



Univerzitet u Novom Sadu
Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin", Zrenjanin



MODELI OBEZBEĐENJA POUZDANOSTI SLOŽENIH POSTROJENJA U TERMoeLEKTRANAMA

RELIABILITY ENSURING MODELS OF COMPLEX FACILITIES IN THERMAL POWER PLANTS

- DOKTORSKA DISERTACIJA -



Kandidat:
Mr Dragan A. Milošević

Zrenjanin, 2015.
Univerzitet u Novom Sadu



Univerzitet u Novom Sadu
Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin", Zrenjanin



MODELI OBEZBEĐENJA POUZDANOSTI SLOŽENIH POSTROJENJA U TERMOELEKTRANAMA

RELIABILITY ENSURING MODELS OF COMPLEX FACILITIES IN THERMAL POWER PLANTS

- DOKTORSKA DISERTACIJA -

Mentor:
Prof. dr Živoslav Ž. Adamović

Kandidat:
Mr Dragan A. Milošević

Zrenjanin, 2015.
Univerzitet u Novom Sadu

**UNIVERZITET U NOVOM SADU
TEHNIČKI FAKULTET „MIHAJLO PUPIN” ZRENJANIN**

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj: RBR	
Identifikacioni broj: IBR	
Tip dokumentacije: TD	Monografska publikacija
Tip zapisa: TZ	Tekstualni štampani zapis
Vrsta rada: VR	Doktorska disertacija
Autor: AU	Mr Dragan A. Milošević
Mentor: MN	Prof. dr Živoslav Adamović, redovni profesor
Naslov rada: NR	Modeli obezbeđenja pouzdanosti složenih postrojenja u termoelektranama
Jezik publikacije: JP	Srpski (latinica)
Jezik izvoda: JI	Srpski/engleski
Zemlja publikovanja: ZP	Srbija
Uže geografsko područje: UGP	AP Vojvodina
Godina: GO	2015.
Izdavač: IZ	Autorski reprint
Mesto i adresa: MA	TF „Mihajlo Pupin”, Đ. Đakovića b.b., Zrenjanin, Srbija

Fizički opis rada:
FO

Br. poglavlja	Br. stranica	Br. tabela	Br. slika	Br. referenci	Br. priloga
9	260	62	179	208	6

Naučna oblast:
NO Industrijsko inženjerstvo

Naučna disciplina:
ND Tehnologija održavanja
pouzdanosti mašina

Predmetna odrednica/ključne reči:
PO Pouzdanost, model, složeno postrojenje

UDK:

Čuva se:
ČU U biblioteci TF „Mihajlo Pupin”, Zrenjanin

Važna napomena:
VN

Izvod:
IZ Ova studija ima za cilj da prikaže mogućnost generisanja modela obezbeđenja pouzdanosti složenih postrojenja u termoelektranama.

Datum prihvatanja teme od strane NN veća:
DP 29.12.2010.

Datum odbrane:
DO

Članovi komisije (titula / ime i prezime / zvanje / naziv organizacije / status)
KO

- Predsednik: **Prof. dr Miroslav Lambić**, redovni profesor, uža naučna oblast: Industrijsko inženjerstvo, 1997. god., Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin”, Zrenjanin.
- Član: **Prof. dr Branko Škorić**, redovni profesor, uža naučna oblast: Tehnologija oblikovanja površina, 2010. god., Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad.
- Član: **Prof. dr Dragan Milanović**, redovni profesor, uža naučna oblast: Industrijsko inženjerstvo, 2010. god., Mašinski fakultet, Beograd.
- Član: **Prof. dr Slavica Prvulović**, vanredni profesor, uža naučna oblast: Industrijsko inženjerstvo, 2012. god., Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin”, Zrenjanin.
- Član - mentor: **Prof. dr Živoslav Adamović**, redovni profesor, uža naučna oblast: Industrijsko inženjerstvo, 1995. god., Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin”, Zrenjanin.

**UNIVERSITY OF NOVI SAD
TECHNICAL FACULTY „MIHAJLO PUPIN” ZRENJANIN**

KEY WORD DOCUMENTATION

Acdecession number:

ANO

Identification number:

INO

Document type:

DT

Monographic documentation

Type of record:

TR

Textual printed material

Contents code:

CC

Doctoral thesis

Author:

AU

MSc Dragan A. Milošević

Mentor:

MK

Ph. D Živoslav Ž. Adamović, full professor

Title:

TI

Reliability Ensuring Models
of Complex Facilities in
Thermal Power Plants

Language of text:

LT

Serbian

Language of abstract:

LA

English / Serbian

Country of publication:

CP

Serbia

Lacality of publication:

LP

AP Vojvodina

Publication Year:

PY

2015.

Publisher:

PU

The author's reprint

Publication place:

PP

Technical faculty "Mihajlo Pupin",
Đure Đaković b.b., Zrenjanin, Serbia

Physical description:
PD

No. of chapters	No. of pg.	No. of tables	No. of pictures	No. of reference	No. of additional lists
9	260	62	179	208	6

Scientific field:
SF Industrial engineering

Scientific discipline:
SD Maintenance technology of reliability
of machines

Subject/Key Words:
SKW Technical system, Reliability, Software

Holding Data:
HD In the library of Technical faculty „Mihajlo
Pupin”, Zrenjanin

Note:
N

Abstract:
AB The goal of this study is to show the
possibility of generating reliability
ensuring models of complex facilities in
thermal power plants.

Accepted by the Scientific Board on:
AS 29.12.2010.

Defended on:
DE

Thesis defended board: (Degree / Name and Surname / Title / Faculty)
DB

- President: PhD Miroslav Lambić, full professor at the Technical Faculty „Mihajlo Pupin” in Zrenjanin, University in Novi Sad,
- Member: PhD Branko Škorić, full professor at the Faculty of Technical Science, Novi Sad,
- Member: PhD Dragan D. Milanović, full professor at the Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade,
- Member: PhD Slavica Prvulović, associate professor at the Technical Faculty „Mihajlo Pupin” in Zrenjanin, University in Novi Sad,
- Member - mentor: PhD Živoslav Adamović, full professor at the Technical Faculty „Mihajlo Pupin” in Zrenjanin, University in Novi Sad

PREDGOVOR

Eksploataciona istraživanja u okviru doktorske disertacije su obavljena u PD "Termoelektrane i kopovi Kostolac" doo, Kostolac i PD "Termoelektrane Nikola Tesla" doo, Obrenovac u vremenskom periodu od 2011. do 2014. godine. Ona su deo objavljivanih naučnih radova sa mentorom Prof. dr Živoslavom Adamovićem kao i same doktorske disertacije.

Profesor Živoslav Adamović je u vezi sa disertacijom predložio temu, rukovodio radom, davao sugestije i pravce istraživanja, nesebično pomagao svaki domen rada i time omogućio najkraći mogući vremenski put od početka ka kraju izrade disertacije koja je iziskivala puno vremena i truda. Bez ovakve pomoći, disertacija ne bi ugledala svetlost dana pod svim realnim okolnostima. Ne samo zbog svega ovde navedenog već i onoga što nije napisano u vidu ljudske nesebične podrške koja se rečima ili bez njih može dobiti, pa i zbog onoga što ne može biti napisano, svoju neizmernu zahvalnost dugujem svom mentoru Prof. dr Živoslavu Adamoviću.

Moja zahvalnost postoji i prema rukovodiocima preduzeća u kojima su radena istraživanja i koji su nesebično otvarali ne uvek laka vrata koja su vodila potrebnim podacima i informacijama da bi disertacija ugledala svetlost dana.

Iskrenu zahvalnost dugujem i svim saradnicima u oblasti nauke koji su puno svog truda i vremena uložili u zajednički rad, podršku i razumevanje.

Neprocenjivo sam zahvalan svojoj porodici a najviše ocu koji mi je trasirao put i bio svaka potpora i logistika radu i željama i bez čije pomoći ne bih ni krenuo ni istrajao na ovom putu.

Prijateljima koji su mi pomogli, čitali moju disertaciju i kada i mi je bilo teško naći vremena i za sebe, rešavali moje probleme u disertaciji zajedno sa mnom, pitali za moj rad i kada mi nije bilo lako da istrajem, razumeli moja neraspoloženja i slabosti.

Svima koje volim i koji me vole, kojima sam nedostajao i koji su mi nedostajali za vreme uloženo u ovaj rad.

Ponajviše hvala Bogu koji me drži, nosi, nadahnjuje i pokreće.

Zrenjanin, 2015. godine

SADRŽAJ

PREDGOVOR

REZIME	1
SUMMARY	3
1. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA	5
1.1. KONCEPTI ODRŽAVANJA	8
1.2. POLITIKA OPTIMIZACIJE ODRŽAVANJA	9
1.2.1. Politika optimizacije zasnovane na troškovima	9
1.2.2. Politika optimizacije zasnovana na riziku	10
1.2.3. Kombinovana politika optimizacije	10
1.3. PROCENA I ANALIZA POUZDANOSTI	10
1.3.1. Dijagnostika stanja i otkaza	11
1.3.2. Stablo otkaza i analiza uzroka	11
1.3.3. FMECA metod	12
1.3.4. Blok dijagram pouzdanosti	12
1.3.5. Monte Carlo metode	13
1.3.6. Osnovni principi verovatnoće	13
1.3.7. Markovljeva teorija	15
1.3.8. Poasonov proces	16
1.3.9. Modeli na bazi dijagnostika stanja	17
1.3.10. Bajesova teorija	18
1.3.11. Ostali modeli	19
1.3.12. Diskusija	21
2. METODOLOŠKI KONCEPT	24
2.1. PROBLEM ISTRAŽIVANJA	24
2.2. PREDMET ISTRAŽIVANJA	24
2.3. CILJ ISTRAŽIVANJA	25
2.4. HIPOTEZE ISTRAŽIVANJA	26
2.5. NAUČNA I DRUŠTVENA OPRAVDANOST ISTRAŽIVANJA	28
2.6. METODE ISTRAŽIVANJA	29
2.7. ORGANIZACIJA ISTRAŽIVANJA	30
3. TEORIJSKA ISTRAŽIVANJA	32
3.1. POUZDANOST SLOŽENIH TEHNIČKIH SISTEMA	32
3.1.1. Pouzdanost tehničkih sistema	32
3.1.2. Vrste složenih tehničkih sistema	40
3.1.3. Pouzdanost složenih tehničkih sistema	40
3.1.4. Proračun pouzdanosti kompleksnog sistema	43
3.1.5. Predikcija pouzdanosti sistema sa preventivnim održavanjem	46

3.2. RAZVIJENI MODELI POUZDANOSTI SLOŽENIH POSTROJENJA U SVETU	47
3.2.1. SSA (Split System Approach) KONCEPT	47
3.2.2. Modelovanje	48
3.2.3. Interaktivni otkazi	56
3.3. RAZVOJ NOVIH MODELA POUZDANOSTI SLOŽENIH TEHNIČKIH SISTEMA U TERMOELEKTRANA	58
3.3.1. Dekomponovanje sistema	61
3.3.2. Model složenog tehničkog sistema sa nepopravljivim komponentama	62
3.3.3. Formiranje modela za složeni sistem sa popravljivim komponentama (korektivno održavanje)	74
3.3.4. Formiranje modela za složeni sistem sa popravljivim komponentama (kombinovano održavanje)	79
3.3.4.1. Simulacioni model pouzdanosti za perfektno održavanje komponenti	79
3.3.4.2. Simulacioni model pouzdanosti za imperfektno održavanje komponenti	89
3.3.4.3. Proračun parametara imperfektno održavanih komponenti	90
3.3.4.4. Simulacija pouzdanosti imperfektno održavanih komponenti rotornog bagera	96
3.3.4.5. Proračun parametara perfektno održavanih komponenti	101
3.3.5. Formiranje modela sa Vejbulovom troparametarskom raspodelom..	104
3.3.5.1. Primer	106
3.3.6. Formiranje modela sa postojanjem interaktivnih otkaza	113
4. EKSPOLATACIONA ISTRAŽIVANJA	129
4.1. ISTORIJSKI PODACI I DEKOMPONOVANJE TEHNIČKIH SISTEMA U TERMOELEKTRANAMA	130
4.1.1. Tračni transporter sistema BTO5 na površinskom kopu Drmno u PD „Termoelektrane i kopovi Kostolac“ DOO, Kostolac.....	130
4.1.2. Rotorni bager 1200x24/4x0 (400kW) + VR koji radi na površinskom kopu uglja RB Kolubara	132
4.1.3. Blokovi B1 i B2 termoelektrane Kostolac B.....	133
4.2. IMPLEMENTACIJA SOPSTVENIH MODELA OBEZBEĐENJA POUZDANOSTI SLOŽENIH POSTROJENJA U TERMOELEKTRENAMA	134
4.2.1. Tračni transporter sistema BTO5 na površinskom kopu Drmno u PD "Termoelektrane i kopovi Kostolac" doo, Kostolac	134
4.2.2. Rotorni bager 1200x24/4x0 (400kW) + VR koji radi na površinskom kopu uglja RB Kolubara	151
4.2.3. Blokovi B1 i B2 termoelektrane Kostolac B	156

5. REZULTATI ISTRAŽIVANJA	172
5.1. KLJUČNI REZULTATI ISTRAŽIVANJA	172
5.1.1. Tračni transporter sistema BTO5 na površinskom kopu Drmno u PD "Termoelektrane i kopovi Kostolac" doo, Kostolac	172
5.1.2. Rotorni bager 1200x24/4x0 (400kW) + VR koji radi na površinskom kopu uglja RB Kolubara	179
5.1.3. Blokovi B1 i B2 termoelektrane Kostolac B	186
5.2. DOKAZIVANJE GLAVNE HIPOTEZE	192
5.3. UPOREĐIVANJE REZULTATA ISTRAŽIVANJA SA SLIČNIMA U SVETU	194
6. ZAKLJUČAK	199
6.1. OPŠTE.....	199
6.2. UNIVERZALNI DOPRINOS	207
6.3. DOPRINOS NAUCI	208
6.4. DRUŠTVENA KORIST	209
6.5. HIPOTEZA DOKAZANA	211
PREDLOG DALJIH ISTRAŽIVANJA	212
LITERATURA	215
PRILOZI	226

REZIME

Doktorska disertacija se bavi problematikom formiranja modela obezbeđenja pouzdanosti složenih postrojenja u termoelektranama. Pošto se iznesu osnovne činjenice koje se odnose na pouzdanost i modelovanje pouzdanosti, te ukaže na vrste modela koje su razvijene u dosadašnjim istraživanjima, pristupa se razvoju sopstvenih modela pouzdanosti složenih tehničkih sistema. Može se reći da se u širem smislu razmatra modelovanje tehničkih sistema, a u užem modelovanje konkretnih postrojenja u termoelektranama. Sužavanjem objekata koji se modeluju dobijaju se modeli koji opisuju stanja specifičnih tehničkih sistema. Složenost tehničkih sistema i brojnost akcija održavanja koje se na njima sprovode, naročito preventivnih jer su sistemi popravljivi, čine otežavajuće faktore za definisanje modela pouzdanosti. Kada je u pitanju složenost, ona se oslikava i u velikom broju komponenti, podsistema, sklopova, podsklopova i elemenata sistema, ali i u njihovoj raznovrsnosti.

Dakle, možemo govoriti o složenosti sistema prema broju komponenata koje ga čine kao i složenosti prema vrsti komponenata. Sama brojnost delova sistema nameće pitanja izvodljivosti proračuna kao adekvatnog dekomponovanja sistema, posebno u uslovima malog broja otkaza. Svaki od delova sistema koji je druge vrste, zahteva drugačije parametre raspodele verovatnoće pojave otkaza (ukoliko model obuhvata pojave otkaza na ovim delovima) ili zahteva drugačiju teorijsku raspodelu pojave otkaza ili čak i ceo novi model. Ako se uzme u obzir i eventualna potreba da se podaci vremenski povežu u što kraćim intervalima radi preciznosti proračuna, onda se nailazi na nove prepreke da se model dobro postavi i izvrše adekvatni proračuni u razumnom vremenskom roku.

Složeni tehnički sistemi koji se razmatraju u okviru ove disertacije su skupi, njihovo vreme zastoja nanosi velike proizvodne gubitke te na njima postoji potreba za velikim brojem preventivnih akcija održavanja. Posebna pažnja je posvećena velikim periodičnim opravkama – remontima. Neretko kao posledica ovih potreba, dolazi do pojave uzastopnih preventivnih akcija, zbog čega se lako gubi uvid u trenutno stanje tehničkog sistema i njegovu pouzdanost, te modeli, dakle, moraju uzeti u obzir i ovu činjenicu.

Dodatnu teškoću za modelovanje pouzdanosti predstavljaju i pojave imperfektnih popravki što znači nedovođenje pouzdanosti sistema na najviši nivo a koje najčešće nastaju kao posledica opravke na samo jednom delu sistema. One u modelima mogu biti obuhvaćene i kroz pojavu promene nivoa pouzdanosti (povećanja, stagnacije, smanjenja), ali i kroz promene rizika pojave otkaza i/ili funkcije koja ga opisuje.

Modeli moraju obuhvatiti i što bolje opisivati realno stanje tehničkog sistema te se postavlja i pitanje interakcije među komponentama sistema i definisanje odnosa u smislu posledica koje otkaz jednog dela sistema može izazvati na drugom delu sistema u smislu promene pouzdanosti.

U tehnološkom smislu, doprinos disertacije se ogleda u aplikaciji modela pouzdanosti kroz primenu metoda simulacije za izbor najboljih parametara funkcionisanja komponenata i sklopova, sa aspekta njihove pouzdanosti, što bi se dokazalo eksperimentalnim metodama (upotrebom sakupljenih podataka i pohranjenih podataka iz prošlosti). Analiza pouzdanosti na bazi formiranih modela treba da doprinese

efikasnom i što jednostavnijem određivanju parametara za donošenje relativnih odluka za pouzdanost složenih tehničkih sistema. Ovi parametri mogu vremenski definisati donošenje odluka o akcijama održavanja na bazi potrebnog nivoa pouzdanosti. Simulacijom se, dakle, mogu definisati optimalni vremenski trenuci zamene/opravke delova tehničkog sistema pre nego što dođe do njegovog otkaza ili potreba da se deluje korektivno. Konsekventno, ovi modeli sprovođenjem adekvatnih akcija održavanja služe obezbeđenju nivoa pouzdanosti složenih postrojenja u termoelektranama.

SUMMARY

The doctoral thesis deals with the issue of forming the model of securing the reliability of complex installations in power plants. After the basic facts concerning the reliability and modeling of the reliability are presented, and the types of models that have been developed in previous research pointed out, the development of their own models of reliability of complex technical systems will be approached. We can say that, in a broader sense, modeling technical systems will be considered and in the narrow sense, modeling concrete plant in thermal power plants. By narrowing the objects that are modeled, models that describe the specific technical conditions of the system are obtained. The complexity of the technical systems and the number of maintenance actions that are carried out on them, especially preventive since the systems are reversible, constitute aggravating factors to define a model of reliability. When it comes to complexity, it is also reflected in the large number of components, sub-systems, assemblies, subassemblies and elements of the system, but also in their diversity.

So we can talk about the complexity of the system according to the number of components which is made of as well as the complexity of the type of components. The very number of parts of the system raises questions of feasibility budget as an adequate decomposing system, especially in terms of a small number of failures. Each part of the system that is of other type requires different parameters probability distribution of failure occurrence (if the model includes failure occurrence in these parts) or requires a different theoretical distribution of failure occurrence, or even a whole new model. If we take into account the possible need for information to connect in time as shorter intervals for the accuracy of the budget, then encountering new obstacles to good model lineup and making appropriate calculations in a reasonable time can happen.

Complex technical systems under consideration of the scope of this thesis are expensive, their downtime causes severe production losses so there is a need for a large number of preventive maintenance actions on them. Special attention was paid to major periodic repairs - overhauls. Often as a result of these needs, and consecutive preventive actions follow, which is why the insight into the current state of the technical system and its reliability can easily be lost, so the models must therefore take into account this fact.

An additional difficulty in modeling the reliability presents the emergence of the imperfect repairs which means not bringing the system reliability at the highest level and which usually occur as a result of repairs on just one part of the system. They can be covered in models through the emergence of changes in the level of reliability (increase, stagnation, reduction) but also through changes in the risk of failure and/or function that describes it.

Models must include and describe as better as they can the real state of the technical system, so it raises the question of interactions between components of the system and defining the relationship in terms of the consequences that the failure of one part of the system can cause on the second part of the system in terms of change of the reliability.

In technological terms, the contribution of the thesis is reflected in the application of model reliability through the use of simulation methods for the selection of the best

parameters of functioning of components and assemblies, in terms of their reliability, which is proven by experimental methods (using the data collected and stored data from the past). Reliability analysis based on the formed model should contribute to the efficient and the simplest setting parameters for relative decision-making for the reliability of complex technical systems. These parameters can define time making decisions about maintenance actions based on the required level of reliability. Simulations can, therefore, define the optimal time moments of replacement/repair of parts of the technical system before it comes to its failure or need for corrective works. Consequently, the implementation of appropriate maintenance actions these models are used to secure the level of reliability of complex installations in power plants.

1. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA

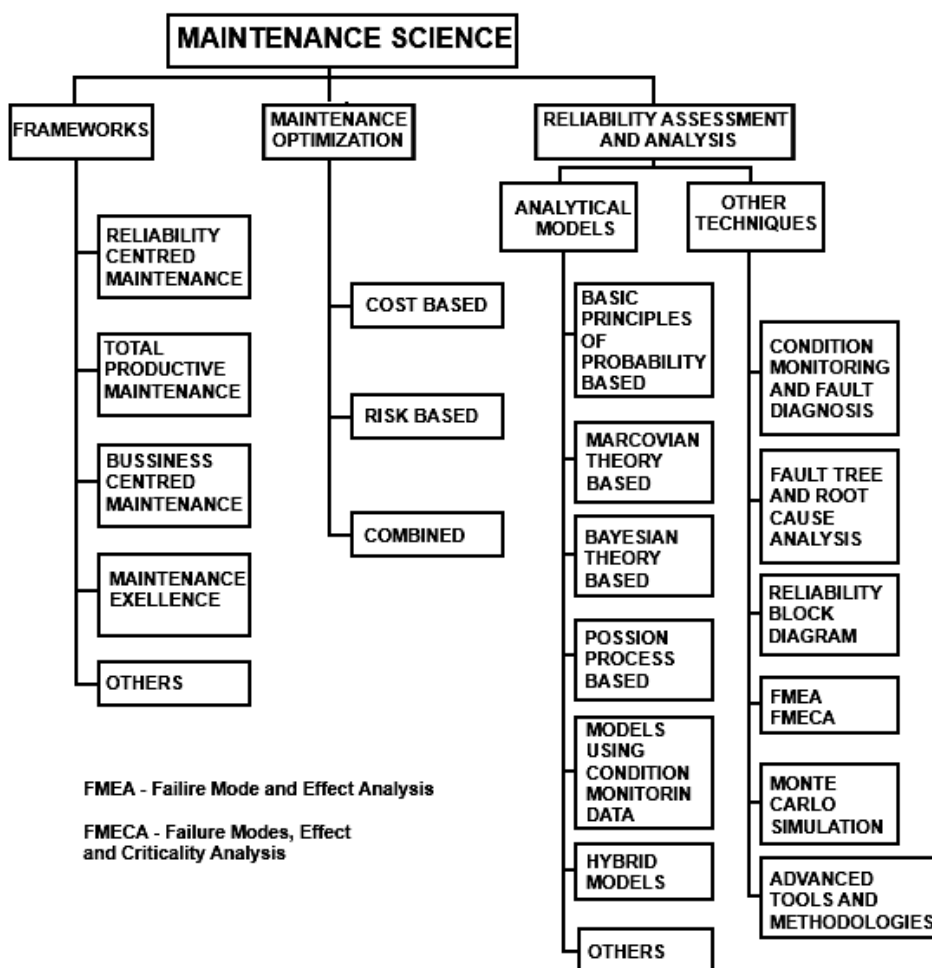
Kada su u pitanju složeni tehnički sistemi, broj primenjivanih modela pouzdanosti nije prevelik iz razloga njihove teške primenjivosti. Potreba za velikim brojem iteracija u proračunima da bi se došlo do preciznijih podataka ili potreba za eksperimentisanjem kako bi se podesili parametri modela traže simplifikaciju i apstrahovanje bitnih faktora koji utiču na pouzdanost. Najkorišćeniji modeli današnjice za predikciju pouzdanosti tehničkih sistema su bazirani na stohastičkim ili statističkim analizama, uključujući Markovljeve lance (proces), Poasonove procese, Bajesov metod, modele bazirane prema stanju, Monte Carlo simulacije i kombinacije ovih modela. Detaljnijim uvidom u literaturu mogu se uočiti neka ozbiljnija ograničenja navedenih modela. Recimo, većina ovih modela je fokusirana samo na analizu srednjeg vremena do pojave otkaza (MTTF – Mean Time To Failure) ili na očekivani broj otkaza za dati tehnički sistem. Broj dostupnih modela koji uvažava imperfektne preventivne akcije održavanja (kada se akcijom održavanja nivo pouzdanosti ne podiže na 100%), koje su neminovna realnost u industriji, je jako mali, a njihova integracija sa blok dijagramima primenjena na kompleksne tehničke sisteme gotovo nepostojeća. Jedan od modela koji povezuje pouzdanost složenih sistema sa blok dijagramom je SSA (Split Sistem Approach) model. Istraživanja koja se odnose na interakcije između delova tehničkih sistema i njihovih otkaza ili predikcije pouzdanosti korišćenjem veoma malog broja podataka o otkazima ili bez njih su takođe veoma štura i njihova primena je veoma raritetna.

