

**POUZDANOST, RASPOLOŽIVOST I OČEKIVANI RADNI UČINCI SISTEMA
GRAĐEVINSKIH MAŠINA SA RASPLINUTIM (FUZZY) ULAZNIM
PARAMETRIMA**

**RELIABILITY, AVAILABILITY AND EXPECTED WORKING EFFECTS OF
SYSTEM CONSTRUCTION MACHINES WITH FUZZY INPUT PARAMETERS**

*Živojin Prašćević, redovni profesor, Akademija inženjerskih nauka Srbije
Nataša Prašćević, docent, Univerzitet u Beogradu - Građevinski fakultet*

Rezime: U ovome radu se prikazuje procedura određivanja pouzdanosti, raspoloživosti i očekivanih radnih učinaka sistema građevinskih mašina za izvođenje građevinskih radova (betonski radovi, zemljani radovi, radovi u steni, asfaltni radovi i dr.). Ulazni parametri, u koje spadaju intenziteti otkaza i opravki, kao i radni učinci se tretiraju kao slučajne i rasplinite (fuzzy) veličine i izražavaju pomoću fuzzy trouglastih brojeva. Za slučaj nezavisnih otkaza sa ovim fuzzy parametrima određuju se raspoloživost i očekivani radni učinci sistema mašina, kao i karakteristična srednja trajanja ciklusa sistema u radu i u otkazu. Prema prikazanoj metodologiji je napisan odgovarajući računarski program i jedan primer, koji se odnosi na sistem mašina za spravljanje, transport i ugrađivanje betona na gradilištu je priložen u ovom radu.

Ključne reči: fuzzy pouzdanost, fuzzy raspoloživost, proizvodni građevinski sistem.

Summary: A procedure for determination of reliability, availability and working effects of a system of construction machines for construction works (concrete works, earth works, rock works, asphalt works, etc.) is presented in this paper. Input parameters as intensities of failure and repair and working effects are assumed as fuzzy values and expressed by fuzzy triangular numbers. The availability, working effects of the system of machines and characteristic duration of the mean times in states of work and failure are determined using these fuzzy parameters. According to presented procedures, a computer program is written out and an example which is related to a system of machines for the mixing, transporting and placing concrete at a building site is written out and presented in the paper.

Keywords: fuzzy reliability, fuzzy availability, production system in construction.

UVOD

U projektovanju, implementaciji i održavanju kompleksnih tehničkih sistema mora se posebno voditi računa o njihovom *tehničkom integritetu*. Tehnički integritet, prema [1], uključuje pouzdanost (reliability), raspoloživost (availability), održivost (maintability) i sigurnost inherentnih sistemskih funkcija i sa njima povezane opreme. Integritet *tehničkog projektovanja* uključuje projektne kriterijume koji se odnose na ove faktore. Ukupna kombinacija ova četiri faktora konstituiše metodologiju koja potvrđuje dobar inženjering sa željenim inženjerskim integritetom. Ova metodologija, koja se u literaturi naziva RAMS analiza, omogućava analizu, sagledavanje i kontrolu kompletnog inženjerskog dizajna. Ona nije nova i zasnovana je na teorijskim analizama i bogatoj praksi hemijskih, mašinskih i građevinskih inženjera, kao i inženjera u oblastima elektro i elektronske industrije i procesnog inženjerstva. U njoj se posebno polazi od toga šta bi trebalo postići da bi se ispunili kriterijumi projektovanja [1].

Pouzdanost može biti posmatrana kao verovatnoća uspešnih operacija ili performansi sistema i odgovarajuće opreme sa minimalnim rizikom gubitka ili oštećenja (katastrofe) ili otkaza rada sistema. *Raspoloživost* sistema je takav aspekt njegove pouzdanosti u kojemu se uzima u obzir njegova *održivost*. Ovde se razmatraju konsekvence neuspešnih operacija i performansi integrisanog sistema da bi se ponovo povratile projektovane operacije ili performanse. *Održivost* je aspekt u kojem se uzima u obzir vreme trajanja sistema u otkazu (downtime). Projektovanje za održivost zahteva vrednovanje dostupnosti ili popravljivosti sistema koji se nalazi u otkazu. *Sigurnost* se klasifikuje u tri kategorije koje se odnose na

* Akademija inženjerskih nauka Srbije, Kraljice Marije 16, Beograd
zika@arf.bg.ac.rs

zaštitu osoblja koje radi u sistemu, zaštitu opreme odnosno svih komponenata sistema i zaštitu njegovog okruženja [1].

