

ANALIZA EFIKASNOSTI FUNKCIONALNIH RADIO-KOMUNIKACIONIH CENTARA

Major mr Saša Devetak, Vojna akademija
dr Dragan Đorđević, dipl. inž.

Rezime:

U radu je prikazan jedan pristup u analizi efikasnosti radio-komunikacionih centara funkcionalnog telekomunikacionog sistema, kao što je vojni sistem veza. Radio-komunikacioni centar modelovan je kao sistem masovnog opsluživanja. Opisana su stanja sistema i parametri i izveden izraz za određivanje verovatnoće opsluživanja radio-komunikacionog centra, kao kriterijuma za ocenu efikasnosti. Predstavljen je, takođe, model, odnosno izrazi za kvantitativnu analizu efikasnosti radio-komunikacionih centara u uslovima elektronskih dejstava.

Ključne reči: teorija masovnog opsluživanja, efikasnost, verovatnoća opsluživanja.

THE EFFICIENCY ANALYSIS OF FUNCTIONAL RADIO COMMUNICATION CENTRES

Summary:

One approach in the analysis of efficiency of radio communication centres of functional telecommunication systems (for example Military Systems) has been shown in this article. A radio communication centre has been presented as a model of mass service systems. The system states and its parameters have been described as well as the resulting formula for determining service probability as a criterion for efficiency evaluation. A model and the formulae for quantitative analysis of efficiency in electronic warfare have been presented as well.

Key words: theory of mass servicing, efficiency, servicing probability

Uvod

Pravovremene, sigurne i pouzdane informacije i primena novih komunikacionih i informacionih tehnologija i sistema uslov su uspešnog rukovođenja i komandovanja i efikasne upotrebe snaga i sredstava u ratu. Prenos informacija za potrebe vojske ostvaruje se upotrebom funkcionalnog telekomunikacionog sistema. Vojni sistem veza čine pokretni i stacionarni elementi: centri veze, čvorišta i stanice veze. Elementi sistema veze su međusobno povezani radio, radio-relejnim i/ili žičnim

spojnim putevima u određenom broju kanala veze. Radio-komunikacioni centar funkcionalnog telekomunikacionog sistema predstavlja deo centra veze odgovarajuće komande – jedinice i čine ga tehnička sredstva (različite vrste radio-uređaja) i poslužiocci koji ih opslužuju.

U radu se radio-komunikacioni centar razmatra kao tehnički sistem, čija je osnovna funkcija prenos različitih vrsta informacija radio-spojnim putem (govora, pisanih poruka, računarskih i drugih podataka, itd.). Efikasnost tehničkih sistema je kompleksni pokazatelj funkcionisanja sistema i, zavisno od njegove osnovne namene i funkcije cilja, obuhvata različite karakteristike sistema. Odgovarajući modeli za ocenu funkcije efikasnosti tehničkih sistema obuhvataju relevantne parametre funkcionisanja sistema i ispunjavanja funkcije cilja.

Jedan od često korišćenih modela, koji je definisan u okviru koncepta efikasnosti vojske¹ [1], a prema kojem se kvantitativna ocena funkcije efikasnosti tehničkog sistema $E(t)$ vrši na osnovu svojstava pouzdanosti $P(t)$, raspoloživosti $A(t)$ i funkcionalne podobnosti $F_p(t)$, može se predstaviti izrazom [2]:

$$E(t) = P(t) \cdot A(t) \cdot F_p(t) \quad (1)$$

gde je:

$E(t)$ – *efikasnost sistema*, koja predstavlja verovatnoću da će sistem stupiti u dejstvo, izvršiti postavljene zadatke na osnovu projektovanih mogućnosti u zadatom periodu i datim uslovima rada,

$P(t)$ – *pouzdanost sistema*, koja se definiše kao verovatnoća da će sistem biti u operativnom, radnom stanju, u toku vremena t , odnosno verovatnoća da će u određenom periodu sistem ispravno funkcionisati i obavljati svoje zadatke,

$A(t)$ – *raspoloživost sistema*, definisana kao pokazatelj koji predstavlja vreme u kojem se može očekivati da će sistem biti u operativnom stanju, tj. procenat vremena kada je sistem upotrebljiv u odnosu na ukupno vreme rada sistema,

$F_p(t)$ – *prikladnost sistema* za vršenje funkcije kao svojstvo sistema koje ukazuje na to kojom će verovatnoćom sistem izvršiti postavljeni zadatak.