Brojna literatura je objavljena na temu tehnologije održavanja i modela pouzdanosti tehničkih sistema ali u novijem dobu ona je dinamičnija i značajnija.

Strategija korektivnog održavanja je prva nastala u periodu vremena od 1940. do 1950. godine¹. Logika ove strategije održavanja je da se akcije održavanja tek nakon što nastupi kvar ili zastoj. Ovaj način održavanja je veoma zastupljen i danas usprkos nizu negativnih posledica. Druga generacija održavanja jeste strategija preventivnog održavanja a nastala je 60-ih godina prošlog veka. Preventivno održavanje je održavanje prilikom kojeg se sistem održava pre nego što nastane kvar. Prediktivno održavanje se može sprovoditi na više načina ali kada su u pitanju složeni tehnički sistemi strategija preventivnog održavanja se uglavnom sastoji od predefinisanih remonta koji se obavljaju u fiksnim intervalima vremena. Sledeća je nastala strategija prediktivnog održavanja tj. održavanja prema stanju koja pripada trećoj generaciji održavanja se vezuje za sredinu 70-ih godina prošlog veka. Ova strategija sprovodi akcije održavanja na osnovu stanja delova ili čitavog sistema. Posledično ciljevi ove strategije su postali viši nivo pouzdanosti i raspoloživosti postrojenja, veća sigurnosti funkcionisanja, bolji kvalitet proizvoda, duži životni veka opreme itd¹. Istorijski gledano sledeća strategija jeste proaktivno održavanje. Cilj ove strategije nije toliko da se spreči sam otkaz već da se on izbegnu ili smanje posledice samog otkaza¹.

¹ Sun, Y., "Reliability Prediction Of Complex Repairable Systems: An Engineering Approach", Thesis submitted in total fulfilment of requirements of the degree of Doctor of Philosophy, Faculty of Built Environment and Engineering, University of Technology, Queensland, 2006.

Postojeći modeli održavanja se mogu klasifikovati na razne načine. Wang, H.Z.,² je klasifikovao politike održavanja sistema u sledeće kategorije: politika starosne zamene, politika slučajne zamene, politika zamene blokova, politika periodičnog preventivnog održavanja, politika ograničenja otkaza, politika senkvencijalnog preventivnog održavanja, politika ograničenja troškova opravke, politika ograničenja vremena opravke, politika računanja broja opravki, politika mešovite starosti, politika pripremljenog održavanja, politika grupnog održavanja i oportunistička politika održavanja. Svakako, ima mnogo drugih šema klasifikacija. Ovaj pregled nauke o održavanju je dat u tri klase: filozofija održavanja, modeli i metodologija procene pouzdanosti i optimizacija održavanja. Optimizacija održavanja je cilj održavanja dok predikcija pouzdanosti i procene rizika čine bazu donošenja optimalnih odluka o održavanju. Filozofija održavanja se tiče efektivne primene ovih modela, metodologije i politike. Iako ima brojnih publikacija u vezi sa istraživanjem održavanja, sve one su klasifikovane u neku od ovih kategorija. Slika 1.1. prikazuje pregled istraživanja u domenu nauke o održavanju.¹



Slika 1.1. Pregled istraživanja nauke o održavanju¹

² Wang, H.Z., A survey of maintenance policies of deteriorating systems, European Journal of Operational Research, 2002., 139(3), 469-489.

¹ Sun, Y., "Reliability Prediction Of Complex Repairable Systems: An Engineering Approach", Thesis submitted in total fulfilment of requirements of the degree of Doctor of Philosophy, Faculty of Built Environment and Engineering, University of Technology, Queensland, 2006.

Kao istraživanja koja su slična onom koje je sprovedeno u ovoj doktorskoj disertaciji mogu se pobrojati neka.

Na primer u istraživanju Nikhil Dev i dr.³ Istraživao se indeks pouzdanosti elektrane koja je dekomponovana i grafičkom metodom prezentovana. Ovo istraživanje je solidan pokušaj rešavanja krucijalnog problema kod ovakvih složenih tehničkih sistema koji se i preventivno održavaju u smislu da je moguće nadomestiti mali broj podataka o otkazima. Ipak, model se i previše oslanja na empiriju i nema dovoljno objektivne podatke te je moguće primenjivati ga efikasnije na sisteme koji su novi. Sistemi u eksploataciji i sistemi koji se mogu posle dužeg perioda eksploatacije prema otkazima dekomponovati na veći broj komponenti nisu podesni za primenu ovakvog modela pouzdanosti. Jasno je da su sistemi najčešće upravo u periodu eksploatacije. Još i važnije, interakcije otkaza komponenata sistema nisu predviđene modelom. Kao rezultat modela dobija se RTRI – indeks pouzdanosti u realnom vremenu što zapravo predstavlja vrednost pouzdanosti u jednoj vremenskoj tački kalkulacije.

Mnoga istraživanja oslanjajući se na Monte Carlo simulacije, poput istraživanja Naess, A., i dr.⁴ pokušavaju da zaobiđu probleme matematički kompleksnih ili neotkrivenih pravila modelovanja pouzdanosti. Ovaj metod daje prostora da se takav zadatak uspešno i prevaziđe, ali modelima nedostaju vremenska dinamika i/ili preventivne akcije održavanja. Time su modeli izgubili mogućnosti realne implementacije, naročito kada je potrebno primeniti ih na sisteme složenije strukture.

Istraživanje Weber, P., Jouffe, L.,⁵ kombinuje više metoda poput metode analize stabla otkaza, Bajesove mreže i Markovljevih lanaca. Ovo istraživanje je usmereno na modelovanje pouzdanosti proizvodnih procesa kod složenih tehničkih sistema. To znači i veće zahteve u domenu modelovanja pouzdanosti pogotovo jer je ovaj model uvažio postojanje preventivnih akcija održavanja kao i vremensku dinamiku pouzdanosti. Ono što je izostalo od realnih okolnosti jesu interakcije otkaza i mogućnost primene modela na složenih tehnički sistem dekomponovan na veliki broj komponenata usled eksponencijalnog rasta broja kombinacija u modelu te je proračune za pojedine slučajeve nemoguće izvršiti u razumnom vremenskom roku.

Moazzami, M. i dr.⁶ su dali procene pouzdanosti sabirnica u elektrani koristeći Monte Carlo simulacije, međutim vremenska dinamika kretanja procenjene pouzdanosti je izostala, a nisu predviđeni ni slučajevi opravki koji imaju realni uticaj na pouzdanost sistema. Takođe, parametarski procenjena pouzdanost je parcijalno sagledavana bez integralnog modela.

³ Nikhil Dev, Samsheb, S.S. Kachhwaha, Rajesh Attri, Development of reliability index for combined cycle power plant using graph theoretic approach, Ain Shams Engineering Journal, Ain Shams University, 2014., 5, 193–203.

⁴ Naess, A., Leira, B.J., Batsevych, O., System reliability analysis by enhanced Monte Carlo simulation, Structural Safety, 2009., 31, 349–355.

⁵ Weber, P., Jouffe, L., Complex system reliability modelling with Dynamic Object Oriented Bayesian Networks (DOOBN), Reliability Engineering and System Safety, 2006., 91, 149–162.

⁶ Moazzami, M., Hemmati, R., Haghghatdar Fesharaki, F., Rafiee Rad, S., Reliability evaluation for different power plant busbar layouts by using sequential Monte Carlo simulation, Electrical Power and Energy Systems, 2013., 53, 987–993.

Sun, Y.¹ u svojoj disertaciji je razvio nekoliko modela oslanjajući se na postojeće poput SSA i AIMF. Novi razvijeni model je ESSA u koji je involviran slučaj malog broja otkaza sistema, preventivnih akcija održavanja, imperfektnih popravki, interakcije otkaza i vremenske dinamike. Model takođe previđa i postojanje kaskadnih otkaza kao mogućnost primene različitih distribucija otkaza. Model je orijentisan na donošenje odluka o pravovremenim preventivnim, ali ne i korektivnim akcijama održavanja, pa je kombinovano održavanje isključeno iz modela. Model omogućuje da se pouzdanost svake komponente sistema posebno razmatra te i preventivne akcije održavanja su definisane prema svakoj komponenti sistema zasebno. Interakcije komponenata su definisane matricom interaktivnih koeficijenata pri čemu je uticaj otkaza jedne komponente na otkaz druge komponente konstantan tokom vremena. Nakon preventivnih otkaza komponenata moguća je promena karakteristika teorijske raspodele otkaza a komponente sistema na kojima ne bilo preventivnih akcija održavanja. Ipak, heuristički pristup određivanju koeficijenata interakcije je ostao slaba tačka modela i otežava njegovu primenljivost. ESSA model nema jasno iskazane algoritme iako je jasno da ih je moguće definisati. Model ima i unapred definisana vremena preventivnih akcija održavanja i primena akcija održavanja prema pouzdanosti nije deo modela iako je to realnost kod održavanja prema pouzdanosti.

U našoj zemlji istraživanje Petrović G., i dr.⁷ je primenom Markovljevog procesa ustanovljeno optimalno preventivno vreme održavanja maksimizacijom raspoloživosti sistema. Model je stohastički i razmatra akcije održavanja i njihove efekte. Model je primenjen transportni sistem koji je dekomponovan na dve komponente. Ovakav model se lako može orijentisati i na pouzdanost njenim kriterijumima pružiti odgovor o vremenima optimalnih akcijama održavanja. Ipak, da bi se primenio i na strukturno kompleksne tehničke sisteme sa velikim brojem komponenata ovaj model bi morao da pretrpi značajne izmene i reši mnoga pitanja. Model takođe ne predviđa ni imperfektne akcije održavanja niti interakciju otkaza komponenti sistema.

1.1. KONCEPTI ODRŽAVANJA

Koncept održavanja predstavlja skup različitih metoda i modela održavanja koje su integrisane u cilju efikasnog održavanja.

Na slici 1.1. su klasifikovane i upoređene karakteristike, kao i ideje i procesi različitih okvira održavanja. Četiri okvira su trenutno najkorišćenija: Reliability-Centred Maintenance (RCM), Total Productive Maintenance (TPM), Business-Centred Maintenance (BCM) i Maintenance Excellence (ME).

¹ Sun, Y., "Reliability Prediction Of Complex Repairable Systems: An Engineering Approach", Thesis submitted in total fulfilment of requirements of the degree of Doctor of Philosophy, Faculty of Built Environment and Engineering, University of Technology, Queensland, 2006.

⁷ Petrović, G., Marinković Z., Marinković, D., Optimal preventive maintenance model of complex degraded systems: A real life case study, Journal of Scientific & Industrial Research, 2011., 70, 412-420.

1.2. POLITIKA OPTIMIZACIJE ODRŽAVANJA

Optimizacija održavanja je pokušaj da se reše konflikti situacija odlučivanja na takav način da promenljive pod kontrolom donosioca odluke uzmu njihove najbolje vrednosti^{8,9,10}. Na slici 1.1. su prikazane tri vrste politike optimizacije održavanja, zasnovane na troškovima, riziku i kombinovana.

1.2.1. POLITIKA OPTIMIZACIJE ZASNOVANA NA TROŠKOVIMA

Sve politike optimizacije u krajnjoj instanci imaju za cilj smanjenje ukupnih troškova. Predviđanje ukupnih troškova ili dobiti u slučaju primene različitih načina održavanja je još uvek često nepoznanica za mnoge održavaoce. U tu svrhu je razvijeno mnogo tehnika ali najčešće primenjivane su kalkulacije na osnovu predikcije broja otkaza i analize troškova životnog ciklusa¹¹. Jedna od popularnih strategija je lean održavanje koja naglašava efikasni menadžment održavanja ali na nekvantitativan način u cilju smanjenja rasipanja u aktivnostima održavanja¹². Takođe primenjivana tehnika za rešavanje problema odlučivanja u održavanju je i analiza vremena odlaganja (DTA) koju je predstavio Christer, A.H.,¹³. Ovaj koncept je usmeren na odluke o tome "šta raditi". DTA koncept vidi otkaze kao višestepeni procesa u kome komponenta sistema može biti u jednom od tri stanja: neoštećena, oštećena ili u otkazu a vreme odlaganja se odnosi na to kada je komponenta u stanju oštećenosti. Koristeći DTA koncept Wang, W., i Christer, A.H.,¹⁴ su prezentovali tri algoritma kao rešenja za uspostavljanje modela višestruke inspekcije komponenti.

Postoje i istraživanja koja ne razmatraju samo opciju da su akcije održavanja uvek takve da donose poboljšanja tj. da nivo pouzdanosti uvek raste ili dolazi na apsolutni nivo nakon akcija održavanja. Zato se akcije održavanja u tim istraživanjima mogu posmatrati i kao imperfektna i imati svoje kvalitativne konsekvence na pouzdanost sistema^{15,16}.

⁸ Artana, K.B., Ishida, K., Spreadsheet modelling of optimal maintenance schedule for components in wear-out phase, *Reliability Engineering & System Safety*, 2002., 77(1), 81-91.

⁹ Campbell, J.D., Jardine, A.K.S., *Maintenance Excellence: optimizing equipment life-cycle decisions*, New York: Marcel Dekker, 2001.

¹⁰ Jardine, A.K.S., *Maintenance Replacement and Reliability*, London: Pitman, 1973.

¹¹ Kelly, A., *Maintenance Strategy*, Oxford: Butterworth-Hernemann, 1997.

¹² Bicheno, J., Holweg, M., Niessmann, J., Constraint batch sizing in a lean environment, *International Journal of Production Economics*, 2001., 73(1), 41-49.

¹³ Christer, A.H., Innovatory decision making, the role and effectiveness of theories of decision in practice, in *The Role and Effectiveness of Theories of Decision in Practice*, London: Hodder and Stoughton, 1973., 369-377.

¹⁴ Wang, W., Christer, A.H., Solution algorithms for a nonhomogeneous multi-component inspection model, *Computers & Operations Research*, 2003., 30(1), 19-34.

¹⁵ Langseth, H., Lindqvist, H., B., Modelling imperfect maintenance and repair of components under competing risk, *Communications of the Third International Conference on Mathematical Methods in Reliability – Methodology and Practice*, 2002., 359, Trondheim, Norway.

¹⁶ Pham, H., Wang, H., Multivariate imperfect repair, *European Journal of Operations Research*, 1996., 94, 425-428.

1.2.2. POLITIKA OPTIMIZACIJE ZASNOVANA NA RIZIKU

Politika optimizacije zasnovana na riziku je ona u kojoj je najveći fokus usmeren na održavanje onih delova sistema koji nose najveći rizik da otkazu. Time je najšire prihvaćen cilj minimizacije troškova održavanja stavljen u drugi plan. Ova strategija se najčešće koristi kada postoji mogućnost da otkaz sistema ima katastrofalne posledice, obično na ljudske živote ili životnu sredinu.

1.2.3. KOMBINOVANA POLITIKA OPTIMIZACIJE

Kombinovane politike održavanja su razvijene za sveobuhvatnu optimizaciju održavanja preko obimnog razmatranja nekoliko različitih faktora kao što su na primer troškovi ili pouzdanost, ali to mogu biti i drugi faktori. Time se cilj minimizacije troškova relativizuje u određenoj, kvantifikovanoj meri u zavisnosti od važnosti drugih faktora.

Neki modeli su na primer razvijeni da se ostvare minimalni zahtevi koji se odnose na pouzdanost nakon što se ostvare oni koji se odnose na troškove održavanja. Logično, postoje i recipročni modeli gde je akcenat na pouzdanosti određenog nivoa koji se ultimativno mora ispuniti a zatim se uz taj uslov pristupa minimizaciji troškova održavanja.

Kombinovani modeli dobijaju sve veću primenljivost usled svoje kompatibilnosti sa savremenim tehnikama kontinuirane dijagnostike stanja tehničkih sistema u industriji.

Kada je u pitanju kombinovana politika održavanja moraju se što bolje odrediti kriterijumi koji su značajni za održavanje i ostvarivanje funkcije cilja i mogu doći u obzir svi koji su važni.

Postoje i druge politike koje uključuju sa više kriterijuma pa tako na primer model prema Jiang, R., Ji, P.,¹⁷ razmatra četiri kriterijuma: troškove, raspoloživost, pouzdanost i životni vek. U primeni su takođe i aplikacije rangiranja rizika i analize troškova životnog veka za procenu pouzdanosti¹⁸.

1.3. PROCENA I ANALIZA POUZDANOSTI

Razumevanje pouzdanosti i posledica otkaza ali i drugih faktora koji utiču na održavanje i proizvodnju je potrebno da bi se došlo do cilja smanjenja troškova održavanja i optimizacije strategije održavanja¹⁹. Razumevanje pouzdanosti ipak zauzima centralno mesto u ovom procesu. Pouzdanost se može definisati kao sposobnost sistema da obavlja zahtevanu funkciju pod navedenim uslovima za dati

¹⁷ Jiang, R., Ji, P., Age replacement policy: a multi-attribute value model, *Reliability Engineering & System Safety*, 2002., 76(3), 311-318.

¹⁸ Stewart, M.G., Reliability-based assessment of ageing bridges using risk ranking and life cycle cost decision analyses, *Reliability Engineering & System Safety*, 2001., 74(3), 263-273.

¹⁹ Lowry, G., Factors affecting the success of building management system installations, *Building Services Engineering Research and Technology*, 2002., 23(1), 57-66.

period vremena²⁰. Pouzdanost je uobičajeno određena verovatnoćom da sistem ne otkaze u period vremena $(0, t]$. Najdirektniji način da se izraze svojstva pouzdanosti jeste funkcija pouzdanosti $R(t)$ koja se takođe nazvana i funkcijom opstanka (preživljavanja)²¹. Druga funkcija koja se koristi da izrazi pouzdanost sistema je funkcija distribucije otkaza $F(t)$ odnosno funkcija gustine otkaza $f(t)$.

Pojam otkaza znači da sistem ili komponenta sistema koja je otkazala ne ispunjava funkciju cilja za koju je projektovana. Modeli i tehnike za procenu i analizu pouzdanosti mogu se podeliti na matematičke i konceptualne¹.

Analitički modeli se odnose na popravljive sisteme. Popravljivi sistemi se obično definišu kao oni koji će biti popravljani kako bi vratili svoje funkcije posle svakog otkaza pre nego da budu odbačeni tokom kontinuiranog rada²². Kompleksni sistem obično označava da je sastavljen od više komponenata koje mogu biti povezane serijski ili paralelno ili na druge kompleksne načine.

1.3.1. DIJAGNOSTIKA STANJA I OTKAZA

Razvoj novih tehničkih rešenja dovodi do toga da dijagnostika stanja i otkaza ima sve veći značaj u istraživanju održavanja²³ tako da se sada aktuelan novi termin za ovakvu dijagnostiku - održavanje prema stanju. Ova strategija je trenutno najbolja u domenu preventivnog održavanja jer se odluke o održavanju donose na osnovu trenutnog stanja sistema²⁴. Kontinuirana dijagnostika stanja je danas veoma primenjivana u raznim domenima i u tu svrhu se koristi puno dostupnih tehnika poput termovizija, ultrazvuk, vibrodijagnostika, akustika itd. I pored toga što nove metode i filozofije nastavljaju da se pojavljuju, određivanje najbolje pozicije senzora je i dalje jedan od glavnih ciljeva istraživanja^{25,26}.

1.3.2. STABLO OTKAZA I ANALIZA UZROKA

Ove tehnike su široko upotrebljavane. Analiza uzroka otkaza se koristi da se otkrije uzrok otkaza^{27,28}. Klasična tehnika je stablo otkaza (Fault Tree Analysis - FTA) dok je

²⁰ Hoyland, A., Rausand, M., System reliability Theory: Models and Statistical Methods, New York: John Wiley & Sons, Inc. 1994.

²¹ Cox, D.R. Oakes, D., Analysis of Survival Data, London: Chapman & Hall. 1984., 91-113.

¹ Sun, Y., "Reliability Prediction Of Complex Repairable Systems: An Engineering Approach", Thesis submitted in total fulfilment of requirements of the degree of Doctor of Philosophy, Faculty of Built Environment and Engineering, University of Technology, Queensland, 2006.

²² Crow, L.H., Reliability analysis for complex repairable systems, in Reliability and Biometry, Philadelphia, Pennsylvania: SIAM., 1974., 379-410.

²³ Rao, B.K.N., Handbook of Condition Monitoring, UK: Elsevier Advanced Technology, 1996.

²⁴ Shina, J., Junb, H., On condition based maintenance policy, Journal of Computational Design and Engineering, 2015., 2(2), 119-127.

²⁵ Syed, I., Din, I., Kim, H., An Optimal Sensor Placement for Full Coverage in Road Monitoring Systems with Proper Shape of Sensing Range, Life Science Journal, 2013., 10(2), 2524-2527.

²⁶ An integrated method for comprehensive sensor network development in complex power plant systems Original Research Article, Reliability Engineering & System Safety, 2000., 67(1), 17-27.

²⁷ Ekanathan, M., Yeldose, B., Kallanickal, P., Mangalath, G., Root Cause Analysis to Identify the Problem Causing Turbine Failure, International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT), 2013., 2(2), 527-535.

srodna tehnika analiza događaja (Event Tree Analysis - ETA)^{29,30}. Stablo otkaza prevodi fizički sistem u logički dijagram različite kombinacije mogućih događaja. FTA metod je nastao 60-ih godina dvadesetog veka i podesan je za kvalitativnu ili kvantitativnu analizu te spada u jedan od najkorišćenijih za otkrivanje uzroka otkaza. Ova tehnika je i pored svih prednosti dosta vremenski zahtevna ali i ne uspeva da svojom Bulovom logikom iskaže među stanja komponenti od potpuno ispravne do potpuno neispravne usled poznavanja samo ova dva stanja.

1.3.3. FMECA METOD

FMEA je tehnika za procenu mogućih problema pouzdanosti³¹. FMECA se koristi za identifikaciju načina otkaza, razloga, posledica i kritičnosti sistema ali i u druge svrhe.^{32,33} Osim prethodne tehnike i FMCA je veoma popularna u proceni kritičnosti sistema i komponenta sistema a obe su podesne i za otkrivanje otkaza putem analize temperature, vibracija ili maziva³⁴.

1.3.4. BLOK DIJAGRAM POUZDANOSOTI

Blok dijagram pouzdanosti je grafička tehnika – mreža koja opisuje funkciju sistema. Sistem je u ovoj tehnici podeljen na blokove predstavljaju različite elemente, delove, sklopove, komponente ili podsisteme. Kada se formira dijagram pouzdanosti za određeni sistem moguće je tražiti i identifikovati „puteve“ uspešnog funkcionisanja ili otkaza sistema.

Ukoliko je neki sistem multifunkcionalan mogu se kreirati različiti blok dijagrami. Ovaj metod je široko primenljiv i moguće ga je kombinovati sa mnogim drugim tehnikama, npr. sa FTA metodom. Ipak, može se reći da je stablo otkaza je podesnije za traženje uzroka otkaza a blok dijagram pouzdanosti je podesniji za kvantitativnu analizu pouzdanosti. Kada se koristi za kvalitativnu analizu blok dijagram pouzdanosti može biti korišćen da identifikuje da li je sistem u funkcionalnom stanju ili ne, pod određenim uslovima. Strukturna funkcija je binarna.¹

²⁸ Chandrakar, J., Kumar, R., Reduction of Breakdowns in Food Processing Plants Through Failure Analysis, International Journal of Advanced Engineering Research and Studies, 2015., 4(2), 212-214.

²⁹ Marhavalas, P., Koulouriotis, D., Gemeni, V., Risk analysis and assessment methodologies in the work sites: On a review, classification and comparative study of the scientific literature of the period 2000-2009, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2011., 24, 477-523.