Pouzdanost se odnosi na tzv. neopravljive (nonreparable) sisteme ili njihove komponente, dok se raspoloživost i održivost odnose na popravljive (repairable) sisteme. U ovome radu će se analizirati raspoloživost popravljivih sistema.

U svetskoj, a i našoj literaturi postoji ogroman broj publikacija koje se odnose na pomenute aspekte tehničkog integriteta raznih vrsta inženjerskih sistema. Tako su modeli održavanja tehničkih sistema prikazani u monografiji [2], problemi efektivnosti i pouzdanosti sistema u mašinstvu u monografijama [3] i [4] i mnogim drugim publikacijama.

U izgradnji raznih vrsta građevinskih objekata i realizaciji investicionih projekata u potpunosti je zastupljena primena mehanizovanog rada. Automatizacija i robotika se već odavno koriste prilikom izvršenja velikog broja radnih procesa u građevinarstvu, čime je u velikoj meri isključen teški manuelni rad u često nepovoljnim radnim uslovima. Realizacija investicionih projekata i izgradnja objekata zahteva ispunjenje strogih ugovornih uslova, koji se odnose na rokove, kvalitet i troškove, što je nezamislivo bez upotrebe najsavremenije mehanizacije. Zbog toga optimalni izbor, kao i korišćenje i održavanje građevinske mehanizacije i opreme, spadaju u krucijalne probleme i zadatke upravljanja građevinskim projektima i organizacije građevinske proizvodnje. O ovim problemima razvoja i primene građevinske mehanizacije, automatizacije i robotike postoji, takođe, veliki broj radova u stranoj i domaćoj literaturi. U spisku literature, zbog ograničenog prostora, navedeno je samo nekoliko publikacija o pouzdanaosti i raspoloživosti proizvodnih sistema, sastavljenih od građevinskih mašina [5], [6], [7], [8] i [9].

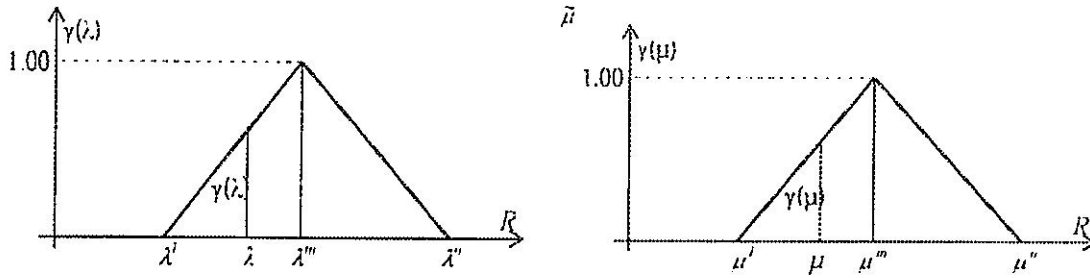
U analizi pouzdanosti sistema polazi se od toga da se sistem ili njegove komponente mogu naći u stanju u radu ili u stanju u otkazu, koji se prema JUS-u definiše "kao prestanak sposobnosti proizvoda da obavlja zahtevanu funkciju". Kako se ističe u radu [10] "u mašinstvu se naročito srećemo sa otkazima koji su posledica istrošenja, habanja ili starenja, pa izlazne karakteristike mašinskih sistema opadaju postepeno i konstantno i odlučiti se za jedan nivo izlaznih karakteristika kao oštru granicu između stanja u radu i otkazu nosi sa sobom rizik da se napravi gruba greška". Ovaj problem se može realnije rešiti ako se uvede stepen pripadnosti elementa stanju u radu ili otkazu. Zbog toga, ova stanja predstavljaju fuzzy (rasplinute) događaje koji se opisuju rasplinitim veličinama, odnosno elementima fuzzy (rasplinitih) skupova, koje je definisao L. Zadeh u svom čuvenom radu [11]. Pošto se, sa druge strane, otkazi dešavaju slučajno, to oni predstavljaju slučajne (probabilističke) događaje, pa za njih važi teorija verovatnoće fuzzy (rasplinitih) događaja, čije je osnove postavio Zadeh [12]. Ova teorija je primenjena u [2], [10], [13], [16] i još nekim radovima za određivanje pouzdanosti i upravljanje održavanjem tehničkih sistema.

