

RAZVOJ SOFTVERSKIH SISTEMA ZA ANALIZU I MODELIRANJE POUZDANOSTI KOMPONENTI SAOBRAĆAJNIH SISTEMA (Pozivni referat)

Hon.D.Sc. Predrag Dašić, email: dasicp58@gmail.com

Faculty of Strategic and Operational Management (FSOM), 11000 Beograd (Serbia)
SaTCIP Publisher Ltd., 36210 Vrnjačka Banja (Serbia)

Sažetak: Pouzdanost sobračajnog sistema se definiše kao njegova sposobnost da uspešno obavlja zadate mu funkcije i održava vrednost eksploatacionih parametara, u propisanim i zadatim granicama pod određenim uslovima i u datom vremenskom intervalu. U radu je prikazan razvoj dva softverska sistema za analizu pouzdanosti komponenti tehničkih sistema, i to: RATSC-CTD (softverski sistem za analizu pouzdanosti komponenti tehničkih sistema na osnovu izbora teorijske raspodele prema karakteristikama teorijskih raspodela, kojom se najbolje aproksimiraju eksperimentalni podaci) i RATSC-CA (softverski sistem za analizu pouzdanosti komponenti tehničkih sistema na osnovu izbora teorijske raspodele zasnovano na komparativnoj analizi, kojom se najbolje aproksimiraju eksperimentalni podaci), koji su razvijeni i pisani u FORTRAN i C++ programskim jezicima od strane autora ovog rada. Korišćenjem razvijenih softverskih sistema prikazani su primeri analize pouzdanosti komponenti sobračajnih sistema.

Ključne reči: pouzdanost, analiza pouzdanosti, softverski sistem, saobraćajni sistem.

DEVELOPMENT OF SOFTWARE SYSTEMS FOR RELIABILITY ANALYSIS OF THE COMPONENTS TRAFFIC SYSTEM (Keynote paper)

Abstract: The reliability of the traffic system is defined as its ability to successfully perform its functions and maintain the value of the exploitation parameters, within the prescribed and defined limits under certain conditions and within a given time interval. The paper presents the development of two software systems for reliability analysis of technical system components, as follows: RATSC-CTD (Software system for Reliability Analysis of Technical System Components on the Basis of Choice of Theoretical Distribution According to Characteristics of Theoretical Distributions, which in the best way Approximate Experimental Data) and RATSC-CA (Software system for Reliability Analysis of Technical System Components on the Basis of Choice of Theoretical Distribution Based on Comparative Analysis, which in the best way Approximate Experimental Data), which have been developed and written in FORTRAN and C++ programming languages by the authors of this paper. Using the developed software systems, examples of the reliability analysis of the component system components are presented.

Keywords: reliability, reliability analysis, software system, traffic system.

1. Uvod

Pouzdanost je verovatnoća da će sistem, na određenom nivou značajnosti (α), uspešno obaviti funkciju za koju je namenjen, bez otkaza i unutar specifikovanih granica performansi, uzimajući u obzir prethodno vreme korišćenja sistema, u toku specifikovanog vremena trajanja zadatka, kada se koristi na propisani način i u svrhu za koju je namenjen, pod specifikovanim nivoima opterećenja [1-2, 5-28, 5-41]. Znači pouzdan je samo onaj sistem koji izvršava svoju funkciju bez kvara (otkaza) u određenom vremenskom intervalu. Pouzdanost sistema definisana je i u međunarodnim standardima [29-30] i u mnogim nacionalnim standardima. Pošto saobraćajni sistem spada u grupu tehničkih sistema, to i prethodno navedena definicija važi i za pouzdanost saobraćajnih sistema.

Tehnički sistem, pa samim tim i saobraćajni sistem, je složen sistem, koji se sastoji od niza elemenata (komponenti), podsklopova i sklopova sistema. To znači, da se pouzdanost tako složenog sistema sastoji od pouzdanosti svake komponente, podsklopa ili sklopa sistema. Pri tome, sve komponente složenog sistema ne utiču podjednako na njegovu pouzdanost, već za pouzdanost složenog sistema važnu ulogu ima njegova struktura (odnosno njegovi delovi ili komponente). Pouzdanost svakog sastavnog dela (komponente) sistema može se računati pod pretpostavkom da otkaz jednog dela prouzrokuje otkaz podsklopa ili sklopa sistema.

Veliki broj komponenti tehničkih sistema spada u grupu podsistema (celina) čiji otkazi prouzrokuju zastoje u radu čitavog tehničkog sistema. Takođe, može se zaključiti, na osnovu saznanja iz teorije tehničkih sistema da otkazi komponenti u okviru tehničkog sistema zavise od čitavog niza faktora i da predstavljaju vrlo kompleksnu pojavu. Takođe, može se zaključiti da vreme do otkaza komponente sistema nije konstatno već da predstavlja slučajnu veličinu koju možemo prognozirati.

Osnovni pokazatelji pouzdanosti komponenti tehničkih sistema su [1-2, 5-28, 31-41]:

- funkcija pouzdanosti ili verovatnoća ispravnog funkcionisanja:

$$R(t) = P(t) = \frac{n - N(t)}{n} = 1 - \frac{N(t)}{n} = \frac{n(t)}{n(t) - N(t)} = \frac{n(t)}{n} \quad (1)$$

- funkcija nepouzdanosti ili verovatnoća pojave otkaza:

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - \frac{n(t)}{n} = \frac{N(t)}{n} \quad (2)$$

- funkcija učestanosti (gustine) otkaza ili učestanost pojave otkaza:

$$f(t) = \frac{\Delta n}{n} \quad (3)$$

- funkcija intenziteta (brzine) otkaza ili brzine pojave otkaza:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\Delta n}{n(t)} = \frac{\Delta n}{n - N(t)} \quad (4)$$

gde je:

n - ukupan broj posmatranih elemenata sistema,

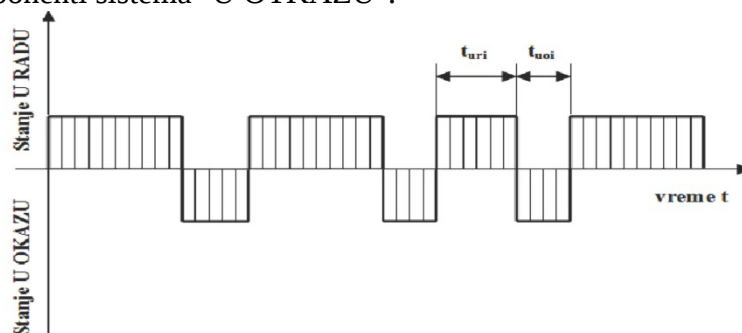
$N(t)$ - ukupan broj neispravnih elemenata ili elemenata koji su otkazali do trenutka t ,

$n(t)$ - ukupan broj ispravnih elemenata ili elemenata koji nisu otkazali do trenutka t i

Δn - ukupan broj otkaza po grupnom intervalu (između granica intervala).

Analiza pouzdanosti komponenti sistema uslovljena je posedovanjem svih relevantnih informacija o ponašanju sistema, na bazi vremenske slike stanja (slika 1). Sa slike 1 mogu se uočiti dva osnovna stanja komponenti sistema, i to:

- stanje komponenti sistema "U RADU" i
- stanje komponenti sistema "U OTKAZU".