³⁰ Lipol, S., L., Baig, A., A., Ruzli, R., Buang, B., A., Reliability Analysis Using Fault Tree Analysis: A Review, International Journal of Chemical Engineering and Applications, 2013., 4(3), 169-173.

³¹ Haq, J., Risk Analysis Method: FMEA/FMECA in the Organizations, International Journal of Basic & Applied Sciences, 2011., 11(5), 49-57.

³² Srivastava, K., N., Mondal, S., Predictive maintenance using modified FMECA method, International Journal of Productivity and Quality Management., 2015., 16(3).

³³ Gilchrist, W., Modelling failures modes and effects analysis. Interantional Journal of Quality & Reliability Management, 1993. 10(5), 16-23.

³⁴ Kelly, A., Harris, M.J., Management of Industrial Maintenance, Butterworth, 1987.

¹ Sun, Y., "Reliability Prediction Of Complex Repairable Systems: An Engineering Approach", Thesis submitted in total fulfilment of requirements of the degree of Doctor of Philosophy, Faculty of Built Environment and Engineering, University of Technology, Queensland, 2006.

Blok dijagram pouzdanosti podesan da se kvantifikuje pouzdanosti sistema i da se ukoliko ima adekvatnih ulaznih podataka izvrši tačan proračun pouzdanosti u nekom vremenskom trenutku ili periodu vremena. Upravo ti ulazni podaci i jesu često nedostatak ovog metoda jer se do njih ne dolazi uvek lako.

Razvijeno je mnogo metoda za analizu i kalkulaciju blok dijagrama pouzdanosti¹. Blok dijagram je svakako moćno sredstvo za kalkulaciju pouzdanosti. Ipak, kada se ova metoda primenjuje za kalkulaciju pouzdanosti sistema, funkcija pouzdanosti svake individualne komponente se mora poznavati a gotovo uvek je kao veliko ograničenje pretpostavljena nezavisnost komponenti sistema³⁵.

1.3.5. MONTE CARLO METODE

Monte Carlo metode su bazirane na simulaciji slučajnih brojeva. Ova metoda se često koristi za rešavanje fizičkih i matematičkih probleme kada je teško ili nemoguće koristiti druge matematičkih metoda. Monte Carlo metoda se koristi uglavnom da reši tri vrste problema: numeričku integraciju, optimizaciju i generiranje grafika teorijskih raspodela verovatnoće. Kada je u pitanju pouzdanost tu se ova metoda najviše koristi u domenu predikcije jer iz mnoštva mogućih događaja, simulacijom se nalazi približno najverovatniji ishod. Prva primena ove metode je ostvarena od strane Conte de Buffon-a 1777. godine³⁶ međutim prave mogućnosti primene ove metode dolaze do izražaja sa povećanim računarskim kapacitetima. Neretko se primenjuje tzv. metod grube sile ili "čekić metod" da se dođe do jednostavnijih rešenja od analitičkog puta, pa je ovaj metod, izvesno je, budućnost mnogih naučnih istraživanja. Ipak, najveći problem ove metode jeste, gotovo po pravilu, težak razvoj algoritama.

1.3.6. OSNOVNI PRINCIPI VEROVATNOĆE

Korišćenjem osnovnih principa verovatnoće je razvijeno nekoliko modela za predikciju pouzdanosti popravljivih sistema. Modeli bazirani na principima verovatnoće su razvijeni da odrede najpodesnije vreme preventivnog održavanja T prema funkciji pouzdanosti ili funkciji distribucije otkaza sistema. Najčešće korišćena funkcija distribucije jeste Vejbulova distribucija⁸. Normalna i eksponencijalna distribucija kao specijalni slučajevi Vejbulove su jednako u upotrebi³⁷. Metod održavanja na bazi vremena podrazumeva da se zamene delova vrše nakon fiksnog vremena T ili nakon otkaza, u zavisnosti koji se od ova dva događaja desi prvi². U ranijim istraživanjima, zamene delova nakon fiksnog vremena T ili otkaza, gde je T konstanta, dobile su

¹ Sun, Y., "Reliability Prediction Of Complex Repairable Systems: An Engineering Approach", Thesis submitted in total fulfilment of requirements of the degree of Doctor of Philosophy, Faculty of Built Environment and Engineering, University of Technology, Queensland, 2006.

³⁵ Villemeur, A., Reliability, Availability, Maintainability and Safety Assessment, Vol. 1. Chichester: John Wiley & Sons, 1992.

³⁶ Kalos, M. H. Whitlock, P. A., Monte Carlo Methods, New York: John Wiley & Sons, 1986.

⁸ Artana, K. B., Ishida, K., Spreadsheet modeling of optimal maintenance schedule for components in wear-out phase, Reliability Engineering & System Safety, 2002., 77(1), 81-91.

³⁷ Clausius, R., Ueber die mittlere lange der wege, Ann. Phy. Lpzg, 1858., 105, 239-258.

² Wang, H. Z., A survey of maintenance policies of deteriorating systems, European Journal of Operational Research, 2002., 139(3), 469-489.

nazivan model starosne zamene³⁸. Kasnije je razvijen model zamene bloka koji podrazumeva zamenu komponenti u fiksnom trenutku vremena bez obzira na starost ali ako komponenta otkáže pre predefinisano vreme zamene, zamena će biti izvršena². Model periodičnog preventivnog održavanja je takav da se u fiksnom intervalu vremena sprovodi održavanje komponente ali ne obavezno i zamenom. S obzirom na to da se intenzitet otkaza komponente uvek povećava tokom vremena i sistem često ne može biti "dobar kao nov" nakon popravke, fiksno vreme opravke je zamenjeno varijabilnim a takvo održavanje nazvano sekvencijalno preventivno održavanje a promovisano je od strane od strane Nguyen-a i Murthy-ja³⁹. Neka od istraživanja su načinjena da prošire model na kompleksni popravljivi sistem^{20,40,41}. Model vremenski zavisnog održavanja je prvobitno razvijen za pojedinačnu komponentu sistema pa su se pojavili modeli sa imperfektnim popravkama (Fontenot i Proschan⁴²) te model za predikciju pouzdanosti popravljivih sistema sa periodičnim izmenama (Gurov i Utkin⁴³). Ipak svi ovi modeli ne nalaze značajne primene u industriji jer se oslanjaju na integralni račun¹.

Model obnove procesa je opšti klasični model koji je dokazao svoju korisnost do sad. On se može primenjivati onda kada komponenta sistema koja otkáže biva u akciji održavanja zamenjena novom, identičnom koja je "dobra kao nova"⁴⁴. Pouzdanost popravljivih standby sistema je izazvala dosta pažnje i Narmada, S., Jacob, M.,⁴⁵ su izgradili model 1-otkaz-od-2-komponente (1-out-of-2) a zatim Dey, S., Sarmah, P.,⁴⁶ 1-otkaz-od-N-komponenti in a kraju Wang, K.H., Ke, J.C.,⁴⁷ W-otkaza-od-W+M-komponenti. Ipak, neprimenljiva matematika modela učinila je da su ovi modeli su imali retku primenu.

³⁸ Barlow, R. E., Hunter, L. C., Optimum preventive maintenance policies, Operations Research, 1960., 8, 90-100.

² Wang, H. Z., A survey of maintenance policies of deteriorating systems, European Journal of Operational Research, 2002., 139(3), 469-489.

³⁹ Nguyen, D.G., Murthy, D.N.P., Optimal preventive maintenance policies for repairable systems, Operations research, 1981., 29, 1181-1194.

²⁰ Hoyland, A., Rausand, M., System reliability Theory: Models and Statistical Methods, New York: John Wiley & Sons, Inc. 1994.

⁴⁰ Armstrong, M.J., Age repair policies for the machine repair problem, European Journal of Operational Research, 2002., 138(1), 127-141.

⁴¹ Mazzuchi, T.A., Soyer, R.A., Bayesian perspective on some replacement strategies, Reliability Engineering & System Safety, 1996., 51(3), 295-303.

⁴² Fontenot, R.A., Proschan, F., Some imperfect maintenance models, in Reliability Theory and Models, M.S, Abdel-Hameed, E. Cinlar, and J. Quinn, Editors, Academic Press, Inc: Orland, 1984., 83-101.

⁴³ Gurov, S.V. Utkin, L.V., Reliability of repairable systems with periodic modifications, Microelectronics Reliability, 1996., 36(1), 27-35.

¹ Sun, Y., "Reliability Prediction Of Complex Repairable Systems: An Engineering Approach", Thesis submitted in total fulfilment of requirements of the degree of Doctor of Philosophy, Faculty of Built Environment and Engineering, University of Technology, Queensland, 2006.

⁴⁴ Noortwijk, J., M., Weide, J., A., M., Applications to continuous-time processes of computational techniques for discrete-time renewal processes, Reliability Engineering & System Safety, 2008., 93(12), 1853-1860.

⁴⁵ Narmada, S., Jacob, M., Reliability analysis of a complex system with a deterioration standby unit under common-cause failure and critical human error, Microelectronics Reliability, 1996., 36(9), 1287-1290.

⁴⁶ Dey, S., Sarmah, P., Estimation of parameters of a model of a complex repairable system, Microelectronics Reliability, 1997., 37(4), 673-676.

⁴⁷ Wang, K.H., Ke, J.C., Probabilistic analysis of a repairable system with warm standbys plus balking and reneging, Applied Mathematical Modelling, 2003., 27(3), 327-336.

Iako je istraživanje klasičnih modela održavanja započelo još polovinom XX veka ovi modeli su još uvek atraktivni te se značajni naponi ulažu da se oni unaprede ili da im se nađe primena putem kombinovanja sa drugim metodama. Modeli razvijeni na osnovama principa verovatnoće mogu zadovoljiti široko polje realnih situacija, ali ih složena matematika udaljava od šire primene. Ipak, kada su u pitanju istraživanja modela preventivnog održavanja na bazi vremena gde su podaci o otkazima retki čini se da principi verovatnoće imaju najviše izgleda da daju odgovor na izazov koji je realnost današnjice.¹

1.3.7. MARKOVLJEVA TEORIJA

Markovljev (takođe nazvan i Markof) proces je nazvan po ruskom matematičaru Andreju Markovu koji ga je predstavio 1907. godine. Ovaj proces opisuje buduće stanje sistema na osnovu sadašnjih parametara i time čini nezavisnim prošlo i buduće stanje sistema. Kada se ne radi o kontinualnim već o diskretnim veličinama tada možemo govoriti o Markovljevim lancima. Markovljevi procesi su prikladna za procenu pouzdanosti funkcionalno složenih sistema i složenih popravki ili strategija održavanja. Ipak oni podražavaju monotonost funkcija i procesa.

Model baziran na Markovljevom procesu pretpostavlja da sistem ima konačni prostor stanja i seriju mogućih tranzicija između ovih stanja. Funkcije, različiti modeli otkaza i standby i različite aktivnosti održavanja mogu biti opisane kao različita stanja. Ako tranzicija između stanja može biti aproksimativno opisana stohastičkim procesima na svojstvima ovog modela, onda Markovljeve metode mogu biti upotrebljene da se proceni pouzdanost sistema nakon nekoliko stanja. Dakle, prilično je uobičajeno koristiti Markovljevu teoriju da se modelira problem predikcije pouzdanosti popravljivog sistema⁴⁸.

Područje primene tehnike Markovljevih lanaca je kada stope tranzicija, npr. kvara ili popravke zavise od stanja sistema variraju u zavisnosti od opterećenja, nivoa stresa, strukture sistema itd. Naročito, struktura sistema (npr. standby stanja) i politika održavanja mogu stvoriti zavisnosti koje ne mogu biti obuhvaćene drugim tehnikama osim ove⁴⁹.

Loše strane Markovljevih modela su mnogobrojne. Markovljev metod se često primenjuje na popravljive sisteme, međutim, nije lako doći do verovatnoća svih tranzicija koje su potrebne a pretpostavke modela su uvek veoma restriktivne. Takođe u domenu kontinualnih veličina tj. Markovljevih procesa matematička rešenja jednačina umeju da budu veoma nedostupna čime se primenljivost modela kao i u mnogim drugim slučajevima ozbiljno dovodi u pitanje.

¹ Sun, Y., "Reliability Prediction Of Complex Repairable Systems: An Engineering Approach", Thesis submitted in total fulfilment of requirements of the degree of Doctor of Philosophy, Faculty of Built Environment and Engineering, University of Technology, Queensland, 2006.

⁴⁸ Fiems, D., Steyaert, B., Bruneel, H., Analysis of a discrete-time GI-G-1 queuing model subjected to burst interruptions, Computers & Operations Research, 2003., 30(1), 139-153.

⁴⁹ IEC 61165, Application of Markov techniques

1.3.8. POASONOV PROCES

Poasonov proces je nazvan po francuskom matematičaru Simeo-Deni Poasonu. Radi se o stohastičkom procesu u kojem se događaji dešavaju neprekidno i nezavisno jedan od drugog. Poasonovi procesi jesu poseban slučaj Markovljevih lanaca²⁰. Poasonovim procesima se mogu opisati razne pojave pa i otkazi sistema. Ovaj model pretpostavlja da su otkazi nezavisni jedan od drugog i da broj otkaza u svakom vremenskom intervalu podleže Poasonovoj distribuciji. Postoje razne vrste Poasonovih procesa poput Homogenog Poasonovog procesa, Nehomogenog Poasonovog procesa, Složeni Poasonovog procesa, Dvostruko-stohastičkog Poasonovog procesa, Filtriranog Poasonovog procesa itd. Homogeni Poasonov Proces (HPP) kao model zahteva stacionarne inkremente dok Nehomogeni Poasonov Proces (NHPP) ne zahteva inkremente. U mnogim primenama Poasonovog procesa nije realno pretpostaviti da je prosečna stopa pojavljivanja otkaza konstantna. Ova stopa zavisi od vremena tj. promenljive t . Zato je NHPP je podesniji model za modelovanje popravljivih sistema sa imperfektnim akcijama održavanja i dosta modela se danas zasniva na njemu. Takođe, ovaj model može obuhvatiti stope pojave otkaza (ROCOF) onda kada su one međusobno zavisne a vreme između otkaza nije ni nezavisno ni identično distribuirano⁵⁰. Neka istraživanja ukazuju na to da se popravljivi sistemi koji se sastoje od više komponenata ne mogu modelovati kontinualnim distribucijama što je i logično usled nastanka složenih kretanja pouzdanosti tako posmatranog sistema. Otkazi koji se pojavljuju kod popravljivih sistema bi mogli biti razmatrani kao serije diskretnih događaja koji se pojavljuju slučajno u kontinuumu. Ove situacije se ponašaju kao stohastičke tačke procesa i mogu biti analizirane pomoću statistike serija događaja. Log-linearni NHPP model i power law NHPP model su dva široko korišćena modela za popravljive sisteme. Power law NHPP model je baziran na Weibulovoj distribuciji i dat je kao¹:

$$v(t) = \lambda \beta t^{\beta-1} \quad (1.1.)$$

gde je:

$v(t)$ - funkcija intenziteta otkaza,

λ - konstanta koja se odnosi na stopu otkaza,

β - parametar oblika i

t - operativno vreme.

²⁰ Hoyland, A., Rausand, M., System reliability Theory: Models and Statistical Methods, New York: John Wiley & Sons, Inc. 1994.

⁵⁰ Saldanha, P. L. C., Simone, E. A. D., Melo, P. F. F. E., An application of non-homogeneous Poisson point processes to the reliability analysis of service water pumps, Nuclear Engineering and Design, 2001., 210(1-3), 125-133.

¹ Sun, Y., "Reliability Prediction Of Complex Repairable Systems: An Engineering Approach", Thesis submitted in total fulfilment of requirements of the degree of Doctor of Philosophy, Faculty of Built Environment and Engineering, University of Technology, Queensland, 2006.

Pulcini je primenio ovaj model na pouzdanost kompleksnih popravljivih. Pouzdanost je na bazi Poasonovih procesa i softverski modelovana a modelovana je takođe i pouzdanost softvera na bazi ovog procesa⁵¹.

Poasonov proces je podesan za analizu popravljivih sistema sa više rednih otkaza sa tačkastom stohastičkom prirodom procesa. Međutim, postojeći modeli na ovoj bazi su dostupni samo za slučajne načine otkaza, ali ne obuhvataju narastajući hazard tokom vremena. Modeli na bazi Poasonovih procesa pretpostavljaju da verovatnoća otkaza sistema prati Poasonovu distribuciju, a broj otkaza ne utiče na pouzdanost sistema. NHPP model pretpostavlja da je pouzdanost odmah nakon popravke ista kao i pouzdanost neposredno pre odgovarajućeg otkaza što model čini podesnim za tzv. "minimalne popravke", ali ne i za popravke poput remonta¹.

1.3.9. MODELI NA BAZI DIJAGNOSTIKE STANJA

Sa porastom tehnika za dijagnostiku stanja, održavanje je dobilo ambiciju da unapredi stalnost predikcije pouzdanosti. Model Proporcionalnog rizika (PHM) koji je razvio Cox²¹ trenutno je najpopularniji model ove vrste. Sličan je i model proporcionalnog intenziteta (PIM) premda je prvi model fleksibilniji i kao takav izbegava određene probleme koji se pojavljuju kod drugog. Pre koncepta modela proporcionalnog hazarda funkcija pouzdanosti i funkcija hazarda su matematički bile definisane na sledeći način.

Funkcija pouzdanosti $R(t)$ je korišćena da predstavi distribuciju slučajne promenljive T homogene populacije individua od kojih svaka ima "vremena otkaza". To je definisano kao verovatnoća da sistem ili komponenta funkcionišu u periodu vremena t ⁵²:

$$R(t) = P(T \geq t) , \quad (1.2.)$$

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t)dt , \quad (1.3.)$$

gde je:

$f(t)$ - funkcija gustine otkaza,

$P(x)$ - verovatnoća događaja X .

Sa druge strane funkcija hazarda je definisana kao²¹:

⁵¹ Finkelstein, M., S., A point-process stochastic model for software reliability, Reliability Engineering & System Safety, 63(1), 67-71, 1999.

¹ Sun, Y., "Reliability Prediction Of Complex Repairable Systems: An Engineering Approach", Thesis submitted in total fulfilment of requirements of the degree of Doctor of Philosophy, Faculty of Built Environment and Engineering, University of Technology, Queensland, 2006.

²¹ Cox, D.R. Oakes, D., Analysis of Survival Data. London: Chapman & Hall, 1984., 91-113.

⁵² Ebeling, C.E., An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering, New York: The McGraw-Hill Company, 1997., 124-128.

$$h(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{p(t \leq T < t + \Delta t | t \geq T)}{\Delta t}. \quad (1.4.)$$

Razmatrajući jednačine (1.2.) i (1.3.), jednačina (1.4.) se može zapisati kao:

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (1.5.)$$

PHM iako široko u upotrebi, kada je potrebno opisati pojave otkaza, nije podesan kao metod optimizacije akcija održavanja. Roberts, J.W.T., Mann, Jr.L.,⁵³ tvrde da se klasični PHM ne može iskoristiti za predikciju pouzdanosti popravljivog višekomponentnog sistema.

Novi modeli za predikciju pouzdanosti koji koriste podatke o dijagnostici stanja su takođe razvijani pa su, na primer, Barbera, F., Schneider, H., Watson, E.,⁵⁴ predstavili model na bazi blok dijagrama pouzdanosti za sistem sa dve komponente sa serijskom vezom dok je Al-Najjar⁵⁵ razvio mehanički model za predikciju nivoa vibracija kotrljajućih ležajeva. Takođe, i Markovljev simulacioni model je iskorišćen da proceni efektivnost modela na bazi dijagnostike stanja⁵⁶.

1.3.10. BAJESOVA TEORIJA

Bajesove metode se dovode u vezu sa Thomas Bayes-aom (1702-1761). Ovih metoda je mnogo kao na primer Bajesov faktor, Bajesova igra, Bajesova multivarijantna linearna regresija, Bajesova mreža, Bajesov empirijski metod itd. Bajesov model se koristi i u modelovanju pouzdanosti i podrazumeva i mogućnosti implementacije empirijskih iskustava održavalaca. Mazzuchi i Soyer⁴¹ su proširili ovaj model na tradicionalnu politiku zamene na bazi vremena i politiku zamene bloka sa minimalnim popravkama pod pretpostavkom da su troškovi popravke konstantni i da su parametar razmere α i parametar oblika β inicijalno nezavisni. Razmatrajući troškove popravke za otkaze sistema koji su slučajni i nepoznati, Shue⁵⁷ je razvio model adaptivnih zamena koristeći Bajesov pristup pod pretpostavkom da je hazard sistema monoton i rastući.

⁵³ Roberts, J.W.T., Mann, Jr.L., Failure predictions in repairable multi-component systems, International Journal of Production Economics, 1993., 29(1), 103-110.

⁵⁴ Barbera, F., Schneider, H., Watson, E., A condition based maintenance model for a two-unit series system, European Journal of Operational Research, 1999., 116(2), 281-290.

⁵⁵ Al-Najjar, Prediction of the vibration level when monitoring rolling element bearings in paper mill machines, International Journal of COMADEM, 2001., 4(2), 19-26.

⁵⁶ Asadzadehd, S., M., Salehib, N., Firoozic, M., Condition-based maintenance effectiveness for series-parallel power generation system—A combined Markovian simulation model, Reliability Engineering & System Safety, 2015., 142, 357-368.

⁴¹ Mazzuchi, T.A., Soyer, R.A., Bayesian perspective on some replacement strategies, Reliability Engineering & System Safety, 1996., 51(3), 295-303.

⁵⁷ Sheu, S.H., Yeh, R.H., Lin, Y.B., Yuang, M.G., A Bayesian approach to an adaptive preventive maintenance model. Reliability Engineering & System Safety, 2001., 71(1), 33-44.

Percy⁵⁸ je putem Bajesovog pristupa istraživao mogućnosti poboljšanja preventivnog održavanja. Apelan⁵⁹ je pokušao da koristi potpuno subjektivan ili Bajesov pristup za donošenje odluka o održavanju kada su objektivni podaci nedovoljni. Bajesov pristup se koristi i da se opišu otkazi sa zajedničkim uzrokom⁶⁰.

Bajesov model omogućava involviranje empirijskih iskustava održavalaca kao najveću prednost ali on sam po sebi nije podesan da se modeluje pouzdanost. Njegova najveća prednost je kombinovanje sa teorijskim raspodelama verovatnoće u čemu Bajesov metod služi korekciji te distribucije kao glavne da se opišu pojave otkaza sistema.

1.3.11. OSTALI MODELI

Neke od naprednih metoda koje se koriste u istraživanjima su na primer fazi logika, neuronske mreže, genetski algoritmi, fuzija podataka, kombinacije Monte Carlo metoda ili Markovljevih lanaca i ovih tehnika itd. Sve ove metode su atraktivne održavanju jer pružaju nove mogućnosti u pogledu preciznosti predikcije pouzdanosti. Tehnološki napredak čini da korišćenje kompjuterskih tehnika povećava analitičke mogućnosti i kvalitet istraživanja. Prve upotrebe računara za rešavanje problema u održavanju datiraju iz 70-ih godina ali do danas se puno toga promenilo kako su se i tehnološka dostignuća nizala. Danas se koriste razni softverski paketi da odrede načine otkaza ili za optimizaciju održavanja kao na primer RELCODE i EXAKT⁶¹. RELAX ili RELIABILITY WORKBENCH integrišu predikciju pouzdanosti, predikciju pogodnosti održavanja, FMECA metod, blok dijagram pouzdanosti, FTA, ETA metode, Markovljevu analizu itd¹. Postoje i drugi softveri koji se recimo koriste za upravljanje ljudskim resursima u održavanju⁶².

Naravno mnogi istraživači su kombinovali različite modele kao npr., Bajesov metod sa Poasnovim procesom⁶³, ili čak po tri modela poput Bajesovog, Markovljevih lanaca i Monte Carlo metode^{64,65}. Na ovaj način kombinovanja pojedinih modela razvijeno je mnogo novih specifičnih modela pouzdanosti.

⁵⁸ Percy, D.F., Kobbacy, K.A.H., Fawzi, B.B., Setting preventive maintenance schedules when data are sparse. *International Journal of Production Economics*, 1997., 51(3), 223-234.

⁵⁹ Apeland, S., Scarf, P.A., A fully subjective approach to modeling inspection maintenance. *European Journal of Operational Research*, 2003., 148(2), 410-425.

⁶⁰ Liu, Z., Liu, Y., Cai, B., Zhang, D., Zheng, C., Dynamic Bayesian network modeling of reliability of subsea blowout preventer stack in presence of common cause failures, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2015., 38, 58-66.

