

OCENA SIGURNOSTI FUNKCIONISANJA ROTORNOG BAGERA KORIŠĆENJEM PRAVILA FAZI ALGEBRE

ESTIMATION OF BUCKET WHEEL EXCAVATOR DEPENDABILITY USING FUZZY ALGEBRA RULES

Originalni naučni rad / Original scientific paper
UDK /UDC: 621.879.48-192
Rad primljen / Paper received: 16.04.2010

Adresa autora / Author's address:
Rudarsko-geološki fakultet Univerziteta u Beogradu /
University of Belgrade, Faculty of Mining and Geology

Ključne reči

- rotorni bager
- sigurnost funkcionisanja
- fazi skupovi

Izvod

U radu se daje model procene sigurnosti funkcionisanja rotornog bagera na bazi pravila fazi algebre. Formirani matematički model koristi teoriju fazi skupova za sintezu performansi pouzdanosti, pogodnosti održavanja i podrške održavanju, na nivo sigurnosti funkcionisanja, kao i za sintezu ocena sigurnosti funkcionisanja sa nižih na više hijerarhijske nivoe konstrukcije bagera. Sigurnost funkcionisanja je korišćena kao performansa koja na najkompleksniji način sagledava upotrebnost kvalitet određenog tehničkog sistema, a teorija fazi skupova kao pogodan matematički aparat, koji daje mogućnost računanja sa hibridnim podacima uz njihov međusobni sinergetski efekat.

UVOD

Nivo proizvodnje površinskih kopova lignita najvećim delom zavisi od raspoloživosti osnovne mehanizacije, pre svega rotornih bagera. Sa druge strane, rotorni bageri predstavlja jednu od najsloženijih tehničkih sistema u industriji uopšte, u smislu upravljanja njihovim životnim ciklusom, /1/. Kompleksnost ocene nivoa raspoloživosti i upotrebnog kvaliteta rotornih bagera posebno dolazi do značaja na našim površinskim kopovima lignita, s obzirom na starost ovih mašina. U praksi se za ocenu nivoa raspoloživosti uobičajeno koristi koeficijent vremenskog iskorišćenja kao globalni pokazatelj, kao i prosečno vreme u radu za pojedine elemente bagera, kao parcijalni pokazatelj. Standardom ISO IEC-300 (JUS IEC-300), definisana je sigurnost funkcionisanja kao zajednički termin koji se koristi da opiše performansu raspoloživosti i pokazatelje koji na nju utiču: pouzdanost, pogodnost održavanja i podrška održavanju, /2/. Praćenje ovih pokazatelja se odvija kroz više koncepcija, od onih na bazi sistemskih nauka, preko niza postupaka merenja i kontrole, /3/, pa do modela na bazi ekspertskih mišljenja, /4-6/. Sva ova praćenja se odvijaju pojedinačno na nekom nivou hijerarhijske strukture tehničkog sistema. Postavlja se problem na koji način sintetizovati vrednosti pokazatelja i integralno dati ocenu sigurnosti funkcionisanja tehničkog sistema. Pri tome se identifikuju dva nivoa sinteze. Prvi, kada je potrebno sintetizovati parcijalne pokazatelje sigurnosti funkcionisanja za nivo određenog elementa u hijerarhijskoj strukturi tehničkog sistema i

Keywords

- bucket wheel excavator
- dependability
- fuzzy sets

Abstract

An evaluation model for bucket wheel excavator dependability is analysed in this paper. The model is formed to introduce fuzzy sets theory in dependability analysis regards to performances of reliability, maintainability and maintenance support, as well for synthesis of dependability from the lowest to higher level of excavators' structure. Dependability is used as the most complex performance that covers in total the quality of service for specific technical systems, and fuzzy sets theory is introduced as a convenient mathematical model that gives mutual synergy to calculations with hybrid data.

INTRODUCTION

The level of production at open pit lignite mines mostly depends on the availability of basic machinery, primarily bucket wheel excavators. On the other hand, in terms of managing their life cycle, the bucket wheel excavator is one of the most complex technical systems in the industry in general, /1/. The complexity of bucket wheel excavators availability and quality of service estimations becomes particularly important in our lignite surface mining, regarding to the age of these machines. In practice, for assessing the level of availability, the coefficient of time utilization is commonly used as a global indicator, while the average work time of individual excavator parts is used as a partial indicator. According to IEC 300 standard, dependability is defined as collective term used to describe availability and its determining factors: reliability, maintainability, and maintenance support, /2/. Monitoring of these indicators is done through several concepts, those based on system sciences, through a series of procedures of measurement and control, /3/, to the model based to expert opinion, /4-6/. All this monitoring is completed on a single level of hierarchical structure of technical systems. The problem is how to synthesize the indicators' values and provide integrated security performance evaluation of the technical system. In addition, two levels of synthesis could be identified. The first, when partial indicators of the dependability for certain elements in the hierarchical structure of technical systems have to be synthesized. The second is regarded to synthesis

drugi nivo sinteze, kada je potrebno sintetizovati ocene sigurnosti funkcionisanja elemenata tehničkog sistema sa nižih na više nivoe hijerarhijske strukture.

Radi prevazilaženja navedenih problema, u ovom radu je prikazan model za određivanje sigurnosti funkcionisanja rotornog bagera na bazi korišćenja teorija fazi skupova i fazi algebre. Odnosno, fazi skupovi su iskorišćeni za identifikaciju i integraciju performanse pouzdanosti, pogodnosti održavanja i podrške održavanju do nivoa sigurnosti funkcionisanja elemenata bagera, /7/, kao i za sintezu ovih parcijalnih ocena sigurnosti funkcionisanja do viših nivoe strukture rotornog bagera. Ključno mesto u postupku integracije i sinteze predstavlja definisanje postupka kompozicije parcijalnih uticaja na nivo sinteznog, /8/. U ovom radu biće korišćena tzv. *max-min* kompozicija, /9/ ili kako se još zove pesimistička, koja ima ideju da sinteznu ocenu predstavi reprezentativnom parcijalnom virtuelnom ocenom, koja se identifikuje kao najbolja moguća među očekivanim najlošijim parcijalnim ocenama.

OCENA SIGURNOSTI FUNKCIONISANJA

Implementacija pojma sigurnost funkcionisanja detaljno je razrađena pomenutom serijom standarda IEC-300, sa posebnim akcentom na značaj stepena zadovoljenja korisnika odgovarajućim proizvodom, definišući zahtev za sigurnošću funkcionisanja kao i elemente programa vezane za organizaciju proizvođača sa organizacijom korisnika, /2/. Evaluacija sigurnosti funkcionisanja, u skladu s tim trebalo bi da omogući analizu parcijalnih pokazatelja (pouzdanost, pogodnost održavanja i podrška održavanju) i njihovu sintezu. Na taj način se dobija ocena koja verifikuje postignutu raspoloživost tehničkog sistema.