U teoriji pouzdanosti se intenziteti otkaza i opravke razmatraju kao poznate veličine zavisne od vremena, na osnovu kojih se određuju verovatnoće stanja, pouzdanost i raspoloživost sistema. Ove veličine se određuju na osnovu statističkih podataka, merenja ili ekspertskih procena, zbog kojih one nisu uvek dovoljno precizne. Zbog toga se u mnogim radovima, kao na primer [14], [15], [17] i drugim, ove veličine tretiraju kao fuzzy (rasplinute) veličine koje se izražavaju fuzzy (rasplinitim) brojevima na koje se primenjuju pravila fuzzy aritmetike [20]. Zbog toga, pouzdanost i raspoloživost sistema i njegovih podsistema i komponenata predstavljaju fuzzy brojeve. Pored, ovih još neki važni pokazatelji rada sistema, kao što su radni učinci ili efekti, predstavljaju slučajne fuzzy veličine. U ovome radu, pomenuti pristup određivanja pouzdanosti, raspoloživosti i radnih učinaka proizvodnih sistema, podsistema i komponenata biće primenjen korišćenjem trouglastih fuzzy (rasplinitih) brojeva. Na početku rada se razmatra raspoloživost pojedinačne komponente, zatim serijske i paralelne veze komponenata i na kraju, u jednom brojnom primeru, kombinacija serijske i paralelne veze, koja se često javlja kod radnih sistema u građevinarstvu. Detaljniji prikaz i postupci za određivanje raspoloživosti i ostalih karakterističnih veličina sa realnim nerasplinitim ulaznim parametrima prikazan je od strane prvog autora ovog rada u knjizi [5], a ovde je izvršeno uopštavanje za ulazne parametre izražene fuzzy brojevima.

TROUGLASTI FUZZY BROJ I RASPOLOŽIVOST KOMPONENTE SISTEMA

Na slici 1 su prikazani intenziteti otkaza $\tilde{\lambda}$ i opravke $\tilde{\mu}$ kao trouglasti fuzzy brojevi, sa funkcijom pripadnosti $\gamma \in [0,1]$ koji se izražavaju pomoću tri karakteristična nerasplinuta broja

$$\tilde{\lambda} = (\lambda^l, \lambda^m, \lambda^u) \text{ i } \tilde{\mu} = (\mu^l, \mu^m, \mu^u), \quad \lambda^l \leq \lambda^m \leq \lambda^u, \quad \mu^l \leq \mu^m \leq \mu^u. \quad (1)$$

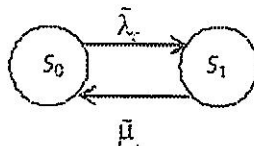


Slika 1. - Fuzzy trouglasti brojevi $\tilde{\lambda}$ i $\tilde{\mu}$

Posmatra se neka komponenta sistema C , prikazana na slici 2, koja se održava i može biti u dva stanja: stanje u radu S_0 i stanje u otkazu S_1 . Intenzitet prelaska iz stanja S_0 u stanje S_1 je $\tilde{\lambda}_c$, a iz stanja S_1 u stanje S_0 je $\tilde{\mu}_c$. Raspoloživost \tilde{A}_c ove komponente za konstantne vrednosti intenziteta otkaza i opravke $\tilde{\lambda}_c$ i $\tilde{\mu}_c$, kada vreme $t \rightarrow \infty$, je fuzzy broj

$$\tilde{A}_c = \tilde{p}_0(\infty) = \tilde{\mu}_c \odot (\tilde{\mu}_c \oplus \tilde{\lambda}_c)^{-1}, \quad \tilde{U}_c = 1 - \tilde{A}_c = \tilde{p}_1(\infty) = 1 - \tilde{\mu}_c \odot (\tilde{\mu}_c \oplus \tilde{\lambda}_c)^{-1} \quad \tilde{A}_c = (A_c^l, A_c^m, A_c^u). \quad (2)$$

Znakovi \odot i \oplus označavaju fuzzy aritmetičke operacije množenja i sabiranja. \tilde{p}_0 je fuzzy verovatnoća stanja u radu S_0 komponente



Slika 2. - Stanja komponente

Primenjujući pravila fuzzy aritmetike dobijaju se, s obzirom na (1), karakteristične vrednosti fuzzy broja \tilde{A}

$$A_c^l = \mu_c^l / (\mu_c^l + \lambda_c^u), \quad A_c^m = \mu_c^m / (\mu_c^m + \lambda_c^m), \quad A_c^u = \mu_c^u / (\mu_c^u + \lambda_c^l). \quad (3)$$

Srednja fuzzy vremena stanja komponente u radu (Mean Up Time) $M\tilde{U}T_c$ i u otkazu (Mean Down Time) $M\tilde{D}T_c$, kao i srednje fuzzy trajanje ciklusa između dva otkaza (Mean Cycle Time) su, slično kao i kada se računa sa realnim nerasplinutim brojevima prikazana na sledeći način:

$$M\tilde{U}T_c = \tilde{\lambda}_c^{-1}, \quad M\tilde{D}T_c = \tilde{\mu}_c^{-1}, \quad M\tilde{C}T_c = M\tilde{U}T_c + M\tilde{D}T_c. \quad (4)$$

Iz fuzzy aritmetike je poznato da ovi fuzzy brojevi dobijeni aritmetičkim operacijama fuzzy brojeva $\tilde{\lambda}$ i $\tilde{\mu}$ su samo aproksimativni trouglasti fuzzy bojevi.