⁶¹ Tian, Z., Liao, H., Condition based maintenance optimization for multi-component systems using proportional hazards model, *Reliability Engineering & System Safety*, 2011., 96(5), 581-589.

⁶² Ghapanchi, H., Wohlin, C., Aurum, A., Resources contributing to gaining competitive advantage for open source software projects: An application of resource-based theory *International Journal of Project Management*, 2014., 32(1), 139-152.

⁶³ Belitser, E., Serra, P., Zanten, H., Rate-optimal Bayesian intensity smoothing for inhomogeneous Poisson processes, *Journal of Statistical Planning and Inference*, 2015., 166, 24-35.

⁶⁴ Lee, M., Sohn K., Inferring the route-use patterns of metro passengers based only on travel-time data within a Bayesian framework using a reversible-jump Markov chain Monte Carlo (MCMC) simulation, *Transportation Research Part B: Methodological*, 2015., 81(1), 1-17.

⁶⁵ Liu, Y., Li, C., Complex-valued Bayesian parameter estimation via Markov chain Monte Carlo, *Information Sciences*, 2016., 326(1), 334-349.

Hibridni modeli imaju perspektivu u pogledu naučnog istraživanja ali za sada ne pružaju univerzalna rešenja i imaju ozbiljne problem na nivou primenljivosti.

U novije vreme se razvijaju modeli koji se odnose i na imperfektna održavanja i pokušaje predikcije pouzdanosti sistema. Ipak, većina modela ima ozbiljna ograničenja koja limitiraju implementaciju ali i ne stvaraju realnu sliku kretanja pouzdanosti sistema.

Sa druge strane većina modela se oslanja na pretpostavku nezavisnosti otkaza komponenti sistema iako je jasno da je to potpuno nerealno i da ne odgovara iskustvima u industrijskoj praksi. Ima dosta modela koji pokušavaju da opišu realnost putem interakcije otkaza ili komponenti sistema⁶⁶ i koji predstavljaju realniji ali teže primenljiv koncept modelovanja pouzdanosti.

Koncept zavisnih otkaza je bio predmet mnogih istraživača u dugom nizu proteklih godina a najveću pažnju koja je i danas prisutna privlače kaskadni otkazi i otkazi^{67,68,69} sa zajedničkim uzrokom^{70,71}.

Kaskadni otkazi se mogu posmatrati kao višestruko sekvencijalni otkazi. Kaskadni otkazi su inicirani otkazom komponente koja dovodi do otkazivanja neke druge ili više drugih komponenti sistema.

Otkazi sa zajedničkim uzrokom su višestruko povezani događaji sa zajedničkim uzrokom. Dakle, na primer, jedna komponenta sistema dovodi do otkaza više drugih komponenti i time one imaju zajednički uzrok otkazivanja.

Otkazi sa negativnom zavisnošću su oni koji mogu da zaustave otkazivanje drugih komponenti. U ovom slučaju otkaz jedne komponente utiče pozitivno na pouzdanost druge ili više drugih komponenti.

Kaskadni otkazi i otkazi sa negativnom zavisnošću su često analizirani metodama poput analize stabla otkaza, Markovljevih lanaca ili blok dijagrama pouzdanosti. Greig⁷² je, recimo, predstavio model sekundarnog momenta za procenu pouzdanosti sistema i sa

⁶⁶ He, Z., Gong, W., Xie, W., Zhang, J., Zhang, G., Hong, Z., NVH and reliability analyses of the engine with different interaction models between the crankshaft and bearing, *Applied Acoustics*, 2016., 101(1), 185–200.

⁶⁷ Yi, C., Bao, Y., Jiang, Y., Xue, Y., Modeling cascading failures with the crisis of trust in social networks, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2015., 436(15), 256–271.

⁶⁸ Henneaux, P., Probability of failure of overloaded lines in cascading failures, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2015., 73, 141–148.

⁶⁹ Duan, D., Ling, X., Wu, X., OuYang, D., Zhong, B., Critical thresholds for scale-free networks against cascading failures, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2014., 416, 252–258.

⁷⁰ Cupac, V., Lizier, J., T., Prokopenko, M., Comparing dynamics of cascading failures between network-centric and power flow models, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2013., 49, 369–379.

⁷¹ Wu, X., Wu, X., Extended object-oriented Petri net model for mission reliability simulation of repairable PMS with common cause failures, *Reliability Engineering & System Safety*, 2015., 136, 109–119.

⁷² Greig, G. L., Second moment reliability analysis of redundant systems with dependent failures, *Reliability Engineering & System Safety*, 1993., 41(1), 57-70.

zajedničkim uzorkom otkaza i sa kaskadno zavisnim otkazima. Mosleh⁷³ je prezentovao smernice za identifikaciju, modelovanje i kvantifikovanje otkaza sa zajedničkim uzrokom. Findlay i Harrison⁷⁴ su identifikovali glavne načine otkaza sa zajedničkim uzrokom za slučaj aviona. Neki poput Yong Sun i dr.⁷⁵ su dali analitičke modele interaktivnih otkaza.

I pored svih pokušaja da se otkazi obuhvate i što realnije modeluju kao i pouzdanost sistema, praksa i teorija pokazuju da postoje otkazi koji se ne mogu podvesti niti pod nezavisne niti pod navedene grupe otkaza u kojima ima interakcije¹.

Osim što otkazi mogu da interaguju jednosmerno, moguće opcije su da otkazi komponenti uzajamno interaguju. Taj uticaj je moguć i u pozitivnom i u negativnom pravcu kao i od jedne komponente ka više njih i obratno. U pojedinim slučajevima promene stope otkaza komponenti usled interakcije otkaza mogu biti značajne i imati veliki uticaj na pouzdanost i pojavu otkaza. Procena verovatnoće otkaza komponenti koje su izložene interakciji otkaza je prioritet kako bi se realno modelovala pouzdanost takvog sistema. Efikasni modeli i tehnike koje se koriste za ovu kvantitativnu analizu verovatnoće otkaza još ne postoje ili su neprimenljivi i pored mnogo napisanih radova i dugo vremena bavljenja ovom tematikom.

1.3.12. DISKUSIJA

Iako broj modela neprekidno raste i istraživanja kombinuju razne tehnike i metode a nova polja i mogućnosti se vremenom otvaraju, ipak primenljivost tih modela je veoma mala i čak ima opadajući trend. U svom istraživanju 1996. godine Dekker, R.,⁷⁶ je uspeo da prebroji realno primenljive modele i pronašao 112 njihovih primena. Većina je implementirana u periodu od 1985. do 1989. godine, njih 45, ali nakon 1990. godine je našao samo 25 primenjenih modela. Dakle usko grlo svakog istraživanja nije ništa drugo do implementacija modela. Takođe, realni uslovi u industriji u kojima su informacije nedostajuće i gde usled preventivnih akcija održavanja i potrebe da sistem bude stalno na što višem nivou pouzdanosti, kreiraju situaciju sa nedovoljnim brojem otkaza za primenu ogromne većine modela pouzdanosti. Ista situacija postoji i onda kada je tehnički sistem nov a kada je najbolji trenutak za modelovanje pouzdanosti kako bi period eksploatacije karakterisala što veća efikasnost.

Iako se može reći da su otkazi nepotrebni input modelovajna u slučaju kada se dijanostikom stanja može postići procena pouzdanosti sistema, činjanica je da preveliki broj inspekcija može usloviti i velike gubitke onda kada se sistem mora planski zaustaviti ili usled cene koštanja inspekcija.

⁷³ Mosleh, A., Common cause failures: An analysis methodology and examples, Reliability Engineering & System Safety, 1991., 34(3), 249-292.

⁷⁴ Findlay, S., J., Harrison, N. D., Why aircraft fail. Materials Today, 2002., 5(11), 18-25.

⁷⁵ Sun, Y., Ma, L., Mathew, J., Zhang, S., An analytical model for interactive failures, Reliability Engineering & System Safety, 2006., 91(5), 495-504.

¹ Sun, Y., "Reliability Prediction Of Complex Repairable Systems: An Engineering Approach", Thesis submitted in total fulfilment of requirements of the degree of Doctor of Philosophy, Faculty of Built Environment and Engineering, University of Technology, Queensland, 2006.

⁷⁶ Dekker, R., Applications of maintenance optimization model: a review and analysis, Reliability Engineering and System Safety, 1996., 51(3), 229-240.

Ipak, činjenica je da su zahtevi za što većom preciznošću stanja sistema takvi da je modelovanje pouzdanosti uvek isplativo ulaganje. Prepreke koje se nameću u ovom zadatku pred naučnike i održavaoce čine ovaj zadatak kompleksnim a u pojedinim slučajevima današnjice i nerešivim. Jedno je i pored toga jasno, da donošenja najboljih odluka o održavanju nekog tehničkog sistema nema bez predikcije njegove pouzdanosti.

Dosada razvijeni modeli pouzdanosti se najviše oslanjaju na teoriju verovatnoće međutim kao takvi malo odslikavaju iskustva iz prakse ili eksperimentalna istraživanja. Druga istraživanja pak uvršćuju empiriju i eksperiment ali imaju i ozbiljne nedostatke i pored težnje da se približe realnim uslovima:

- modeli koji vrše proračun pouzdanosti sistema nakon preventivnih akcija održavanja su neadekvatni i neprimenljivi,
- modeli prilikom procene pouzdanosti kompleksnih popravljivih sistema često ne dekomponuju sistem i razmatraju pouzdanost pojedinačnih komponenti sistema već sistem sagledavaju integralno dajući uprošćenu i nepreciznu procenu pouzdanosti sistema,
- interakcija između otkaza komponenti sistema nije adekvatno modelovana i postojeći modeli koji se odnose na zavisne otkaze razmatraju uglavnom jednosmerne efekte otkaza. Dakle, modeli sa kontinualnim interakcijama između komponenti još nisu razvijeni,
- ne postoje adekvatni modeli koji su razvijeni da procene pouzdanost sistema na bazi malog broja otkaza ili u slučaju kada oni ne postoje.

Može se naslutiti da je prilaz sa teorijskog aspekta modelovanja kao i eksperimentalnog podjednako dobar ukoliko uvaži prednosti onog drugog i sopstvene nedostatke ukloni u meri koja je moguća odnosno da bez ovih pravaca delovanja nijedan pristup nije dobar.

Današnji nivo modelovanja je takav da se pokušavaju prevazići pomenuti nedostaci ali sve ostaje na niskom nivou implementacije. Ovaj rad pokušava da napravi kvalitativni i kvantitativni korak u tom pravcu da se postojeća znanja konceptualizuju i prekomponuju u primenljivu celinu putem novih softverskih rešenja sa akcentom na njihovo racionalno vreme izvršenja.

Ovo znači kao i kod svakog modela da se određenim pretpostavkama stvore i nekakvi limiti modela ali fleksibilnost modela može biti način da se on može primeniti na što većem broju vrsta tehničkih sistema te i da mu se limitirajuće pretpostavke mogu korigovati u skladu sa potrebama modelovanja pouzdanosti konkretnog tehničkog sistema.

Mnoštvo kompromisa i nalaženja finih mera između zahteva i mogućnosti koja nude danas osvojena znanja nameću dugi pogled. Sama polazna osnova modelovanja pouzdanosti ne mora biti iz određene klasične ili jasno definisane oblasti, već bi dobro bilo da se interdisciplinarnim pristupom uzimaju dostupna znanja i pakuju u celinu koja je praktično primenljiva i upravljana industrijskim zahtevima sa posebnim akcentom na primenljivost i svrsishodnost modela koji moraju biti deo predefinisano cilja rada.

Dosadašnja istraživanja imaju pred sobom postavljene još nerešene zadatke. Oni su uslovljeni trenutnim stanjem u istraživanjima. Na primer, postoji veoma velika neusaglašenost teorijskih istraživanja i primenjenih modela u praksi. Većina modela je razvijena od naučnika u vidu teorijske, matematičke, statističke, informatičke ili neke druge problematike koja ne može da se implementira i reši praktičan problem u industriji. Zadatak se može definisati kao razvoj modela koje je moguće implementirati u svrhu rešavanja praktičnih problema u industriji.

Stvaranje modela koji se mogu primeniti i u slučaju malog broja dostupnih podataka o sistemu, a naročito malog broja otkaza. Ovo je realnost za mnoge tehničke sisteme i činjenica koja kada je prisutna nema alternativu.

Tačnost modela pouzdanosti je nešto što još pruža velike mogućnosti za napredak. Ovo je naročito važno kada je u pitanju predikcija pouzdanosti koja je fundament planiranja i donošenja odluka o optimalnim akcijama održavanja prema zadatim kriterijumima.

Modeli pouzdanosti koji se odnose na kompleksne tehničke sisteme još nisu razvijeni kao dovoljno precizni, primenljivi i ne obuhvataju bitne realne faktore. Neophodan je dalji rad u ovim pravcima.

2. METODOLOŠKI KONCEPT

2.1. PROBLEM ISTRAŽIVANJA

Performanse tehničkog sistema u industriji su dalekosežne i složene. One se reflektuju na proizvodnju, cenu koštanja proizvoda, servis potrošačima kao i direktno na sam profit i celokupno poslovanje. Pouzdanost je veličina koja direktno utiče na performanse tehničkog sistema i predstavlja fundamentalnu veličinu sistema. Nju možemo definisati kao sposobnost tehničkog sistema da izvršava zahtevanu funkciju, pod datim uslovima i u datom intervalu vremena. Ukupna pouzdanost tehničkog sistema može biti poznata jedino ako se razvije i primeni adekvatan model pouzdanosti. **Problem ovog istraživanja je upravo kreiranje opštih modela pouzdanosti složenih tehničkih sistema.**

Mnogi modeli koriste blok dijagram pouzdanosti kao polaznu osnovu da definišu tehnički sistem i funkcionalne odnose među komponentama sistema. Blok dijagrami kombinovani sa različitim teorijskim zakonima raspodele verovatnoće pojave otkaza omogućuju modelovanje i po kriterijumu složenosti tehničkog sistema po vrstama komponenti. Modelovanje može uključiti i pitanje interakcije komponenti sistema i to kako otkaz jedne komponente sistema utiče na druge. U praksi se kod velikih popravljivih tehničkih sistema dešava veći broj uzastopnih preventivnih akcija održavanja zbog čega je teško pratiti pouzdanost sistema naročito nakon većeg broja ovih akcija. Broj razvijenih modela koji uvažavaju ovaj faktor je jako mali a primena na složenijim tehničkim sistemima jako retka i nije primenjivana na tehničke sisteme koji su predmet ovog istraživanja. Popravke koje se sprovode na tehničkim sistemima u praksi pokazuju različite efekte, uključujući popravke koje dovode do imperfektnih rezultata, tj. do toga da se pouzdanost ne podiže na apsolutni nivo. Modeli pouzdanosti moraju obavezno uvažiti ove aspekte realnosti kako bi bili validni a sa druge strane njihova primenljivost postaje otežana i mora se voditi računa o tome u svakom momentu naučnog istraživanja, jer je primenljivost modela upravo usko grlo ovakvih i sličnih problema istraživanja.

Takođe i drugi parametri mogu biti promenjeni nakon opravki sistema, recimo intenzitet otkaza, odnosno zakonitost njegove promene. Kada su u pitanju ovi faktori takođe je razvijeno malo adekvatnih modela i postoje mnogobrojne teškoće primene ovakvih modela na složene tehničke sisteme

2.2. PREDMET ISTRAŽIVANJA

Po kreiranju opštih modela pouzdanosti tehničkih sistema problem konkretnog modelovanja se svodi na odabir najboljih parametara za obezbeđenje pouzdanosti. Stoga je **predmet ovog naučnog istraživanja izbor najboljih parametara za formiranje sopstvenih modela za obezbeđenje pouzdanosti složenih postrojenja u termoelektranama.** Tehnologija održavanja tehničkih sistema nezamisliva je bez poznavanja podataka o pouzdanosti samog sistema, na osnovu koga se dolazi do odluka bitnih za proces održavanja. Do tih odluka se dolazi na osnovu postavki iz teorije pouzdanosti i sistemskih nauka u celini, a u njihovoj osnovi se nalazi detaljno izučavanje otkaza i drugih pojava u životu tehničkog sistema, tako da se postupci

održavanja sadržajno i vremenski usklađuju sa stvarnim potrebama. Tehnologija održavanja počiva na poznavanju karakteristika pouzdanosti, na osnovu kojih se stalno, tokom rada tehničkog sistema vrše prognoze budućeg stanja, odnosno predviđanja pojava otkaza. Na bazi tih saznanja se donose odluke o postupcima preventivnog, korektivnog ili kombinovanog održavanja koje treba sprovesti u određenim trenucima vremena, kako bi se sprečila iznenadna pojava otkaza, a time i odgovarajući zastoji i dodatni troškovi. Dobro definisan model pouzdanosti, koji uvažava sve relevantne faktore koji utiču na pouzdanost tehničkog sistema, može da obezbedi donošenje najboljih odluka o akcijama za njegovo održavanje i time obezbedi odgovarajući nivo pouzdanosti datog tehničkog sistema. Složena postrojenja u termoelektranama koja su predmet ovog istraživanja su specifična i od velike važnosti. Složena postrojenja koja se razmatraju u ovom radu su: parne turbine, generatori, tračni transporter, bageri. Posledice njihovog zastoja mogu biti veoma ozbiljne i njihovo poznavanje pouzdanosti mora biti prioritet. Do danas nije dat dobar model pouzdanosti tehničkih sistema koji su predmet istraživanja te su istraživanja daleko od tačke obuhvatanja svih relevantnih faktora pouzdanosti datih tehničkih sistema, a još dalje od kreiranja integralnog modela. Kreiranje modela pouzdanosti za ova postrojenja pokreće brojna pitanja kakva su prikupljanje podataka o otkazima, kreiranje blok dijagrama pouzdanosti, dekompozicije postrojenja, uvažavanje preventivnih akcija održavanja, imperfektnih akcija održavanja itd.

2.3. CILJ ISTRAŽIVANJA

Cilj istraživanja je da se **teoretski i empirijski, kontrolisano, sistematski i kritički ispita hipoteza formiranja modela za obezbeđenje pouzdanosti složenih postrojenja u termoelektranama PD "Termoelektrane i kopovi Kostolac" doo, Kostolac i PD "Termoelektrane Nikola Tesla" doo, Obrenovac.** Ovo znači ostvarivanje sledećih zadataka:

- Prikupljanje i obrada podataka o otkazima tehničkih sistema.
- Formiranje blok dijagrama na adekvatnom nivou dekomponovanja sistema.
- Povezivanje podataka o otkazima sa blok dijagramom i na bazi toga definisanje teorijskih zakonitosti raspodele i parametara date raspodele za svaki dekomponovani deo tehničkog sistema a na bazi analize otkaza.
- Razvijanje modela za predikciju i obezbeđenje pouzdanosti koji uvažavaju višestruke korektivne i/ili preventivne akcije održavanja. Ove metode je potrebno najpre opšte definisati prema pretpostavci da korektivne ili preventivne akcije održavanja mogu kao konsekvencu imati da sistem nakon popravke bude apsolutno pouzdan, što većina modela i uzima kao pretpostavku, a zatim i prema pretpostavkama imperfektnih akcija održavanja. Ovi modeli se razvijaju na bazi pretpostavke da su otkazi delova sistema međusobno nezavisni. Nakon razvijanja modela potrebno je primeniti ih na date tehničke sisteme i izvesti zaključke, te pronaći one koji su za date tehničke sisteme i njihove delove najprimenljiviji.
- Razvijanje modela na bazi prethodnog iskustva koji uvažavaju postojanje interakcije među delovima tehničkih sistema i međusobnog uticaja promene pouzdanosti jednih na pouzdanost drugih. Posebnu pažnju treba obratiti na uticaj otkaza pojedinih delova tehničkih sistema na pouzdanost drugih. Uklanjanje

pretpostavke o međusobnoj nezavisnosti otkaza komponenata iz prethodno definisanih modela dovodi do postavljanja kompleksnog modela pouzdanosti. Ovakav model mnogo više uvažava faktore realne situacije, ali je zbog njegove složenosti i mogućnosti da se naprave ozbiljne greške u primeni ovog modela, potrebno uočiti gde je adekvatno primeniti ga, a gde ne. Potrebno je dakle jasno uočiti mesta primene ovog modela na bazi postojanja zavisnosti (korelacije) između pojave otkaza jednog dela tehničkog sistema ili nekih drugih veličina koje mogu ukazati na ove relacije kao što je npr. srednje kvadratno odstupanje.

- Integracija razvijenih modela na konkretne tehničke sisteme i analiza na osnovu podataka o otkazima, te verifikacija modela i metodologije modelovanja. Modeli moraju pružiti kao svoje izlaze podatke o pouzdanosti, koji moraju biti upotrebljivi i koji se mogu dalje analizirati za konkretni tehnički sistem, te donositi relevantne odluke u pogledu akcija održavanja radi ostvarenja ciljeva modelovanja.

Kao rezultat istraživanja očekuje se formiranje modela za obezbeđenje pouzdanosti koji dovodi do preciznih podataka o pouzdanosti modelovanog sistema a posledično i do mogućnosti za donošenje kvalitetnijih odluka o akcijama održavanja, te sprečavanje pojave otkaza, odnosno, smanjivanje verovatnoće pojave otkaza u narednom periodu rada tehničkih sistema na kojima se modeli primenjuju putem optimizacije sadržaja akcija preventivnog i/ili korektivnog održavanja.

Naučno istraživanje u okviru ovog rada treba da dovede i do primene modela koji se odnose na interaktivne otkaze, što je prva primena ovakvih modela na datim postrojenjima. Kao rezultat toga se očekuju kvalitetni (precizniji) podaci o pouzdanosti ovih tehničkih sistema.

Ovo istraživanje treba takođe da omogući primenu modela za obezbeđenje pouzdanosti i u uslovima malog broja otkaza ili nepostojanja podataka o otkazima za mnoge delove tehničkih sistema koji su obuhvaćeni istraživanjem što je uobičajeno za postrojenja sa velikim brojem preventivnih akcija održavanja kao i za slučajeve loših evidencija podataka o otkazima.

Formiranje hibridnih modela na bazi prethodno definisanih za složene tehničke sisteme bi mogao biti kvalitativno novi doprinos u modelovanju pouzdanosti i originalan doprinos modelovanju sistema koji su u fokusu ovog naučno-istraživačkog rada.

2.4. HIPOTEZE ISTRAŽIVANJA

Glavna hipoteza istraživanja glasi: "**Moguće je formirati modele za obezbeđenje povišenog eksploatacionog nivoa pouzdanosti složenih postrojenja u termoelektranama**".

Modeli će biti primenljivi u planiranju zastoja i preventivnih akcija održavanja. Modeli treba da obezbede rešenja koja su optimalna po pojedinim kriterijumima a koji treba da oslikaju najbitnije faktore pouzdanosti postrojenja u termoelektranama i daju što jasniju i celovitiju sliku o njihovoj pouzdanosti. Prioritet je da ovi modeli moraju biti primenjivi na složene tehničke sisteme i očekuju se poboljšanja njihovom primenom u

smislu boljeg uvida u stanje složenih postrojenja u termoelektranama, te da se stvaraju mogućnosti za izbor optimalnih vremenskih trenutaka i odabir pravih akcija održavanja što indirektno dovodi do povećanja proizvodnje i smanjivanja troškova koje sa sobom povlače neplanirani otkazi usled nepoznavanja pouzdanosti sistema.

Radne – pomoćne hipoteze:

1. Moguće je definisati modele koji prezentuju kompleksne tehničke sisteme putem blok dijagrama pouzdanosti koji se može povezati analizom otkaza sa odgovarajućim zakonima raspodele za svaki dekomponovani blok te integralno prezentovati kretanje pouzdanosti celog sistema.
2. Moguće je u modele pouzdanosti uvrstiti popravke podsistema, te dalje uvažiti njihovu imperfektnost.
3. Moguće je definisati i u modele implementirati uticaj otkaza jedne komponente na pouzdanost drugih komponenti.
4. Moguće je sve modele softverski realizovati u vremenski prihvatljivim okvirima izvršenja softvera koji je primeljav na konkretna složena postrojenja u termoelektranama.
5. Putem softverskih simulacija modela i izlaznih podataka moguće je proveriti validnost modela za date tehničke sisteme upoređujući ih sa početnim podacima o otkazu.