Hijerarhijska struktura

Prvi korak u formiranju evaluacijskog modela je definisanje hijerarhijske strukture tehničkog sistema, odnosno, dekompozicija sistema, u ovom slučaju rotornog bagera. Tako se rotorni bager posmatra kroz četiri nivoe hijerarhijske strukture, odnosno: nivo komponente, nivo podsistema, nivo sistema i najviši nivo – sam rotorni bager (sl. 1).

Dekompozicija se vrši na osnovu konstrukcijsko funkcionalnih celina. Na nivou sistema mogu da se identifikuju devet sistema prema sl. 1.

of dependability of upper element in hierarchical structure according to determined dependability of lower elements in the same structure.

To overcome these problems, this paper presents a model for determining the dependability of excavators based on fuzzy sets theory and fuzzy algebra. Fuzzy sets are used for identification and integration of reliability, maintainability and maintenance support performances to the dependability performance of single elements, /7/, as well as the synthesis of partial assessment of dependability to higher levels in the excavator structure. The key role in the process of integration and synthesis is to define how the composition of partial influences impact the overall level, /8/. In the paper max-min composition, /9/, also called pessimistic, is used. The idea is to make overall assessment equal to the partial virtual representative assessment. This assessment is identified as the best possible one among expected worst partial grades.

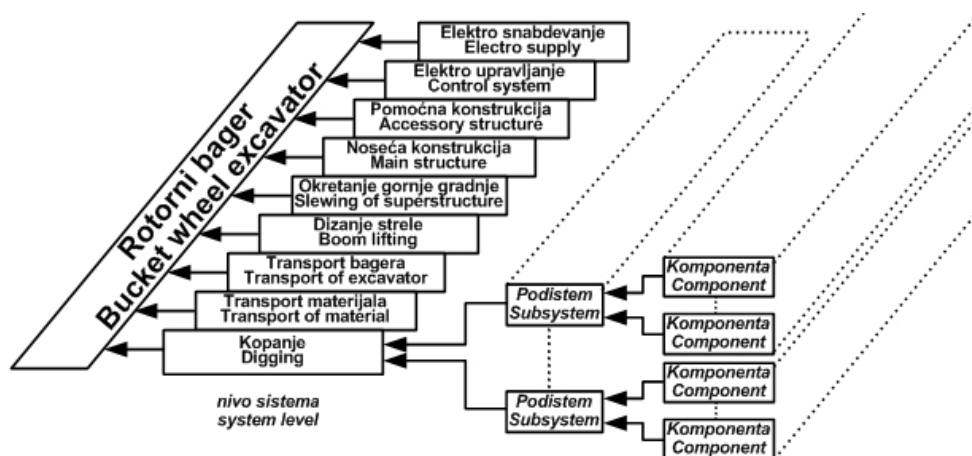
ASSESSMENT OF DEPENDABILITY

Implementation of dependability concept was developed in detail in IEC-300 standards. Special attention is devoted to degree of customers' satisfaction with the appropriate product by defining requirements for dependability, as well as to the connection of producers and users organisation, /2/. Dependability evaluation, in accordance with this should enable the analysis of partial indicators (reliability, maintainability and maintenance support) and their synthesis. In that way, estimation for verification of the achieved availability of technical systems is obtained.

Hierarchical structure

The first step in forming the evaluation model is defining the hierarchical structure of technical systems, i.e. the decomposition of the system, in this case the bucket wheel excavator. The excavator is considered as a four-level hierarchical structure: component level, subsystem level, systems level and the highest level – the excavator (Fig. 1).

Decomposition is performed based on construction – functional position. At the system level, the following nine systems can be identified, according to Fig. 1.



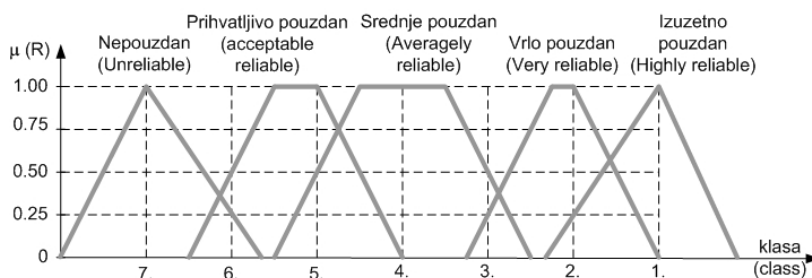
Slika 1. Hijerarhijska struktura rotornog bagera
Figure 1. Hierarchical structure of bucket wheel excavator.

Ostali nivoi hijerarhijske strukture bagera neće biti navedeni na ovom mestu zbog ograničenosti prostora. Treba pomenuti da kvalitet ocene tehničkog sistema u velikoj meri zavisi od načina dekompozicije, te da je neophodno izvršiti dekompoziciju do što nižih konstrukcijskih celina, ali sa jasno izraženom funkcijom.

Sigurnost funkcionisanja elementa

Ocena sigurnosti funkcionisanja dobija se na bazi analize njenih pokazatelja: pouzdanosti, pogodnosti održavanja i podrške održavanja. U cilju identifikacije kvaliteta elementa u smislu pouzdanosti, potrebno je definisati fazi skupove, odnosno, definisati nazive (lingvističke promenljive) i funkcije pripadnosti μ . Predlažu se pet fazi skupova sa nazivima: izuzetno pouzdan, vrlo pouzdan, srednje pouzdan, prihvatljivo pouzdan, nepouzdan.

Pouzdanost je po definiciji bezdimenziona i obično se izražava u intervalu od 0 do 1 ili od 0 do 100%. Ovo važi i za pogodnost održavanja kao i za podršku održavanja, što se tiče bezdimenzionalnosti. Kao jedinica mera koja oslikava kvalitet datog elementa tehničkog sistema u pogledu sva tri pokazatelja sigurnosti funkcionisanja, može se ovde uvesti pojam klasa kao često korišćen pojam koji reprezentuje performanse kvaliteta (na pr. od 1 do 7, s tim što je 1. klasa najkvalitetnija, tj. sa najvećom pouzdanošću...). U zavisnosti od klasa mogu da se usvoje položaj, oblik, odnosno, pokrivenost odgovarajućih fazi skupova koji predstavljaju uvedene lingvističke promenljive, sl. 2.



Slika 2. Fazi skupovi pouzdanosti
Figure 2. Reliability fuzzy sets.

