

# Realizacija kontrolera anestezije na bazi fazi logike u programskom okruženju MATLAB/Simulink

Jovana Janković

student drugog ciklusa studija

Filozofski fakultet Univerziteta u Istočnom Sarajevu

Pale, RS, BiH

jovanajankovic91@yahoo.com

*Sadržaj*— U ovom radu opisana je realizacija i primjena kontrolera na bazi fazi logike u svrhu određivanja i regulacije dubine anestezije u toku procesa operacije. Date su detaljne smjernice vezane za softversku implementaciju fazi pravila zaključivanja. Napravljen je model u simulacionom modulu Simulink, programa MATLAB, koji ilustruje funkcionalnost fazi kontrolera dubine anestezije. Predstavljani su i detaljno opisani primjeri simulacija koji verifikuju funkcionalnost projektovanog fazi kontrolera anestezije.

*Ključne riječi*— fazi logika; funkcija pripadnosti; pravila zaključivanja; kontroler anestezije; simulaciona analiza;

## I. UVOD

Primjena fazi logike (eng. fuzzy logic) trenutno doživljava veliku ekspanziju u raznovrsnim naučnim oblastima. Mogućnosti implementacije fazi pravila zaključivanja su posebno izražene u mnogobrojnim tehničkim disciplinama.

Od 1980-tih, razvijaju se nove tehnologije, zasnovane na fazi logici, koje se primjenjuju u medicini. Zahvaljujući primjeni novih tehnologija u današnje vrijeme je moguće koristiti raspoložive tehnike kontrole na „online“ uređajima za vrijeme operacija i na intenzivnoj njezi. Problem kontrole dubine anestezije je veoma značajan. Anesteziolozi u velikoj mjeri moraju da se oslanjaju na svoja iskustva i praksu prilikom određivanja doze anestetika za vrijeme operacija. Kako bi se spriječilo da pacijent u toku operacije dođe do svijesti, anesteziolozi obično doziraju veću dozu anestezije nego što je to minimalno potrebno. Predoziranje, međutim, produžava period oporavka što može dovesti do pojave depresije i ugrožavanja života oboljelih. Upravo jedna od prednosti sistema koji koriste fazi logiku je veća bezbjednost i udobnost pacijenta. Istraživanja vezana za primjenu fazi logike u medicini, posebno u oblasti kontrole dubine anestezije, vršena su od strane mnogih autora [1]-[5].

Drugo poglavlje ovog rada sadrži opis osnovnih pojmova vezanih za fazi logiku. Dat je pregled osnovnih definicija fazi skupova, zatim su opisani osnovni tipovi funkcija pripadnosti na osnovu kojih se vrši klasifikacija fazi skupova. Treće poglavlje obuhvata analizu fazi sistema zaključivanja. Opisane su metode fazi zaključivanja, Mamdani i Sugeno, navedene su njihove glavne prednosti, kao i međusobne razlike. Takođe su opisani najpoznatiji procesi i metode defazifikacije [6]-[9]. U četvrtom poglavlju opisana je osnovna koncepcija Fuzzy Logic Toolbox-a u programskom okruženju MATLAB/Simulink

[10]-[12]. Implementacija fazi kontrolera za anesteziju, koji je predložen i opisan u [10], objašnjena je u petom poglavlju. U šestom poglavlju su predstavljani najvažniji simulacioni rezultati, što je glavni doprinos ovog rada.

## II. OSNOVE FAZI LOGIKE

Percepcija svijeta oko nas protkana je pojmovima koji nisu u potpunosti jasni, tj. koji nemaju jasno definisane granice. Pojmovi: mnogo visok, mnogo veći, nizak, težak itd. su tačni do nekog stepena, ali su takođe i netačni do određenog stepena. Ovako iskazani pojmovi ne mogu se pretvoriti u binarna stanja. Za ovakve pojmove se kaže da su *fazi* ili *neprecizni* (engl. vague). Prirodni jezici, koji su na mnogo višem nivou od programskih jezika, su fazi, dok programski jezici nisu.

Klasična teorija skupova polazi od stava da neki element  $x$  iz posmatranog univerzalnog skupa  $X$  pripada ili ne pripada konkretnom skupu  $A$ . Karakteristična funkcija,  $\chi_A$ , klasičnog skupa pridružuje svakom njegovom elementu vrijednost 1 ili 0 u zavisnosti od toga da li taj element pripada ili ne pripada skupu. Teorija fazi skupova proširuje taj koncept definisanjem *parcijalne pripadnosti*. U teoriji fazi skupova, karakteristična funkcija pripadnosti generalizovana je funkcijom pripadnosti tako da svakom elementu iz univerzalnog skupa pridružuje vrijednosti iz intervala  $[0,1]$ .