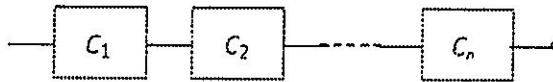
Karakteristične vrednosti fuzzy brojeva (4) su, s obzirom na (1), u skladu sa pravilima fuzzy aritmetike

$$\begin{aligned} M\tilde{U}T_c^l &= 1/\lambda_c^u, & M\tilde{U}T_c^m &= 1/\lambda_c^m, & M\tilde{U}T_c^u &= 1/\lambda_c^l, \\ M\tilde{D}T_c^l &= 1/\mu_c^u, & M\tilde{D}T_c^m &= 1/\mu_c^m, & M\tilde{D}T_c^u &= 1/\mu_c^l, \\ M\tilde{C}T_c^l &= M\tilde{U}T_c^l + M\tilde{D}T_c^l, & M\tilde{C}T_c^m &= M\tilde{U}T_c^m + M\tilde{D}T_c^m, & M\tilde{C}T_c^u &= M\tilde{U}T_c^u + M\tilde{D}T_c^u. \end{aligned} \quad (5)$$

* Akademija inžjerskih nauka Srbije, Kraljice Marije 16, Beograd
 zika@grf.bg.ac.rs

SERIJSKA VEZA KOMPONENATA

Na slici 3 je prikazan sistem sa serijskom vezom komponenta C_1, C_2, \dots, C_n . Razmatra se slučaj kada su otkazi nezavisni, tj. kada se otkaz može dogoditi nezavisno od toga da li su otkazale ostale komponente, odnosno da li je sistem kao celina u random stanju ili otkazu.



Slika 3. - Sistem sa serijskom vezom komponenta

Ako su poznate fuzzy raspoloživosti \tilde{A}_i komponenta C_i sistema ($i = 1, 2, \dots, n$), onda je fuzzy raspoloživost sistema \tilde{A} , slično kao i za slučaj sa parametrima izraženim realnim brojevima

$$\tilde{A} = \tilde{A}_{1,1} \otimes \tilde{A}_{1,2} \otimes \dots \otimes \tilde{A}_{1,n} \quad (6)$$

Karakteristične vrednosti ovog fuzzy broja su, s obzirom na izraze (3)

$$A_s^l = \prod_{i=1}^n [\mu_{C_i}^l / (\mu_{C_i}^l + \lambda_{C_i}^l)], \quad A_s^m = \prod_{i=1}^n [\mu_{C_i}^m / (\mu_{C_i}^m + \lambda_{C_i}^m)], \quad A_s^u = \prod_{i=1}^n [\mu_{C_i}^u / (\mu_{C_i}^u + \lambda_{C_i}^u)] \quad (7)$$

Ako se, radi uprošćenja u daljoj analizi, uvede pojam komponente [19], koja zamenjuje ovaj sistem i ima istu vrednost raspoloživosti \tilde{A}_s i pouzdanosti \tilde{R}_s , ista srednja vremena trajanja stanja u radu i otkazu, onda je zamenjujući intenzitet otkaza, slično kao i za nerasplinute (nonfuzzy) parametre

$$\tilde{\lambda}_s = \tilde{\lambda}_{1,1} \oplus \tilde{\lambda}_{1,2} \oplus \dots \oplus \tilde{\lambda}_{1,n} \quad \tilde{\lambda}_s = (\lambda_s^l, \lambda_s^m, \lambda_s^u) \quad (8)$$

tako da su,

$$\lambda_s^l = \lambda_{1,1}^l + \lambda_{1,2}^l + \dots + \lambda_{1,n}^l, \quad \lambda_s^m = \lambda_{1,1}^m + \lambda_{1,2}^m + \dots + \lambda_{1,n}^m, \quad \lambda_s^u = \lambda_{1,1}^u + \lambda_{1,2}^u + \dots + \lambda_{1,n}^u \quad (9)$$