Pogodnost održavanja, pre svega, se odnosi na konstrukcijsku prilagođenost akcijama održavanja. Generalno mogu da se identifikuju sledećih pet slučajeva pogodnosti održavanja, odnosno, sledeći fazi skupovi pogodnosti održavanja:

- Maksimalno povoljno za održavanje. Ova lingvistička promenljiva se odnosi na praktično automatizovane sisteme održavanja, na pr. demontaže ili drugih operacija održavanja, gde nije potreban nikakav dodatni alat, pris. tupačnost mesta gde se obavlja akcija održavanja ne dolazi do izražaja. Ovakvi sistemi se uglavnom javljaju kod elektrosistema.
- Lako za održavanje. U načelu ova lingvistička promenljiva pokriva praktično najpovoljnije slučajeve što se tiče operacija održavanja, s obzirom da teško koji deo bagera može da se proceni sa maksimalno povoljnom, odnosno, pomenuto automatizovanim.
- Prosečnih mogućnosti za održavanje. Ovo je najčešći slučaj kod kompleksnih mehaničkih sistema. U poređenju sa prethodnim sadrži nešto komplikovaniju operaciju održavanja i/ili na nepristupačnoj lokaciji.

Other levels in the hierarchical structure of the excavator will not be listed here due to limited space. It should be noted that the quality of technical system evaluation largely depends on decomposition, and that it is necessary to perform the decomposition to as low construction levels as possible, but with clearly defined function.

Dependability of elements

Dependability performance estimation is obtained regards to analysis of its indicators: reliability, maintainability and maintenance support. In order to identify the quality of elements in terms of reliability, it is necessary to define a fuzzy set, i.e. names (linguistic variables) and membership functions μ . Five fuzzy sets are proposed, called: highly reliable, very reliable, averagely reliable, acceptable reliable, unreliable.

Reliability is by definition dimensionless and usually is expressed as an interval 0...1 or 0...100%. The same situations are for maintainability and maintenance support, in terms of dimensionless. As a measuring unit, class can be introduced as a usually used concept for representing performances' quality (1st to 7th, so the 1st is the highest quality class, i.e. with the highest reliability ...), for all three indicators. Hence, the structure of dependability indicators and linguistic variables with seven classes as measures of appropriate fuzzy sets will be as follows, Fig. 2.

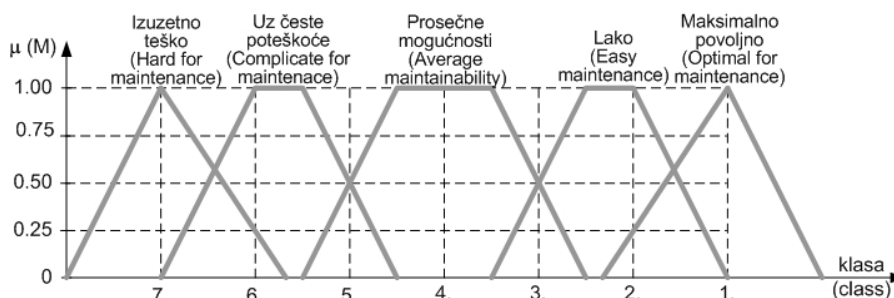
Maintainability is primary concerned to system design accommodation to maintenance actions. Generally, next five expressions of maintainability, apropos fuzzy sets, can be identified:

- Optimal for maintenance. This linguistic variable concerns practically automated maintenance systems, without any additional tool utilisation and the accessibility of locations are without influence on maintenance operation. These systems are generally present in electrical systems.
- Easy maintenance. This linguistic variable includes practically the most favourable cases for complex mechanical systems, since hardly any excavator element can be assessed as maximum favourable, or automated, as already mentioned.
- Average maintainability. This is the most often case in complex mechanical systems. Compared with previous variables it implicates somewhat more complicated maintenance operation and/or more inaccessible location.

– Uz česte poteškoće u procesu održavanja. Teško tehnološki izvodljive operacije održavanja, javljaju se i nepotrebne komplikacije pri održavanju, ali ipak mogu da se ocene kao očekivane u određenoj meri, odnosno, prepoznatljivije su.

– Izuzetno teško za održavanje. Pored već teško tehnološki izvodljive operacije održavanja, gotovo uvek i nepredviđene komplikacije u održavanju.

Položaj, oblik i pokrivenost ovih lingvističkih promenljivih, u zavisnosti od klasa, dat je na sl. 3.



Slika 3. Fazi skupovi pogodnosti održavanja

Figure 3. Maintainability fuzzy sets.

Analizom uslova održavanja koji uobičajeno vladaju na srpskim kopovima lignita i uopšte u okviru velikih industrijskih sistema, načelno mogu da se razgraniče četiri izražena slučaja podrške održavanju:

- održavanje putem servisa od strane proizvođača ili ovlašćenog serviser, a
- održavanje razvijeno od strane korisnika,
- održavanje postoji ali sa dosta ograničenja, odnosno, odvija se na zahtev,
- ne postoji.

Prva dva slučaja ponekad teško mogu da se razgraniče po efikasnosti. Održavanje razvijeno na nivou servisa od strane proizvođača ili ovlašćenog serviser, karakteristično je za savremene koncepcije održavanja u industriji uopšte, kada proizvođač opreme ili ovlašćeni serviser garantuje za ispravan rad opreme.

Podrška održavanju razvijena od strane korisnika dosta je prisutna na velikim rudarskim mašinama velikih investicionih cena, koji se proizvode u malim serijama i kod kojih su prisutne značajne promene na konstrukciji tokom njihovog životnog veka. Rotorni bageri predstavljaju očigledan primer.

Ne ulazeći u ekonomsku opravdanost ovakve koncepcije održavanja, ona se može oceniti kao dosta uspešna pre svega iz razloga vezanosti službe održavanja i konstrukcijskog razvoja i modernizacije ovakvih mašina i tokom perioda eksploatacije.

Slučaj kada održavanje postoji ali sa dosta ograničenja, odnosno, obavlja se na zahtev, načelno može da se okarakteriše kao pre svega dosta inertna koncepcija. Posledice ove inertnosti, odnosno, nedostatka pravovremene i organizovane akcije održavanja, posebno mogu da budu izražene kod tehničkih sistema sa velikom jediničnom cenom tehnološkog procesa koji obavljaju. Karakteristično je da ovakva koncepcija ima dosta subjektivnih činilaca, te će i njen fazi skup imati izraženo široki opseg.

– Complicated for maintenance. Technologically more complicated but predictable maintenance operations to a certain level, or they are identifiable (for example tendency to rust).

– Extremely difficult for maintenance. Beside high technological complexity of maintenance, unpredictable situations during the maintenance operation can almost always be expected.

The position, shape and coverage of these linguistic variables, depending on the class is given in Fig. 3.

By analysis of maintenance conditions that usually exist at complex industrial systems, four maintenance support systems can be identified:

- maintenance through services by producers or licensed organizations,
- maintenance developed by consumer,
- maintenance exists, but with many limitations, or is performed on consumers' request,
- without organised maintenance.

Efficiencies of the first two cases are hard to be distinguished. Maintenance with services performed by producers or licensed organisations is characteristic for recent maintenance concepts. Here producers of equipment give guarantee for their correct operation.