Dekomponovanje sistema daje bolji uvid u funkcionalne veze komponenti i mogućnosti za kvalitetnije podatke o pouzdanosti, ali i je to mač sa dve oštrice u kome se gubi ionako mali broj otkaza po komponenti ali i otežava integralni proračun pouzdanosti za celi sistem. Ovde je potrebno naći meru dekomponovanja kroz to da se sistem maksimalno dekomponuje što se postiže mogućnošću da model barata sa malim brojem otkaza. Ipak, boljim dekomponovanjem sistema javlja se veći broj manjih proračuna pouzdanosti i teškoća formiranja efikasnog proračuna pouzdanosti za celi sistem. Dakle, sa jedne strane postoji težnja da se sistem što bolje dekomponuje radi kvalitetnih podataka o pouzdanosti a sa druge stoje zahtevi da broj podataka o otkazu po pojedinoj komponenti sistema ne bude mali kao i da je proračun pouzdanosti izvodljiv u vremenski prihvatljivim granicama i primenljiv. Upravo u prostoru ovih međusobno suprotstavljenih zahteva leži potencijal izrade modela pouzdanosti kakav do sada nije izrađen i primenjen na postrojenja koja su predmet ovog naučnog istraživanja.

Sledeći zadatak se odnosi na formiranje modela koji uvažava akcije održavanja, naročito preventivne koje su po pravilu dominantne u industriji. Naravno, postoje i tehnički sistemi koji se dominantno održavaju korektivno, kakavi su u ovom istraživanju u vezi sa sistemom za prouzvodnju električne energije (turbine, generatori itd.) Svakako da je usled malog broja ovih modela i primena izostala ali ovi modeli nikada nisu adaptirani na postrojenja iz ovog naučnog istraživanja pa se nužno mora pribeci adaptacijama koje su specifične i do sada nisu izvođene. Naročito je teško izvesti validaciju modela sa malim brojem otkaza po komponenti.

Kod ovakvih modela pretpostavka nezavisnosti otkaza je pravilo, ali iskustva iz industrije govore o povezanosti otkaza među komponentama sistema pa su mnoga istraživanja iako sa neefikasnim primenama već dugo usmerena na pojedine vrste zavisnih otkaza. Model koji bi uvažio ovakve otkaze mora imati i prethodne

performanse koje se odnose na preventivne akcije i druge elemente što mu daje veoma veliku složenost naročito u domenu proračuna pouzdanosti za ceo sistem. Ovakav model do danas nije primenjen na ova postrojenja pa njegova permanenta primena i ne postoji ali bi se njegovim razvojem mogli dobiti izuzetno kvalitetni podaci koji bi u budućnosti mogli postati standard za sva ovakva postrojenja usled potencijala ogromnih benefita nakon primene modela pouzdanosti. Upravo od realizacije ovog zadatka će zavisiti dobijanje najveće opravdanosti istraživanja.

Imajući u vidu prethodno navedeno potpuno je jasno da se analitičkim metodama ne mogu izvesti proračuni u ovako masovnom obimu i da se mora preći na algoritamsku i softversku logiku proračuna, koja nekada neminovno mora značiti prelazak sa kontinualnih veličina na diskretne. Ovaj prelazak je uvek delikatan i svakako da dolazi do gubitaka određenih performansi rezultata, ali one mogu biti u svedene na minimum pažljivim planiranjem algoritama proračuna i svedeni na manje značajne kada se uzme u obzir masovnost proračuna kao i da je to možda jedini put da se proračun izvede u vremenski prihvatljivim granicama.

Validacija ovih modela je veoma delikatno pitanje usled toga što je pitanje koji su kriterijumi validacije mogući. Kako nema sličnih modela da se izvrši upoređenje modela i dobijenih rezultata onda se mora vratiti na inpute modela i upoređenje dobijenih rezultata proračuna sa onim iz baze podataka, te se u tom koraku i eventualno izvršiti korekcija modela.

2.5. NAUČNA I DRUŠTVENA OPRAVDANOST ISTRAŽIVANJA

U industriji su popravljivi tehnički sistemi dominantna vrsta. Popravljive tehničke sisteme možemo definisati kao one koji nakon popravke ponovo mogu obavljati funkciju cilja za koju su projektovani nakon svakog eventualnog otkaza. Takva vrsta tehničkih sistema je domen predmeta ovog naučnog istraživanja i svi modeli su orijentisani na takve tehničke sisteme. Postojanje malog broja modela ove vrste, kao i onih koji se odnose na imperfektne popravke kakve odgovaraju realnom stanju stvari ukazuje na potencijal rezultata ovog istraživanja naročito ako se uzme u obzir da složeni tehnički sistemi znače i skupa vremena zastoja koja se najefektnije kontrolišu poznavanjem pouzdanosti putem modelovanja. Mali broj modela uvažava i realnost interakcije delova tehničkog sistema jednih na druge i posledice koje njihovi otkazi izazivaju, pa su istraživanja sa primenom na postrojenja iz predmeta istraživanja korisna u smislu postavljanja temelja za dalja modelovanja ove vrste. Dakle, ova istraživanja pokušavaju da približe modele pouzdanosti realnom stanju stvari na kvalitativno nov način i utru put lakšoj primeni ovih modela, te stvore uslove za koristi širokog obima u smislu donošenja najboljih odluka o akcijama održavanja koje direktno utiču na uštede, proizvodne procese, načine servisiranja itd. U najužem smislu posmatrano, koristi od modela za obezbeđenje pouzdanosti tehničkih sistema u PD "Termoelektrane i kopovi Kostolac" doo, Kostolac i PD "Termoelektrane Nikola Tesla" doo, Obrenovac, se ogledaju u mogućnosti planiranja zastoja, velikih ušteda, efikasnijeg održavanja i lakšeg planiranja akcija održavanja. Primena boljih modela dovodi do direktnog smanjivanja broja otkaza a to dalje smanjuje i troškove održavanja. Krajnji rezultat bi mogao da se ogleda u povećanju sveukupne sigurnosti funkcionisanja čitavog proizvodnog sistema termoelektrana, a time i elektroenergetskog sistema zemlje.

Mogućnost primene očekivanih rezultata se ogleda u potencijalu da se modeli pouzdanosti primene na sva slična postrojenja u zemlji usled njihove sličnosti. Dakle i problematika sa kojom se susreću je slična. Podaci koje ponuđeni modeli obezbeđenja pouzdanosti složenih postrojenja pružaju omogućuju najbolje akcije održavanja, pa je uz adekvatne postavke i korekcije parametara modela moguće dobiti relevantne podatke i za druga složena postrojenja u termoelektranama u Srbiji, a potencijalno i šire. Ovakvi modeli vode i ka kreiranju integralnih modela na nivou čitavih fabrika čak i van domena termoelektrana pa je potencijalno moguće iskorišćenje modela i na nivou celokupne Elektroprivrede Srbije, pa i šire. S obzirom da se ovo preduzeće od nacionalnog značaja nalazi u procesu restrukturiranja, potreba za primenom rezultata jednog ovakvog istraživanja je potencijalno veoma velika.

2.6. METODE ISTRAŽIVANJA

Metodološki posmatrano, razvoj modela za obezbeđenje pouzdanosti složenih postrojenja treba da bude koncipiran na takav način da se ponuđena opšta rešenja mogu primeniti na bilo koje slične tehničke sisteme ali uz uvažavanje specifičnosti koje se odnose na konkretna postrojenja putem odabira pravih vrednosti parametara modela. Modeli su rezultat različitih metoda i polaznih pretpostavki koje se koriste empirijskim podacima radi izbora parametara konačnih rešenja koja obezbeđuju najveću pouzdanost i donošenje relevantnih odluka o akcijama održavanja. Sistemski pristup u savremenoj nauci predstavlja specijalnu metodološku koncepciju, koja ima za zadatak da u sistemskom obliku formuliše sveukupnost metoda istraživanja i konstruisanja različitih sistema. Kompleksnost problematike zahteva kombinovanje različitih istraživačkih tehnika i instrumenata. Metodološka osnova za rad na doktorskoj disertaciji će se zasnivati na kombinovanom metodološkom pristupu. Metode koje su u primeni su analiza i sinteza, indukcije i dedukcije, kibernetiska metoda, statistička metoda, itd. Kako bi se obezbedila predikcija pouzdanosti složenih tehničkih sistema potrebno je korišćenje metoda teorije verovatnoće. Za prezentovanje funkcionalnih odnosa među komponentama sistema biće korišćen blok dijagram pouzdanosti. Na bazi definisanja matematičkih modela, radi mogućnosti izvođenja proračuna i povezivanja modela sa empirijskim podacima potrebno je definisanje računarskih (softverskih) modela koji će biti algoritamski razvijani i prezentovani radi lakšeg razumevanja a za šta će se upotrebljavati raznoliki softverski paketi koji mogu zatrebati poput MS Excela ili Visual Basica, itd. Simulacije mehanizama otkazivanja biće ostvarene putem pseudo slučajnih brojeva što govori o primeni Monte Carlo metode. Softverskim modelovanjem se ubrzava postupak svakog proračuna i stvara mogućnost za lakše korigovanje modela i eventualno brže podešavanje parametara definisanih modela za šta je neophodna primena i statističke metode. Da bi se došlo do validnih modela za obezbeđenje pouzdanosti potrebno je koristiti se i modelnim eksperimentima i simulacijama. Verifikacija se vrši korišćenjem podataka prikupljenih na licu mesta i baze podataka koja je dostupna.

Magistarski rad autora ove disertacije „Softver za praćenje pouzdanosti mašina u procesu eksploatacije“ koji predstavlja naučno-istraživački rad na modelovanju pouzdanosti tehničkih sistema ukazao je na probleme modelovanja pouzdanosti složenih sistema i otvorio put daljim istraživanjima. Logično je, da je dalji korak u istraživanju bio na polju koje je sa malo rezultata, a odnosi se na modelovanje pouzdanosti popravljivih tehničkih sistema, gde se javlja veliki broj uzastopnih preventivnih akcija, i

gde najčešće korišćeni modeli nemaju mogućnost primene. Ovo su najčešći tehnički sistemi u industriji i fokus mnogih istraživanja je na ovom pitanju no rezultati izostaju u domenu primenljivosti modela ili njihove ograničenosti na samo pojedine sisteme. Mali broj podataka o otkazima koji su česta pojava u praksi je dodatno ozbiljno ograničenje koje mnoge modele čini neprimenljivim. Takođe, pitanja interakcije delova tehničkih sistema su nedovoljno istražena i primenjena, te je naučno istraživanje logično usmereno i na tu stranu. Realna situacija ukazuje i na slučajeve imperfektnih akcija održavanja koje ne dovode uvek do povećanja pouzdanosti na apsolutni nivo, kako to najveći broj primenjivanih modela pouzdanosti uzima u obzir, pa je istraživanje u ovom domenu neophodnost kako bi se pouzdanost tehničkog sistema razumela, pratila i što preciznije predviđala.

Mesto eksperimentalne provere rezultata su PD "Termoelektrane i kopovi Kostolac" doo, Kostolac i PD "Termoelektrane Nikola Tesla" doo, Obrenovcu vremenskom periodu od 2011. do 2014. godine.

Nakon grupisanja podataka složenih postrojenja u PD "Termoelektrane i kopovi Kostolac" doo, Kostolac i PD "Termoelektrane Nikola Tesla" doo, Obrenovac o stanju „u radu“ i stanju „u otkazu“, kao i podataka o uzrocima otkaza i akcijama održavanja, upotrebom statističkih metoda obrade podataka se dolazi do korigovanja postavljenih modela pouzdanosti. Kako bi se modeli učinili što efikasnijim neophodno je njihovo povezivanje i sa postojećom bazom podataka ali i eksperimentisanje na modelu putem simuliranja podataka.

2.7. ORGANIZACIJA ISTRAŽIVANJA

U današnjoj domaćoj elektroprivredi tehničke sisteme karakteriše veliki broj otkaza. Primena modela za obezbeđenje pouzdanosti tehničkih sistema je na veoma niskom ili neretko nikakvom nivou. Zbog ovoga je svako modelovanje korisno i može dovesti do ozbiljnih benefita u poslovanju. Način izbora uzorka je zasnovan na ovoj realnoj potrebi, a time je posledično definisana i veličina uzorka. Podaci o otkazima su pohranjeni u bazama podataka termoelektrana. Ipak, i ovaj veliki broj podataka nije dovoljno dobro obrađen ili na brižljiv način prikupljan i klasifikovan, a situacija je još više otežana činjenicom da taj veliki broj podataka postaje mali broj otkaza ili ne postoji po pojedinom elementu sistema. Počevši od definisanih funkcija cilja tehničkih sistema i definisanih nivoa dekomponovanja u okviru blok dijagrama kao i od mogućnosti prikupljanja podataka o tehničkim sistemima koji se ispituju, dolazi se i do okvira za konstrukciju uzoraka.

Mesto eksperimentalnog istraživanja je PD "Termoelektrane i kopovi Kostolac" doo, Kostolac i PD "Termoelektrane Nikola Tesla" doo, Obrenovac. Vreme praćenja tehničkih sistema je trajalo u vremenskom periodu od 2011. do 2014. godine.

Sistemi koji su praćeni u procesu eksploatacije su:

- Tračni transporter sistema BTO5 na površinskom kopu Drmno u PD „Termoelektrane i kopovi Kostolac“ DOO, Kostolac,
- Rotorni bager 1200x24/4x0 (400kW) + VR koji radi na površinskom kopu uglja Polje D RB Kolubara,
- Blokovi B1 i B2 termoelektrane Kostolac B

Istraživanje započinje teorijskim razmatranjima pouzdanosti, strukture i predstavljanja složenih tehničkih sistema i postojećih modela za obezbeđenje pouzdanosti integralno posmatranog sistema a zatim i dekomponovanog i onog koji se preventivno ili kombinovano održava. Nakon toga se daje pregled modela razvijenih u svetu koji su poslužili kao osnova ili ideja daljeg rada da bi usledio razvoj novih sopstvenih modela složenih postrojenja u termoelektranama. Razvoj modela mora zbog složenosti postepeno razmatrati svaki od većih problema modelovanja. Koraci se odnose na probleme dekomponovanja sistema (što je u tesnoj vezi sa prikupljanjem podataka o otkazima i realizacijom proračuna pouzdanosti celog sistema), zatim modelovanje nepopravljivih i popravljivih komponenti, zatim korektivno, preventivno ili kombinovano održavanje, te primenu dvoparametarske ili troparametarske Vejbulove raspodele i na kraju na interakciju otkaza komponenti sistema. Verifikacija svakog od modela je korak koji se može odigrati pre neposredne primene modela kako bi se korigovali parametri modela i eventualne greške proračuna time anulirale. Podesna metoda za to jeste Monte Carlo metoda koja treba da uskladi simulacione podatke sa stvarnim iz baze podataka promenom odgovarajućih parametara.

Nakon što se kreira odgovarajući model sa validnim parametrima, sledi simulacija rada sistema. Simulacije se mogu iterativno ponavljati i pod različitim parametrima održavanja. Mogu se menjati vremenski periodi održavanja kao i vrednosti pouzdanosti kada se pristupa akcijama održavanja. Moguće je modelom predvideti i različite oblike imperfektne akcije održavanja sa različitim nivoima pouzdanosti.

Dovoljan broj iteracija može dovesti do validnih parametara i sigurnih zaključaka o tome koje je akcije održavanja najbolje preduzeti prema definisanim kriterijumima. Kriterijumi mogu biti minimum troškova održavanja, minimum otkaza, kumulativni nivo pouzdanosti za diskretne vrednosti ili funkcija pouzdanosti kao kontinualna vrednost. Izbor kriterijuma zavisi od postrojenja na kome se primenjuje simulacioni model pouzdanosti tako da njegov izbor zavisi i od samog tehničkog sistema ali i od karakteristika modela prema dostupnim podacima. Kriterijum troškova, na primer, je primenljiv samo tamo gde su takvi podaci dostupni i involvirani u model.

Nakon niza simulacija i dobijenih rezultata potrebno je sistematizovati ih i predstaviti u adekvatnom obliku. Grafičko i tabelarno prezentovanje dobijenih rezultata je najpodesnije za veliki broj podataka koji figurira za ovako veliki broj simulacija. Potrebna je dodatna pažnja kako ne bi došlo do propusta koji mogu izmeniti smisao rezultata. U ovom postupku veliku pomoć pružaju softveri za tabelarne proračune koji omogućuju sistematičan rad. Nakon ovog postupka potrebno je komentarisati rezultate i izvesti zaključke.

3. TEORIJSKA ISTRAŽIVANJA

Teorijska istraživanja se odnose na problem istraživanja te pitanja pouzdanosti i modela pouzdanosti složenih tehničkih sistema. Akcenat je bačen na mogućnost da modeli iskažu kretanja pouzdanosti popravljivih tehničkih sistema kakvi su u razmatranju ovog naučnog istraživanja i kakvi su dominantni u industriji. Složeni tehnički sistemi se mogu posmatrati sa aspekta brojevnog i strukturnog složenosti koja nameće i različita gledišta na probleme modelovanja. Nakon što se preispitaju mogućnosti već postojećih modela pouzdanosti složenih tehničkih sistema u poslednjem poglavlju teorijskih istraživanja će se razvijati novi modeli koji će u okviru eksploatacionih istraživanja biti implementirani na složena postrojenja u termoelektranama.

3.1. POUZDANOST SLOŽENIH TEHNIČKIH SISTEMA

3.1.1. POUZDANOST TEHNIČKIH SISTEMA

Radi boljeg baratanja terminima i daljeg toka naučnog istraživanja neophodno je pre svega definisati neke osnovne pojmove u vezi sa pouzdanošću i otkazima tehničkih sistema. Neki od ovih pojmova nisu u eksplicitnom razmatranju zbog svoje nejasne pojave ili nestalnog postojanja u okvirima tehničkih sistema koji se razmatraju ali je njihovo definisanje neophodnost radi celokupne slike o ponašanju sistema u vezi sa pouzdanošću.

POUZDANOST (eng. RELIABILITY) je sposobnost da se očuvaju parametri koji karakterišu sposobnost ispunjavanja zadate funkcije, odnosno očuva kvalitet u predviđenim uslovima eksploatacije za određeno vreme. Bitni faktori u definiciji su: "vreme" (pouzdanost je vremenski zavisna) i "određeni uslovi" u kojima treba da radi sistem (sistem se proračunava za rad u određenoj sredini: temperatura, vlažnost, vibracije, udari, itd.) i koji se zadaju tehničkim zahtevima za sistem. Pojam pouzdanosti se često izjednačava sa pojmom verovatnoće rada bez otkaza⁷⁷.

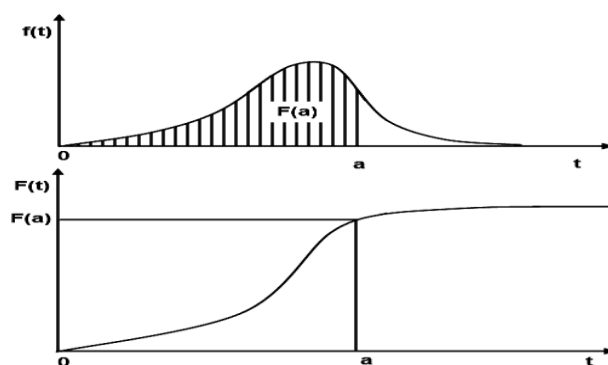
Kako određeni integrali po definiciji predstavljaju površinu ispod krive, u određenim granicama, u ovom slučaju pouzdanost može da se predstavi kao površina ispod krive koja označava radnu sposobnost sistema u granicama $t=0$ kad sistem počinje da vrši funkciju cilja, i trenutka vremena $t=t_{grs}$ kad sistem gubi radnu sposobnost, tj. kad više nije u mogućnosti da vrši funkciju prema datim kriterijumima, kako je to prikazano na slici 3.1.⁷⁸

Stav iz prethodnog paragrafa se može predstaviti sledećom jednačinom:

$$POUZDANOST = \int_0^{t_{grs}} (RadnaSposobnost) dt ;^{78} \quad (3.1.)$$

⁷⁷ Božičković, R., Popović, M., "Eksploatacija i održavanje vozila", Saobraćajni fakultet Doboj, Doboj, 2009.

⁷⁸ Adamović, Ž., Milošević, D., i dr., "Teorija pouzdanosti", Akademija inženjerstva održavanja, Beograd, 2008.



Slika 3.1. - Raspodela verovatnoće

Saglasno definiciji o slučajnim procesima (eksperimentima), gde je rečeno da se više puta ponovljeni eksperimenti koji daju dva ili više različitih ishoda nazivaju slučajni a njihovi ishodi neizvesni, procesi promene stanja sistema mogu se posmatrati kao slučajni procesi, jer su vremena rada sistema do pojave stanja u otkazu neizvesne veličine⁷⁸.

Slučajni procesi i slučajno promenljive veličine koje ih definišu, kao što je poznato, izučavaju se u teoriji verovatnoće. Stoga je razumljivo da se pouzdanost, kao karakteristika koja definiše sposobnost sistema da održava radnu sposobnost u datom vremenu, definiše preko njenih pokazatelja. Pouzdanost se definiše kao verovatnoća da će sistem uspešno ispunjavati funkciju cilja prema datom kriterijumu, pod datim uslovima, u datom vremenu.⁷⁹

Zaključeno je da ishodi nekog slučajnog eksperimenta ili procesa mogu da budu definisani preko brojnih vrednosti funkcije koja se naziva slučajna promenljiva i koja preslikava svaki događaj iz prostora događaja u skup realnih brojeva ($T : \rightarrow R$). U datom slučaju kao slučajno promenljivu veličinu možemo posmatrati vreme rada do pojave stanja u otkazu, koju ćemo shodno preporukama o obeležavanju slučajno promenljivih označiti sa T . Znači, slučajna promenljiva T je funkcija koja svakom događaju d_i , iz prostora događaja D , dodeljuje odgovarajuću brojnu vrednost t_i . Međutim, kako se radi o slučajnom procesu, potrebno je odrediti i verovatnoću realizacije jednog određenog slučajnog događaja. U ovom slučaju verovatnoća da će slučajna promenljiva T uzeti vrednost t_i označava se sa $p_i = p(T = t_i)$. Brojne vrednosti koje uzima slučajna promenljiva i verovatnoće njihove realizacije definišu skup označen kao raspodela verovatnoće (slika 3.1.), koja može da bude izražena preko različitih pokazatelja. Ovim je uspostavljena potpuna analogija između slučajnih procesa definisanih u teoriji verovatnoće i karakteristike sistema označene kao pouzdanost koja definiše proces promene stanja sistema, koji nastaje kao rezultat svih nepovratnih procesa koji se definišu u materijalima preko slučajne promenljive T . Kako pojava stanja u otkazu, uopšteno posmatrano, može da nastane u svakom trenutku vremena rada sistema, T je kontinualna slučajna promenljiva koja može da uzme sve vrednosti u intervalu od 0 do $+\infty$. Sada je jasno zašto je pouzdanost sistema definisana preko verovatnoće slučajnog događaja⁷⁹.

⁷⁸ Adamović, Ž., Milošević, D., i dr., "Teorija pouzdanosti", Akademija inženjerstva održavanja, Beograd, 2008.

⁷⁹ Adamović, Ž., "Pouzdanost mašina", Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin", Zrenjanin, 2006.

Posmatrajući vremensku sliku stanja m jednorednih sistema lako je uočiti da pojava stanja u otkazu nastaje u različitim trenucima vremena rada (t_1, t_2, \dots, t_m) koja služe kao polazna osnova za dobijanje funkcije gustine verovatnoće pojave stanja u otkazu $f(t)$ što je prikazano na slici 3.1⁷⁸.

Analogno tome, kumulativna funkcija raspodele verovatnoće $F(a)$ slučajno promenljive T tj. funkcija nepouzdanosti je:

$$F(a) = P(T \leq a) = \int_0^a f(t) dt ;^{78} \quad (3.2.)$$

a funkcija pouzdanosti: $R(a)$ je:

$$R(a) = 1 - F(a) = P(T > a) = \int_a^{+\infty} f(t) dt .^{78} \quad (3.3.)$$

Ovako definisana pouzdanost je i pored jakog oslonca na teoriju verovatnoće, zapravo dominantno inženjerska disciplina.

Funkcija cilja je konstrukcijski definisana tj. sistem se projektuje da zadovolji određenu funkciju cilja radeći u određenim uslovima koji se konstruisanjem takođe predefinišu. Najefikasnije metode da se verovatnoća ispunjenja funkcije cilja predvidi se ostvaruju kroz teoriju verovatnoće. Pouzdanost je upravo verovatnoća da se ispuni funkcija cilja i njene se vrednosti kreću u granicama od 0 do 1 (0% do 100%). Pouzdanost se kvantitativno može izraziti i kao odnos između broja uspešnih zadataka i ukupnog broja zadataka u vremenu specifičnom za funkcionisanje sistema:

$$\underline{R}(t) = \frac{n_1(t)}{n(t)} ;^{80} \quad (3.4.)$$

pri čemu je:

$\underline{R}(t)$ - procena (statistička vrednost) pouzdanosti,

$n_1(t)$ - broj uspešnih zadataka u vremenu t ,

$n(t)$ - ukupan broj izvedenih zadataka u vremenu t ,

t - vreme specificirano za funkcionisanje sistema.