Sljedeća definicija formalno definiše koncept fazi skupa.

**Definicija 1.** Neka je  $X$  domen. Fazi vrijednosti na domenu  $X$  okarakterisane su fazi skupom  $A$  na  $X$  i funkcijom pripadnosti

$$\mu_A : X \rightarrow [0,1].$$

Na ovaj način svaki element  $x \in X$  ima stepen pripadnosti fazi skupu  $A$ ,  $\mu_A(x) \in [0,1]$ . Dakle, fazi skup  $A$  je možemo predstaviti skupom uređenih parova

$$A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in X, \mu_A(x) \in [0,1]\},$$

pri čemu je  $\mu_A(x)$  stepen pripadnosti elementa  $x$  skupu  $A$ .

### A. Svojstva fazi skupova

Fazi skupovi okarakterisani su visinom, nosačem i jezgrom. Stoga su date sljedeće definicije:

**Definicija 2.** Visina fazi skupa  $A$  je najveći stepen pripadnosti elemenata u  $A$ :

$$hgt(A) = \sup_{x \in X} (\mu_A(x)).$$

**Definicija 3.** Nosač (eng. support) fazi skupa je klasičan skup elemenata  $x \in X$  takvih da je  $\mu_A(x) > 0$ :

$$Supp(A) = \{x \mid \mu_A(x) > 0, x \in X\}.$$

**Definicija 4.** Neka je  $A$  fazi skup univerzalnog skupa  $X$ . Jezgro od  $A$  je podskup od  $X$  koji sadrži sve elemente sa stepenom pripadnosti 1:

$$Jezgro(A) = \{x \mid \mu_A(x) = 1, x \in X\}.$$

Fazi skup  $A$  čiji se nosač sastoji iz samo jednog elementa univerzalnog skupa  $X$  i pri tome je  $\mu_A(x) = 1$ , naziva se fazi singleton (eng. fuzzy singleton).

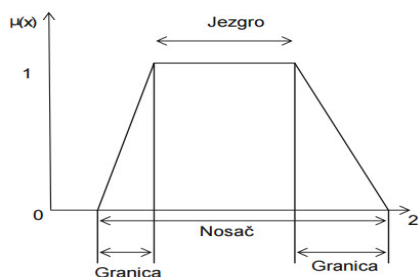
**Definicija 5.** Element  $x \in X$  za koji vrijedi  $\mu_A(x) = 0.5$  naziva se tačka prolaska (eng. crossover point).

Na Sl.1 data je grafička predstava osnovnih svojstava fazi skupova.

### B. Vrste karakterističnih funkcija pripadnosti

Fazi skupovi se mogu klasifikovati kao normalizovani i subnormalizovani u zavisnosti od funkcije pripadnosti. Ako funkcija pripadnosti bar jednog elementa univerzalnog skupa ima vrijednost 1, onda se takav skup naziva normalizovan fazi skup. Ako funkcija pripadnosti ima pripadnu vrijednost manju od 1, onda se takav skup naziva subnormalizovan.

Najčešće vrste funkcija pripadnosti su: trougaona, trapezoidna, pravolinijska i zvonasta. Relacija (1) definiše trougaonu funkciju pripadnosti.



Slika 1. Osnovna svojstva fazi skupova (jezgro, nosač i granica)

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a, x \geq b \\ \frac{x-a}{m-a}, & x \in (a, m] \\ \frac{b-x}{b-m}, & x \in (m, b) \end{cases} \quad (1)$$

## III. FAZI SISTEMI ZAKLJUČIVANJA

Zaključivanje u fazi logici je blisko ljudskom načinu donošenja zaključaka, jer postoji određena mjera neizvjesnosti. Da bi se došlo do zaključaka, u sistemu moraju da budu definisane funkcije pripadnosti pojedinih lingvističkih varijabli i pravila zaključivanja.