Maintenance developed by consumers is a somewhat obsolete maintenance concept but it is still present for complex and valuable systems which have been produced in small amounts and which can have significant modification in design during their lifetime. Huge bucket wheel excavators at open pit mines are good examples of such systems.

Without consideration of economic aspects of such maintenance policy, it can be estimated as quite successful, primarily because of close relationship of maintenance service with design development and modernisation of such machines during their operating time. Maintenance by consumers' request can be characterised as a very inertial concept, but it can satisfy demands with limited number of activities necessary for keeping the system available. However, the consequences of inertia, i.e. lacking of forehand and organised maintenance actions, can be very serious, especially for systems implemented in an expensive technological process. As the uncertainty and vagueness are inherent to this concept, its fuzzy set will have a significantly wide range.

Slučaj kada održavanje ne postoji, karakteristično je pre svega za delove noseće konstrukcije, vratila i zupčanike velikih dimenzija i sl., zatim komponente koje nisu često zastupljene na kopu, odnosno, nalaze se na mašinama koje su uslovno rečeno jedinstvene. Kao i mehaničke komponente čije eventualno skladištenje kao rezervnog dela izaziva velike troškove, što zbog visoke sopstvene cene, tako i zbog realno manje verovatnoće za iznenadnim otkazom.

S obzirom da su već diferencirane četiri koncepcije podrške održavanja, paralelno se mogu uvesti i četiri lingvističke promenljive (sl. 4): vrlo razvijena podrška održavanju, dobro razvijena podrška održavanju, podrška održavanju sa dosta ograničenja i podrška održavanju ne postoji. Pri čemu se klase i ovde mogu koristiti kao jedinice mere (1 do 7). Za slučaj dve efikasnije koncepcije, već je objašnjeno kako se one u dobroj meri prepliću, tako da koncepcije i navedene lingvističke promenljive ne moraju *apriori* da se poistovete. Drugim rečima, koncepcija *Održavanje putem servisa od strane proizvođača ili servisera* načelno može da se identifikuje kao *Visoko razvijena*, ali ne i sa potpunom sigurnošću, što važi i za koncepciju *Održavanje razvijeno od strane korisnika* i lingvističku promenljivu *Dobro razvijena*. Potpuno poistovećivanje koncepcije i lingvističke promenljive u dobroj meri bi neutralisalo prednosti analize na bazi fazi skupova. Drugim rečima, obaveza proizvođača da izvrši radnje neophodne za održavanje ne znači da je podrška održavanju odlično razvijena. Za ostale dve manje efikasne koncepcije podrške održavanju, uvode se lingvističke promenljive: *sa dosta ograničenja* i *ne postoji*. Ove dve koncepcije se daleko lakše diferenciraju po nivou kvaliteta. U skladu sa navedenim i krajnje lingvističke promenljive *Ne postoji* i *Vrlo razvijena*, nisu simetrične međusobom, tako što je *Vrlo razvijena* sa širim opsegom pokrivenosti.

Inexistence of organised maintenance is connected to component and parts of systems which are rare, unique or reliable in the degree that any failure is unexpected (for example support construction, hollow shafts and planetary gears of large dimensions, etc.). Storage of such components would have high expenses but the failures of these components are frequently fatal for the whole system.

According to four identified maintenance policy concepts, four linguistic variables for maintenance support can be introduced (Fig. 4): excellently developed maintenance support, well developed maintenance support, limited maintenance support and inexistence of maintenance support. Again, classes are used as measuring units for representation of maintenance support quality (interval 1...7). For the case of two more efficiency concepts, linguistic variables excellently developed and well developed are set up but without strict identification. In other words, maintenance through services by producers or licensed organisations can principally be identified as excellently developed maintenance support but without absolute certainty. The same is with maintenance developed by consumer and linguistic variable well developed. With strict identification of proposed linguistic variables and maintenance policies, advantages of fuzzy sets utilisation would also be neutralised. For example, obligation of the producer to carry out maintenance actions does not necessarily mean that the maintenance support is excellently developed. For remaining two less efficient maintenance support options, linguistic variables: *limited* and *inexistence* are introduced. These two maintenance policies are quite easier for differentiation and the strict identification with linguistic variables is evident. Also, according to previous considerations, outer linguistic variables *Excellently developed* and *Inexistence* are not mutually symmetrical.



Slika 4. Fazi skupovi podrške održavanju
Figure 4. Maintenance support fuzzy sets.

Analitičar na bazi pristupačnih informacija, formira ocenu odgovarajućeg elementa tehničkog sistema za sva tri pokazatelja sigurnosti funkcionisanja u zavisnosti od klasa kao mere odgovarajućih fazi skupova, u obliku:

$$R = \{1/(0...1.0), 2/(0...1.0), 3/(0...1.0), 4/(0...1.0), 5/(0...1.0), 6/(0...1.0), 7/(0...1.0)\} \quad (1)$$

$$M = \{1/(0...1.0), 2/(0...1.0), 3/(0...1.0), 4/(0...1.0), 5/(0...1.0), 6/(0...1.0), 7/(0...1.0)\} \quad (2)$$

$$L = \{1/(0...1.0), 2/(0...1.0), 3/(0...1.0), 4/(0...1.0), 5/(0...1.0), 6/(0...1.0), 7/(0...1.0)\} \quad (3)$$

Oznake R , M , L , predstavljaju pouzdanost, pogodnost održavanja i podršku održavanja, respektivno. Konkretno, ako bi svi analitičari podršku održavanju ocenili sa „dobro razvijena“, ocena bi se pisala u obliku (u skladu sa sl. 4):

$$L_{\text{dobro razvijena (well developed)}} = \{1/(0), 2/(0.5), 3/(1.0), 4/(0.5), 5/(0), 6/(0), 7/(0)\}$$

On the basis of accessible information the analyst makes assessment for adequate elements of the technical system, regarding all three indicators of dependability, and using classes as measures of appropriate fuzzy sets, in the form:

R , M , L are reliability, maintainability and maintenance support, in respect. For example, if all analysts should estimate the maintenance support as “well developed”, the evaluation would be written in the form (Fig. 4):