I ovde važi uslov uravnoteženih frekvencija [19], jer je fuzzy frekvencija prelaska komponente ili sistema iz stanja u radu u stanje otkaza \tilde{f}_{ds} jednaka frekvenciji prelaska iz stanja u otkazu u stanje u radu \tilde{f}_{us}

$$\tilde{f}_{ds} = \tilde{f}_{us}, \quad \tilde{f}_{ds} = \tilde{\lambda}_s \otimes \tilde{A}_s, \quad \tilde{f}_{us} = (1 - \tilde{A}_s) \otimes \tilde{\mu}_s, \quad \tilde{\lambda}_s \otimes \tilde{A}_s = (1 - \tilde{A}_s) \otimes \tilde{\mu}_s \quad (10)$$

Oдавде se dobija

$$\tilde{\mu}_s = \tilde{\lambda}_s \otimes \tilde{A}_s \otimes (1 - \tilde{A}_s)^{-1}, \quad \tilde{\mu}_s = (\mu_s^l, \mu_s^m, \mu_s^u) \quad (11)$$

tako da su zbog zadovoljenja uslova (1)

$$\mu_s^l = A_s^l \lambda_s^u / (1 - A_s^l), \quad \mu_s^m = A_s^m \lambda_s^m / (1 - A_s^m), \quad \mu_s^u = A_s^u \lambda_s^l / (1 - A_s^u) \quad (12)$$

Ako je radni učinak komponente C_i izražen kao fuzzy broj $\tilde{W}_i = (W_{i,1}^l, W_{i,1}^m, W_{i,1}^u)$, onda je učinak sistema izražen kao fuzzy broj $\tilde{W}_s = (W_s^l, W_s^m, W_s^u)$ gde je:

$$\tilde{W}_s = \min(\tilde{W} \otimes \tilde{A}_s), \quad W_s^l = \min(W_{i,1}^l \otimes A_{i,1}^l), \quad W_s^m = \min(W_{i,1}^m \otimes A_{i,1}^m), \quad W_s^u = \min(W_{i,1}^u \otimes A_{i,1}^u), \quad i=1, 2, \dots, n \quad (13)$$

Očekivana fuzzy veličina radnog učinka sistema je [21]

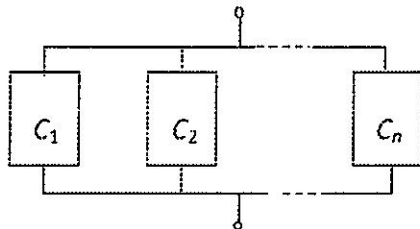
$$\exp W_s = (W_s^l + 2W_s^m + W_s^u) / 4 \quad (14)$$

Prema ovoj formuli se mogu odrediti i sve ostale očekivane fuzzy veličine.

* Akademija inženjerskih nauka Srbije, Kraljice Marije 16, Beograd
zika@arf.bg.ac.rs

PARALELNA VEZA KOMPONENATA

Na slici 4 prikazan je sistem sastavljen od n komponenta koje su paralelno povezane.



Slika 4. - Sistem sa paralelnom vezom komponentata

Razmatra se slučaj kada su otkazi komponentata nezavisni. Fuzzy raspoloživost ovog sistema je

$$\begin{aligned} \tilde{A}_p &= 1 - (1 - \tilde{A}_{c,1}) \otimes (1 - \tilde{A}_{c,2}) \otimes \dots \otimes (1 - \tilde{A}_{c,n}), \quad \tilde{A}_p = (A_p^l, A_p^m, A_p^u), \\ A_p^l &= 1 - \prod_{i=1}^n (1 - A_{c,i}^l), \quad A_p^m = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - A_{c,i}^m), \quad A_p^u = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - A_{c,i}^u). \end{aligned} \quad (15)$$

Intenzitet opravke zamenjujuće komponente $\tilde{\mu}_z = (\mu_z^l, \mu_z^m, \mu_z^u)$ je

$$\tilde{\mu}_z = \tilde{\mu}_{c,1} \oplus \tilde{\mu}_{c,2} \oplus \dots \oplus \tilde{\mu}_{c,n}, \quad (16)$$

$$\mu_z^l = \mu_{c,1}^l + \mu_{c,2}^l + \dots + \mu_{c,n}^l, \quad \mu_z^m = \mu_{c,1}^m + \mu_{c,2}^m + \dots + \mu_{c,n}^m, \quad \mu_z^u = \mu_{c,1}^u + \mu_{c,2}^u + \dots + \mu_{c,n}^u \quad (17)$$