Slika 1: Vremenska slika stanja komponenti sistema

Stanje komponenti sistema "U RADU" zadovoljava, što znači da komponenta sistema uspešno vrši funkciju unutar specifikovanih granica performansi. Vremenski interval stanja komponenti sistema "U RADU" naziva se "vreme U RADU" komponente sistema ili vreme do otkaza odn. vreme bezotkaznog rada komponente sistema, a obuhvata vremenski period ispravnog rada komponente sistema do nastupanja otkaza. Vreme bezotkaznog rada komponente sistema se najčešće izražava u vremenskim jedinicama (minutima, časovima, danima, mesecima ili godinama) ali se može isto tako izraziti i u brojevima radnih ciklusa, dužini obrade, broju obrađenih komada posle kojih je izvršena zamena komponente sistema i sl.

Stanje komponente sistema "U OTKAZU" nezadovoljava, što znači da je u okviru tehničkog sistema narušena utvrđena međuzavisnost elemenata i relacija između njih i njihovih karakteristika, da komponenta sistema ne vrši postavljenu funkciju unutar specifikovanih granica performansi i da je potrebno preduzeti mere povratka komponente sistema "U RADU". Vremenski interval stanja komponente sistema "U OTKAZU" naziva se "vreme U OTKAZU" komponente sistema i predstavlja vreme u kom je potrebno realizovati: reparaciju, regeneraciju i prevlačenje ili zamenu komponente sistema.

Na osnovu ovako praćenih "vreme U RADU" i otkaza komponente tehničkog sistema (slika 1) u fazi realne eksploatacije, a primenom statističkih metoda, moguće je utvrditi teorijski zakon raspodele kojim se najbolje aproksimiraju eksperimentalni podaci.

U radu je data metodologija izbora, algoritam i kratak opis programske realizacije određivanja pouzdanosti komponenti tehničkog sistema na osnovu izbora najboljeg teorijskog zakona raspodele. Prema tome, cilj metodologije izložene u ovom radu je da se po određenoj proceduri, bez određenog subjektivizma o navedenoj pripadnosti eksperimentalnih podataka o otkazima pojedinih komponenti tehničkih sistema tačno određenom teorijskom zakonu raspodele, odredi pouzdanost na osnovu izbora najbolje raspodele iz reda onih koje se najčešće primenjuju u oblasti pouzdanosti tehničkih sistema. To su najčešće: eksponencijalna, hiper-ekspencijalna, normalna, log-normalna, Weibull-ova, Rayleigh-ejeva, Gama, Erlang-ova, Gumbel-ova (ekstremnih: minimalnih ili maksimalnih vrednosti tipa I) raspodela i sl. Za konkretno praćenje otkaza komponente saobraćajog sistema dat je primer primene prikazane metodologije i softverskih sistema za utvrđivanje pouzdanosti komponente saobraćajog sistema. Pri tome su prikazani: izabrani teorijski zakon raspodele, karakteristike prave u verovatnosnom papiru, osnovni pokazatelji teorijskog modela pouzdanosti, provera saglasnosti eksperimentalnih podataka sa teorijskim modelom pouzdanosti pomoću neparametarskih testova i za određene verovatnoće vreme bezotkaznog rada komponente saobraćajog sistema.

2. Metode određivanje i analize pouzdanosti komponenti tehničkih sistema

Metodologija, odn. procedura, određivanja pouzdanosti komponenti tehničkih sistema obuhvata sledeće korake [5, 8, 14]:

- određivanje eksperimentalnog modela pouzdanosti (formiranje eksperimentalne raspodele, izračunavanje osnovnih pokazatelja pouzdanosti eksperimentalnih podataka i izračunavanje numeričkih statističkih karakteristika uzorka);
- usvajanje tačno određene teorijske raspodele ili izbor teorijske raspodele kojom se najbolje aproksimiraju eksperimentalni podaci;
- određivanje teorijskog modela pouzdanosti (određivanje parametara izabrane teorijske raspodele i izračunavanje osnovnih teorijskih pokazatelja pouzdanosti);
- proveru saglasnosti teorijskog modela pouzdanosti, odn. teorijskog zakona raspodele, sa eksperimentalnim podacima i

- grafičku prezentaciju osnovnih eksperimentalnih i teorijskih pokazatelja pouzdanosti.

2.1. Podela metoda za određivanje i analizu pouzdanosti komponenti tehničkih sistema

Primenom statističkih metoda, a na osnovu dobijenih eksperimentalnih podataka o praćenju otkaza komponenti tehničkih sistema u fazi realne eksploatacije, moguće je po određenoj proceduri utvrditi teorijski model pouzdanosti komponenti tehničkih sistema kao podsistema, tehničkog sistema. Određivanje pouzdanosti komponenti tehničkih sistema u laboratorijskim uslovima ili u fazi realne eksploatacije, kako za male tako i za velike uzorke, moguće je realizovati na osnovu dva principa [5, 8, 14]:

- određivanje pouzdanosti komponenti tehničkih sistema na osnovu prethodnog opredeljenja o pripadnosti eksperimentalnih podataka tačno određenom teorijskom zakonu raspodele i
- određivanje pouzdanosti komponenti tehničkih sistema na osnovu izbora teorijskog zakona raspodele kojim se najbolje aproksimiraju eksperimentalni podaci (prema karakteristikama teorijskih raspodela [6, 12-13], na osnovu komparativne analize [5, 7-8, 11, 15-17] itd.).

Predlog autora ovog rada je da se pouzdanost komponenti tehničkih sistema određuje prema drugom metodu.

2.2. Razvoj softverskih sistema za određivanje pouzdanosti komponenti tehničkih sistema na osnovu prethodnog opredeljenja o pripadnosti eksperimentalnih podataka tačno određenom teorijskom zakonu raspodele

Po ovom metodu pouzdanost, odn. funkcija raspodele otkaza, komponente tehničkog sistema određuje se tako što se prethodno opredelimo za određen teorijski zakon raspodele, koji se najčešće primenjuje u oblasti pouzdanosti komponenti tehničkih sistema. Prema literaturnim podacima kao funkcija raspodele otkaza komponenti tehničkih sistema najčešće se koristi Weibull-ova raspodela, normalna, log-normalna, eksponencijalna i td.

Softverski sistemi razvijeni od strane autora ovog rada po ovoj metodologiji su:

- RATSC-ED (Software system for Reliability Analysis of Technical System Components-Based on Exponential Distribution - Softverski sistem za analizu pouzdanosti komponenti tehničkih sistema na osnovu eksponencijalne raspodele);
- RATSC-WD (Software system for Reliability Analysis of Technical System Components-Based on Weibull Distribution - Softverski paket za analizu pouzdanosti komponenti tehničkih sistema na osnovu Weibull-ove raspodele);
- RATSC-ND (Software system for Reliability Analysis of Technical System Components-Based on Normal Distribution - Softverski paket za analizu pouzdanosti komponenti tehničkih sistema na osnovu normalne raspodele);
- RATSC-LND (Software system for Reliability Analysis of Technical System Components-Based on Log-Normal Distribution - Softverski paket za analizu pouzdanosti komponenti tehničkih sistema na osnovu log-normalne raspodele);
- RATSC-RD (Software system for Reliability Analysis of Technical System Components-Based on Rayleigh Distribution - Softverski paket za analizu pouzdanosti komponenti tehničkih sistema na osnovu Rayleigh-jeve raspodele) i
- RATSC-GD (Software system for Reliability Analysis of Technical System Components-Based on Gumbel (Extreme Value Type I) Distribution - Softverski paket za analizu pouzdanosti komponenti tehničkih sistema na osnovu Gumbel-ove raspodele).

Softverski sistemi: RATSC-ED, RATSC-WD, RATSC-ND, RATSC-LND i RATSC-RD originalno su razvijeni od strane autora ovog rada u periodu od 1987-1990. godine, a objašnjeni su u radovima [5, 8, 9, 23]. Svi navedeni softverski sistemi pisani su u FORTRAN 77 programskom jeziku, koji je detaljno objašnjen u knjizi [10].