Sledeći korak je sinteza ocena za R, M, L do nivoa sigurnosti funkcionisanja (D). Sinteza se vrši na bazi odgovarajuće fazi kompozicije. U ovom slučaju se koristi tzv. *max-min* kompozicija, definisana na sledeći način:

$$D = R \circ M \times L \tag{4}$$

Kartenzijanski proizvod dva skupa $M \times L$ kao pokazatelja vezanih za održavanje tj. vezanih za vreme dok je sistem u zastoju, odnosno, odgovarajuća funkcija pripadnosti definisana je na sledeći način:

$$\mu_{M \times L} = (\mu^{ij}_{M \times L})_{n \times n}, \text{ gde je (where): } \mu^{ij}_{M \times L} = \min(\mu^i_M, \mu^j_L)$$

funkcije pripadnosti za skupove M i L date su na sledeći način:

$$\mu_M = (\mu^1_M, \mu^2_M, \dots, \mu^n_M).$$

Na kraju, funkcija pripadnosti za skup D može biti dobijena na sledeći način:

$$\mu_D = \mu_{R \circ M \times L} = (\mu^j_D)_{1 \times n},$$

gde je (where): $\mu^j_D = \max(\min(\mu^1_R, \mu^{1j}_{M \times L}), \dots, \min(\mu^n_R, \mu^{nj}_{M \times L})), j=1, 2, \dots, n.$

Okvako definisana *max-min* kompozicija postavlja fazi skup L kao „kritičan“, drugim rečima u slučaju da neki element bagera ima visoku pouzdanost R i pogodnost održavanja M , a izraženo nisku performansu podrške održavanju L , ocena sigurnosti funkcionisanja D biće isto na niskom nivou.

Kao izlaz fazi kompozicije dobija se sigurnost funkcionisanja odgovarajućeg elementa, u obliku gde se daje zavisnost od klasa, na način:

$$D = \{1/(0...1.0), 2/(0...1.0), 3/(0...1.0), 4/(0...1.0), 5/(0...1.0), 6/(0...1.0), 7/(0...1.0)\} \tag{5}$$

U odnosu na klase (1 do 7) mogu se definisati i fazi skupovi sigurnosti funkcionisanja, odnosno, njihove funkcije pripadnosti: odlična, dobra, prosečna i loša sigurnost funkcionisanja, sl. 5.

The next step is a synthesis of estimation for R, M, L to the level of dependability (D). Synthesis is done based on corresponding fuzzy compositions. In this case the *max-min* composition is used, defined as follows:

The Cartesian product (and the corresponding membership function) of two sets $M \times L$ as an indicator related to maintenance, i.e. related to the period while the system is out of operation, is defined as follows:

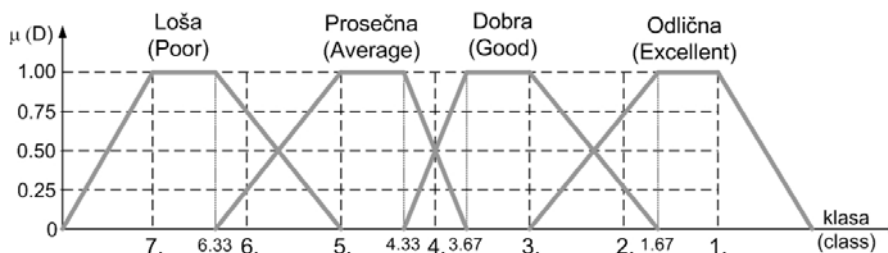
membership functions for sets M and L , are given in the following way:

Finally, membership functions for set D can be obtained as follows:

Thus defined *max-min* composition locates the fuzzy set L as “critical”, in other words, in the case that some element of the excavator has high reliability R and maintainability M , but significantly low maintenance support L , dependability D rating will also be low.

As the output of fuzzy composition, dependability of the elements is obtained in the form related to classes, as:

In relation to class (1 to 7) dependability and their membership functions can be defined as: excellent, good, average and poor, Fig. 5.



Slika 5. Fazi skupovi Sigurnosti funkcionisanja
Figure 5. Dependability fuzzy sets.

Sigurnost funkcionisanja može da se identifikuje prema fazi skupovima sigurnosti funkcionisanja (sl. 5) korišćenjem metode računanja težišta Z :

Dependability can be identified according to dependability fuzzy sets (Fig. 5) by centre of mass point calculation Z :

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^7 \mu_{C_i} \cdot C}{\sum_{i=1}^7 \mu_{C_i}} = 1...7 \tag{6}$$

gde je C klasa (1 do 7), a μ_C funkcija pripadnosti preseka broja Z i klase C .

where C is the class (1 to 7), and μ_C is the membership function to intersection of number Z and class C .

SINTEZA SIGURNOSTI FUNKCIONISANJA

Ocena D datog elementa, praktično predstavlja jednu od parcijalnih ocena određene strukture tehničkog sistema, čiji je taj element deo. U sledećem koraku trebalo bi izvršiti sintezu parcijalnih ocena elemenata na viši hijerarhijski nivo tehničkog sistema.

Za sintezu funkcija pripadnosti μ_D može da se koristi fazi algebra, odnosno, *max-min* kompozicija. Ako se posmatraju funkcije pripadnosti D za elemente, mogu se identifikovati moguće kombinacije po fazi skupovima sigurnosti funkcionisanja i za svaku od njih odrediti ishodi. Uobičajeno je da se koriste „AKO-ONDA“ pravila. Na pr. AKO su sve parcijalne ocene po elementima „odlična“, ONDA je ishod skupa tih elemenata (viši hijerarhijski nivo) „odlična“. U slučaju da se javi kombinacija različitih ocena po elementima, trebalo bi da se izračuna prosečna i na osnovu nje odredi ishod. *Max-min* kompozicija se onda primenjuje na sledeći način:

- za svaku od kombinacija traži se MINimum među vrednostima preseka fazi skupova sigurnosti funkcionisanja i vrednosti Z , (6) za svaki element;
- za svaki od ishoda traži se MAXimum među prethodno identifikovanim minimuma;
- na kraju se vrednosti maksimuma normalizuju do 1.

Na ovaj način se dobija ocena sigurnosti funkcionisanja skupa elemenata u konačnom obliku:

$$D = \{(\mu_1, \text{„loša“}), (\mu_2, \text{„prosečna“}), (\mu_3, \text{„dobra“}), (\mu_4, \text{„odlična“})\} \quad (7)$$

$$D = \{(\mu_1, \text{„poor“}), (\mu_2, \text{„average“}), (\mu_3, \text{„good“}), (\mu_4, \text{„excellent“})\} \quad (7)$$

SIGURNOST FUNKCIONISANJA BAGERA SCHRS 630, JPRB KOLUBARA, TAMNAVA ZAPADNO POLJE

Kao primer primene razvijene metode ocene sigurnosti funkcionisanja rotornog bagera, biće izložena analiza sistema (I nivo dekompozicije bagera) i sinteza na nivo rotornog bagera. Odnosno, sistemi na bageru će biti posmatrani kao elementi, a rotorni bager kao tehnički sistem. Pri tome se ocene dobijaju kao ekspertske od strane zaposlenih u eksploataciji i održavanju ovog bagera.