Fazi sistem zaključivanja (eng. Fuzzy Inference System - FIS) je najznačajniji alat za modelovanje zasnovan na teoriji fazi skupova. Osnovna struktura FIS-a je model koji preslikava ulazne karakteristike u ulazne funkcije pripadnosti, ulazne funkcije pripadnosti u pravila, pravila u skup izlaznih karakteristika, izlazne karakteristike u izlazne funkcije pripadnosti, a izlaznu funkciju pripadnosti u jediničnu vrijednost izlaza ili odluku u skladu sa izlazom. FIS se sastoji od pet funkcionalnih blokova:

1. *Baza pravila:* sadrži broj fazi IF-THEN pravila,
2. *Baza podataka:* definiše funkciju pripadnosti fazi skupova koji se koriste u fazi pravilima,
3. *Jedinica donošenja odluka:* izvršava zaključivanje u zavisnosti od pravila,
4. *Interfejs fazifikacije:* prevodi "crisp" vrijednosti u odgovarajuće lingvističke varijable,
5. *Interfejs defazifikacije:* prevodi fazi rezultate zaključivanja u "crisp" izlaze.

### A. Fazi pravila

Fazi pravila su osnova fazi logike u precesu dobijanja fazi izlaza. Sistem fazi pravila zasnovan je na IF-THEN (AKO-ONDA) sistemu pravila.

Fazi AKO-ONDA pravila su standardna matematička pravila u formi: AKO je  $x=A$ , ONDA je  $y=B$ , gdje su  $x$  i  $y$  lingvističke varijable, dok su  $A$  i  $B$  lingvističke vrijednosti definisane na univerzalnim skupovima  $X$  i  $Y$ . Dio pravila „ $x$  je  $A$ “ se naziva antecedent (prethodnik) ili premisa, pretpostavka, a „ $y$  je  $B$ “ se naziva konsekvencija, posljedica, zaključak. Maksimalan broj pravila određen je brojem ulaznih veličina i brojem lingvističkih vrijednosti. Sistem fazi pravila uglavnom ima više od jednog pravila. Proces dobijanja sveobuhvatnog zaključka od pojedinačnih premisa iz svakog od pravila je poznat kao agragacija pravila.

### B. Mamdani fazi metod zaključivanja

Mamdani fazi metod zaključivanja je najčešće korišćena fazi metodologija. Bio je među prvim kontrolnim sistemima koji su sastavljeni pomoću teorije fazi skupova.

Kod fazi sistema zaključivanja rezultat funkcija pripadnosti su fazi skupovi. Nakon procesa agregacije dobije se fazi skup za svaku izlaznu varijablu koju treba defazifikovati. Proces fazi zaključivanja ovog FIS-a za zadate ulazne vrijednosti, odvija se kroz sljedećih šest koraka :

1. Definisanje skupa fazi pravila.
2. Fazifikovanje ulaza pomoću ulaznih funkcija pripadnosti.
3. Kombinovanje fazifikovanih ulaza prema fazi pravilima radi utvrđivanja snage pravila.
4. Pronalaženje posljedice pravila kombinovanjem snage pravila i izlazne funkcije pripadnosti.
5. Kombinovanje posljedica radi dobijanja izlazne distribucije.
6. Defazifikovanje izlazne distribucije.

Defazifikovanje izlazne distribucije je prosek prevođenja rezultata dobijenih u obliku fazi skupa u brojčane vrijednosti. Postoji nekoliko metoda za defazifikaciju fazi izlaza. Kada se radi o Mamdani sistemu najčešće korišćene metode su: metod centra gravitacije i metod srednje vrijednosti maksimuma.

1) *Metod centra gravitacije:* Po ovoj metodi tačna vrijednost zaključivanja je vrijednost težišta površine ograničene funkcijom pripadnosti koja je dobijena fazi zaključivanjem. Metoda je predstavljena relacijom (2):

$$z = \frac{\sum_{j=1}^q Z_j u_c(Z_j)}{\sum_{j=1}^q u_c(Z_j)}, \quad (2)$$

gdje je  $z$  centar gravitacije, a  $u_c$  je pripadnost u klasi  $c$  za vrijednost  $Z_j$ .

2) *Metod srednje vrijednosti maksimuma:* Vršiti se formiranje jedinstvene vrijednosti izlazne promijenljive kao srednje vrijednosti lokalnih promijenljivih u kojima funkcija pripadnosti dostiže maksimalne vrijednosti. Metoda je opisana izrazom (3):

$$z = \sum_{j=1}^l \frac{Z_j}{l}, \quad (3)$$

gdje je  $Z_j$  tačka u kojoj funkcija pripadnosti ima maksimalnu vrijednost, a  $l$  je broj puta za koji izlazna distribucija dostiže maksimalan nivo.