⁷⁸ Adamović, Ž., Milošević, D., i dr., "Teorija pouzdanosti", Akademija inženjerstva održavanja, Beograd, 2008.

⁸⁰ Adamović, Ž., Šukalo, B., "Menadžment održavanja", Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin", Zrenjanin, 2005.

Vrednost $\underline{R}(t)$ predstavlja procenjenju vrednost pouzdanosti jer je broj zadataka kao i vreme t konačno.

Na bazi vremenske slike stanja sistema, osnovna statistička jednačina ima oblik:

$$F(t) + R(t) = 1;^{78} \quad (3.5.)$$

gde je:

$R(t)$ - pouzdanost,

$F(t)$ - nepouzdanost.

Diferenciranjem ovog izraza po vremenu dobija se:

$$\frac{dF(t)}{dt} + \frac{dR(t)}{dt} = 0;^{79} \quad (3.6.)$$

pri čemu izraz:

$$\frac{dF(t)}{dt} = f(t) [\text{otkaz/jed. vremena}];^{79} \quad (3.7.)$$

predstavlja diferencijalnu funkciju raspodele ili funkciju gustine verovatnoće pojave intervala "u otkazu" posmatranog sastavnog dela sistema, a izvod:

$$\frac{dR(t)}{dt} = p(t);^{80} \quad (3.8.)$$

predstavlja diferencijalnu funkciju raspodele ili funkciju gustine verovatnoće pojave stanja "u radu", odnosno verovatnoću bezotkaznog rada posmatranog sastavnog dela sistema (za neprekidne promene), pa je sada:

$$f(t) = -p(t);^{80} \quad (3.9.)$$

Za prekidne promene je:

$$\underline{p}(t) = \frac{N - n}{N \cdot \Delta t} [\text{pojava } s^{-1}];^{80} \quad (3.10.)$$

⁷⁸ Adamović, Ž., Milošević, D., i dr., "Teorija pouzdanosti", Akademija inženjerstva održavanja, Beograd, 2008.

⁷⁹ Adamović, Ž., "Pouzdanost mašina", Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin", Zrenjanin, 2006.

⁸⁰ Adamović, Ž., Šukalo, B., "Menadžment održavanja", Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin", Zrenjanin, 2005.

gde je:

$\underline{p}(t)$ - procena (statistička vrednost) frekvencija pojava stanja „u radu”,

n - broj stanja „u otkazu“,

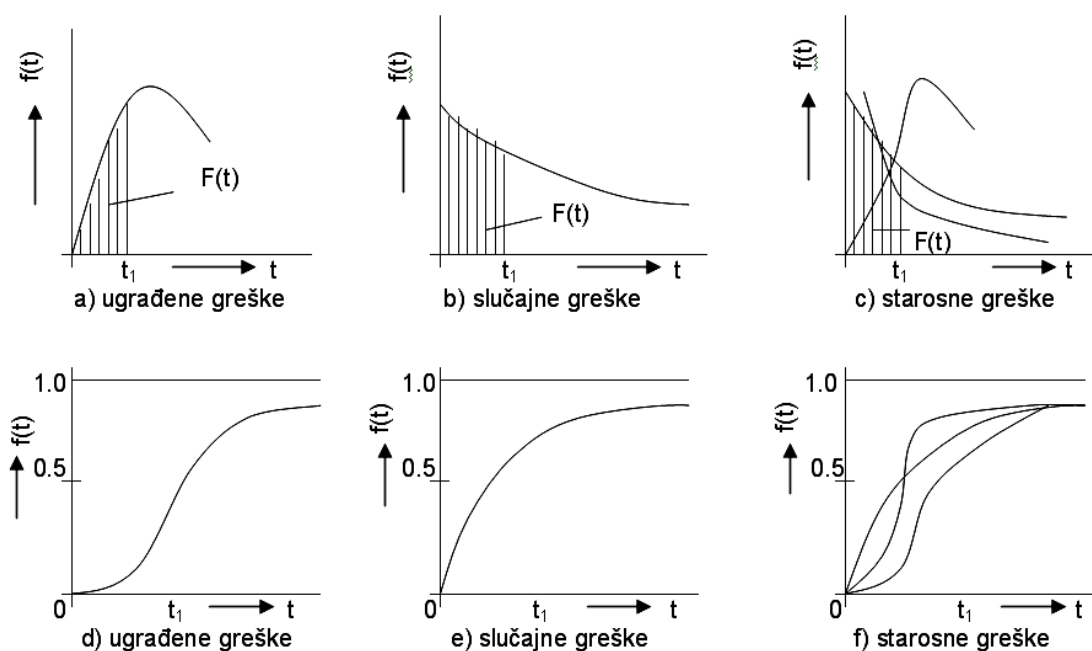
N - ukupan broj stanja (događaja, sastavnih delova),

Δt - interval vremena posmatranja.

Kumulativna funkcija gustine pojava stanja „u otkazu“ sistema dobija se za slučaj neprekidnih promena u vidu:

$$F(t) = \int_0^{t_1} f(t) dt ;^{78} \quad (3.11.)$$

i predstavlja površinu ispod krive funkcije gustine pojava „u otkazu“ (slika 3.2.) koja obuhvata određeno područje u granicama $0-t_1$ promenljive t .



Slika 3.2. - funkcije gustine pojava stanja u otkazu⁸⁰
 a, b, c – funkcija gustine pojava stanja „u otkazu”
 d, e, f – kumulativne funkcije gustine pojava stanja „u otkazu”

Ako se šrafirana površina na slici 3.2. proširi na ukupno područje ispod krive funkcije gustine pojava stanja „u otkazu“ dobija se kumulativna funkcija po definiciji:

⁸⁰ Adamović, Ž., Šukalo, B., "Menadžment održavanja", Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin", Zrenjanin, 2005.

⁷⁸ Adamović, Ž., Milošević, D., i dr., "Teorija pouzdanosti", Akademija inženjerstva održavanja, Beograd, 2008.

$$F(t) = \int_0^{\infty} f(t) dt = 1. \quad (3.12.)$$

Kumulativna funkcija gustine pojava stanja "u radu" ili funkcija bezotkaznog rada se, za slučaj neprekidnih promena stanja, dobija na osnovu:

$$F(t) = \int_0^{t_1} f(t) dt ; \quad (3.13.)$$

odnosno:

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^{t_1} f(t) dt ; \quad (3.14.)$$

Sada se pouzdanost može izraziti kao:

$$R(t) = \int_{t_1}^{\infty} f(t) dt ; \quad (3.15.)$$

i može se pokazati kao komplementarna funkcija kumulativnoj funkciji gustine pojava stanja „u otkazu" (nepouzdanosti). Za slučaj prekidnih promena stanja sistema procena (statistička vrednost) kumulativne funkcije bezotkaznog rada (pouzdanosti) data je kao:

$$\underline{R}(t) = \frac{N - n(t)}{N} ; \quad (3.16.)$$

gde je:

$\underline{R}(t)$ - procena (statistička vrednost) kumulativne funkcije bezotkaznog rada,

$n(t)$ - ukupan broj elemenata sistema koji su otkazali u toku vremena t (tj. u vremenu od 0 do t),

$N - n(t)$ - ukupan broj ispravnih elementa sistema u toku vremena t ,

N - ukupan broj elemenata sistema koji se posmatra $t_0 = 0$.

Sledeća karakteristika pouzdanosti, je intenzitet otkaza $\lambda(t)$ (eng. Failure Rate, Hazard Rate) i definiše se kao uslovna gustina verovatnoće otkaza u određenom

⁷⁹ Adamović, Ž., "Pouzdanost mašina", Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin", Zrenjanin, 2006.

⁸⁰ Adamović, Ž., Šukalo, B., "Menadžment održavanja", Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin", Zrenjanin, 2005.

vremenskom intervalu $(t + dt)$ pod uslovom da element (sistem) nije otkazao do momenta t .

$$\lambda(t)dt = \frac{F(t + dt) - F(t)}{R(t)};^{77} \quad (3.17.)$$

odnosno

$$\lambda(t) = \frac{-\frac{dR(t)}{dt}}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} [\text{pojava stanja u otkazu } s^{-1}];^{77} \quad (3.18.)$$

pa intenzitet otkaza predstavlja odnos funkcije gustine pojava stanja „u otkazu“ i kumulativne gustine pojava stanja „u radu“. Očigledno je da je $\lambda(t) \geq f(t)$, a pri $R(t) = 1$, $\lambda(t) = f(t)$ ⁷⁷.

Za prekidne promene stanja intenzitet otkaza se određuje na bazi istog prilaza kao i kod kontinualnih promena, tj.:

$$\underline{\lambda}(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\frac{n(\Delta t)}{N(\Delta t)}}{\frac{N - n(\Delta t)}{N}} = \frac{n(\Delta t)}{[N - n(\Delta t) \cdot \Delta t]};^{79} \quad (3.19.)$$

gde je:

$\underline{\lambda}(t)$ - statistička ocena intenziteta otkaza $\lambda(t)$,

N - ukupan broj posmatranih elemenata,

$n(\Delta t)$ - ukupan broj elemenata koji su otkazali u vremenskom intervalu Δt ,

$N - n(\Delta t)$ - broj elemenata “u radu”

a za praktična izračunavanja se koristi:

$$[N - n(\Delta t)]_{sr} = \frac{[N - n(\Delta t)]_i + [N - n(\Delta t)]_{i+1} + 1}{2};^{79} \quad (3.20.)$$

gde:

⁷⁷ Božičković, R., Popović, M., "Eksploatacija i održavanje vozila", Saobraćajni fakultet Doboj, Doboj, 2009.

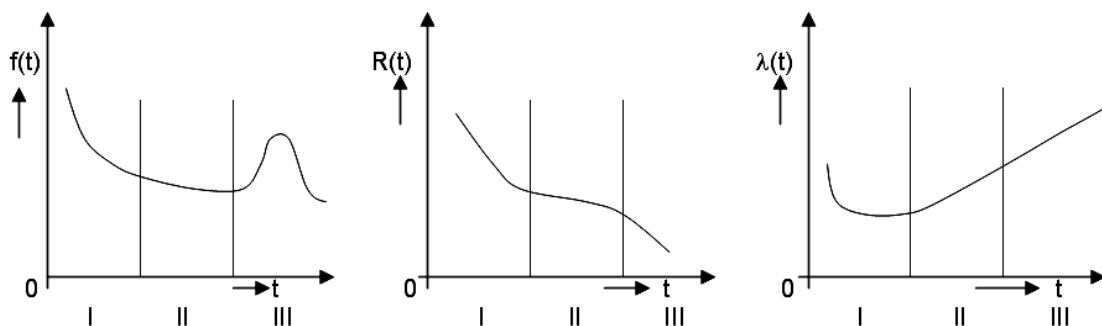
⁷⁹ Adamović, Ž., "Pouzdanost mašina", Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin", Zrenjanin, 2006.

$[N - n(\Delta t)]_{sr}$ - srednji broj elemenata "u radu" u intervalu vremena Δt ,

$[N - n(\Delta t)]_i$ - predstavlja broj elemenata "u radu" na početku intervala i ,

$[N - n(\Delta t)]_{i+1}$ - predstavlja broj elemenata "u radu" na početku intervala $i+1$,
odnosno na kraju i -tog intervala.

Načelne zakonitosti $R(t)$, $f(t)$ i $\lambda(t)$ date su na slici 3.3.



Slika 3.3. - Načelne zakonitosti $f(t)$, $R(t)$ i $\lambda(t)$ ⁷⁸

Srednje vreme do otkaza (eng. Mean Time To Failure - MTTF) definiše se kao matematičko očekivanje slučajnog vremena rada do prvog otkaza:

$$T_{ur} = M[T] = \int_0^{\infty} t f(t) dt = - \int_0^{\infty} t R'(t) dt = -t R(t) \Big|_0^{\infty} + \int_0^{\infty} R(t) dt ;^{81} \quad (3.21.)$$

Nakon rešavanja navedenog integrala, za srednje vreme rada do otkaza dobija se

$$T_{ur} = \int_0^{\infty} R(t) dt ;^{81} \quad (3.22.)$$

Dakle, srednje vreme do otkaza T_{ur} jednako je površini koja je ograničena krivom $R(t)$ i apscisnom osom.

Sve navedene karakteristike pouzdanosti odnose se na aspekt sistema kao celovitog bez dekomponovanja istog i zalaženja u funkcionalne odnose među komponentama, što dozvoljava samo načelno upoznavanje sa karakteristikama pouzdanosti sistema. Da bi se došlo do realnijeg uvida u pouzdanosti sistema dekomponovanje je nužan postupak, čime se otvara prostor za dalje bavljenje pouzdanošću komponenti ali i pitanjima njihovog broja ili vrsta.

⁷⁸ Adamović, Ž., Milošević, D., i dr., "Teorija pouzdanosti", Akademija inženjerstva održavanja, Beograd, 2008.

⁸¹ Adamović, Ž., Voskresenski, V., Sigurnost funkcionisanja mašina, Društvo za tehničku dijagnostiku Srbije, Beograd, 2008.

3.1.2. VRSTE SLOŽENIH TEHNIČKIH SISTEMA

Kada govorimo o složenim tehničkim sistemima možemo razgraničiti vrste složenosti koje konsekventno utiču na modelovanje pouzdanosti, pa se prema tome i razlikuju brojevno i strukturno složeni. **Brojevno složeni sistemi** su oni koji imaju veliki broj istih elemenata, dok **strukturno složeni sistemi** imaju raznorodne elemente, tj. možemo reći da oni podležu različitim teorijskim raspodelama pojave otkaza. Kod brojevno složenih sistema se kao dominantan problem modelovanja nameće pitanje vremena kalkulacije pouzdanosti usled velikog broja elemenata sistema, dok kod strukturno složenih sistema postoje problemi prezentovanja strukture sistema i povezivanje velikog broja elemenata sa različitim raspodelama verovatnoće pojave otkaza. Svakako sve složeniji tehnički sistemi su najčešće i strukturno i brojevno složeni, mada u praksi postoje svi pojedini primeri.

Još jedan za ovo istraživanje značajan aspekt na osnovu kog se mogu podeliti složeni tehnički sistemi jeste popravljivost sistema, te razlikujemo **popravljive i nepopravljive tehničke sisteme**. Popravljivi sistem je onaj koji se može vratiti u operativno stanje bilo kakvom akcijom održavanja uključujući i zamene i/ili popravke delova sistema. Kada govorimo o stopi po kojoj se pojavljuju otkazi popravljivih sistema, relativno je nepravilno govoriti o intenzitetu otkaza ili hazardu kao indikatoru iz razloga što se on odnosi na vremena prvih otkaza u populaciji nepopravljivih sistema, pa se primenjuje termin **Rate Of Occurrence Of Failure (ROCOF) – Intenzitet pojave otkaza ili „intenzitet popravke“**. Ipak suština ovih termina je ista jer iako ROCOF predstavlja svojevrsnu suprotnost hazarda, ne dolazi nužno do grešaka u modelovanju i proračunima prilikom nepravilne upotrebe ovih pojmova.

Nepopravljivi sistemi su oni za koje možemo reći da nakon pojave otkaza svaki pojedinačni sistem koji je otkazao biva trajno uklonjen iz upotrebe.

Složeni tehnički sistemi danas su po pravilu popravljivi, ali se može govoriti o popravljivim i nepopravljivim komponentama sistema ili onima koje se iz raznih praktičnih razloga mogu tako posmatrati (npr. kad se finansijski ne isplati popravljati popravljivu komponentu sistema).

3.1.3. POUZDANOST SLOŽENIH TEHNIČKIH SISTEMA

Pouzdanost složenih tehničkih sistema postavlja pitanja izvođenja validnih rezultata pouzdanosti prema modelu u konačnom vremenu. Složeniji modeli koji bi bolje reprezentovali pouzdanost ovakvih sistema su svakako adekvatniji, ali podrazumevaju problematiku prikupljanja podataka i njihovog unosa, validnog reprezentovanja strukture i stanja sistema, reprezentovanje uticaja popravki na pouzdanost kao i problem ograničenog vremena proračuna pa i drugo. Otuda su ozbiljnija hvatanja u koštac sa ovom problematikom novijeg datuma.

Neki od često preporučivanih modela su semi-Markovljevi modeli. Neki pogledi na ovu problematiku odlaze u pravcu modelovanja pouzdanosti na bazi multi-state pristupa dok drugi u pravcu dekomponovanja sistema recimo na bazi blok dijagrama pouzdanosti⁸².

Pretpostavka da je sistem sačinjen od multi-state komponenti sa nivoima pouzdanosti koji opadaju tokom vremena bez mogućeg uticaja opravkama tokom vremena na pouzdanost sistema ima dosta limitirajućih faktora. Iako se ovim pristupom može izbeći veoma teška problematika kontinualnih veličina koje se odnose na pouzdanost i time dobiti diskretan oblik prezentovanja pouzdanosti na lak način te i sve jako lako pretvoriti u programski kod koji će dati potrebno vreme izvršenja, ipak prezentovanje pouzdanosti komponenti sistema u samo nekoliko veličina bez uvažavanja gustine verovatnoće pojave otkaza (koja se i ne razmatra) je veoma diskutabilna i slikovito rečeno predstavlja „kroki crtež“ prezentovanja pouzdanosti složenih sistema. Ovo su po pravilu ograničenja modelovanja pouzdanosti kompleksnih tehničkih sistema sa multi-state pristupom.

Neki od modela idu dalje i definišu i strukturu sistema pomoću jednostavnih blok dijagrama ali i uvažavanjem rada sistema sve do otkaza „m“ od „n“ komponenti sistema.

Kada su u pitanju binarni kompleksni sistemi prvo možemo govoriti o strukturnim relacijama između sistema i njegovih komponenti. Pretpostavke su da govorimo o međusobno nezavisnim otkazima komponentata i da nema uticaja jednih na druge po pitanjima pouzdanosti. Možemo razmatrati sistem od n komponentata numerisanih od 1 do n (Slika 3.4.). Možemo pretpostaviti samo dva stanja komponenti sistema: funkcionalno – u radu i u otkazu, a to se konsekventno odnosi i na svaki podsistem i sistem u celini. Da bi indikovali ova stanja mi ćemo svakoj i -toj komponenti sistema dodati varijablu x_i .⁸³

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{ako je komponenta u stanju "u radu"} \\ 0, & \text{ako je komponenta u stanju "u otkazu"} \end{cases}$$

što i odgovara pojmu binarne varijable.



Slika 3.4. - Serijska struktura

Posledično se može uvesti i binarna varijabla za celi sistem koja može imati vrednosti 0 ili 1:

⁸² Kołowrocki, K., Soszyńska, J., Reliability and Safety of Complex Technical Systems an Overall Approach, Journal of KONBiN 2010., 1(13).

⁸³ Aven, T., Jensen, U., Stochastic Models in Reliability, Springer-Verlag, New York, 1999.

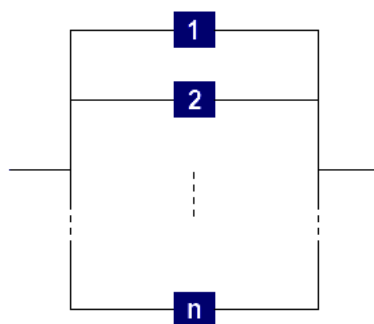
$$\Phi = \begin{cases} 1, & \text{ako je sistem u stanju "u radu"} \\ 0, & \text{ako je sistem u stanju "u otkazu"} \end{cases}$$

gde je jasno da je $\Phi = \Phi(x)$, (strukturna funkcija sistema tj. struktura sistema), a $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ te je stanje sistema u potpunosti definisano stanjem komponentata. Tako je struktura sistema u rednoj vezi elemenata data kao:

$$\Phi(x) = x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_n = \prod_{i=1}^n x_i. \quad (3.23.)$$

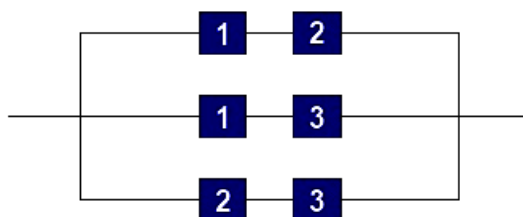
Kada je u pitanju paralelna struktura sistema (slika 3.5.) tada važi:

$$\Phi(x) = 1 - (1 - x_1) \cdot (1 - x_2) \cdot \dots \cdot (1 - x_n) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - x_i) = \prod_{i=1}^n x_i. \quad (3.24.)$$



Slika 3.5. - Paralelna struktura⁸³

Slika 3.6. prezentuje i kako se blok dijagramom predstavlja struktura koja je u otkazu u slučaju da otkáže bilo kojih k od n komponentata sistema na primeru otkaza 2 od 3 komponente.



Slika 3.6. - Otkaz 2 od 3 komponente dovodi do otkaza sistema⁸³

Monoton sistem je onaj kome strukturna funkcija Φ nije rastuća za svaki argument i takođe $\Phi(0) = 0$ i $\Phi(1) = 1$. Ovo dakle znači da je nemoguće da sistem tokom vremena ide ka otkazu a da istovremeno unapređuje performanse komponentata. Takođe monotonost podrazumeva i to da ako su sve komponente u otkazu, sistem je u otkazu,

⁸³ Aven, T., Jensen, U., Stochastic Models in Reliability, Springer-Verlag, New York, 1999.

kao i ako su sve komponente funkcionalne onda je i ceo sistem funkcionalan. U ovom istraživanju će se razmatrati upravo monotoni sistemi⁸³.

3.1.4. PRORAČUN POUZDANOSTI KOMPLEKSNOG SISTEMA

Neka je X_i binarna slučajna varijabla koje reprezentuje stanje i -te komponente sistema u datom trenutku vremena, gde je $i = 1, 2, \dots, n$ i neka je

$$p_i = P(X_i = 1)$$

$$q_i = P(X_i = 0)$$

$$h = h(p) = P(\Phi(X) = 1)$$

$$g = g(q) = P(\Phi(X) = 0),^{83}$$

gde je $p = (p_1, p_2, \dots, p_n)$, $q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$ i $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$. Verovatnoće p_i i q_i odgovaraju pouzdanosti i nepouzdanosti komponente sistema i , a h i g odgovaraju pouzdanosti i nepouzdanosti celog sistema⁸³.

O osnovni, problem se svodi na to da se izračuna pouzdanost h data preko pouzdanosti komponenta p_i . Pre nego li se pristupi rešavanju ovog problema potrebno je razmotriti posebne slučajeve⁸³.

Pouzdanost serijske strukture je:

$$h = P(\Phi(X) = 1) = P\left(\prod_{i=1}^n X_i = 1\right) = \prod_{i=1}^n P(X_i = 1) = \prod_{i=1}^n p_i,^{83}$$

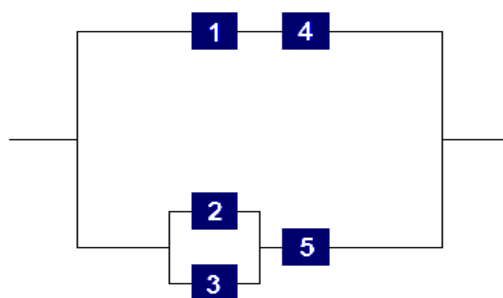
a pouzdanost paralelne strukture je analogno:

$$h = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i) = \prod_{i=1}^n p_i. ^{83}$$

Na primeru strukture prikazane na slici 3.7. možemo da sagledamo proračun pouzdanosti.

Razmatrajući blok dijagram pouzdanosti sistem se može sagledati kao paralelna struktura sa 2 nezavisna podsistema: prvi podsistem sa komponentama 1 i 4 i drugi podsistem sa komponentama 2, 3 i 5. Pouzdanosti ovih podsistema su dakle $p_1 \cdot p_4$ za prvi podsistem i $(1 - (1 - p_2) \cdot (1 - p_3)) \cdot p_5$ za drugi podsistem.

⁸³ Aven, T., Jensen, U., Stochastic Models in Reliability, Springer-Verlag, New York, 1999.