1. Sistem za kopanje

Pouzdanost sistema za kopanje je ocenjena u najvećoj meri sa *vrlo pouzdan* od strane svih 10 ispitanih analitičara (100%). Ipak, dvoje (20%) su izabrali i kao ocenu *prosečne pouzdanosti*. U skladu sa fazi skupovima prema sl. 2, fazi skupovi *vrlo pouzdan* i *prosečno pouzdan* su definisani sa:

$$R \text{ vrlo (very)} = \{1/0, 2/1.0, 3/0.5, 4/0, 5/0, 6/0, 7/0\},$$

$$R \text{ prosečno (average)} = \{1/0, 2/0, 3/0.5, 4/1.0, 5/0.5, 6/0, 7/0\}.$$

Ukupna pouzdanost (1) na nivou sistema za kopanje je procenjena u najvećoj meri sa *Vrlo pouzdan*, na sledeći način (tab. 1):

Tabela 1. Postupak dobijanja ocene pouzdanosti za sistem kopanja
Table 1. Procedure of reliability evaluation of the excavation system.

Lingvist. promenljiva (Linguistic variable)	% anketiranih (% of respondents)	Klasa (Class)						
		1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
Vrlo (Very)	100 %	0 x 100 %	1,0 x 100 %	0,5 x 100 %	0 x 100 %	0 x 100 %	0 x 100 %	0 x 100 %
Prosečno (Average)	20 %	0 x 20 %	0 x 20 %	0.5 x 20 %	1.0 x 20 %	0.5 x 20 %	0 x 20 %	0 x 20 %
$\sum R_1$		0	1.0	0.6	0.2	0	0	0

$$R_1 = \{1/0, 2/1.0, 3/0.6, 4/0.2, 5/0, 6/0, 7/0\}$$

SYNTHESIS OF DEPENDABILITY

Evaluation of D for a selected element practically represents a partial assessment of the specific structure of the technical system, where that element is located. The next step should be to make a synthesis of this partial assessment to the highest hierarchical level of the technical system.

For the synthesis of membership functions μ_D , fuzzy algebra, i.e. *max-min* composition can be used. If membership functions D of the elements are observed, the possible combinations of fuzzy sets of dependability can be identified and for each of them the outcome can be determined. It is customary to use “IF-THEN” rules. E.g. IF all elements of the partial evaluation are “excellent”, THEN the outcome of a set of elements (at higher hierarchical level) is “excellent”. In the case that a combination of different elements assessments occurs, the average assessment should be calculated and determination of outcome should be done based on it. *Max-min* composition is then applied as follows:

- for each combination, search for the MINimum value of the intersection of dependability fuzzy sets and the value of Z , (6) for each element;
- for each of the outcomes find the MAXimum between previously identified minimums;
- finally, the maximum value is normalised to 1.

In this way, the assessment of dependability for a set of elements is obtained as follows:

DEPENDABILITY OF EXCAVATOR SCHRS 630, JPRB KOLUBARA, TAMNAVA WEST FIELD

As an application example of developed methods for dependability determination, analysis of bucket wheel excavator systems (first level of excavator decomposition) are presented, as well as the synthesis to the excavator level. These systems will be considered as elements, and the excavator as a technical system. Estimations are obtained as experts' by the excavators operation and maintenance staff.

1. System for excavation

Reliability of the system for excavation is evaluated mostly as *very reliable* by all engineers (100%). However, two of them (20%) selected also *average reliable*. According to reliability fuzzy sets defined in Fig. 2, fuzzy sets *very reliable* and *average reliable* are defined as:

Total reliability performance (1), which is obviously recognised as dominantly *very reliable* is calculated as (Table 1):

Na isti način su ocenjeni i pogodnost (2) i podrška održavanju (3) na nivou sistema za kopanje:

$$M_1 = \{1/0, 2/1.0, 3/0.5, 4/0.1, 5/0, 6/0, 7/0\}, L_1 = \{1/0, 2/0, 3/0.1, 4/0.5, 5/1.0, 6/0.4, 7/0\}$$

Max-min kompozicija je izražena na sledeći način:

In the same way the maintainability (2) and maintenance support (3) are rated, for the excavation system:

The max-min composition is expressed as follows:

$$\mu_{M \times L} = (\mu^{ij}_{M \times L})_{7 \times 7}$$

$$\mu^{ij}_{M \times L} = \min(\mu^j_M, \mu^i_L) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.5 & 1.0 & 0.4 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.5 & 0.5 & 0.4 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mu^j_D = \max(\min(\mu^1_R, \mu^{1j}_{M \times L}), \dots, \min(\mu^7_R, \mu^{7j}_{M \times L})), j = 1, 2, \dots, 7$$

$$\mu^D = \mu^R \circ \mu_{M \times L} = (\mu^j_D)_{1 \times 7} = (0, 0, 0.1, 0.5, 1.0, 0.4, 0)$$

Sigurnost funkcionisanja sistema (4) za kopanje, dobija se konačno u obliku (5):

$$D_1 = \{1/0, 2/0, 3/0.1, 4/0.5, 5/1.0, 6/0.4, 7/0\}$$

Dependability (4) for the excavation system is finally obtained in the form (5):