Pored ovih metoda, razvijene su i sljedeće: centar suma, centar najveće površi, centar prvog ili posljednjeg maksimuma itd.

Prednosti Mamdani modela su: intuitivan je, široko je prihvaćen, jednostavno se implementira, prihvatljiv je za ljudski razum.

### C. Takagi-Sugeno fazi metod zaključivanja (TS metod)

TS metod nastao je sa željom da se razvije sistemski pristup za generisanje fazi pravila datog skupa podata ulaza-izlaza. Fazi pravilo u Sugeno fazi modelu ima oblik:

$$\text{AKO je } x = A \text{ i } y = B \text{ ONDA je } z = f(x, y), \quad (4)$$

gdje su:  $A, B$  fazi skupovi u premisi,  $z = f(x, y)$  je „crisp“ funkcija u posljedici,  $f(x, y)$  je polinom sa dvije promijenljive  $x$  i  $y$ .

Kada je  $f$  polinom prvog reda, onda imamo Sugeno fazi model prvog reda. Kada je  $f$  konstanta, onda imamo Sugeno model nultog reda, što se može posmatrati kao specijalan slučaj Mamdani FIS modela, gdje je svaka posljedica pravila određena kao fazi singleton.

Prednosti TS modela su: računarski je efikasniji, dobro radi sa linearnim tehnikama, funkcioniše dobro sa optimizacionom i adaptivnom tehnikom, nudi bolji sistematski pristup za kreiranje modela fazi logike, koristi manje fazi promenljivih od Mamdanijevog modela, jer mali broj fazi varijabli će smanjiti broj implikacija, više je prilagođen matematičkoj analizi.

Glavna razlika između Mamdani i Sugeno modela je ta što su Sugeno izlazne funkcije pripadnosti ili linearne funkcije ili konstantne, dok su Mamdani izlazi fazi skupovi koje treba defazifikovati.

## IV. MATLAB/SIMULINK - FUZZY LOGIC TOOLBOX

Programski paket MATLAB raspolaže sa paletom alata predviđenom za fazi logiku, Fuzzy Logic Toolbox, pomoću koje se mogu kreirati i uređivati sistemi fazi zaključivanja. Fuzzy Logic Toolbox obezbjeđuje korišćenje Matlab funkcija, aplikacija, Simulink blokova za analizu, projektovanje i simulaciju sistema zasnovanih na fazi logici. Omogućava modelovanje složenih sistema korišćenjem jednostavnih pravila fazi logike, a zatim implementaciju ovih pravila u fazi sistem zaključivanja.

Fuzzy Logic Toolbox je dizajniran za rad u Simulink okruženju. Nakon kreiranja fazi sistema koristeći alate grafičkog korisničkog interfejsa (GUI) ili neke druge metode, sistem se može realizovati direktno u simulaciju.

Simulink je softverski modul za modelovanje, simulaciju i analizu dinamičkih sistema. Podržava linearne i nelinearne sisteme, kao i modele u diskretnom vremenu odabiranja. U Simulinku se jednostavno mogu predstaviti, a zatim i simulirati matematički modeli koji predstavljaju neki fizički sistem. Simulink omogućava numeričku aproksimaciju rješenja za matematičke modele koje je teže riješiti „ručno“.

Biblioteka Fuzzy Logic Toolbox-a sadrži Fuzzy Logic Controller i Fuzzy Logic Controller sa Rule Viewer blokovima. Ova biblioteka uključuje i podbiblioteku funkcija pripadnosti koja sadrži Simulink blokove sa ugrađenim funkcijama pripadnosti. Za većinu fazi sistema zaključivanja, Fuzzy Logic Controller automatski stvara hijerarhijski blok dijagram FIS-a. Blok-dijagram reprezentacija koristi ugrađene Simulink

blokove i tako omogućava efikasno generisanje koda. Fuzzy Logic Controller sa Rule Viewer-om je proširenje Fuzzy Logic Controller-a. Kroz dodatne opcije omogućava pregled primjene fazi pravila za vrijeme trajanja simulacije.

#### V. IMPLEMENTACIJA FAZI KONTROLERA ANESTEZIJE

Za vrijeme operacije prate se promjene u varijablama kao što su krvni pritisak i puls, a stabilnost se postiže prilagođenim doziranjem anestezije. Dubina anestezije za pacijenta zavisi od vrste anestetika i karakterističnih osobina pacijenta kao što su starost, težina itd. Odluku o dubini anestezije donosi anesteziolog. Ako je anesteziolog umoran ili mu je smanjena koncentracija udisanjem gasova anestetika, ili ako operacija duže traje, može se desiti da anesteziolog odredi nepravilnu dubinu anestetika. Iz ovih razloga, anestezija nije sigurna i udobna, pa se kao rješenje može predložiti kontroler anestezije na bazi fazi logike.