Treba napomenuti da se kod različitih tehničkih sistema, zavisno od osnovne funkcije cilja i glavnih posledica otkaza, ocena funkcije efikasnosti može definisati i preko pojedinačnih pokazatelja. Pored toga, važan je probabilistički aspekt prisutan u prikazanom konceptu i stohastička priroda relevantnih parametara, koji efikasnost definišu kao kategoriju verovatnoće. Matematički izrazi za funkcije efikasnosti sistema, dati u obliku proizvoda različitih verovatnoća, mogu se formalno prihvatiti ukoliko parametri koji figurišu u navedenim izrazima predstavljaju međusobno nezavisne slučajne veličine.

Analizom efikasnosti radio-komunikacionih centara kvantitativno se može oceniti njihovo funkcionisanje i izvršenje namenskog zadatka. Radi određivanja efikasnosti potrebno je radio-komunikacioni centar predstavi-

¹ Army System Effectiveness Concept.

ti odgovarajućim modelom i kvantitativno odrediti njegova svojstva u odnosu na mogućnosti zadovoljenja njegovih funkcija u složenim uslovima.

U radu je predstavljen jedan pristup za analizu efikasnosti radio-komunikacionih centara. Radio-komunikacioni centar modelovan je kao sistem za masovno opsluživanje sa otkazom, imajući u vidu da je funkcionisanje sistema limitirano propusnom sposobnošću sistema i potrebom da svaka informacija koja dođe u sistem pravovremeno bude preneti.² Kako informacije u centar pristižu pojedinačno, nezavisno jedna od druge i u slučajnim vremenskim intervalima, nadalje će se razmatrati samo Poasonov sistem masovnog opsluživanja sa otkazom, sa prostim tokom događaja. Verovatnoća opsluživanja sistema predstavlja kriterijum za ocenu njegove efikasnosti.

Model za ocenu efikasnosti radio-komunikacionog centra

Radio-komunikacioni centar predstavlja sistem sačinjen od „n“ jednorodnih radio-uređaja (kanala veze), koji vrše razmenu informacija sa drugim radio-komunikacionim centrima radio-spojnim putem. U sistem pristižu informacije sa dolaznim intenzitetom „ λ “,³ a prenose se sa intenzitetom opsluživanja „ μ “.⁴ Karakteristika izlaznog toka „ μ “ može se smatrati složenom funkcijom, jer se sastoji od intenziteta razmene informacija i intenziteta uspostavljanja veze između radio-uređaja. Intenzitet opsluživanja jednak je zbiru ovih intenziteta, pod pretpostavkom da i tok razmene informacija i tok uspostavljanja veze imaju odlike Poasonove funkcije. Posmatrani sistem može se naći u nekom od sledećih stanja:

S_0 – svi radio-uređaji su slobodni,

S_1 – jedan radio-uređaj je zauzet, ostali radio-uređaji su slobodni,

S_k – k radio-uređaja je zauzeto, ostali (n-k) radio-uređaji su slobodni,

S_n – svi radio-uređaji su zauzeti.

Da bi se odredila verovatnoća otkaza sistema, odnosno radio-komunikacionog centra, potrebno je najpre naći verovatnoću da se sistem nađe u k-tom stanju. Na taj način biće dobijena i verovatnoća otkaza sistema, kao specijalan slučaj, pri čemu je $k = n$.