Softverski sistem RATSC-GD originalno je razvijen od strane autora ovog rada u saradnji sa kolegom Prof. dr Ljubišom Papićem u periodu od 1987-1989. godine i objašnjen u radovima [21-22, 36], a početkom 1990-ih godina samostalno unapređen od strane autora ovog rada. Pisan je u FORTRAN 77 programskom jeziku od strane autora ovog rada. Listing ovog softverskog sistema prikazan je u doktorskoj disertaciji kolege Lj. Papića iz 1992. godine [35].

2.3. Razvoj softverskih sistema za određivanje pouzdanosti komponenti tehničkih sistema na osnovu izbora teorijskog zakona raspodele kojim se najbolje aproksimiraju eksperimentalni podaci

Postupak utvrđivanja funkcije pouzdanosti koja najbolje aproksimira eksperimentalne podatke zasniva se na veličini, odnosno obimu uzorka, vrednostima parametara i uslovima koji karakterišu određene teorijske zakone raspodele. Pri tome se mogu sresti uzroci bez grupisanja (takozvani mali uzorak kod kojeg je broj posmatranih elemenata $n \leq 20$ ili 30 ili 50 u zavisnosti od autora) i uzroci se grupisanjem (takozvani veliki uzorak kod kojeg je broj posmatranih elemenata $n > 20$ ili 30 ili 50) vrednosti obeležja slučajne promenljive. Grupisanjem vrednosti obeležja slučajne promenljive stvaraju se grupni razmaci ili intervali, koji najčešće treba da budu jednaki. Ponekad je u praksi to veoma teško postići, naročito kada je varijacioni razmak veliki.

Algoritamski pristup za određivanje pouzdanosti komponenti tehničkih sistema za zadate eksperimentalne vrednosti otkaza u fazi realne eksploatacije po ovom metodu, obuhvata sledeće opšte algoritamske korake, odn. sledeću proceduru [5, 8, 14]:

- unošenje vrednosti diskretne slučajno promenljive t_i ($i=1,2,\dots,n$) uzorka po slučajnom rasporedu iz datoteke koja je organizovana na nekoj od spoljnih memorija i nivo značajnosti α [%],
- ređanje vrednosti diskretne slučajne promenljive t_i ($i=1,2,\dots,n$) uzorka po rastućem rasporedu,
- utvrđivanje broja posmatranih elemenata i ako je $n \leq 20$ određivanje broja stanja za svaku vrednost, a ako je $n > 20$ određivanje grupnih intervala i broja stanja između granica intervala,
- utvrđivanje eksperimentalne raspodele i numeričkih statističkih karakteristika uzorka i uvrđivanje ponašanja funkcije intenziteta otkaza $\lambda(t)$,
- izbor teorijskog zakona raspodele koji najbolje aproksimira eksperimentalne podatke po predloženoj metodologiji,
- određivanje parametara teorijske prave (linearna regresija) u verovatnosnom papiru pomoću metode najmanjih kvadrata i ocena značajnosti koeficijenta korelacije,
- određivanje parametara teorijskog zakona raspodele i izračunavanje teorijskih pokazatelja pouzdanosti,
- provera saglasnosti eksperimentalnog i teorijskog modela pouzdanosti pomoću neparametarskih testova,
- grafička prezentacija rezultata obrade, odn. funkcija pouzdanosti i
- štampanje i/ili zapisivanje izlaznih podataka ili rezultata obrade u datoteku koja je organizovana na nekoj od spoljnih memorija.

Softverski sistemi razvijeni od strane autora ovog rada po ovoj metodologiji su:

- RATSC-CTD (Software system Reliability Analysis of Technical System Components on the Basis of Choice of Theoretical Distribution According to Characteristics of Theoretical Distributions, which in the best way Approximate Experimental Data - Softverski sistem za analizu pouzdanosti komponenti tehničkih sistema na osnovu izbora teorijske raspodele prema karakteristikama teorijskih raspodela, kojom se najbolje aproksimiraju eksperimentalni podaci) i
- RATSC-CA (Software system for Reliability Analysis of Technical System Components on the Basis of Choice of Theoretical Distribution - Based on Comparative Analysis of Different Theoretical Distributions - Softverski sistem za analizu pouzdanosti komponenti tehničkih sistema na osnovu komparativne analize različitih teorijskih raspodela).

2.3.1. Razvoj softverskog sistema RATSC-CTD

U ovom poglavlju prikazan je algoritamski pristup i metodologija (slika 2) za određivanje pouzdanosti komponenti tehničkih sistema, na osnovu izbora teorijske raspodele prema karakteristikama teorijskih raspodela, kojom se najbolje aproksimiraju eksperimentalni podaci, koji su korišćeni za razvoj softverskog sistema RATSC-CTD.

Osnovne statističke karakteristike za izbor teorijskog modela raspodele koji najbolje aproksimira eksperimentalne podatke, koje su korišćene kod softverskog sistema RATSC-CTD, su [6, 12-13]:

- srednje vreme bezotkaznog rada $\bar{t}$,
- medijana M_e ,
- standardna devijacija uzroka σ ,
- ponašanje funkcije intenziteta otkaza $\lambda(t)$ i
- parametar oblika Weibull-ovog zakona raspodele β .

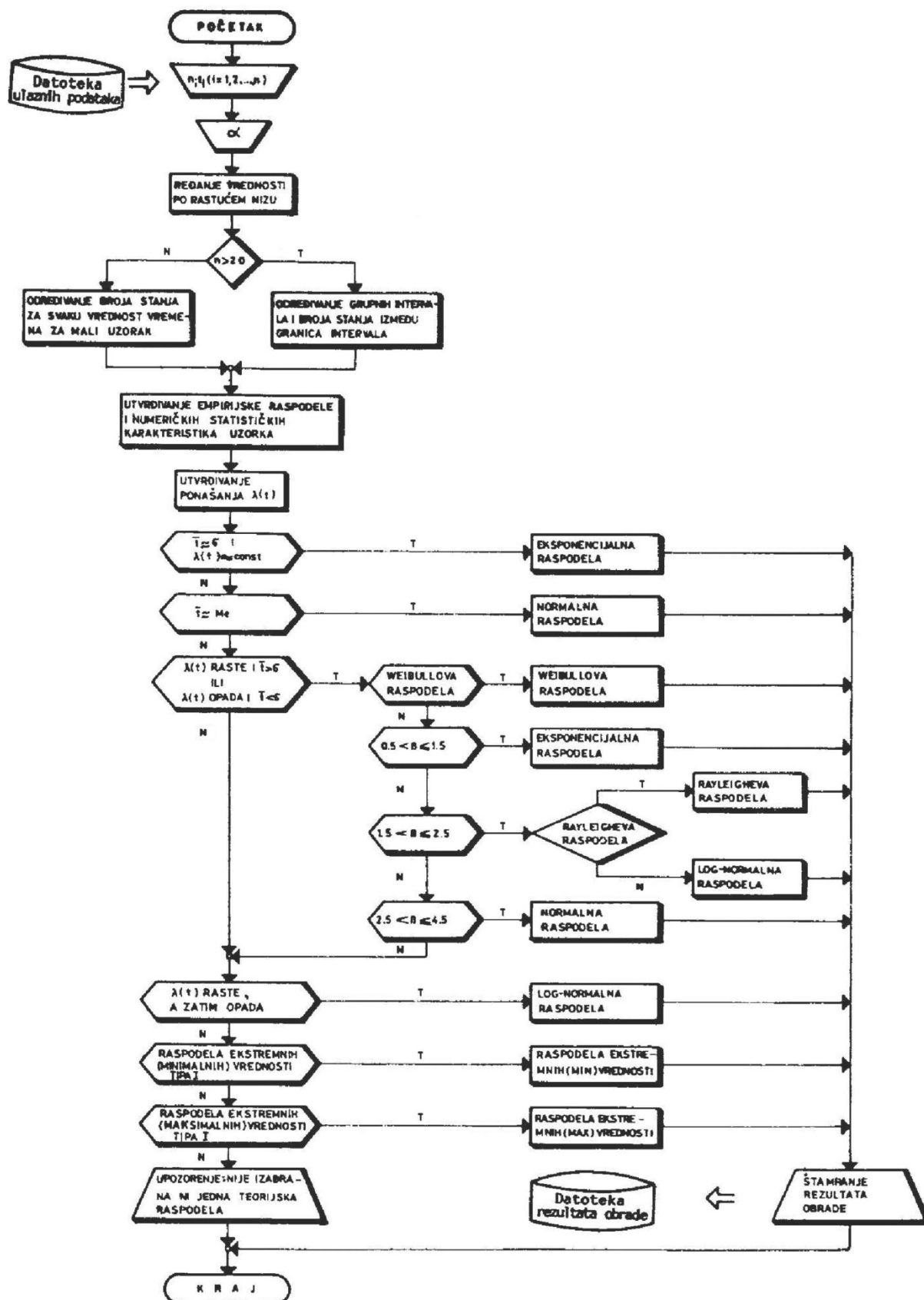
Algoritamski pristup i metodologija izbora teorijskog zakona raspodele koji najbolje aproksimira eksperimentalne podatke prema navedenim karakteristikama teorijskih raspodela, kojom se najbolje aproksimiraju eksperimentalni podaci, određuje se po sledećoj metodologiji (slika 2):