Na osnovu eksperimentalnih mjerenja svakih 10 minuta, prilikom operacija 27 pacijenata utvrđene su granične vrijednosti za sistolni (gornji) krvni pritisak (mmHg), puls (pm)<sup>-1</sup> i nivo anestezije (%u) (Tab.I). Rezultati eksperimentalnih mjerenja su preuzeti iz [10].

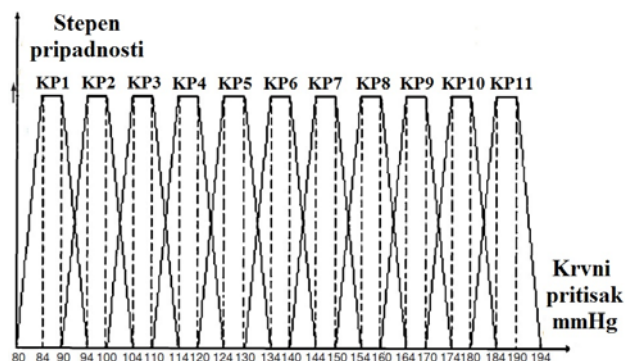
Kao fazi ulazne varijable potrebno je uzeti sistolni krvni pritisak (mmHg) i puls (pm)<sup>-1</sup>, a kao izlaznu fazi varijablu, nivo anestezije (dubinu anestezije). Predhodno navedene fazi varijable u daljem tekstu su predstavljene simbolima KP, P i A, respektivno.

Na osnovu graničnih vrijednosti ulaznih promjenjivih formiraju se odgovarajući intervali funkcija pripadnosti, koji su prikazani u Tab.II. U Tab. III prikazani su nemogući slučajevi kombinacija vrijednosti krvnog pritiska i pulsa za ljudsko biće.

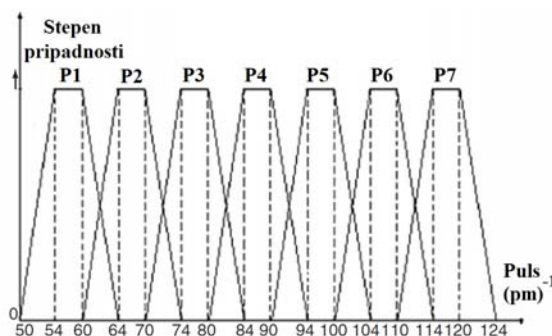
Da bi se realizovao fazi kontroler dubine anestezije neophodno je formirati skupove funkcija pripadnosti za sva tri razmatrana parametra (krvni pritisak, puls i nivo anestezije). Fazi skupovi funkcija pripadnosti za krvni pritisak, puls i nivo anestezije su prikazani na Sl. 2, Sl. 3 i Sl. 4, respektivno.

TABELA III. NEMOGUĆE KOMBINACIJE VRIJEDNOSTI KRVNOG PRITISKA I PULSA ZA LJUDSKO BIĆE

Krvni pritisak	Puls	Nivo anestezije
Visoko	Veoma nisko	Nemoguće
Veoma visoko	Veoma nisko	Nemoguće
Visoko	Nisko	Nemoguće
Veoma visoko	Nisko	Nemoguće
Veoma nisko	Visoko	Nemoguće
Nisko	Visoko	Nemoguće
Veoma nisko	Veoma visoko	Nemoguće
Nisko	Veoma visoko	Nemoguće



Slika 2. Fazi skup funkcija pripadnosti za krvni pritisak



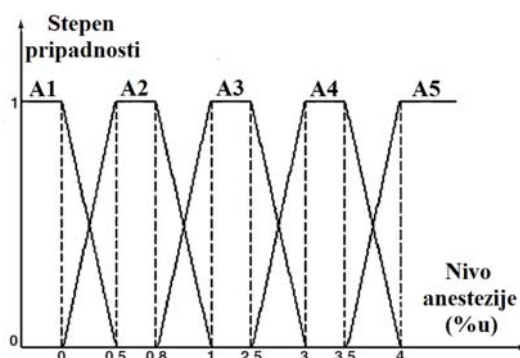
Slika 3. Fazi skup funkcija pripadnosti za puls