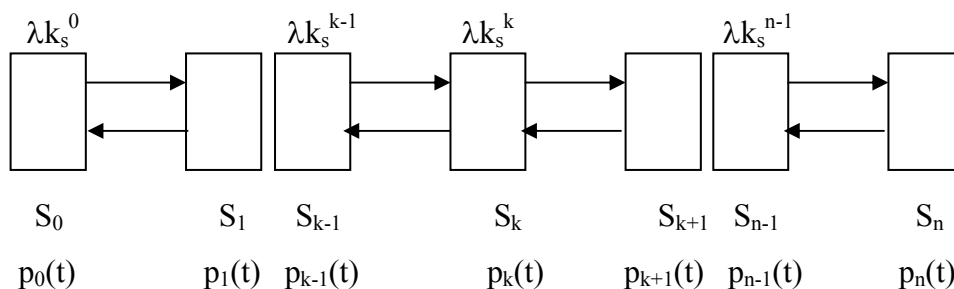
Radi predstavljanja dinamike funkcionisanja sistema, kao sistema masovnog opsluživanja, i opisa sistema i njegovih stanja, neophodno je

² Sistemi masovnog opsluživanja predodređeni su za opsluživanje nekog toka zahteva i mogu biti sistemi sa otkazom i sistemi sa čekanjem. U sistem sa otkazima zahtev koji je došao u momentu kad su svi kanali opsluživanja zauzeti dobija otkaz i sistem prekida rad. U sistemima sa čekanjem kod takvog zahteva ne prekida se rad sistema, već se svrstava u red i čeka dok se ne oslobodi neki kanal [3].

³ λ – predstavlja karakteristiku ulaznog toka izraženu kroz broj poruka u jedinici vremena, odnosno može se tretirati kao recipročna vrednost srednjeg vremena između dva dolaska informacija.

⁴ μ – predstavlja karakteristiku izlaznog toka izraženu kroz broj prenesenih poruka u jedinici vremena, odnosno može se tretirati kao recipročna vrednost srednjeg vremena zauzetosti radio-sistema.

nacrtati graf stanja sistema. Primenom mnemoničkih pravila [4] prikazan je graf stanja sistema (S_0, S_1, \dots, S_n), sa označenim intenzitetima prelaska iz jednog u drugo stanje (slika 1). Verovatnoće $p_0(t), p_1(t), \dots, p_n(t)$, predstavljaju verovatnoće da će se sistem naći u određenom stanju.



Slika 1 – Prikaz grafa stanja sistema

Verovatnoća da će sistem preći iz jednog u drugo stanje jednaka je proizvodu verovatnoće da u sistem pristigne informacija, odnosno verovatnoće da bilo koji radio-uređaj završi svoju misiju, tj. oslobodi se i verovatnoće da svi k radio-uređaji budu u ispravnom stanju (bez otkaza) i da obavljaju svoju funkciju, odnosno da su raspoloživi. Raspoloživost se iskazuje koeficijentom spremnosti i može se predstaviti izrazom [2]:

$$K_s = \frac{T_o}{T_o + T_{no}} = \frac{T_o}{T} = \frac{T - T_{no}}{T} = 1 - \frac{T_{no}}{T} \quad (2)$$

gde je:

T_o – srednje vreme rada radio-uređaja bez otkaza,

T_{no} – srednje vreme zastoja radio-uređaja,

T – ukupno planirano vreme rada radio-uređaja.

Za pojedina stanja sistema važi sledeći sistem diferencijalnih jednačina [4]:

$$p_0'(t) = -\lambda k_s^0 p_0(t) + \mu k_s^1 p_1(t)$$

$$p_k'(t) = \lambda k_s^{k-1} p_{k-1}(t) + (k+1)\mu k_s^{k+1} p_{k+1}(t) - (\lambda + k\mu) k_s^k p_k(t)$$

$$p_n'(t) = \lambda k_s^{n-1} p_{n-1}(t) - n\mu k_s^n p_n(t)$$

U slučaju graničnog, stacionarnog režima rada sistema, ovaj sistem diferencijalnih jednačina može se prevesti u sistem algebarskih jednačina. Kada se posmatranje vrši u dugom periodu, tj. kada $t \rightarrow \infty$, svi prvi izvodi verovatnoća su jednaki nuli i rešavanjem sistema jednačina izvodi se opšti izraz za verovatnoću stanja sistema:

$$p_k = \frac{\lambda^k}{k! \mu^k} \cdot \frac{1}{k_s^k} p_0 \quad (3)$$

Pošto je poznat uslov da je suma svih verovatnoća jednaka jedinici:

$$\sum_{k=0}^n p_k = 1 \quad \Rightarrow \quad p_0 = \frac{1}{\sum_{k=0}^n \frac{\lambda^k}{k! \mu^k} \cdot \frac{1}{k_s^k}} \quad (4)$$

zamenom u opšti izraz (3) i uvođenjem zamene:

$$x = \frac{\lambda}{\mu} \cdot \frac{1}{k_s} = \frac{\alpha}{k_s} \quad (5)$$

izvedena je formula Erlanga, kojom se određuje verovatnoća stanja sistema:

$$p_k = \frac{\frac{x^k}{k!}}{\sum_{k=0}^n \frac{x^k}{k!}}, \quad \text{odnosno} \quad p_k = \frac{\frac{\lambda^k}{k! \mu^k} \cdot \frac{1}{k_s^k}}{\sum_{k=0}^n \frac{\lambda^k}{k! \mu^k} \cdot \frac{1}{k_s^k}} \quad (6)$$

Izraz (6) predstavlja verovatnoću da se posmatrani sistem nađe u stanju S_k , tj. verovatnoću da je k radio-uređaja zauzeto. Ako je $k = n$, tada su svi radio-uređaji zauzeti, što znači da sistem (radio-komunikacioni centar) nije više u stanju ni da preda ni da primi informacije, tj. nalazi se u stanju otkaza. Iz tog uslova proizilazi da je verovatnoća opsluživanja sistema:

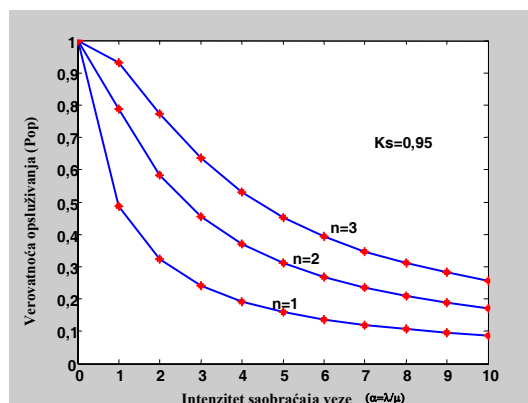
$$p_{op} = 1 - p_n = 1 - \frac{\frac{\lambda^n}{n! \mu^n} \cdot \frac{1}{k_s^n}}{\sum_{k=0}^n \frac{\lambda^k}{k! \mu^k} \cdot \frac{1}{k_s^k}} \quad (7)$$

Verovatnoća opsluživanja sistema predstavlja kriterijum za ocenu efikasnosti rada sistema (radio-komunikacionog centra), odnosno njegovog funkcionisanja u zavisnosti od intenziteta dolaska informacija, intenziteta opsluživanja, raspoloživosti radio-uređaja i kapaciteta sistema.

Analiza efikasnosti radio-komunikacionog centra

Izvedeni izraz (7) predstavlja osnovu za analizu efikasnosti u zavisnosti od zadatih parametara. U relaciji (4) odnos intenziteta pristizanja informacija i intenziteta opsluživanja zamenjen je sa α , pri čemu je $\alpha = \lambda/\mu$, i predstavlja „intenzitet saobraćaja veze“. Na osnovu izraza (7), za poznatu raspoloživost radio-uređaja (k_s) i različit broj radio-uređaja (n), može se analizirati zavisnost verovatnoće opsluživanja radio-komunikaci-

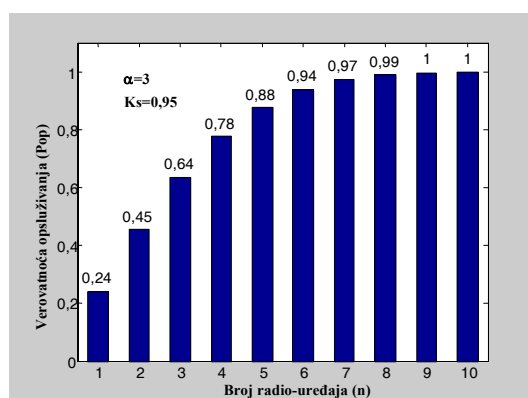
onog centra (p_{op}) od intenziteta saobraćaja veze (slika 2). Za izračunavanje verovatnoće opsluživanja u funkciji intenziteta saobraćaja veze (α), gde je kao parametar uzet broj radio-uređaja (n) i koeficijent spremnosti (k_s), urađen je program u programskom paketu Matlab 6.5R13 [5].