- ako je srednje vreme bezotkaznog rada približno jednako standardnoj devijaciji uzorka ($\bar{t} \approx \sigma$) i ako je funkcija intenziteta otkaza približno konstantna ($\lambda(t) \approx \text{const.}$) treba proveriti hipotezu o **eksponencijalnom zakonu raspodele**,
- ako je srednje vreme bezotkaznog rada približno jednako medijani ($\bar{t} \approx M_e$) treba proveriti hipotezu o **normalnom zakonu raspodele**,
- ako funkcija intenziteta otkaza $\lambda(t)$ raste tokom vremena i ako je srednje vreme bezotkaznog rada veće od standardne devijacije uzorka ($\bar{t} > \sigma$), treba proveriti hipotezu o **Weibull-ovom zakonu raspodele**. Parametar oblika Weibull-ove raspodele β utiče na oblik teorijskog zakona raspodele, tako da za:
 - $0,5 < \beta \leq 1,5$ treba proveriti hipotezu o **eksponencijalnom zakonu raspodele** (specijalno, za $\beta=1$ Weibull-ova raspodela se i svodi na eksponencijalnu),
 - $1,5 < \beta \leq 2,5$ treba proveriti hipotezu o **Rayleigh-evom zakonu raspodele**, a u slučaju da ista ne zadovolji, treba proveriti hipotezu o **logaritamsko-normalnom zakonu raspodele** (specijalno, za $\beta=2$ Weibull-ova raspodela približno i odgovara logaritamsko-normalnoj) i
 - $2,5 < \beta \leq 4,5$ treba proveriti hipotezu o **normalnom zakonu raspodele** (za vrednosti parametara β u ovim granicama Weibull-ova raspodela se sve više približava

normalnoj raspodeli tako da razlike postaju praktično zanemarljive, mada teorijski ovi zakoni raspodele nisu identični),

- ako funkcija intenziteta otkaza $\lambda(t)$ opada tokom vremena i ako je srednje vreme bezotkaznog rada manje od standardne devijacije uzorka ($\bar{t} < \sigma$) treba proveriti hipotezu o **Weibull-ovom zakonu raspodele** (ovo je slučaj kada je vrednost parametra $\beta < 1$),
- ako funkcija intenziteta otkaza $\lambda(t)$ raste a zatim opada tokom vremena treba proveriti hipotezu o **logaritamsko-normalnom zakonu raspodele**,
- ako nijedan od prethodnih uslova nije zadovoljen ili nijedna hipoteza nije prihvaćena a poznato je da eksperimentalni podaci predstavljaju:
 - minimume slučajne promenljive, treba proveriti hipotezu o **raspodeli ekstremnih (minimalnih) vrednosti tipa I** ili
 - maksimume slučajne promenljive, treba proveriti hipotezu o **raspodeli ekstremnih (maksimalnih) vrednosti tipa I** i
- ako nijedna hipoteza nije prihvaćena može da se izvede zaključak da nijedan teorijski zakon raspodele ne može dovoljno pouzdano da reprezentuje eksperimentalne podatke.

Inicijalna i uopštena metodologija za određivanje pouzdanosti komponenti tehničkih sistema sistema na osnovu izbora teorijske raspodele prema karakteristikama teorijskih raspodela, kojom se najbolje aproksimiraju eksperimentalni podaci od strane autora ovog rada u saradnji sa kolegom Prof. dr Ljubišom Papićem u periodu od 1988-1992. godine [18-20]. Ta verzija bila je uglavnom zasnovana na preporukama koje su prikazane u BS standardima [3, 4]. Znatno unapređena metodologija i realizacija softverskog sistema RATSC-CTD FORTRAN 77 programskom jeziku razvijena je od strane autora ovog rada u periodu od 1992-1995. godine [6, 12-12]. Softverski sistem RATSC-CTD po predloženoj metodologiji služi za proračunavanje najčešće korišćenih teorijskih zakona raspodele u oblasti pouzdanosti tehničkih sistema na bazi eksperimentalnih podataka u fazi realne eksploatacije. Program je rađen u FORTRAN 77 programskom jeziku na modulatornom principu, a sadrži: glavni program, 22 opšta potprograma i 6 datoteka sa sekvencijalnim pristupom. Glavni program sadrži samo ulaz podataka, proceduru izbora najboljeg teorijskog modela pouzdanosti i pozive potprograma. Svaki opšti potprogram čini jednu nezavisnu programsku celinu, odnosno jedan moduo. Kompletan program je dobro čitljiv, razumljiv i metodološki poučan, a testiran je na računarskom sistemu El-Honeywell DPS 6/95 u industriji IMK "14. oktobar" u Kruševcu.



Slika 2: Opšta grafička šema algoritma za određivanje pouzdanosti komponenti tehničkih sistema na osnovu izbora teorijske raspodele prema karakteristikama teorijskih raspodele, kojom se najbolje aproksimiraju eksperimentalni podaci

2.3.2. Razvoj softverskog sistema RATSC-CA

U ovom poglavlju prikazan je algoritamski pristup i metodologija (slika 3) za određivanje pouzdanosti komponenti tehničkih sistema, na osnovu izbora teorijske raspodele na osnovu komparativne analize različitih teorijskih raspodela, koji su korišćeni za razvoj softverskog sistema RATSC-CA.

Osnovne statističke karakteristike za izbor teorijske raspodele, odn. funkcije raspodele otkaza, komponenti tehničkih sistema kojom se najbolje aproksimiraju eksperimentalni podaci na osnovu komparativne analize, su:

- srednje vreme bezotkaznog rada $\bar{t}$,
- vreme bezotkaznog rada za verovatnoću 50 % $T_{50\%}$,
- vreme bezotkaznog rada za verovatnoću 90 % $T_{90\%}$,
- varijansa (disperzija) teorijske raspodele σ^2 ,
- srednja apsolutna-relativna procentualna greška raspodele (Mean Absolute-Relative Percentage Error - MARPE),
- računski χ^2 i tablična χ_{kr}^2 vrednost neparametarskog testa Pearsona i
- računski d i tablična d_{kr} vrednost neparametarskog testa Kolmogorov-Smirnova.