TABELA I. GRANIČNE VRIJEDNOSTI KRVNOG PRITISKA, PULSA I NIVOA ANESTEZIJE

Varijable	Minimalna vrijednost	Maksimalna vrijednost
Krvni pritisak (mmHg)	60	220
Puls (pm) <sup>-1</sup>	40	150
Nivo anestezije (%u)	0	4

TABELA II. INTERVALI FUNKCIJA PRIPADNOSTI ZA KRVNI PRITISAK, PULS I NIVO ANESTEZIJE

Lingvistička varijabla	Veoma nisko	Nisko	Normalno	Visoko	Veoma visoko
Krvni pritisak (mmHg)	<80	90	100-140	160-170	>190
Puls (pm) <sup>-1</sup>	<50	60	70-90	95-110	>120
Nivo anestezije (%u)	0	0.5-0.8	1-2.5	3-3.6	4



Slika 4. Fazi skup funkcija pripadnosti za nivo anestezije

Na osnovu prethodno definisanih podataka, predložena je baza pravila za fazi ulaze KP i P, koja je predstavljena u Tab.IV.

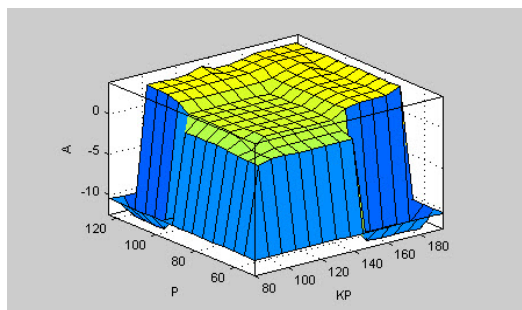
TABELA IV. BAZA PRAVILA ZA FAZI ULAZE KP I P

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
<b>KP1</b>	A1	A1	A2	A2	A2	N	N
<b>KP2</b>	A2	A2	A3	A3	A3	A4	A4
<b>KP3</b>	A2	A3	A3	A3	A3	A4	A4
<b>KP4</b>	A2	A3	A3	A3	A3	A4	A4
<b>KP5</b>	A2	A3	A3	A3	A3	A4	A4
<b>KP6</b>	A2	A3	A3	A3	A3	A4	A4
<b>KP7</b>	A2	A3	A3	A3	A3	A4	A4
<b>KP8</b>	N	A4	A4	A4	A4	A5	A5
<b>KP9</b>	N	A4	A4	A4	A4	A5	A5
<b>KP10</b>	N	A4	A4	A4	A4	A5	A5
<b>KP11</b>	N	A5	A5	A5	A5	A5	A5

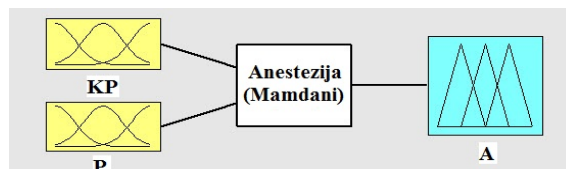
U tabeli sa bazom pravila promjenljiva N označava nemoguć slučaj, dok ostale promjenljive označavaju odgovarajuće funkcije pripadnosti.

Na osnovu baze pravila formiran je FIS u programu MATLAB. Iako je TS metoda računarski efikasnija, kao tip fazi zaključivanja odabran je Mamdani, zbog jednostavnosti implementacije i široke primjene. Da bi se u fazi sistem zaključivanja adekvatno uključili nemogući slučajevi, označeni sa N u bazi pravila, uvedena je dodatna trapezoidna funkcija pripadnosti. Pomenuta funkcija pripadnosti je definisana uz pomoć negativnih vrijednosti izlazne promjenjive A (nivo anestezije), što samo po sebi predstavlja nemoguć slučaj (ne postoji negativna vrijednost dubine anestezije). Da bi se sigurno uticalo na Mamdani sistem fazi zaključivanja odabran je trapez sa širokim opsegom (od -20 do -5). Ukoliko korisnik unese u program fazi kontrolera dubine anestezije nemoguć slučaj, na izlazu će se uvijek prikazati negativna defazifikovana vrijednost. Na ovaj način realizovana je efikasna indikacija nemogućih slučajeva.