Frekvencija prelaska iz stanja sistema u otkazu u stanje u radu \tilde{f}_{us} i iz stanja u radu u stanje u otkazu \tilde{f}_{uo} su

$$\tilde{f}_{us} = \tilde{A}_p \otimes \tilde{\mu}_z, \quad \tilde{f}_{uo} = (1 - \tilde{A}_p) \otimes \tilde{\lambda}_z, \quad \tilde{A}_p \otimes \tilde{\mu}_z = (1 - \tilde{A}_p) \otimes \tilde{\lambda}_z, \quad \tilde{\lambda}_z = \tilde{A}_p \otimes \tilde{\mu}_z \otimes (1 - \tilde{A}_p)^{-1} \quad (18)$$

Odavde se dobija

$$\lambda_z^l = A_p^l \mu_z^u / (1 - A_p^l), \quad \lambda_z^m = A_p^m \mu_z^m / (1 - A_p^m), \quad \lambda_z^u = A_p^u \mu_z^l / (1 - A_p^u). \quad (19)$$

Radni učinci sistema su

$$\begin{aligned} \tilde{W}_p &= \tilde{W}_{c,1} \otimes \tilde{A}_{c,1} \oplus \tilde{W}_{c,2} \otimes \tilde{A}_{c,2} \oplus \dots \oplus \tilde{W}_{c,n} \otimes \tilde{A}_{c,n}, \\ W_p^l &= \sum_{i=1}^n W_{c,i}^l A_{c,i}^l, \quad W_p^m = \sum_{i=1}^n W_{c,i}^m A_{c,i}^m, \quad W_p^u = \sum_{i=1}^n W_{c,i}^u A_{c,i}^u. \end{aligned} \quad (20)$$

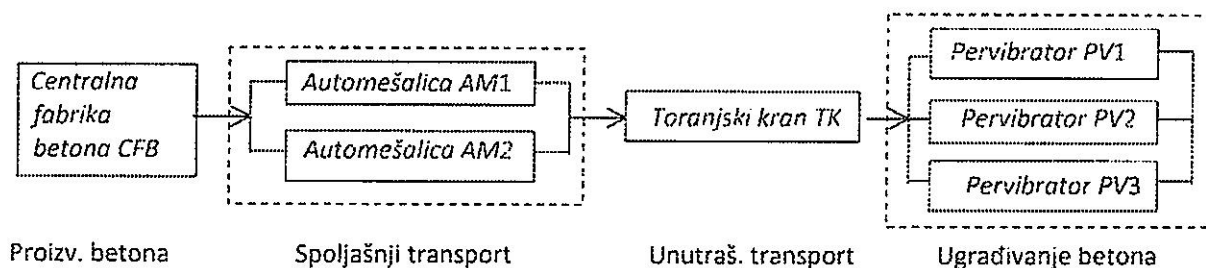
Očekivana fuzzy veličina radnog učinka sistema je [21]

$$\exp W_p = (W_p^l + 2W_p^m + W_p^u) / 4. \quad (21)$$

Na osnovu ovde prikazane procedure autori su razvili kompjuterski program u programskom sistemu MATLAB.

PRIMER

Na slici 5 je prikazan sistem za spravljanje, transport i ugrađivanje betona, sa zadatim intenzitetima otkaza i opravke i radnim učincima kao fuzzy brojevima. Za ovaj sistem treba odrediti njegovu raspoloživost, srednja vremena trajanja ciklusa rada sa trajanjem stanja u radu i na opravi, kao i očekivani radni učinak sistema. Ulazni podaci su prikazani u tabeli 1.



Slika 5. - Sistem za spravljanje, transport i ugrađivanje betona

Tabela 1. – Ulazni podaci

Red. br.	Mašina	λ_c^I (1/h)	λ_c^m (1/h)	λ_c^u (1/h)	μ_c^I (1/h)	μ_c^m (1/h)	μ_c^u (1/h)	W_c^I (m ³ /h)	W_c^m (m ³ /h)	W_c^u (m ³ /h)
1	CFB	1/175	1/160	1/150	1/35	1/30	1/25	37.00	38.40	40.00
2	AM1 i AM2	1/160	1/150	1/135	1/40	1/30	1/25	4.50	5.10	5.80
3	TK	1/190	1/180	1/170	1/25	1/22	1/18	11.00	12.60	15.00
4	PV1, PV2, PV3	1/85	1/80	1/70	1/22	1/20	1/18	4.00	4.50	5.10

Sa slike 5 se može zaključiti da se ovaj sistem za spravljanje transport i ugrađivanje betona sastoji od četiri podsistema:

Podsistem 1 – spravljanje betona (centralna fabrika betona CFB),

Podsistem 2 – spoljašnji transport betona (automešalice AM1 i AM2),

Podsistem 3 – unutrašnji transport betona (toranjski kran TK),

Podsistem 4 – ugrađivanje betona (pervibratori PV1, PV2 i PV3).