Teorijska raspodela sa najvećim vrednostima $\bar{t}$, $T_{50\%}$ i $T_{90\%}$ i ujedno najmanjim σ^2 , MARPE, χ^2 i d smatraće se najboljom teorijskom raspodelom ili teorijskom raspodelom koja najbolje aproksimira eksperimentalne podatke.

Softverski sistem RATSC-CA je originalno razvijen od strane autora ovog rada u periodu od 1999-2000. godine, a objašnjen je u radovima [5, 7-8, 11, 15-17]. Pisan je u FORTRAN 77 programskom jeziku od strane autora ovog rada.

3. Primer analize pouzdanosti komponenti tehničkih sistema na osnovu komparativne analize različitih teorijskih raspodela

Podaci za analizu Weibull-ove raspodele (Weibull distribution - WD) uzeti su na osnovu praćenja zastoja i otkaza u hidrosistemu bagera SchRs 800 iz evidencije o zastojima rudarske mehanizacije, u periodu od 2012 do polovine 2014. godine na "PO DRMNO" (tabela 1) [24].

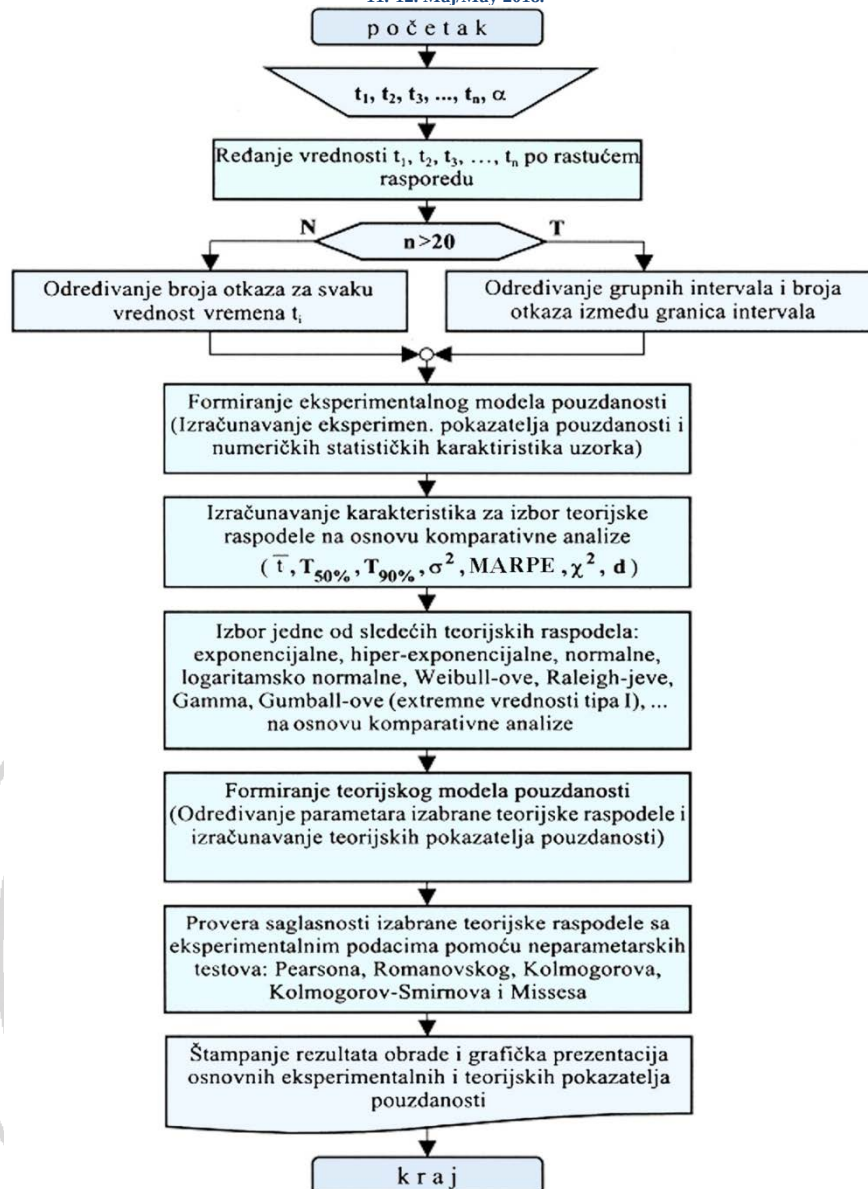
Vreme bezotkaznog rada hidrosistema bagera SchRs 800 mereno je u [h] i kretalo se u intervalu od 112 [h] ili $0.112 \cdot 10^3$ [h] do 923 [h] ili $0.923 \cdot 10^3$ [h].

Tabela 1: The results of the observation of time of work without failure of the hydro-system of excavator SchRs 800 has been measured in 10^3 [h]

0.149	0.112	0.448	0.165	0.645	0.923	0.587
0.288	0.362	0.316	0.470	0.324	0.261	0.154
0.178	0.670	0.261	0.769	0.578	0.302	0.490
0.594	0.480	0.525	0.375	0.420	0.542	0.774

Za navedene podatke iz tabele 1, pomoću softvera RATSC-CA, izračunati su pokazatelji eksperimentalne raspodele, parametri Weibull-ove raspodele, pokazatelji teorijske raspodele i neparametarski testovi za proveru saglasnosti Weibull-ovog modela pouzdanosti (tabela 2).

Vreme bezotkaznog rada hidrosistema bagera SchRs 800 kao ulazni parametar softvera predstavljeno je u 10^3 [h].



Slika 3: Opšta grafička šema algoritma za određivanje pouzdanosti komponenti tehničkih sistema na osnovu izbora teorijske raspodele na osnovu komparativne analize različitih teorijskih raspodela

Prvo je izračunat i usvojen broj grupnih intervala $k=6$, minimalna vrednost prvog intervala $t_{1min}=0,1 \cdot 10^3$ [h] i širina intervala $\Delta t=0,15 \cdot 10^3$ [h] i pokazatelji eksperimentalne raspodele ili eksperimentalnog modela pouzdanosti (tabela 2).

Tabela 2: Eksperimentalna raspodela i osnovni pokazatelji pouzdanosti hidrosistema bagera SchRs 800 mereno u 10^3 [h]

i	Grupni intervali	$t_i \cdot 10^3$ [h]	Δn	$f(t)$	$N(t)$	$F(t)$	$n(t)$	$R(t)$	$\lambda(t)$
1	0.100-0.250	0.175	5	0.1786	5	0.1786	23	0.8214	0.2174
2	0.250-0.400	0.325	8	0.2857	13	0.4643	15	0.5357	0.5333
3	0.400-0.550	0.475	7	0.2500	20	0.7143	8	0.2857	0.8750
4	0.550-0.700	0.625	5	0.1786	25	0.8929	3	0.1071	1.6667
5	0.700-0.850	0.775	2	0.0714	27	0.9643	1	0.0357	2.0000
6	0.850-1.000	0.925	1	0.0357	28	1.0000	0	0.0000	-

Vrednosti pokazatelja centralne tendencije eksperimentalnog modela pouzdanosti su: $R_x=0.811 \cdot 10^3$ [h]; $\bar{t}=0.4429 \cdot 10^3$ [h]; $Med=0.3464 \cdot 10^3$ [h]; $Mo=0.325 \cdot 10^3$ [h]; $\sigma=0.1979$; $CV=44.68$ %; $\beta_1=0.4917$; $\beta_2=2.591$ and $\gamma_2=-0.409$.