Slika 3.7 - Primer blok dijagrama pouzdanosti⁸³

Posledično, pouzdanost sistema se može proračunati kao:

$$h = 1 - \{1 - p_1 \cdot p_4\} \cdot \{1 - (1 - (1 - p_2) \cdot (1 - p_3)) \cdot p_5\} \quad (3.25.)$$

Iako je ovaj matematizam krajnje jednostavan, proračun pouzdanosti za kompleksne tehničke sisteme može biti zastrašujuće težak zadatak i često nerešiv u ograničenim uslovima vremena, nedostatka podataka ili promena pouzdanosti komponenata tokom vremena usled otkaza, preventivnih ili korektivnih akcija održavanja i drugih uticaja na pouzdanost sistema. Ovakav problem traži isključivo najefikasnija algoritamska i metodološka rešenja koja svakako spadaju u važna istraživanja iz domena teorije pouzdanosti danas⁸³.

Postoje brojne metoda proračuna pouzdanosti. Mnoge od njih se zasnivaju na *minimal cut set* ili *minimal put set* metodi. One se odnose na pronalaženje svih kombinacija minimalnog broja komponenata u otkazu da celi sistem bude obavezno u otkazu ili minimalnog broja komponenata u radu da celi sistem bude u radu. Pronalaženje ovih verovatnoća za veliki broj komponenata postaje preobimna kalkulacija gotovo obavezno. Neke od metoda u upotrebi su Inclusion–Exclusion Method, Minimal Cut (Path) Set Representation of the Structure Function, State Enumeration Method, Factoring Method itd⁸³.

Ove metode je moguće primeniti na razne situacije a što je najbitnije i na popravljive i nepopravljive tehnike sisteme. Bez obzira na metod koji se koristi, ono što najviše glavobolje zadaje u proračunu pouzdanosti kompleksnih tehničkih sistema jeste upravo vremenska dinamika. Primera radi, posmatramo monotoni sistem u vremenskom intervalu $[0, t_0]$ pod pretpostavkom da su komponente sistema u trenutku vremena $t = 0$ nove tj. da imaju pouzdanost 1 i da nakon otkaza neke komponente nema opravke ili zamene komponente koja je otkazala. Pretpostavka je da svaka komponenta sistema i ima svoju distribuciju otkaza $F_i(t)$ i intenzitet otkaza $\lambda_i(t)$. Da bi se izračunala pouzdanost sistema u fiksnoj tački vremena zabeležićemo da je $q_i = F_i(t)$ i $p_i = \bar{F}_i(t)$. Tako je za serijsku strukturu sistema pouzdanost u trenutku vremena t :

⁸³ Aven, T., Jensen, U., Stochastic Models in Reliability, Springer-Verlag, New York, 1999.

$$h = \prod_{i=1}^n p_i = \prod_{i=1}^n \bar{F}_i(t). \quad (3.26.)$$

Uzimajući u obzir vremensku dinamiku pouzdanosti pojavljuju se određene teškoće formiranja modela. Naime, potrebno je kontinualne vrednosti teorijskih raspodela i odgovarajućih veličina pretvoriti u adekvatne diskretne a da ne dođe do gubitka suštine premalim brojem vremenskih tačaka kalkulacije ili sa druge strane, do nemogućnosti da se proračun izvede usled velikog broja vremenskih tačaka kalkulacije pouzdanosti.

Nalaženje broja vremenskih tačaka kalkulacije mora uzeti u obzir i dekomponovanje sistema u razmatranje je broj proračuna multiplikovan brojem komponenata.

Još jedan bitan faktor su i jedinice mere u kojima se vrši proračun koje ne moraju nužno biti i one u kojima se iskazuju vremena otkaza u bazi podataka.

Na kraju i broj iteracija simulacije je dodatni multiplikator broja proračuna koji se ne sme izostaviti.

Kako se neretko radi o veoma dugim vremenskim periodima kalkulacije potrebno je voditi računa o svim navedenim faktorima na odabir adekvatnog broja vremenskih tačaka kalkulacije.

Kada su u pitanju kompleksni tehnički sistemi koji su popravljivi, kakve srećemo najčešće u industriji i u termoelektranama mali broj do sada razvijenih modela je adekvatan sa aspekta pokrivanja preventivnih akcija održavanja. Ako se uzme u obzir da u realnim uslovima opravke nisu takve da je zamenjeni ili popravljeni deo sistema uvek "dobar kao nov" tj. da mu je pouzdanost uvek 1 onda je broj modela još manji. Još veći nedostatak postojećih modela je taj što gotovo svi uzimaju u razmatranje pouzdanost celovitog sistema a ne pouzdanost pojedinih komponenata i preko njih formirajući pouzdanost celog sistema. Ovo je veoma ozbiljan nedostatak koji ne pruža realnu sliku o stanju sistema i dovodi gotovo obavezno do veoma velikih razlika između procenjene i stvarne pouzdanosti sistema. Većina postojećih modela se oslanja na MTTF (srednje vreme do pojave otkaza) ili očekivani broj otkaza tokom određenog perioda vremena tj. na osnovu krutih, egzaktnih pretpostavki čime je sve unapred determinisano, dok određeni modeli i pružajući heuristički pristup imaju ipak prethodno iznesene nedostatke u pogledu samo perfektnih opravki čitavog sistema kada se podrazumeva da se akcijom održavanja pouzdanost sistema podiže na nivo od 100%¹.

Kada se govori o interakciji komponenata sistema modeli su uglavnom neadekvatni u smislu da je interakcija po pravilu jednosmerna, sa jedne komponente uticaj se ostvaruje na drugu ili više drugih ali ne i višesmerno¹.

Takođe ostaje problem malog broja otkaza komponenata kod mnogih sistema ili nepotpunih podataka o otkazima što nije redak slučaj u praksi¹.

⁸³ Aven, T., Jensen, U., Stochastic Models in Reliability, Springer-Verlag, New York, 1999.

¹ Sun, Y., "Reliability Prediction Of Complex Repairable Systems: An Engineering Approach", Thesis submitted in total fulfilment of requirements of the degree of Doctor of Philosophy, Faculty of Built Environment and Engineering, University of Technology, Queensland, 2006.

Svakako izlišno je pominjati da postoji efikasan, sveobuhvatan i potpuno primenljiv model koji može da uvaži niz preventivnih akcija održavanja, pogotovu koje su imperfektne ili uvažavaju interakciju komponenata uz mali broj otkaza sistema u bazi podataka¹.

Razviti primenljiv model ili više njih koji za primere složenih tehničkih sistema može da uvaži prethodno iznete činjenice je više nego zahtevan zadatak¹.

Počnimo sa pitanjem preventivnih akcija održavanja.

3.1.5. PREDIKCIJA POUZDANOSTI SISTEMA SA PREVENTIVNIM ODRŽAVANJEM

Preventivne akcije održavanja po definiciji imaju za cilj da se izbegne ili odloži otkaz sistema tokom nekog perioda. Ipak nisu sve akcije održavanja jednako efikasne niti uvek ostvaruju cilj zbog koga se izvode. Preventivno održavanje označava i popravke i/ili zamenu delova sistema. Kompleksni sistemi se uobičajeno sastoje iz nekoliko komponenata (podsistema) pri čemu svaka od njih ima različit životni ciklus i distribuciju otkaza. Ukoliko na ovim sistemima postoje preventivne akcije održavanja, one se neretko sprovode samo na jednoj ili nekim od ovih komponenti sistema. Svakako cilj svake od preventivnih akcija održavanja je da se nivo pouzdanosti podigne na što viši nivo te se sva strategija održavanja uvek i okreće ka kreiranju optimalnih odluka za dostizanje ovog cilja. Stoga je kod popravljivih sistema u centru današnjih istraživanja pitanje predikcije pouzdanosti i iznalaženja optimalne strategije održavanja. Ipak, kao i uvek svaki od modela koji su razvijeni u cilju predikcije pouzdanosti sistema ima svoja ograničenja i umanjuje njihovu primenljivost pa je prostor za istraživanje u ovoj oblasti širok.¹

Svakako da je prvi ozbiljan nedostatak u ovakvim modelima upravo to da stanja sistema nisu dovoljno dobro opisana. Recimo da se u većini modela sve svodi na stanja poput "dobro kao novo" i "loše kao staro". Neki drugi su limitirani na to da popravke i ne uzrokuju promene pouzdanosti sistema (npr. NHPP model) dok drugi nakon popravke počinju da celi sistem gledaju kao nov – iz početka, što takođe ne odgovara realnosti. Ovo, dakle, nameće potrebu da se u model uvrsti postojanje imperfektne akcija održavanja koje mogu da se odraze šaroliko na pouzdanost čak i pojedine komponente sistema što je upravo odgovarajuće realnim događajima u industriji. U tom smislu je moguće očekivati dva scenarija imperfektne akcija održavanja. Prvi scenario je da se nakon akcije održavanja pouzdanost sistema ne vrati na početnu vrednost. To je moguće očekivati kada se nakon otkaza ili pre njega samo pojedine komponente sistema popravljaju a druge ne. Drugi je da se pouzdanost sistema vrati na vrednost 1 ali dolazi do bržeg pogoršanja stanja sistema nego pre, što će reći da je hazard sistema nakon akcije održavanja postao veći. Naravno postoji i treći scenario koji može biti kombinacija prva dva. Dakle ovo se pitanje svodi na razvoj modela koji podrazumeva

¹ Sun, Y., "Reliability Prediction Of Complex Repairable Systems: An Engineering Approach", Thesis submitted in total fulfilment of requirements of the degree of Doctor of Philosophy, Faculty of Built Environment and Engineering, University of Technology, Queensland, 2006.

višestrukne preventivne imperfektne akcije održavanja. Ovakav model nije još razvijen za tehničke sisteme koji su predmet ovog istraživanja. Iako postoje modeli koji omogućuju ovakvo modelovanje pouzdanosti njihov čest glavni nedostatak je što traže procenu od strane inženjera na kom je nivou pouzdanost komponenata sistema nakon opravke što je veoma nesigurna i loša polazna osnova modela. Još veći nedostatak je svakako posmatranje sistema kao celovitog i kao crne kutije bez njegovog dekomponovanja, te dobijanja realnije procene pouzdanosti. Dobar broj modela je razvijan i na stohastičkim osnovama, ali je problem kod njih kompleksnost i samim tim teža primenljivost. Oni često traže više simuliranja zasnovanih na slučajnim varijablama radi dobijanja validnijih rezultata ali je svakako veći problem upravo to što se tada rapidno povećava vreme proračuna te je model teško primeniti. Ako se još u obzir uzme potreba za dekomponovanjem sistema koja je prethodno izneta primenljiv model izgleda gotovo nemoguće napraviti za kompleksne tehničke sisteme. Zato se češće odlazi u pokušaje da se modeli realizuju preko kalkulacija MTTF ili očekivanog broja otkaza²⁰ nego li nađe uticaj preventivne opravke na pouzdanost komponenti sistema iako je jasno da drugi način modelovanja omogućuje kvalitetnije informacije. Takođe, modelovanje sa predefinisanim vremenom preventivnog održavanja ima smisla mnogo puta, ali je sa druge strane za veliki broj sistema potpuno neprimenljivo.¹

U narednom poglavlju je prikazan model SSA koji je prilagođen uvršćivanjem imperfektnih opravki kao model koji popravlja najveći broj prethodno iznetih ograničenja ali i pored toga ima nedostatke a naročito po pitanju primenljivosti na složene tehničke sisteme.

3.2. RAZVIJENI MODELI POUZDANOSTI SLOŽENIH POSTROJENJA U SVETU

3.2.1. SSA (SPLIT SYSTEM APPROACH) KONCEPT

Ovaj model uzima kao polaznu osnovu da razdvaja popravljive i nepopravljive komponente sistema, te procenjuje pouzdanost komponenti sistema odvojeno ne posmatrajući sistem isključivo celovito pa otuda u nazivu split - podeljen. On predstavlja proširenje Ebelingovog metoda u smislu uzimanja u obzir imperfektnih popravki¹.

Pretpostavke ovog sistema su¹:

- Svi otkazi su međusobno nezavisni a popravke na popravljivim komponentama sistema ne utiču na pouzdanost nepopravljivih.
- Funkcije pouzdanosti i novih i popravljenih komponenata su poznate. Postoje razvijene metode da se na osnovu postojećih podataka o otkazima dođe do funkcija pouzdanosti pa je moguća primena različitih.

²⁰ Hoyland, A., Rausand, M., System reliability Theory: Models and Statistical Methods, New York: John Wiley & Sons, Inc. 1994.

¹ Sun, Y., "Reliability Prediction Of Complex Repairable Systems: An Engineering Approach", Thesis submitted in total fulfilment of requirements of the degree of Doctor of Philosophy, Faculty of Built Environment and Engineering, University of Technology, Queensland, 2006.

- Blok dijagram sistema je poznat kao i to koje su komponente popravljive a koje ne.
- Vreme popravke je neznatno i irelevantno za proračun pouzdanosti.
- Vreme preventivne akcije održavanja je unapred determinisano.

3.2.2. MODELOVANJE

Modelovanje pouzdanosti je zadatak koji najčešće ne bude adekvatno obavljen iz razloga što većina modela ne bude primenljiva ili ne uvažava realno stanje stvari. Upravo između ova dva uslova se nalazi uspeh modelovanja pouzdanosti. Uvažavanjem prevelikog broja realnosti stvara se kompleksan i neprimenljiv model. Sa druge strane, simplifikovanje modela radi njegove primenljivosti vodi do neupotrebljivosti modela sa aspekta da ne pruža validne i upotrebljive podatke o pouzdanosti. Iz ovog razloga postoji dosta različitih polazišta kod modelovanja i od toga i zavisi puno daljih postupaka modelovanja koji su ishodišni polazištima. Neke od postojećih modela je moguće odmah primenjivati dok je druge potrebno prilagođavati konkretnom sistemu. Ukoliko su te modifikacije manjeg obima model može biti univerzalniji i primenljiviji na veći broj sistema, ali sa druge strane postoji mogućnost da ne odgovara konkretnom tehničkom sistemu.

U svojoj potrazi za adekvatnim ravnotežnim odnosom među kriterijumima kako bi se iznašao pravi model potrebno je stvoriti pretpostavke o karakteristikama sistema, načinima održavanja, parametrima koji će se uzimati u obzir i o svemu što može uticati na model, kao i odabrati početno polazište u nekom od postojećih modela te prilagoditi ga konkretnom tehničkom sistemu. Dodatni prostor za kreiranje modela daje primena kompjuterskih tehnologija. Ona je pogotovu korisna u slučajevima masovnih proračuna koji su neizbežni kod kompleksnih tehničkih sistema kao i kod numeričkog rešavanja matematičkih proračuna koji se ne mogu obaviti jednostavno ili su nerešivi. Još jedno polje primene računara su i simulacije koje se uvek mogu pokazati korisnim i pogotovu onda kada se traga za pravilima u mnoštvu pojedinih slučajeva kao i validaciji dobijenih rezultata. Kao polazna osnova i uvek korisna, primenljiva i dostupna tehnika za modelovanje pouzdanosti se može koristiti Monte Carlo simulacija⁸⁴.

Model koji se može uzeti kao početno polazište daljeg istraživanja je SSA model zbog svoje osobine da sistem ne posmatra celovito već ga dekomponuje kao i da poznaje razliku između popravljivih i nepopravljivih komponenti sistema.

SSA model možemo razmatrati u nekoliko mogućih scenarija. Prvi je radi lakšeg razumevanja kada se samo jedna komponenta smatra popravljivom, a sve ostale nepopravljivim u sistemu¹.

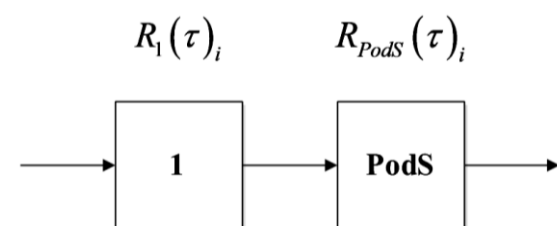
Popravljivu ćemo nazvati komponentom 1. Strategija održavanja je bazirana na pretpostavci da kada nivo pouzdanosti čitavog sistema padne na nivo R_0 tada se

⁸⁴ Dekker, R., Groenendijk, W., Availability assessment methods and their application in practice, Microelectron, 1995., Reliab. 35, 1257–1274.

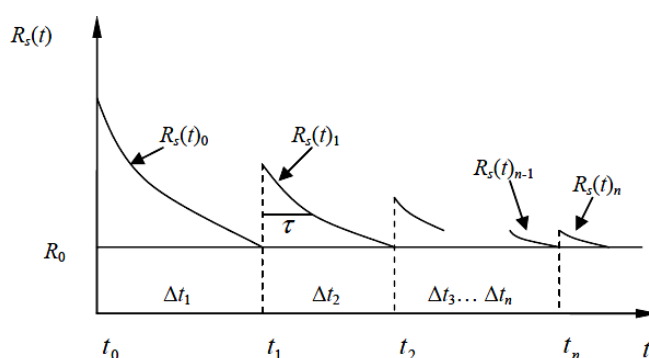
¹ Sun, Y., "Reliability Prediction Of Complex Repairable Systems: An Engineering Approach", Thesis submitted in total fulfilment of requirements of the degree of Doctor of Philosophy, Faculty of Built Environment and Engineering, University of Technology, Queensland, 2006.

akcijom održavanja na popravljivoj komponenti sistema povećava nivo pouzdanosti. Dakle, radi se o sistemu sa minimalnim potrebnim nivoom pouzdanosti koji se želi održavati. Pretpostavimo radi preglednosti da je upravo komponenta 1 kao popravljiva najsklonija otkazivanju. Prvi slučaj koji možemo razmatrati jeste slučaj redne veze između komponente 1 i ostatka sistema (PodS) koji sadrži nepopravljive komponente (slika 3.8.).¹

$R_1(\tau)_i$ je pouzdanost komponente 1 posle vremena τ proteklog od poslednje i -te preventivne akcije održavanja. Dakle, na početku je $i=0$. Uobičajena situacija u industriji je da sistem nakon akcije održavanja nije “dobar kao nov” tj. da nema pouzdanost na nivou $R_S=1$, a to je postojanjem popravljivih i nepopravljivih komponenti ispunjen uslov koji se na ovom primeru jasno može videti na slici 3.9.¹



Slika 3.8. - Redna veza popravljive komponente i nepopravljivih komponenata kompleksnog sistema¹



Slika 3.9. - Kretanje pouzdanosti imperfektno popravljanog kompleksnog sistema¹

Na slici 3.9. Δt_i predstavlja interval vremena između $(i-1)$ i i -te opravke sistema. Tada je ukupno operativno vreme sistema

$$t = \sum_{i=1}^n \Delta t_i + \tau, \quad (3.27.)$$

a ukupna pouzdanost sistema je

$$R_S(\tau)_i = R_1(\tau)_i R_{PodS}(\tau)_i, \quad (3.28.)$$

¹ Sun, Y., "Reliability Prediction Of Complex Repairable Systems: An Engineering Approach", Thesis submitted in total fulfilment of requirements of the degree of Doctor of Philosophy, Faculty of Built Environment and Engineering, University of Technology, Queensland, 2006.

gde je $i = 0, 1, 2, \dots, n$.¹

Ovakvo modelovanje pouzdanosti je moguće realizovati implementacijom različitih distribucija pojave otkaza kakave su eksponencijalna, normalna, lognormalna ili Vejbulova¹.

Dakle početni nivo pouzdanosti sistema je $R_S(\tau)_0 = R_1(\tau)_0 R_{PodS}(\tau)_0$ a preventivna akcija održavanja se preduzima onog trenutka kada pouzdanost sistem dođe na minimalno potrebnu tj. kada je $R_S(\tau)_i = R_0$ i tada se pouzdanost sistema povećava preventivnom opravkom popravljive komponente 1 dok druge - nepopravljive komponente sistema, ostaju na istom nivou pouzdanosti. Ukupni efekat na pouzdanost sistema nakon i -te opravke sistema bi se mogu iskazati kao

$$R_S(\tau)_i = R_1(\tau)_i R_{PodS}(\Delta t_i + \tau)_0, \quad (3.29.)$$

gde je $i = 0, 1, 2, \dots, n$ broj preventivnih opravki.¹

Ako je opravka komponente jedan izvedena tako da je $R_1(\tau)_i = R_1(\Delta t_i + \tau)_{i-1}$ onda to znači da nije ni došlo do povećanja pouzdanosti komponente i da je posledično $R_S(\tau)_i = R_S(\Delta t_i + \tau)_{i-1}$ tj. da nije došlo do promene pouzdanosti sistema u celini. Za ovu opravku se može reći daje izvršena tako da je komponenta 1 "loša kao stara" i da je $R_1(0)_i = R(\tau)_{i-1}$ i $R_1(0)_i < R(0)_{i-1}$. Ako bi se pak nivo pouzdanosti komponente 1 popravkom povećao na početni nivo, tj. $R_1(0)_i = R(0)_{i-1}$, tada bi važila relacija $R_1(\Delta t_i + \tau)_{i-1} < R_1(\tau)_i \leq R_1(\tau)_{i-1}$ i posledično $R_S(\Delta t_i + \tau)_{i-1} < R_S(\tau)_i < R_S(\tau)_{i-1}$. U specijalnom slučaju kada dolazi nakon popravke do povećanja nivoa pouzdanosti komponente 1 na viši nivo nego nakon prethodne popravke, tj. $R_1(0)_i > R(0)_{i-1}$, važi i da je $R_1(\tau)_{i-1} \leq R_1(\tau)_i$ te posledično $R_S(\tau)_{i-1} \leq R_S(\tau)_i$.¹

Nakon n preventivnih akcija održavanja pouzdanost sistema bi se mogla proceniti kao:

$$R_S(\tau)_n = R_1(\tau)_n R_{PodS}\left(\tau + \sum_{i=1}^n \Delta t_i\right)_0 \quad (3.30.)$$

te ako je operativno vreme $t = \tau + \sum_{i=1}^n \Delta t_i$ možemo napisati da je:

$$R_{PodS}(t)_0 = \frac{R_S(t)_0}{R_1(t)_0}, \quad (3.31.)$$

¹ Sun, Y., "Reliability Prediction Of Complex Repairable Systems: An Engineering Approach", Thesis submitted in total fulfilment of requirements of the degree of Doctor of Philosophy, Faculty of Built Environment and Engineering, University of Technology, Queensland, 2006.

$$R_S(\tau)_n = \frac{R_1(\tau)_n R_S(t)_0}{R_1(t)_0}, \quad (3.32.)$$

$$R_S(t) = \frac{R_1\left(t - \sum_{i=1}^n \Delta t_i\right)_n R_S(t)_0}{R_1(t)_0} \quad (3.33.)$$

gde je $R_S(t)$ pouzdanost sistema nakon n preventivnih akcija održavanja¹.

Verovatnoća bezotkaznog rada čitavog sistema tokom čitavog perioda operativnog rada ($R_{SK}(t)$) mogla bi se izvesti na osnovu kumulativne pouzdanosti nakon prve preventivne akcije održavanja:

$$R_{SK}(\tau)_1 = R_1(\Delta t_1)_0 R_S(\tau)_1, \quad (3.34.)$$

pa je kumulativna pouzdanost sistema nakon n opravki i operativnog vremena t

$$R_{SK}(t) = (R_1(\Delta t_1)_0 R_S(t)) \cdot (R_1(\Delta t_2)_1 R_S(t)) \cdot \dots \cdot (R_1(\Delta t_n)_{n-1} R_S(t)) \quad (3.35.)$$

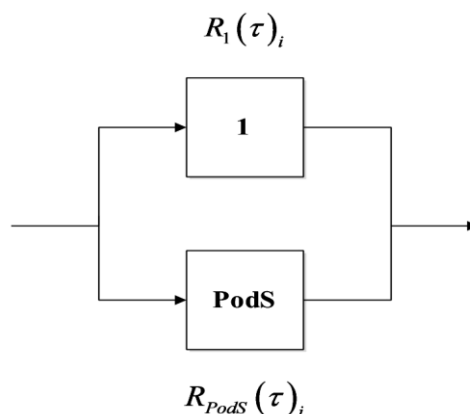
odnosno

$$R_{SK}(t) = \prod_{i=1}^n (R_1(\Delta t_i)_{i-1} R_S(t)), t = \tau + \sum_{i=1}^n \Delta t_i. \quad (3.36.)$$

Uočljivo je da do niskog nivoa pouzdanosti sistema neposredno nakon n – te preventivne akcije održavanja ($R_S(0)_n$) dovodi i loše sprovođenje preventivnih popravki komponente 1 na koje može da se utiče ali i eventualno nizak nivo pouzdanosti nepopravljivih komponenti sistema na koji se preventivnim akcijama održavanja ne može uticati (slika 3.10.). Ukoliko se desi da je $R_S(0)_n \leq R_0$ tj. da se neposredno nakon n – te preventivne akcije održavanja ne postigne više od minimalno potrebnog nivoa pouzdanosti čitavog sistema, sistem dalje nema svrhe popravljati i svako održavanje postaje bezvredno.¹

Drugi slučaj koji možemo razmatrati jeste slučaj paralelne veze između komponente 1 i ostatka sistema (PodS) koji sadrži nepopravljive komponente (slika 3.10.)¹.