Ova četiri podsistema, od kojih su dva (automešalice i pervibratori) sastavljeni od elemenata istog tipa i performansi, se nalaze u serijskoj vezi. Analiza ovog sistema se, prvo, vrši na nivou podsistema. Za podsisteme 2 i 4, čije su komponente paralelno povezane, određuju se raspoloživosti prema izrazima (15), intenziteti opravke i otkaza zamenjujućih komponenata prema izrazima (17) i (19) i vremena trajanja sistema u radu i otkazu prema izrazima (5) i njihovi učinci prema izrazima (20) i očekivani defazifikovani učinci $exp W_p$ prema izrazu (21). Rezultati ovog proračuna dati su u tabelama 2 i 3.

Tabela 2. – Analiza na nivou podsistema

P.	Podsistem	λ_c^I (1/h)	λ_c^m (1/h)	λ_c^u (1/h)	μ_c^I (1/h)	μ_c^m (1/h)	μ_c^u (1/h)	MUT^I / MDT^I (h)	MUT^m / MDT^m (h)	MUT^u / MDT^u (h)
p ₁	CFB	1/175	1/160	1/150	1/35	1/30	1/25	150/25	160/30	175/35
p ₂	AM1, AM2	1/667	1/526	1/357	1/20	1/15	1/12.5	357/12.5	526/15	667/20
p ₃	TK	1/190	1/180	1/170	1/25	1/22	1/18	170/18	180/22	190/25
p ₄	PV1, PV2, PV3	1/85	1/80	1/70	1/22	1/20	1/18	70/18	80/20	85/22

Tabela 3. – Raspoloživosti i radni učinci podsistema

p_i	Podsistem	A_p^l	A_p^m	A_p^u	W_p^l m ³ /h	W_p^m m ³ /h	W_p^u m ³ /h	exp W_p m ³ /h
p_1	FB	0.8108	0.8412	0.8750	30.00	31.14	35.00	31.82
p_2	AM1,AM2	0.9478	0.9722	0.9817	6.95	8.50	10.03	8.56
p_3	TK	0.8718	0.8911	0.9135	9.59	10.98	13.70	11.31
p_4	PV1,PV2,PV3	0.9601	0.9764	0.9842	6.85	8.40	10.15	8.40

U sledećem koraku se razmatra sistem kao celina, koji je sastavljen od serijski vezanih komponenata u kojoj su podsistemi 2 i 4 predstavljeni odgovarajućim zamenjujućim komponentama za koje su prethodno sračunati intenziteti otkaza i opravke ovih komponenata. Sa ovim podacima se za sistem kao celinu određuju se sledeće fuzzy veličine: raspoloživosti prema formulama (7), intenziteti otkaza i opravke prema izrazima (9) i (12), trajanje ciklusa stanja, odnosno trajanje stanja u otkazu i radu prema formulama (4) i učinci prema formulama (13). Za sve ove faktore se određuju defazifikovne očekivane vrednosti prema formuli (14). Dobijene vrednosti u ovom primeru su:

- Raspoloživost sistema $\tilde{A}_s = (0.6426, 0.7124, 0.7724)$, $\exp A_s = 0.7099$,
- Trajanje stanja u radu u časovima $\tilde{MUT}_s = (47.57, 57.69, 65.96)$, $\exp MUT_s = 57.23$ časova,
- Trajanje stanja u otkazu u časovima $\tilde{MDT}_s = (19.46, 23.29, 26.45)$, $\exp MDT_s = 23.12$ časova,
- Trajanje ciklusa u časovima $\tilde{MCT}_s = (67.04, 80.98, 92.41)$, $\exp MCT_s = 80.35$ časova,
- Radni učinak sistema u m³/h $\tilde{W}_s = (5.78, 6.55, 8.96)$ $\exp W_s = 6.96$ m³/h.

U ovom proračunu je korišćen pomenuti računarski program. Rezultati ove analize su dati u sledećim tabelama.