Slika 2 – Zavisnost verovatnoće opsluživanja od intenziteta saobraćaja veze

Sa slike se može zaključiti da verovatnoća opsluživanja, kao kriterijum efikasnosti sistema, opada sa povećanjem intenziteta saobraćaja veze, kao i da broj radio-uređaja koji opslužuju radio-komunikacioni centar mnogo više utiče na efikasnost kada je u sistemu manja količina informacija.

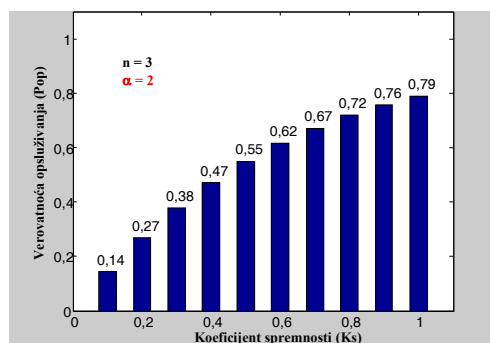
Na sličan način može se analizirati zavisnost efikasnosti radio-komunikacionog centra od broja radio-uređaja za zadate veličine drugih parametara (slika 3). Za izračunavanje verovatnoće opsluživanja u funkciji broja radio-sistema (n), gde je kao parametar uzet intenzitet saobraćaja veze (α) i koeficijent spremnosti (k_s), urađen je, takođe, program u programskom paketu Matlab 6.5R13 [5].



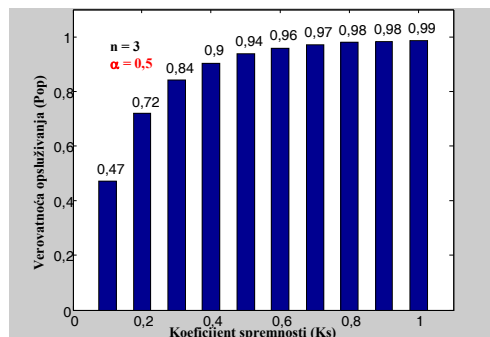
Slika 3 – Zavisnost verovatnoće opsluživanja od broja radio-uređaja

Na sledeća dva grafika predstavljena je zavisnost verovatnoće opsluživanja radio-komunikacionog centra od raspoloživosti radio-uređaja za različit intenzitet saobraćaja veze i pri istom broju radio-uređaja ($n=3$). Za izračunavanje verovatnoće opsluživanja u funkciji koeficijenta spremnosti (k_s), gde je kao parametar uzet broj radio-uređaja (n) i intenziteta saobraćaja veze (α), urađen je program u programskom paketu Matlab 6.5R13 [5].

Grafici na slikama 4 i 5 predstavljeni su diskretnim vrednostima koeficijenta spremnosti, iako on predstavlja kontinualnu veličinu. Cilj je bio da se samo sagleda tok funkcije verovatnoće opsluživanja.



Slika 4 – Zavisnost verovatnoće opsluživanja od raspoloživosti radio-uređaja ($\alpha = 2$)



Slika 5 – Zavisnost verovatnoće opsluživanja od raspoloživosti radio-uređaja ($\alpha = 0,5$)

Na osnovu ovih grafičkih prikaza može se izvesti zaključak da za zadate parametre koeficijent spremnosti nema preveliki uticaj na verovatnoću opsluživanja radio-komunikacionog centra pri malom intenzitetu saobraćaja veze, odnosno raspoloživost radio-uređaja, tj. operativno vreme rada može biti i mnogo manje ako se raspolože dovoljnim brojem radio-uređaja.