2. Sistem za transport materijala
(System material transport)

$$R_2 = \{1/0.8, 2/1.0, 3/0.1, 4/0, 5/0, 6/0, 7/0\}$$

$$M_2 = \{1/1.0, 2/0.6, 3/0, 4/0, 5/0, 6/0, 7/0\}$$

$$L_2 = \{1/0.7, 2/1.0, 3/0.3, 4/0, 5/0, 6/0, 7/0\}$$

$$D_2 = \{1/0.7, 2/0.8, 3/0.3, 4/0, 5/0, 6/0, 7/0\}$$

6. Noseća konstrukcija
(Main structure)

$$R_6 = \{1/0.1, 2/1.0, 3/0.5, 4/0.1, 5/0, 6/0, 7/0\}$$

$$M_6 = \{1/0.3, 2/1.0, 3/0.3, 4/0, 5/0, 6/0, 7/0\}$$

$$L_6 = \{1/1.0, 2/0.7, 3/0.1, 4/0, 5/0, 6/0, 7/0\}$$

$$D_6 = \{1/1.0, 2/0.7, 3/0.1, 4/0, 5/0, 6/0, 7/0\}$$

3. Sistem za transport bagera
(System for excavator transport)

$$R_3 = \{1/0, 2/0.3, 3/0.7, 4/1.0, 5/0.2, 6/0, 7/0\}$$

$$M_3 = \{1/0, 2/1.0, 3/0.4, 4/0.1, 5/0, 6/0, 7/0\}$$

$$L_3 = \{1/0, 2/0.3, 3/1.0, 4/0.5, 5/0.2, 6/0, 7/0\}$$

$$D_3 = \{1/0, 2/0.3, 3/0.4, 4/0.4, 5/0.2, 6/0, 7/0\}$$

7. Pomoćna konstrukcija
(Accessory structure)

$$R_7 = \{1/0.2, 2/1.0, 3/0.5, 4/0, 5/0, 6/0, 7/0\}$$

$$M_7 = \{1/0.3, 2/1.0, 3/0.3, 4/0, 5/0, 6/0, 7/0\}$$

$$L_7 = \{1/1.0, 2/0.7, 3/0.1, 4/0, 5/0, 6/0, 7/0\}$$

$$D_7 = \{1/1.0, 2/0.7, 3/0.1, 4/0, 5/0, 6/0, 7/0\}$$

4. Sistem za dizanje strele
(System for boom lifting)

$$R_4 = \{1/0.2, 2/1.0, 3/0.4, 4/0, 5/0, 6/0, 7/0\}$$

$$M_4 = \{1/0.1, 2/1.0, 3/0.6, 4/0, 5/0, 6/0, 7/0\}$$

$$L_4 = \{1/0.1, 2/0.6, 3/1.0, 4/0.2, 5/0, 6/0, 7/0\}$$

$$D_4 = \{1/0.1, 2/0.6, 3/1.0, 4/0.2, 5/0, 6/0, 7/0\}$$

8. Elektro upravljanje
(Control systems)

$$R_8 = \{1/1.0, 2/0.25, 3/0, 4/0, 5/0, 6/0, 7/0\}$$

$$M_8 = \{1/1.0, 2/0.25, 3/0, 4/0, 5/0, 6/0, 7/0\}$$

$$L_8 = \{1/1.0, 2/0.75, 3/0, 4/0, 5/0, 6/0, 7/0\}$$

$$D_8 = \{1/1.0, 2/0.75, 3/0, 4/0, 5/0, 6/0, 7/0\}$$

5. Sistem za okretanje gornje gradnje
(System for upper construction rotation)

$$R_5 = \{1/0, 2/1.0, 3/0.7, 4/0.4, 5/0.1, 6/0, 7/0\}$$

$$M_5 = \{1/0, 2/1.0, 3/0.7, 4/0.3, 5/0, 6/0, 7/0\}$$

$$L_5 = \{1/0, 2/0.4, 3/1.0, 4/0.4, 5/0.1, 6/0, 7/0\}$$

$$D_5 = \{1/0, 2/0.4, 3/1.0, 4/0.4, 5/0.1, 6/0, 7/0\}$$

9. Elektro napajanje
(Electro supply systems)

$$R_9 = \{1/1.0, 2/0.25, 3/0, 4/0, 5/0, 6/0, 7/0\}$$

$$M_9 = \{1/1.0, 2/0.25, 3/0, 4/0, 5/0, 6/0, 7/0\}$$

$$L_9 = \{1/1.0, 2/0.75, 3/0, 4/0, 5/0, 6/0, 7/0\}$$

$$D_9 = \{1/1.0, 2/0.75, 3/0, 4/0, 5/0, 6/0, 7/0\}$$

U drugom koraku sinteze, računaju se vrednosti Z (6) za svaki od n = 9 sistema:

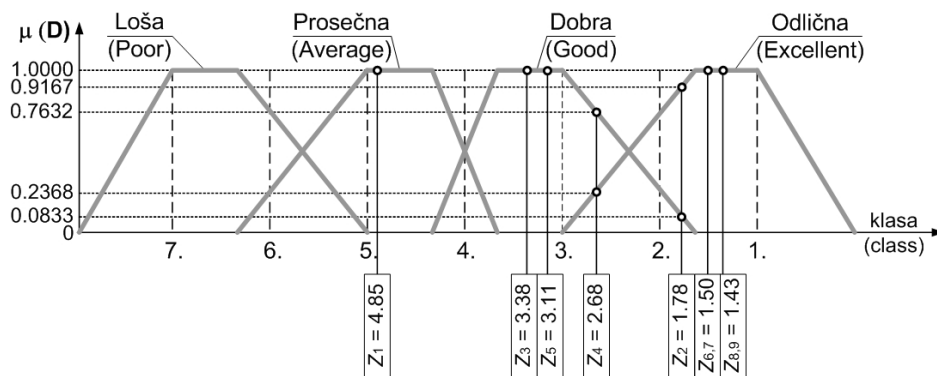
In the second step of the synthesis, Z (6) values are calculated for each n = 9 systems:

$$Z_1 = \frac{\sum_{i=1}^7 \mu_{C_i} \cdot C}{\sum_{i=1}^7 \mu_{C_i}} = \frac{0 \cdot 1 + 0 \cdot 2 + 0.1 \cdot 3 + 0.5 \cdot 4 + 1.0 \cdot 5 + 0.4 \cdot 6 + 0 \cdot 7}{0 + 0 + 0.1 + 0.5 + 1.0 + 0.4 + 0} = 4.85$$

$$Z_2 = 1.78; Z_3 = 3.38; Z_4 = 2.68; Z_5 = 3.11; Z_6 = 1.50; Z_7 = 1.50; Z_8 = 1.43; Z_9 = 1.43$$

One se dalje prikazuju u zavisnosti od fazi skupova D, i očitavaju vrednosti funkcija pripadnosti μ(D) za tačke preseka vrednosti Z i odgovarajućih fazi skupova sigurnosti funkcionisanja (sl. 5).

They are further presented depending on fuzzy sets D, and the value of membership functions μ(D) are read for the intersection point of Z values and corresponding reliability fuzzy sets (Fig. 5).



Slika 5. Presek fazi skupa sigurnost funkcionisanja i težišta sigurnosti funkcionisanja sistema na bageru
 Figure 5. Intersections of dependability fuzzy sets and centre of mass point for excavator systems.

Na osnovu određenih preseka (sl. 5), realno moguće su sledeće četiri kombinacije ocena za devet sistema na bageru, sa očekivanim ishodom (tab. 2):

Tabela 2. Ishodi po kombinacijama fazi skupova sigurnosti funkcionisanja za sisteme na bageru

Sistem Komb.	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	Ishod
1.	P	D	D	D	D	O	O	O	O	D
2.	P	O	D	D	D	O	O	O	O	D
3.	P	D	D	O	D	O	O	O	O	D
4.	P	O	D	O	D	O	O	O	O	O

U tabeli su ocene označene prvim slovom (O–odlična, itd.), a ishodi su određeni tako što je svakoj lingvističkoj oceni dodeljena broječna (odlična = 4, dobra = 3, itd.), i na taj način određena prosečna ocena:

$$I_{1.komb.} = \frac{2+3+3+3+3+4+4+4+4}{9} = 3.33, \text{ odgovara ishodu „dobra“ (belongs to the outcome “good”),}$$

$$I_{2.komb.} = 3.44 \rightarrow \text{dobra (good), } I_{3.komb.} = 3.44 \rightarrow \text{dobra (good), } I_{4.komb.} = 3.55 \rightarrow \text{odlična (excellent).}$$

Primena *max-min* kompozicije je prikazana u tab. 3.