ZAKLJUČAK

Primena teorije rasplnutih (fuzzy) skupova i fuzzy logike omogućava kompletnije i realnije prikazivanje ponašanja raznih tehničkih sistema i određivanje faktora koji se odnose na integritet tih sistema. Precizne vrednosti intenziteta otkaza i opravke komponenata sistema je veoma teško ili ponekad nemoguće odrediti, tako da njihovo izražavanje fuzzy brojevima blisko realnosti i ima puno opravdanja. Prikazana procedura predstavlja uopštavanje poznate procedure iz teorije pouzdanosti sa neraspilnutim (realnim) vrednostima parametara. U ovoj proceduri se primenjuje fuzzy aritmetika i sračunavaju sve tražene veličine kao fuzzy brojevi, a zatim se vrši njihova "defazifikacija", odnosno nalaženje njihovih očekivanih vrednosti koje predstavljaju neraspilnute (realne) brojeve.

LITERATURA

- 1) Stapelberg, R. F. (2009), *Handbook of Reliability, Availability, Maintainability and Safety in Engineering Design*, Springer-Verlag, London, p. 827.
- 2) Minić, S., Arsenić, Ž. (1998), *Modeli održavanja tehničkih sistema*, Vojna knjiga, Beograd, p. 185.
- 3) Zelenović, D., Todorović, J. (1983), *Efektivnost sistema u mašinstvu*, Naučna knjiga, Beograd.
- 4) Rau, J. G. (1970), *Optimization and Probability in System Engineering*, Van Nostrand Reinhold Co. New York.

- 5) Trbojević, B., Prašćević, Ž. (1991), *Građevinske mašine*, IX izdanje, poglavlje *Pouzdanost proizvodnih sistema u građevinarstvu*, Građevinska knjiga, Beograd, pp. 375 – 423.
- 6) Prašćević, Ž., Ivković, B. (1986), *Teorija pouzdanosti i analiza proizvodnih sistema u građevinarstvu*, Drugi Jugoslavenski simpozij *Organizacija građenja*, Građevinski institut, Zagreb, pp. 259 – 272.
- 7) Ivković, B. (1989), *Pouzdanost proizvodnih sistema u građevinarstvu* (doktorska disertacija), Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu.
- 8) Kurij, K., (1989), *Tehnoekonomski model optimalnog perioda eksploatacije građevinskih mašina* (doktorska disertacija), Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu.
- 9) Mirković, M. (2015), *Određivanje modela operativne raspoloživosti sa realnim podacima iz rada građevinskih sistema*, Izgradnja, Beograd, 69, Br. 3 – 4, str. 95 – 106.
- 10) Peković, T., Todorović, J. (1996), *Funkcija cilja kao fazi pojam*, Zbornik radova XXIII Simpozijum za operaciona istraživanja, SYMOPIS, Zlatibor, pp. 182 – 186.
- 11) Zadeh, L. (1965), *Fuzzy Sets*, Information and Control, 8, pp. 338 -353.
- 12) Zadeh, L. (1968), *Probability Measures of Fuzzy Sets*, Journ. of Math. Anal. and Appl., 23, pp. 421/427.
- 13) Vasić, B., Todorović, J. (1994), *Primena teorije fuzzy skupova u upravljanju održavanjem*, Simpozijum za operaciona istraživanja, SYMOPIS, Kotor.
- 14) Jo, J. B., Tsuimura, Y., Gen, M., Yamazaki, G. (1995), *Performance Evaluation of Computer System with Failure Based on Fuzzy Set Theory*, Journ. of Operat. Society of Japan, 38., pp. 409 – 424.
- 15) Duniyakh, J., Saad, W. I. and Wunsch, D., (1999), *A Theory of Independent Fuzzy Probability for System Reliability*, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 7., No. 2, pp. 286 – 295.
- 16) Utkin, L. V. (2004), *Interval reliability of typical systems with partially known probabilities*, European Journal of Operational Research, 153, pp. 790 – 802.
- 17) Yao, J-S., Su, J-S, Teng-San, S. (2008), *Fuzzy System Reliability Analysis Using Triangular Fuzzy Numbers Based on Statistical Data*, Journ. of Inform. Sciences and Engineering, Vol. 24, pp. 1521 – 1535.
- 18) Lee, H-M., Fuh, C-F. and Su, J-S. (2012), *Fuzzy Parallel System Reliability Analysis Base on Level $(\lambda - p)$ Interval Valued Fuzzy Numbers*, Int. Journ. of Inovative Comp., Inform. and Control, 8, pp.5703-5714.
- 19) Birlington, R, Singh, Ch. (1971), *System Reliability Modelling and Evaluation*, Hutchinson, London.
- 20) Kaufmann, A., Gupta, M. M. (1991), *Introduction to Fuzzy Arithmetc*, Int. Thompson Computer Press, London.
- 21) Heilpern, S.(1997), *Representation and application of fuzzy numbers*, Fuzzy Sets and Systems, 91, pp. 259 – 268.