Iz grafičkih prikaza se, takođe, može izvršiti optimizacija radio-komunikacionog centra, odnosno može se izvršiti izbor potrebnog broja radio-uređaja u radio-komunikacionom centru za prenos određene količine informacije, za njegovu zadatu efikasnost i poznatu raspoloživost radio-uređaja.

Međutim, efikasnost radio-komunikacionih centara funkcionalnog telekomunikacionog sistema u borbenim dejstvima ne zavisi samo od pomenutih parametara, već i od ispoljenih efekata elektronskih dejstava protivnika, pre svega od elektronskog ometanja rada radio-sistema. Elektronsko ometanje ima smisla samo ako se radio-uređaji nalaze u radu, s obzirom na to da se koeficijent spremnosti identifikuje verovatnoćom neprekidnog rada uređaja. Koeficijent spremnosti predstavlja sponu između efikasnosti sistema i ispoljenog uticaja elektronskih dejstava protivnika. Uz pretpostavku da će radio-uređaji biti u otkazu samo usled ispoljenog elektronskog ometanja protivnika, koeficijent spremnosti može se predstaviti izrazom [4]:

$$K_s = 1 - p_{om} \quad (8)$$

gde je:

p_{om} – verovatnoća ometanja.

Kako je za efikasno elektronsko ometanje protivnika neophodan uslov prethodno otkrivanje rada uređaja, tj. izviđanje radio-uređaja, potrebno je odrediti ili proceniti verovatnoće i izviđanja i ometanja. Sagleđavanjem broja elektronskih sredstava protivnika za izviđanje i ometanje i daljina sa kojih može da izviđa i ometa, kao i poznavanjem sopstvenog intenziteta saobraćaja veze, može se odrediti verovatnoća izviđanja, odnosno verovatnoća ometanja radio-uređaja od strane protivnika.

Verovatnoća izviđanja radio-uređaja može se predstaviti izrazom [2, 4, 6]:

$$p_{iz} = 1 - \left(\frac{\tau_p}{\tau_p + \tau_s} \right)^{nk} \cdot e^{-nk \frac{\delta}{\tau_p}} \quad (9)$$

gde je:

p_{iz} – verovatnoća izviđanja,

τ_s – srednja vrednost ili matematičko očekivanje dužine trajanja veze (srednje vreme prisustva signala),

τ_p – srednja vrednost ili matematičko očekivanje dužine trajanja pauze u radu (vreme odsustva signala),

n – broj izviđačkih prijemnika,

k – broj pretraživanja frekventnog opsega.

Parametar δ je složeni parametar koji zavisi od frekventnih karakteristika korisnog signala i osobina izviđačkog prijemnika, a određen je izrazom:

$$\delta = \frac{\Delta F_s + \Delta F_{pr}}{\frac{\Delta F}{T_p}} \quad (10)$$

gde je:

ΔF_s – širina spektra korisnog signala,

ΔF_{pr} – propusni opseg,

ΔF – širina opsega pretraživanja,

T_p – vreme pretraživanja,
 $\Delta F/T_p$ – brzina pretraživanja.

Verovatnoća da će radio-uređaj biti otkriven raste sa povećanjem intenziteta saobraćaja veze (duže vreme prisustva signala τ_s , a kraće vreme odsustva signala τ_p), sa povećanjem broja izviđačkih prijemnika n kojima se vrši izviđanje, broja provedenih skeniranja frekventnog opsega k i iznosa parametra δ .