Na Sl.5 je data zavisnost izlazne promjenjive A od ulaznih promjenjivih KP i P. Uz pomoć 3D grafičkog prikaza moguće je sagledati cjelokupan opseg mogućih vrijednosti izlazne promjenjive (nivo anestezije). Sl.6 prikazuje glavni programske blokove editora fazi kontrolera "Anestezija.fis". Korišćenjem odgovarajućih opcija, moguće je fazi pravila prikazati u analitičkoj i grafičkoj formi.



Slika 5. Zavisnost izlazne promjenjive A od ulaznih promjenjivih KP i P

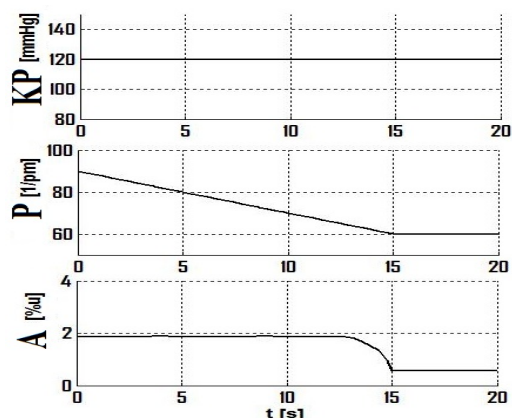


Slika 6. Zavisnost izlazne promjenjive A od ulaznih promjenjivih KP i P

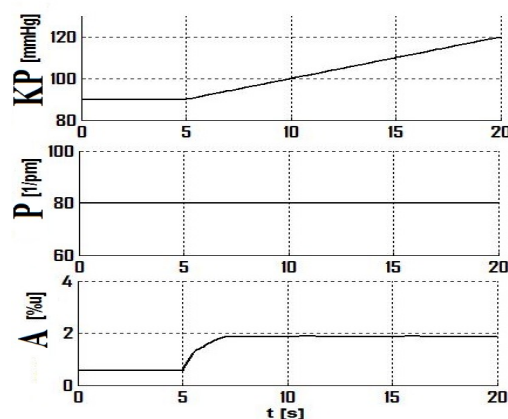
## VI. PRIMJERI SIMULACIONE ANALIZE

Da bi se na adekvatan način ilustrovala funkcionalnost fazi kontrolera dubine anestezije realizovan je model u simulacionom modulu programa MATLAB (Simulink). Kroz simulacije su analizirana tri slučaja:

1. Smanjenje pulsa po linearnom zakonu uz konstantan krvni pritisak, Sl.7.
2. Povećanje krvnog pritiska po linearnom zakonu uz konstantan puls, Sl.8.
3. Istovremeno povećanje krvnog pritiska i pulsa po linearnom zakonu, Sl.9.

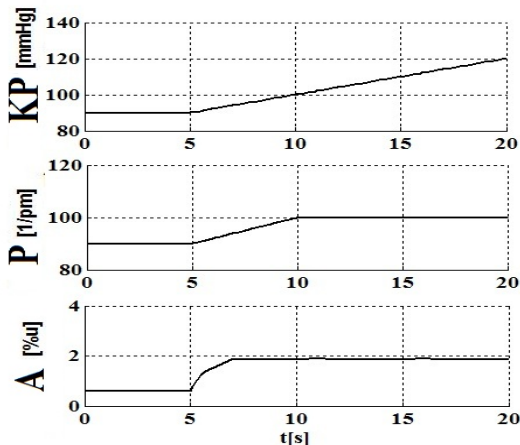


Slika 7. Smanjenje P po linearnom zakonu uz konstantan KP



Slika 8. Povećanje KP po linearnom zakonu uz konstantan P





Slika 9. Povećanje KP i P po linearnom zakonu

#### A. Diskusija

U prvom simulacionom slučaju, čiji su rezultati prikazani na Sl.7, posmatran je odziv kontrolera pri linearnom opadanju vrijednosti pulsa kod pacijenta uz konstantan krvni pritisak (u normalnim granicama). Tek nakon što vrijednost pulsa dovoljno opadne (trenutak  $t=13$  s), dolazi do smanjenja vrijednosti potrebnog nivoa anestezije. U trenutku  $t=15$  s, puls pacijenta se stabilizuje na vrijednost 60 [1/pm] (nisko) što dovodi do stabilizacije potrebnog nivoa anestezije, ali na nižoj vrijednosti.

Kod drugog simulacionog slučaja, sa rezultatima ilustrovanim na Sl.8, posmatra se linearan porast vrijednosti krvnog pritiska od trenutka  $t=5$  s, dok puls u toku simulacije ima konstantnu vrijednost od 80 [1/pm]. Sa povećanjem vrijednosti krvnog pritiska potreban nivo anestezije se povećava, ali samo do određene granice, gdje se uspostavlja nova stacionarna vrijednost.