Tabela 3. Struktura *max-min* kompozicije za potrebe sinteze sistema na nivo bagera

Ishod	L	P	D	O
Komb.	<i>Min po ishodu</i>			
1.	0	0	0.0833	0
2.	0	0	0.7632	0
3.	0	0	0.0833	0
4.	0	0	0	0.2368
Max	0	0	0.7632	0.2368
Normal.	0	0	0.7632	0.2368

Na ovaj način se dobija ocena (7) sigurnosti funkcionisanja bagera SchRs 630:

$$D_{(R.B.)} = \{(0, \text{„loša“}), (0, \text{„prosečna“}), (0.7632, \text{„dobra“}), (0.2368, \text{„odlična“})\}$$

$$D_{(B.W.E)} = \{(0, \text{„poor“}), (0, \text{„average“}), (0.7632, \text{„good“}), (0.2368, \text{„excellent“})\}$$

S obzirom da su načelno sistemi na bageru u rednoj vezi u smislu pouzdanosti, može se usvojiti ovakva *max-min* kompozicija, gde svaki sistem ima isti nivo uticaja na ishod kombinacija.

ZAKLJUČAK

Postavljeni matematičko-konceptijski model procene sigurnosti funkcionisanja rotornog bagera na bazi fazi skupova, pokušava u potpunosti da apsorbuje sve uticajne

On the basis of defined intersections (Fig. 5), four combinations of estimations for nine systems of excavators are realistic, and the expected outcomes are (Table 2):

Table 2. Outcomes by fuzzy set combinations of dependability for excavator systems.

System Comb.	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	Outcomes
1.	A	G	G	G	G	E	E	E	E	G
2.	A	E	G	G	G	E	E	E	E	G
3.	A	G	G	E	G	E	E	E	E	G
4.	A	E	G	E	G	E	E	E	E	E

In the table, assessments are marked by letters (E–excellent, etc.), and outcomes are determined by allocation of numerical value to each linguistic evaluation (excellent = 4, good = 3, etc.), the average evaluation is:

Application of *max-min* composition is shown in Table 3.

Table 3. Structure of *max-min* composition for the synthesis of the excavator system.

Outcome	P	A	G	E
Comb.	<i>Min for outcome</i>			
1.	0	0	0.0833	0
2.	0	0	0.7632	0
3.	0	0	0.0833	0
4.	0	0	0	0.2368
Max	0	0	0.7632	0.2368
Normal.	0	0	0.7632	0.2368

In this way, assessment (7) of dependability of bucket wheel excavator SchRs 630 is:

Considering that the principle systems of excavators are in series in terms of reliability, such a *max-min* composition can be adopted, where each system has the same level of influence to the combination outcome.

CONCLUSION

The exposed mathematical and conceptual model of excavator reliability evaluation, based on fuzzy sets, has been tried to fully absorb all the quality of service influen

faktore na upotrebnost kvaliteta ove mašine, odnosno, vezane za konstrukcijske i logističke karakteristike rotornog bagera. Model daje izlaz u obliku lingvističkog zapisa u kontinualnom obliku, te daje višedimenzioni karakter oceni bagera za razliku od uobičajeno korišćenih modela ocene bagera preko koeficijena vremenskog ili kapacitativnog iskorišćenja.

U navedenom primeru korišćene su samo ekspertske ocene u evaluaciji parametara sigurnosti funkcionisanja, što nije ograničenje za korišćenje i drugih oblika informacija, na pr. u obliku matematički definisanih funkcija vezanih za pouzdanost i sl., koje bi se na odgovarajući način fazifikovale, tj. preslikale na skali „1 do 7 klasa“.

Postavljeni model može lako da se iskoristi i za procenu upotrebnog kvaliteta i drugih tehničkih sistema sa izraženoj hijerarhijskom strukturom.

LITERATURA – REFERENCES

1. Ivković, S., Ignjatović, D., Tanasijević, M., Ivković, D., *Ponašanje rotornih bagera u eksploataciji na površinskim kopovima uglja u Srbiji i rizici*, 12. Savetovanje sa međunarodnim učešćem Upravljanje rizicima, preventiva i osiguranje u energetici, Dunav PREVIEW a.d., Beograd, 2004., str.199-204.
2. Tanasković, T., *Sigurnost funkcionisanja i performansa raspoloživosti*, V jugoslovenski simpozijum sa međunarodnim učešćem Aktuelni problemi razvoja mehanizacije u rudarstvu, RGF, Beograd, 1999., str.219-223.
3. Jovančić, P., Ignjatović, D., Tanasijević, M., Maneski, T., *Dijagnostikovanje stanja i ponašanja rotornih bagera u cilju njihove revitalizacije*, Tehnika - Rudarstvo, geologija i metalurgija, vol. 59, br.3, 2008, str.9-18.
4. Maneski, T., Sedmak, A., *Integritet konstrukcije*, Integritet i vek konstrukcija (in Serbian, Structural Integrity and Life), Vol.1, No2, 2001, pp.107-110.
5. Maneski, T., Ignjatović, D., *Dijagnostika čvrstoće konstrukcije*, Int. i vek konst. (Structural performance diagnostics, Struc. Int. and Life), Vol.4, No1, 2004, pp.3-7.
6. Maneski, T., Ignjatović, D., *Sanacije i rekonstrukcije rotornih bagera*, Int. i vek konst. (Repair and reconstruction of bucket wheel excavators, Struc. Int and Life), Vol.4, No1, 2004, pp.9-28.
7. Tanasijević, M., *Sigurnost funkcionisanja mehaničkih komponenti rotornog bagera*, doktorska disertacija, Rudarsko-geološki fakultet Univerziteta u Beogradu, 2007 (Safety operation of excavator mechanical components, PhD thesis in Serbian, University of Belgrade, Faculty of Mining and Geology, 2007).
8. Ivezić, D., Tanasijević, M., Ignjatović, D., *Fuzzy Approach to Dependability Performance Evaluation*, Quality and Reliability Engineering International, Vol. 24 (7), 2008, pp.779-792.
9. Bowles, J.B, Pelaez, C.E. *Fuzzy logic prioritization of failures in a system failure mode, effects and criticality analysis*, Reliability Engineering and System Safety, 1995, 50(2), 203-213.

tial factors of these machines, related to their construction and logistical characteristics. The model provides output as a linguistic record in continuous form and gives more-dimensional assessment of excavators, unlike the usually used model of evaluation of excavators that uses coefficients of time or capacity efficiency.

In the shown example only expert assessment has been used in the evaluation of dependability performance parameters, but the use of the other forms of information is not limited, e.g. in the form of mathematically defined functions related to reliability, which would be appropriately fuzzified – mapped in the classes’ “1st to 7th” scale.

The proposed model can easily be used for quality of service assessment for other technical systems with complex hierarchical structure.