Primenom teorije masovnog opsluživanja može se odrediti verovatnoća ometanja radio-uređaja [2, 4, 6]:

$$p_{om} = 1 - p_{no} = 1 - \frac{\rho^n \cdot \frac{1}{n!} \cdot p_{iz}^n}{\sum_{m=0}^n \frac{\rho^m}{m!} \cdot \frac{1}{p_{iz}^m}} \quad (11)$$

gde je:

p_{om} – verovatnoća ometanja,

p_{no} – verovatnoća da veza neće biti ometana,

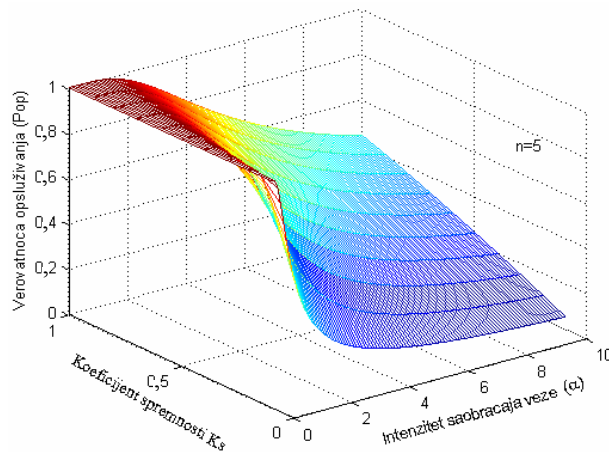
n – ukupan broj ometača,

m – broj aktivnih ometača,

ρ – recipročna vrednost intenziteta saobraćaja veze ($\rho = 1/\alpha$),

p_{iz} – verovatnoća izviđanja.

Predstavljeni teorijski model daje osnovne relacije za kvantitativnu procenu efikasnosti radio-komunikacionih centara u uslovima elektronskih dejstava protivnika. Na slici 6 prikazana je zavisnost efikasnosti radio-komunikacionog centra od navedenih parametara koji čini 5 radio-uređaja.



Slika 6 – Zavisnost verovatnoće opsluživanja od koefficienta spremnosti i intenziteta saobraćaja veze

Za predstavljeni grafik zavisnosti urađen je program u programskom paketu Matlab-u 6.5R13 koji omogućuje bržu i kvalitetniju analizu i procenu za date opsege parametara.

Zaključak

Radio-komunikacioni centar funkcionalnog telekomunikacionog sistema predstavlja tehnički sistem čija se efikasnost ocenjuje verovatnoćom da će pomenuti sistem izvršiti prenos informacija koje u njega pristižu, odnosno predstavlja verovatnoću opsluživanja sistema. Modelovan je kao sistem za masovno opsluživanje sa otkazom, a njegova svojstva opisana su parametrima: brojem radio-uređaja, njihovom raspoloživošću, intenzitetom pristizanja informacija u sistem i intenzitetom opsluživanja informacija. Primenom programskih paketa u Matlab-u 6.5R13 može se kvalitetnije i brže analizirati efikasnost radio-komunikacionih centara i predstaviti krive zavisnosti efikasnosti od parametara koji opisuju svojstva sistema, odnosno, za zadatu efikasnost planirati broj radio-uređaja u zavisnosti od količine informacija. Primenom empirijskog izraza i teorije masovnog opsluživanja mogu se, takođe, odrediti verovatnoće izviđanja i ometanja radio-uređaja od strane protivnika, odnosno proceniti efikasnost radio-komunikacionih centara u uslovima elektronskih dejstava. Analiza se može primeniti u proceni situacije i odlučivanju o upotrebi snaga u borbenim dejstvima.

Literatura

[1] Blanchard, B. S., Lowery, E. E.: *Maintainability Principles and Practices*, McGraw Hill Book Company, New York, 1969.

[2] Petrović, L.: *Analiza uticaja protivelektronske zaštite na efikasnost telekomunikacionih sistema posebne namene*, Vojnotehnička akademija, Beograd, 2001.

[3] Vučićević, R.: *Teorija verovatnoće sa osnovama TMO*, VIZ, Beograd, 2003.

[4] Šepec, V.: *Procena efikasnost sistema veze u borbi*, Makarije, Beograd, 2004.

[5] Devetak, S.: *Efikasnost sistema veze korpusa KoV u odbrambenoj operaciji u uslovima elektronskih dejstava*, (magistarski rad), VA, Beograd, 2006.

[6] Đorđević, D.: *Optimizacija snaga za protivelektronsku borbu u operativno-strategijskim sastavima*, (doktorska disertacija), VA, Beograd, 2002.