Treći simulacioni slučaj analizira slučaj porasta vrijednosti krvnog pritiska uz istovremen porast vrijednosti pulsa (Sl.9). Od trenutka  $t=5$  s, kada dolazi do povećanja vrijednosti krvnog pritiska, a istovremeno i pulsa, vrijednost nivoa anestezije inicijalno poraste, te potom dostigne konstantnu vrijednost, približno 2 [%u].

Na osnovu razmatranih simulacionih slučajeva, može se zaključiti da fazi kontroler tačno, precizno i sa velikom brzinom prati promjene krvnog pritiska i pulsa. Dalja unapređenja je moguće dobiti povećanjem broja fazi pravila.

#### ZAKLJUČAK

Fazi logika omogućava bolje razumijevanje problema i intuitivan pristup rješavanju kontrole anestezije. Fazi kontroler anestezije može da se koristi kao oprema koja pomaže u praćenju i kontroli dubine anestezije. Ovakav sistem je od velikog značaja za anesteziologa jer mu omogućava da usmjeri pažnju na izvršavanje drugih zadataka. U radu je prikazan

kompletan proces modelovanja fazi kontrolera u programu MATLAB/Simulink. Takođe, data je detaljna metodologija razvoja fazi kontrolnih sistema uopšte. Kroz simulacionu analizu izvršena je verifikacija primjene fazi kontrolera.

#### ZAHVALNICA

Zahvaljujem se mr Darku Drakuliću na korisnim sugestijama i savjetima prilikom izrade rada, koji je nastao kao dio seminarskog rada u okviru predmeta Matematička logika u računarstvu na II ciklusu studija.

#### LITERATURA

- [1] D. A. Linkens, M. F. Abbod, and M. Mahfouf, "An initial survey of fuzzy logic monitoring and control utilisation in medicine," Secondary European Symposium on Intelligent techniques, ESIT'99, Kolymbari-Ghania, Crete (Greece), 1999.
- [2] V. J. Collins, General Anesthesia Fundamental Considerations, 3rd ed., Philadelphia: Lea & Febiger, 1993, pp. 314-359.
- [3] R. K. Millard, P. Hutton, E. Pereira, and C. Prysroberts, "On using a selftuning controller for blood pressure regulation during surgery in man," Computer Biol. Med., vol. 17, no. 1, pp. 1-18, 1987.
- [4] S. Isaka, "Control Strategies for Arterial Blood Pressure Regulation," IEEE Trans. Biomed. Eng., vol. 40, pp. 353-363, 1993.
- [5] R. G. Bickford, "Automatic control of general anesthesia," Electroencephalog. Clin. Neurophysiol., vol. 2, pp. 93-96, 1950.
- [6] L. A. Zadeh, "Fuzzy sets," Information and control, vol. 83, pp. 338-353, 1965.
- [7] C. V. Negoita, L. A. Zadeh, and H. J. Zimmermann, "Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility," Fuzzy sets and systems, vol.1, pp. 3-28, 1978.
- [8] R. E. Bellman, and L. A. Zadeh, "Decision-making in a fuzzy environment," Management science, vol. 17, pp. 141-164, 1970.
- [9] G. J. Klir, and B. Yuan, Fuzzy sets and fuzzy logic: theory and applications, New York: Prentice-Hall PTR, 1995.
- [10] S. N. Sivanandam, S. Sumathi, and S. N. Deepa, Introduction to Fuzzy Logic using MATLAB, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007, pp. 200-204.
- [11] A. Cavallo, R. Setola, and F. Vasca, Using Matlab, Simulink and control system toolbox, Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1996.
- [12] J. S. R. Lang, and N. Gulley, Fuzzy Logic Toolbox user's guide, The MathWorks, Natick, MA., 1995.

#### ABSTRACT

In this paper the implementation and application of the controller, based on fuzzy logic, for determination and control of the anesthesia depth, during the surgical procedure, is described. Detailed guidelines, related to programming of corresponding fuzzy rules, are given and analyzed. A MATLAB/Simulink model, which implements the properties of the controller is created. Based on several characteristic simulation cases, the functionality of the designed fuzzy controller is tested and verified.

#### THE IMPLEMENTATION OF ANESTHESIA CONTROLLER BASED ON FUZZY LOGIC IN MATLAB/SIMULINK ENVIRONMENT

Jovana Janković