Pošto je $\bar{t}=0,4429 \cdot 10^3 > Me=0,3464 \cdot 10^3$ to je eksperimentalna raspodela zakrivljena u desno.

Pošto je koeficijent asimetrije $\beta_1=0,4917 > 0$ to je eksperimentalna raspodela pozitivna, odn. levo asimetrična.

Pošto je koeficijent spljoštenosti $\beta_2=2,591 < 3$, odn. koeficijent ekscesa $\gamma_2=-0,409 < 0$, to je eksperimentalna raspodela više spoljštena (šira) u odnosu na normalnu raspodelu.

Nadalje, pošto funkcija $\lambda(t)$ raste i pošto je $\bar{t}=0,4429 > \sigma=0,1979$ izračunati su pokazatelji teorijske Weivull-ove raspodele ili Weivull-ovog modela pouzdanosti.

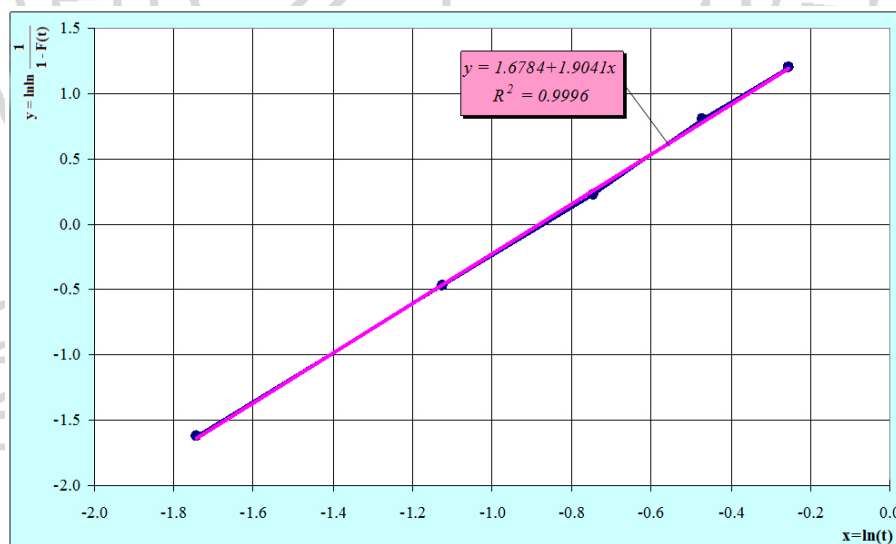
Na osnovu metode najmanjih kvadrata (least-squares method - LSM) i na osnovu linearizacije funkcije kumulativne raspodele $F(t)$ (tabela 3), određena je teorijska prava i u Weibull-ovom verovatnosnom papiru (Weibull probability plot - WPP) pouzdanosti (slika 4):

$$y = 1.6784 + 1.9041 \cdot x \quad (5)$$

sa koeficijentom korelacije $r=0,9998$ i koeficijentom determinacije $R^2=0,9996$.

Tabela 3: Linearizovana funkcija kumulativne raspodele $F(t)$ vremena u radu bez otkaza hidrosistema bagera SchRs 800

i	t_i	$x_i=\ln(t)$	$F(t)$	$y_i=\ln\ln(1/(1-F(t)))$
1.	0.175	-1.7430	0.1786	-1.6260
2.	0.325	-1.1240	0.4643	-0.4714
3.	0.475	-0.7444	0.7143	0.2254
4.	0.625	-0.4700	0.8929	0.8036
5.	0.775	-0.2549	0.9643	1.2040
6.	0.925	-	1.0000	



Slika 4: Teorijska prava u Weibull-ovom verovatnosnom papiru (Weibull probability plot - WPP)

Na osnovu jednačine (5), mogu se odrediti parametri Weibull-ove raspodele: $\beta=1.9041$ i $\eta=0.4142$.

Na osnovu parametara Weivull-ove raspodele β i η mogu se lako formirati funkcije osnovnih pokazatelja pouzdanosti hidrosistema bagera SchRs 800, i to u obliku:

- funkcija pouzdanosti:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{0.4142}\right)^{1.9041}} \quad (6)$$

- funkcije nepouzdanosti:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{0.4142}\right)^{1.9041}} \quad (7)$$

- funkcije gustine otkaza:

$$f(t) = 4.597055 \cdot \left(\frac{t}{0.4142}\right)^{0.9041} \cdot e^{-\left(\frac{t}{0.4142}\right)^{1.9041}} \quad (8)$$

- funkcije intenziteta otkaza:

$$\lambda(t) = 4.597055 \cdot \left(\frac{t}{0.4142}\right)^{0.9041} \quad (9)$$

Histogram i poligon osnovnih eksperimentalnih i teorijskih Weibull-ovih pokazatelja pouzdanosti hidrosistema bagera SchRs 800 prikazan je na slici 5.

Hipoteza o Weibull-ovom podelu pouzdanosti hidrosistema bagera SchRs 800 može se prihvatiti, za nivo značajnosti $\alpha=5$ [%], na osnovu testova: Pearson/a (χ^2), Kolmogorov-Smirnov/a (KS) i Cramér-von Mises/a (CvM) (tabela 4).

Tabela 4: Neparametarski testovi (za $\alpha=5$ [%]) za Weibull-ovu podelu pouzdanosti hidrosistema bagera SchRs 800

i	Naziv testa	k	Računska vrednost	Kritična vrednost	Rezultat
1.	Pearson-ov test	1	3.0608	3.8410	Hipoteza se prihvata
2.	Kolmogorov-Smirnov-ov test	28	0.0126	0.2499	Hipoteza se prihvata
3.	Cramér-von Mises-ov test	-	0.3097	0.4614	Hipoteza se prihvata

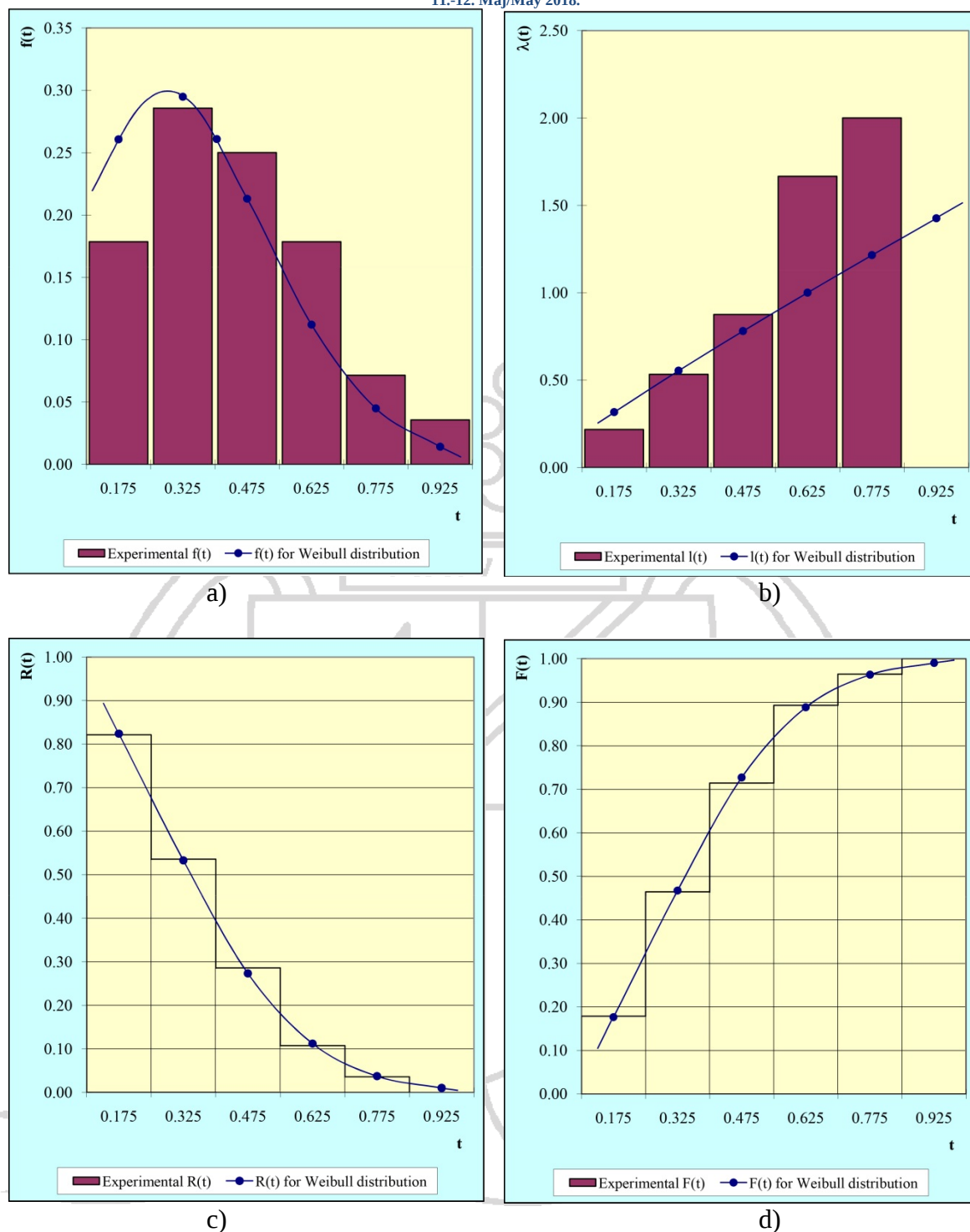
4. Zaključak

Određivanje pouzdanost komponenti tehničkih sistema u laboratorijskim uslovima ili u fazi realne eksploatacije moguće je odrediti: na osnovu prethodnog opredeljenja o pripadnosti eksperimentalnih podataka tačno određenom teorijskom zakonu raspodele i na osnovu izbora teorijskog zakona raspodele kojim se najbolje aproksimiraju eksperimentalni podaci (što je predlog autora ovog rada).

Prikazan algoritamski pristup, metodologija i softverski sistem RATSC-CA određivanja funkcija pouzdanosti komponenti tehničkih sistema na osnovu komparativne analize različitih teorijskih raspodela je opšteg karaktera i može se primeniti kod analize pouzdanosti kako različitih komponenti tako i složenih sistema.

Trenutne aktivnosti u okviru softverskih sistema RATSC-CTD i RATSC-CA su usmerene na pisanju ovih softverskih sistema u C++ programski jezik, dodavanju biblioteka i procedura za crtanje osnovnih funkcija pouzdanosti i novih teorijskih raspodela.

Teorijski Weibull-ov model pouzdanosti dobro reprezentuje eksperimentalne podatke (primer iz poglavlja 3) pri praćenju vremena U RADU hidrosistema bagera SchRs 800.



Slika 5: Histogram i poligon eksperimentalnih i teorijskih Weibull-ovih pokazatelja pouzdanosti hidrosistema bagera SchRs 800

a) funkcija $f(t)$; b) funkcija $\lambda(t)$; c) funkcija $R(t)$; d) funkcija $F(t)$.

Literatura

- [1] Bazovsky, I.: *Reliability theory and practice*. Mineola (New York - USA): Dover Publications, 2004. – 304 pp. ISBN 978-0-48643867-2.

- [2] Birolini, A.: *Reliability engineering: Theory and practice*. Berlin-Heidelberg (Germany): Springer-Verlag GmbH, 2010. – 610 pp. ISBN 978-3-642-14951-1.
- [3] [BS 5760-1:1996](#) *Reliability of systems, equipment and components. Dependability programme elements and tasks*. London (United Kingdom): British Standards Institution (BSI), 1996. – 44 pp. ISBN 0-580-25812-2.
- [4] [BS 5760-2:1994](#) *Reliability of systems, equipment and components. Guide to the assessment of reliability*. London (United Kingdom): British Standards Institution (BSI), 1994. – 108 pp. ISBN 0-580-22808-8.
- [5] Dašić, P.: Algorithm approach to determination of reliability of components technical systems. Plenary and Invitation paper. In: *Proceedings of the 5th International Conference "Research and Development in Mechanical Industry (RaDMI-2005)"*, Vrnjačka Banja, Serbia and Montenegro, 04-07 September 2005. Trstenik: High Technical Mechanical School, 2005, pp. 34-45. ISBN 978-86-83803-20-0.
- [6] Dašić, P.: Algorithm approach to determination of reliability of construction machinery components. In: *Proceedings of the International Conference on Engineering Design (ICED'90), Volume 3*, Dubrovnik, Croatia, 28-31 august 1990. Zuerich (Swiss): WDK Heurista, 1990, pp. 1433-1440. ISBN 3-85693-023-X.
- [7] Dašić, P.: Determination of reliability of ceramic cutting tools on the basis of comparative analysis of different functions distribution. *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 18, Issue 4-5 (2001), pp. 433-446. ISSN 0265-671X.
- [8] Dašić, P.: Development of software systems for reliability analysis of the technical system components. *Journal of Research and Development in Mechanical Industry*, Vol. 9, Issue 1 (2017), pp. 1-50. ISSN 1821-3103.
- [9] Dašić, P.: Examples of analysis of different functions of cutting tool failure distribution. *Tribology in Industry*, Vol. 21, No. 2 (June 1999), pp. 59-67. ISSN 0354-8996.
- [10] Dašić, P.: *FORTTRAN 77*. Kruševac: Viša tehnološko tehnička škola i Trstenik: Viša tehnička mašinska škola, 1990. – 268 str. COBISS.SR-ID 175882759.
- [11] Dašić, P.: Komparativna analiza različitih modela pouzdanosti komponenti tehničkih sistema na primeru reznog alata od kubnog bor nitride. U: *Zborniku radova na CD-ROM-u konferencije o održavanju (KOD-2005)*; Bar; 27-30 jun 2005. Podgorica: Društvo održavalaca sredstava za rad Crne Gore (DOSRCG) i Mašinski fakultet, Centar za Kvalitet, 2005, **Članak br.** : str. 1-14.
- [12] Дашич, П.: Методология определения надёжности функциональных элементов технических систем на основе оптимального выбора теоретического закона распределения. *Надёжность и контроль качества*, Год 23, №. 3 (1991), стр. 46-51. ISSN 0130-6898.
- [13] Dašić, P.: Određivanje pouzdanosti komponenti tehničkih sistema na osnovu izbora najboljeg teorijskog zakona raspodele pomoću računara. *Časopis Tehnika*, god. 45, br. 9-10 (1990), str. 565-571. ISSN 0040-2176 ili *separat Mašinstvo*, god. 39, br. 9-10 (1990), str. M1-M7. ISSN 0461-2531.
- [14] Dašić, P.: Određivanje pouzdanosti komponenti tehničkih sistema na osnovu komparativne analize različitih teorijskih raspodela. U: *Zborniku radova Naučno-stručnog skupa Istraživanje i razvoj mašinskih elemenata i sistema (IRMES 2000)*; Kotor; 14-15 septembar 2000. Podgorica: Mašinski fakultet, 2000, str. 371-376.
- [15] Dašić, P.: Reliability analysis of the cutting tools made of multi-coated carbides. In: *Proceedings of 3rd International Conference "THE Coatings in Manufacturing Engineering and EUREKA Partnering Event"*; Thessaloniki, Greece; 28-29 November 2002. Thessaloniki (Greece): Aristoteles University Thessaloniki, Laboratory for

- Machine Tools and Manufacturing Engineering, 2002, pp. 91-100. ISBN 978-960-431-826-1.
- [16] Dašić, P. & Đorđević, A.: Analysis of different functions of cutting tools failure distribution at the processing on the deep boring. *Journal of the Balkan Tribological Association*, Vol. 9, No. 3 (2003), pp. 370-380. ISSN 1310-4772.
- [17] Dašić, P.; Natsis, A. & Petropoulos, G.: Models of reliability for cutting tools: Examples in manufacturing and agricultural engineering. *Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 54, No. 2 (February 2008), pp. 122-130. ISSN 0039-2480.
- [18] Dašić, P. & Papić, Lj.: Analiza pouzdanosti reznog alata. *Tribologija u industriji*, Vol. 11, br. 3 (septembar 1989), str. 69-72. ISSN 0351-1642.
- [19] Dašić, P. & Papić, Lj.: Ocena parametarske pouzdanosti reznog alata na bazi izbora najbolje raspodele postojanosti. U: *Zborniku radova XV JUPITER konferencije (XI Jugoslovenski simpozijum NU-ROBOTI-FTS)*; Cavtat, Hrvatska; 9-10 februar 1989. Beograd: Mašinski fakultet i JUPITER asocijacija, 1989, str. 115-122.
- [20] Dašić, P. & Papić, Lj.: Određivanje pouzdanosti reznog alata na osnovu izbora najbolje raspodele u fazi realne eksploatacije. U: *Zborniku na trudovi XXII Sovetovanja za proizvodno mašinstvo na Jugoslavija*, knjiga I; Ohrid, Makedonija; 24-26 maj 1989. Skopje: Mašinski fakultet, 1989, str. 77-86. COBISS.SR-ID 59666183.
- [21] Dašić, P. & Papić, Lj.: Pouzdanost reznog alata od keramike primenom Gumbelovog modela prognoze ekstremnih vrednosti. U: *Zborniku radova JUREMA (IX Međunarodno savjetovanje BIAM 88)*; Zagreb, Hrvatska; 13-15 jun 1988. Zagreb (Hrvatska): JUREMA, Vol. 33, Svezak 4 (1988), str. 351-354.
- [22] Dašić, P. & Papić, Lj.: Primena računara u oblasti Gumbelovog modela prognoze ekstremnih vrednosti. *Primenjena nauka*, Vol. 5, br. 17 (1989), str. 40-47. ISSN 0352-5481.
- [23] Dašić, P.; Stanić, J. & Ječmenica, R.: Određivanje pouzdanosti reznog alata na savremenim obradnim sistemima. U: *Zborniku radova 1. Jugoslovenske konferencije o tribologiji (YUTRIB 89)*; Kragujevac; 20-22 septembar 1989. Urednici: Miodrag Lazić i Bogdan Nedić. Kragujevac: Jugoslovenski komitet za tribologiju i Mašinski fakultet, 1989, str. 212-215. COBISS.SR-ID 37715468 i 6830082.
- [24] Dašić, P.; Živković, M. & Karić, M.: Reliability analysis of the hydro-system of excavator SchRs 800 using Weibull distribution. *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 806 (2015), pp. 173-180. ISSN 1660-9336 and ISBN 978-3-03835-751-3. doi: [10.4028/www.scientific.net/AMM.806.173](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.806.173).
- [25] Dhillon, B.S.: *Design reliability: Fundamentals and applications*. Boca Raton (Florida – USA): Chapman and Hall/CRC Press, 2002. – 416 pp. ISBN 978-0-8493-1465-0.
- [26] Ebeling, C.E.: *An introduction to reliability and maintainability engineering*. New York (New York – USA): McGraw-Hill Inc., 2004. – 486 pp. ISBN 978-0-07-042138-7.
- [27] Gnedenko, B.V.; Pavlov, I.V. and Ushakov, I.A.: *Statistical reliability engineering*. Hoboken (New Jersey – USA): John Wiley & Sons Inc., 1999. – 528 pp. ISBN 978-0-471-12356-9.
- [28] Halder, A. & Mahadevan, S.: *Probability, reliability and statistical methods in engineering design*. New York (New York – USA): John Wiley & Sons Inc., 2000. – 320 pp. ISBN 978-0-471-33119-3.
- [29] [ISO 2394:1998](#) *General principles on reliability for structures*. Geneve (Switzerland): International Organization for Standardizations (ISO), 1998. – 73 pp.
- [30] [ISO/IEC 2382-14:1997](#) *Information technology -- Vocabulary -- Part 14: Reliability, maintainability and availability*. Geneve (Switzerland): International Organization for Standardizations (ISO), 1997. – 18 pp.

- [31] Ivanović, G.; Stanivuković, D. & Beker, I.: *Pouzdanost tehničkih sistema*. Beograd: Mašinski fakultet i Vojna akademija i Novi Sad: Fakultet tehničkih nauka, 2010. – 441 str. ISBN 978-86-7892-247-3.
- [32] Kececioglu, D.B.: *Reliability engineering handbook*. Vol. 1. Lancaster (Pennsylvania – USA): DEStech Publications Inc., 2002. – 720 pp. ISBN 978-1-932078-00-8.
- [33] Kececioglu, D.B.: *Reliability engineering handbook*. Vol. 2. Lancaster (Pennsylvania – USA): DEStech Publications Inc., 2002. – 576 pp. ISBN 978-1-932078-01-5.
- [34] Meeker, W.Q. and Escobar, L.A.: *Statistical methods for reliability data*. New York (New York – USA): John Wiley & Sons Inc., 1998. – 712 pp. ISBN 978-0-471-14328-4.
- [35] Papić, Lj.: Razvoj i automatizacija postupaka efektivnih ispitivanja za ocjenu pouzdanosti tehnoloških sistema u industriji. Doktorska disertacija. Novi Sad: Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, 1992. – 193 str. COBISS.SR-ID 53036807.
- [36] Papić, Lj. & Dašić, P.: Estimate of reliability characteristics and maintenance of building machines by applying statistics of extreme values. In: *Reliability Data Collection and Use in Risk and Availability Assessment (Proceedings of the 6th EuReData Conference; Siena, Italy; 15-17 March 1989)*. Edited by Viviana Colombari. Berlin-Heidelberg (Germany): Springer-Verlag GmbH, 1989, pp. 802-809. ISBN 978-3-642-83723-4. doi: [10.1007/978-3-642-83721-0_66](https://doi.org/10.1007/978-3-642-83721-0_66).
- [37] Pham, H.: *Handbook of reliability engineering*. London (United Kingdom): Springer-Verlag London Ltd., 2003. – 663 pp. ISBN 978-1-85233-453-6.
- [38] Ramović, R.M.: *Pouzdanost sistema: Elektronskih, telekomunikacionih i informacionih*. Beograd: Katedra za Mikroelektroniku i tehničku fiziku, 2005. - 249 str.
- [39] Trivedi, K.S.: *Probability and statistics with reliability, queuing and computer science applications*. 2nd Edition. Hoboken (New Jersey – USA): John Wiley & Sons Inc., 2001. – 848 pp. ISBN 978-0-471-33341-8.
- [40] Ushakov, I.A. & Harrison, R.A.: *Handbook of reliability engineering*. Hoboken (New Jersey – USA): John Wiley & Sons Inc., 1994. – 704 pp. ISBN 978-0-471-57173-5.
- [41] Wang, H. & Pham, H.: *Reliability and optimal maintenance*. London (United Kingdom): Springer-Verlag London Ltd., 2006. – 345 pp. ISBN 978-1-84628-324-6.