¹ Sun, Y., "Reliability Prediction Of Complex Repairable Systems: An Engineering Approach", Thesis submitted in total fulfilment of requirements of the degree of Doctor of Philosophy, Faculty of Built Environment and Engineering, University of Technology, Queensland, 2006.



Slika 3.10. - Paralelna veza popravljive komponente i nepopravljivih komponenata kompleksnog sistema¹

Tada važi relacija:

$$R_S(\tau)_i = R_1(\tau)_i + R_{PodS}(\tau)_i - R_1(\tau)_i R_{PodS}(\tau)_i, i = 0, 1, 2, \dots, n. \quad (3.37.)$$

Ekvivalentno je moguće napisati i sledeću relaciju:

$$F_S(\tau)_i = F_1(\tau)_i F_{PodS}(\tau)_i, i = 0, 1, 2, \dots, n. \quad (3.38.)$$

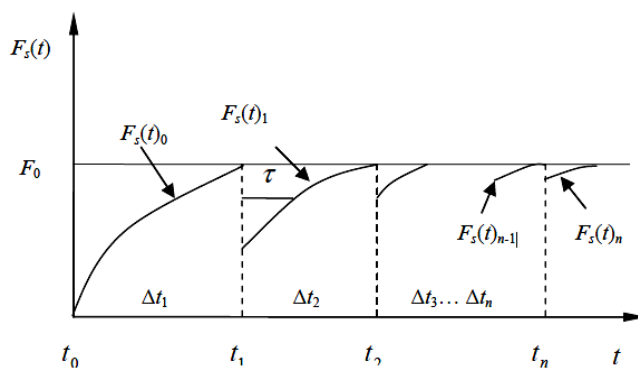
Analogno svemu prethodno napisanom o pouzdanosti redno vezanih komponenata sistema mogu se izvesti sledeće jednakosti:

$$F_S(\tau)_n = \frac{F_1(\tau)_n F_S\left(\tau + \sum_{i=1}^n \Delta t_i\right)_0}{F_1\left(\tau + \sum_{i=1}^n \Delta t_i\right)_0}, \quad (3.39.)$$

$$F_S(t) = \frac{F_1\left(t - \sum_{i=1}^n \Delta t_i\right)_n F_S(t)_0}{F_1(t)_0}, \quad t = \tau + \sum_{i=1}^n \Delta t_i. \quad (3.40.)$$

gde su $F_S(\tau)_n$ i $F_S(t)$ nepouzdanosti sistema nakon n -te preventivne akcije održavanja date preko relativne vremenske skale i apsolutne vremenske skale, respektivno. Funkcije $F_1(\tau)_0$ i $F_1(\tau)_n$ predstavljaju nepouzdanosti komponente 1 pre preventivnih akcija i posle n -te preventivne akcije održavanja., respektivno, a $F_S(\tau)_0$ je nepouzdanost celog sistema. Slika 3.11. prikazuje kretanje nepouzdanosti sistema tokom vremena.¹

¹ Sun, Y., "Reliability Prediction Of Complex Repairable Systems: An Engineering Approach", Thesis submitted in total fulfilment of requirements of the degree of Doctor of Philosophy, Faculty of Built Environment and Engineering, University of Technology, Queensland, 2006.



Slika 3.11 - Kretanje nepouzdanosti imperfektno popravljano kompleksnog sistema¹

U kontekstu pouzdanosti važi relacija:

$$R_S(t) = 1 - \frac{\left[1 - R_1\left(t - \sum_{i=1}^n \Delta t_i\right)\right] \left[1 - R_S(t)_0\right]}{\left[1 - R_1(t)_0\right]}, \quad t = \tau + \sum_{i=1}^n \Delta t_i \quad (3.41.)$$

Generalno je uočljivo da nepouzdanost tokom vremena raste pri svakoj narednoj preventivnoj akciji održavanja što je odraz imperfektnih akcija održavanja.

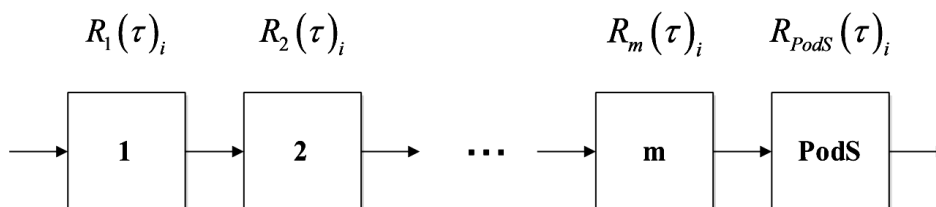
Kumulativna pouzdanost komponente 1 posle n preventivnih akcija održavanja je:

$$R_{1K}(\tau) = \prod_{i=0}^{n-1} \left(R_1(\Delta t_{i+1})_i R_1(\tau)_n \right) \quad (3.42.)$$

Kumulativno pouzdanost čitavog sistema je

$$R_{SK}(\tau) = 1 - \frac{\left[1 - \prod_{i=0}^{n-1} R_1(\Delta t_{i+1})_i R_1\left(t - \sum_{i=1}^n \Delta t_i\right)_n\right] \left[1 - R_S(t)_0\right]}{\left[1 - R_1(t)_0\right]}, \quad t = \tau + \sum_{i=1}^n \Delta t_i \quad (3.43.)$$

Sledeći scenario je više serijskih popravljivih komponenti, gde je m popravljivih komponenti, a ostale čine podsistem nepopravljivih komponenti (slika 3.12).



Slika 3.12. - Sistem sa m serijskih popravljivih komponenti ¹

¹ Sun, Y., "Reliability Prediction Of Complex Repairable Systems: An Engineering Approach", Thesis submitted in total fulfilment of requirements of the degree of Doctor of Philosophy, Faculty of Built Environment and Engineering, University of Technology, Queensland, 2006.

Ako je m popravljivih komponenti u n preventivnih akcija održavanja onda L_K predstavlja poslednju akciju održavanja k -te komponente gde je $k \leq m$ i $L_K \leq n$. Tada je pouzdanost posle n -te preventivne akcije održavanja¹:

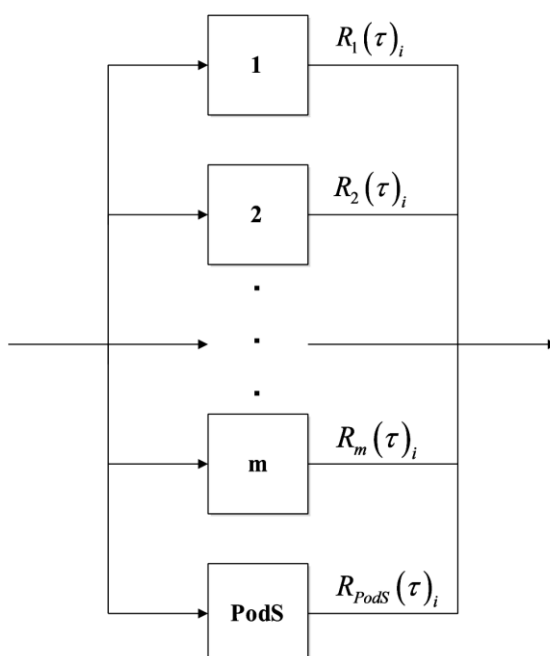
$$R_S(\tau) = \frac{R_S\left(\tau + \sum_{i=1}^n \Delta t_i\right)_0 \prod_{k=1}^m R_k\left(\tau + \sum_{i=L_k+1}^n \Delta t_i\right)_{L_k}}{\prod_{k=1}^m R_k\left(\tau + \sum_{i=1}^n \Delta t_i\right)_0} \quad (3.44.)$$

Ovde $\sum_{i=L_k+1}^n \Delta t_i = 0$ kada $L_k + 1 > n$.

Sledeći scenario sistem sa više paralelnih popravljivih komponenti je prikazan na slici 3.13.

Za ovakav sistem važi relacija:

$$F_S(\tau) = \frac{F_S\left(\tau + \sum_{i=1}^n \Delta t_i\right)_0 \prod_{k=1}^m F_k\left(\tau + \sum_{i=L_k+1}^n \Delta t_i\right)_{L_k}}{\prod_{k=1}^m F_k\left(\tau + \sum_{i=1}^n \Delta t_i\right)_0} \quad (3.45.)$$



Slika 3.13. - Sistem sa m paralelnih popravljivih komponenti¹

¹ Sun, Y., "Reliability Prediction Of Complex Repairable Systems: An Engineering Approach", Thesis submitted in total fulfilment of requirements of the degree of Doctor of Philosophy, Faculty of Built Environment and Engineering, University of Technology, Queensland, 2006.

Kada je u pitanju složenija struktura sistema, koja se svakako sastoji od kombinacije već pomenutih redno ili paralelno vezanih komponenata sistema, proračun pouzdanosti nije ni najmanje jednostavan u svetlu vremenske dinamike. Upravo ona usložnjava proračun i otežava izvodljivost proračuna. Heuristički pristupajući problem, hipotetički se rešenje ovog problema može opisati u nekoliko koraka, ali ovo svakako nije potpuno rešenje kod složenih struktura već predstavlja idejno rešenje koje svoju primenljivost tek mora naći u konkretnim slučajevima. Taj niz koraka se može predstaviti kao¹:

1. Prikupljanje podataka o otkazima.
2. Dekomponovanje sistema i izrada blok dijagrama pouzdanosti sa definisanjem popravljivih i nepopravljivih komponenti sistema.
3. Određivanje pouzdanosti svake komponente posebno i celog sistema na bazi blok dijagrama.
4. Određivanje prvog vremena preventivne akcije t_1 i komponenti koje će biti popravljane u toj preventivnoj akciji održavanja na bazi funkcija pouzdanosti celog sistema i njegovih komponenti.
5. Proračun pouzdanosti svih komponenti i celokupnog sistema na bazi blok dijagrama.
6. Određivanje prvog vremena preventivne akcije t_2 i komponenti koje će biti popravljane u toj preventivnoj akciji održavanja na bazi funkcija pouzdanosti celog sistema i njegovih komponenti.
7. Ovaj postupak se ponavlja sve dok je to potrebno.

Prednosti ovog modela su¹:

- Za razliku od većine primenjivanih modela koji se oslanjaju na unapred određeno vreme preventivnih akcija održavanja, MTTF ili očekivanog broja otkaza, ovaj model je puno podesniji za dugi period operativnog vremena sistema i promene odluka o preventivnim akcijama održavanja kakve su česta pojava u realnosti i kojima se menjaju veličine poput MTTF ili očekivanog broja otkaza.
- Model je sposoban da da uvid u kretanje pouzdanosti pojedinačnih komponenti i njihov uticaj na ukupnu pouzdanost sistema.
- U model je moguće implementirati i imperfektne opravke poput onih koje su karaktera “dobro kao novo”, “lošije od novog”, “loše kao staro”, “bolje nego novo” itd.
- Nema ograničenja po pitanju raspodele otkaza koja se može primeniti na model.

Nedostaci ovakvog pristupa su¹:

- Veoma teška primena modela za slučaj velike složenosti sistema po broju komponenata ali i nedovoljno dobra slika o pouzdanosti sistema za slučaj da se on slabo dekomponuje. Ipak, ukoliko sistem nema veliki broj otkaza onda

¹ Sun, Y., "Reliability Prediction Of Complex Repairable Systems: An Engineering Approach", Thesis submitted in total fulfilment of requirements of the degree of Doctor of Philosophy, Faculty of Built Environment and Engineering, University of Technology, Queensland, 2006.

dekomponovanje nije nužno u takvoj meri a dominantan problem modelovanja postaje mali broj otkaza.

- Iako se jako lako određuju vrednosti pouzdanosti i na osnovu toga planiraju preventivne akcije održavanja, postojanje slučajnih otkaza koje bi nužno dovelo do pojave korektivnih akcija održavanja bi moglo da dovede do ozbiljnog mimoilaženja realne slike stanja u odnosu na onu koja je modelovana i samim tim proračun pouzdanosti kod prve ovakve akcije može izgubiti svaku validnost.
- Takođe, ukoliko bi postojale interakcije komponenata sistema u smislu da otkaz jedne utiče na pouzdanost druge komponente sistema, došlo bi do krajnje ozbiljnih i grubih grešaka proračuna,
- Model ne uvažava korektivne akcije održavanja niti pruža mogućnost uvida u broj mogućih otkaza sistema, tj. komponenti.

Lako je zaključiti da su imperfektne akcije održavanja realnost usled činjenice da se ne mogu održavati sve komponente sistema u svim preventivnim akcijama održavanja. Takođe, optimalna strategija održavanja sistema podrazumeva poznavanje ne samo pouzdanosti sistema već i pojedinih njegovih komponenata upravo radi određivanja onih koje će biti popravljane ili ne u narednim akcijama održavanja. Generalno, postoje dve osnovne mogućnosti planiranja preventivnih akcija održavanja, vremenski bazirane akcije i prema pouzdanosti. Prve je neuporedivo lakše primenjivati i u realnosti i modelovati, ali je drugi način planiranja puno efikasniji i teži za modelovanje. SSA model omogućuje oba načina planiranja preventivnih akcija održavanja, što znači i ovaj teže primenljiv na bazi pouzdanosti.

Jasno je da je ovaj model potrebno unaprediti po pitanjima u kojima ima nedostataka. Nedostatak primenljivosti se može rešavati aproksimacijama kao i primenom kompjuterskih tehnologija kako bi se vreme proračuna skratilo za sisteme sa velikim brojem komponenata. Pitanje postojanja otkaza i posledica koje se dešavaju na pouzdanost same komponente se može rešiti simulacijama putem kojih se može doći do uvida u to šta se dešava sa pouzdanošću sistema na velikom broju otkaza i izvlačenjem zaključaka na osnovu dovoljno velikog broja simulacija pouzdanosti sistema. Na kraju, pitanje interakcija komponenata nakon pojave otkaza u smislu uticaja na pouzdanost drugo je pitanje koje se mora detaljnije rešiti, o čemu se govori u narednom poglavlju kako bi se model unapredio i na ovaj način.

3.2.3. INTERAKTIVNI OTKAZI

Postoji više vrsta otkaza koji su najčešće diskusije ovakvih modela. Najviše se govori o kaskadnim otkazima ili onim sa zajedničkim uzrokom. Uticaji otkaza jednih komponenti na druge može biti različit¹:

- Trenutni interaktivni otkazi – gde usled otkaza jedne komponente dolazi do trenutnog otkaza i druge komponente iako su stanja te dve komponente pre otkaza međusobno nezavisna;

¹ Sun, Y., "Reliability Prediction Of Complex Repairable Systems: An Engineering Approach", Thesis submitted in total fulfilment of requirements of the degree of Doctor of Philosophy, Faculty of Built Environment and Engineering, University of Technology, Queensland, 2006.

- Postepeni interaktivni otkaz – gde postepenim stradanjem jedne komponente dolazi do postepenog stradanja druge, čije stradanje dalje proizvodi stradanje prve, itd. Ovime se stvara pozitivna povratna sprega, a sami otkazi su međusobno zavisni. Ova vrsta otkaza je karakteristična za mehaničke sisteme.

Generalno možemo govoriti o nekoliko pristupa koji su uobičajeni kod modelovanja interaktivnih otkaza¹:

- Pristup u kome se zahteva iskustvo u pogledu konkretnih otkaza od strane inženjera održavaoca i gde se često arbitrira kod modela kako bi se ispravili nedostaci;
- Pristup u kome se razvija model sposoban da opiše mehanizme otkaza pri čemu se neretko dobija veoma specifičan model;
- Pristup zasnovan na teoriji verovatnoće i stohastičkim procesima. Ovi modeli su pogodni za razvoj modela ali su često kompleksni i veoma teško primenljivi na kompleksne sisteme;
- Drugi pristupi.

Pristup koji traži intervenisanje je dobar sa aspekta uklanjanja nedostataka modela kojih uvek ima, ali je loš sa aspekta nemogućnosti primene od strane manje iskusnih inženjera ili sa aspekta njegove univerzalnosti pa se on može primenjivati na mali broj tehničkih sistema ili čak možda samo na pojedine. Ovakav pristup takođe ne omogućuje konzistentan ili matematički dobro definisan model. Stohastički modeli, oni bazirani na teoriji verovatnoće, imaju problem primenljivosti zbog svoje zahtevnosti a kada se uzme u obzir i vremenska dinamika oni postaju veoma problematični za primenu.

Takođe mehanizam otkazivanja može biti opisan i na različite načine, pa se interaktivni otkazi mogu prezentovati preko uticaja otkaza jedne komponente na¹:

- pouzdanost druge komponente,
- intenzitet otkaza (hazard) druge komponente,
- druge parametre komponente koja trpi uticaj.

Model koji je interesantan i originalan je razvijen od strane Sun, Y.¹ zasnovan na matrici koeficijenta preko koje se ostvaruje uticaj na hazard. Ipak i pored dobrog i jednostavnog principa koji zbog svoje jednostavnosti može da bude podesan za primenu on ne oslikava puno vrsta mogućih interaktivnih otkaza. Recimo da je ograničen po pitanju koeficijenta koji su aditivni i koji su uvek manji od jedan a sve se odvija jednokratno i uzima se u obzir popravka samo jedne komponente tokom jedne PM akcije.

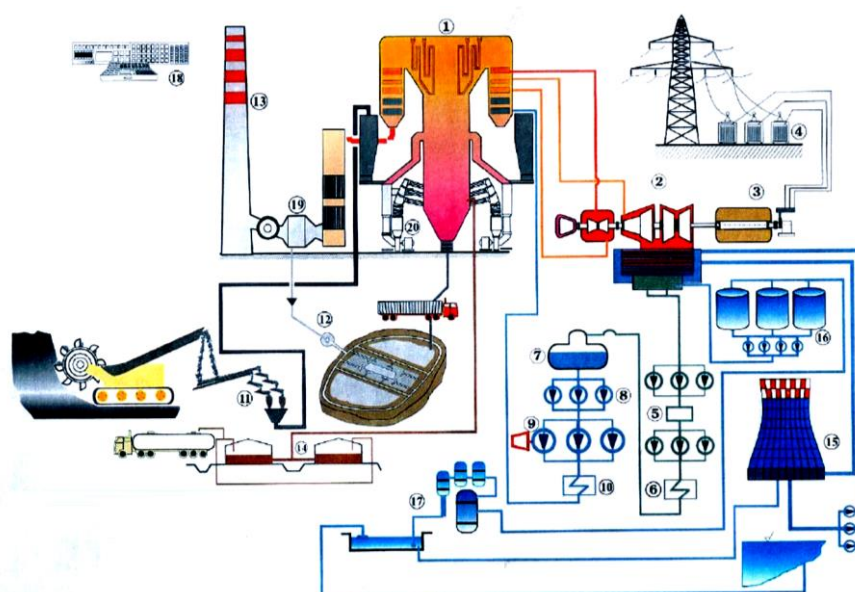
Prezentovanje interaktivnih otkaza preko uticaja na pouzdanost je jednostavnije za primenu od drugih jer se jednokratno promeni verovatnoća bezotkaznog rada komponente, ali se ovim pristupom ne može iskazati promena hazarda koja dobija kompleksni oblik za komponente i ceo sistem. Drugi pristup prezentuje uticaj na rizik

¹ Sun, Y., "Reliability Prediction Of Complex Repairable Systems: An Engineering Approach", Thesis submitted in total fulfilment of requirements of the degree of Doctor of Philosophy, Faculty of Built Environment and Engineering, University of Technology, Queensland, 2006.

pojave otkaza i suštinski je u tom smislu, ali je ne oslikava direktne promene pouzdanosti koje su jednokratne. Sem toga kada je u pitanju određena raspodela pojave otkaza, na primer Weibull-ova, ovaj pristup ne omogućuje promene odnosa parametara koje mogu nastati prilikom otkaza, pa tako određene vrste interaktivnih otkaza ne obuhvata. Takođe, slično je i sa promenama parametara teorijske raspodele otkaza koji odlično prezentuju sve promene sem jednokratnih promena pouzdanosti komponente koja trpi uticaj. Rešenje se može potražiti u kombinovanom pristupu gde se pretpostavlja “ostarivanje” komponente čime se istovremeno menja i pouzdanost komponente na jednokratan način, ali i rizik pojave otkaza trpi promene usled međusobne povezanosti ove dve pojave koje definiše teorijska raspodela pojave otkaza.

3.3. RAZVOJ NOVIH MODELA POUZDANOSTI SLOŽENIH TEHNIČKIH SISTEMA U TERMoeLEKTRANAMA

Većina tehničkih sistema u industriji je upravo vrlo kompleksna i modelovanje njihove pouzdanosti je još uvek veoma težak zadatak. Ovome razlog je veoma veliki broj komponenti sistema i podsistema kao i operativna složenost koja može prouzrokovati i promene pouzdanosti van uobičajenih pravila ili promene karakteristika pouzdanosti. Složeni tehnički sistemi u termoelektranama su upravo takvi i zahtevaju zasebna modelovanja i razmatranja problematike iz svih dostupnih uglova kako bi se modelovanje obavilo na adekvatnom nivou složenosti te najbolje reprezentovalo pouzdanost ovih sistema.



Slika 3.14 - Šematski prikaz proizvodnje električne energije⁸⁵

(1. Kotao, 2. Turbina, 3. Generator, 4. Transformator, 5. Kondenz pumpe, 6. Zagrevači niskog pritiska, 7. Dezerator, 8. Buster pumpe, 9. Elektronapojna i turbonapojna pumpa, 10. Zagrevači visokog pritiska, 11. Doprema uglja, 12. Deponija pepela i šljake, 13. Dimnjak, 14. Rezervoar mazuta, 15. Rashladni toranj, 16. Rezervoari vode, 17. Hemijska priprema vode, 18. Blok komanda Elektrofilteri Mlinovi, 19. Elektrofilteri, 20. Mlinovi)

⁸⁵ Josimović. Lj., Optimizacija postupka vibrodijagnostike turbogeneratora, Doktorska disertacija, Tehnički fakultet “Mihajlo Pupin”, Zrenjanin, 2012.

Slika 3.14. šematski prikazuje proizvodni proces električne energije. Kao složeni sistemi od posebnog značaja za proizvodnju struje i koji će se razmatrati kao kompleksni tehnički sistemi mogu se izdvojiti rotorni bager, tračni transporter, turbine, generatori itd. Bager i tračni transporter kao deo vitalnog BTĐ (i BTO) sistema gde zastoj jednog od ovih sistema znači prestanak proizvodnje uglja moraju biti predmet modelovanja. Transportni tračni transporter su primer tehničkog sistema složenog po broju komponenata i kao takav zanimljiv sa aspekta modelovanja u pogledu rešavanja problema velikog broja kalkulacija. Svakako su turbine i generatori srce proizvodnog procesa i ne smeju biti izostavljeni. Svakako da je integralno razmatranje sistema sveobuhvatnije i bolje prezentuje pouzdanost sistema, te ukoliko je to moguće postići, svaki model pouzdanosti treba da teži tome. Naravno najveći uticaj na model u praksi ostvaruju vrsta i količina dostupnih podataka koji ulaze kao input u model.

U osnovi postoji nekoliko polaznih osnova modelovanja pouzdanosti koje se primenjuju. Neke vrste modela prezentuju pouzdanost aproksimativno, dok druge tragaju za što preciznijim prezentovanjem pouzdanosti. Ipak, primena prvih modela na kompleksne tehničke sisteme konsekvntno može dovesti do grubih grešaka i ozbiljnih odstupanja modela od realnog stanja, te je model selektivno primenljiv ili neprimenljiv, dok druga grupa modela ima često nemogućnost da se adekvatno implementira ili da se proračuni modela mogu izvesti u vremenski prihvatljivim granicama. Upravo iz tih razloga pouzdanost složenih tehničkih sistema po pravilu traži razvoj modela za svaku vrstu tehničkih sistema posebno, a ako se uzme u obzir i mogućnost da tehnički sistemi rade u veoma različitim uslovima eksploatacije, dolazi se i do potrebe modelovanja svakog sistema ponaosob. Dakle, problem modelovanja složenih sistema uvek znači nalaženje pravog balansa između složenosti i primenljivosti modela i to je izraženo mnogo više nego bilo gde u modelovanju pouzdanosti. Stoga aproksimacije moraju biti pažljivo izvedene, a matematički aparat nikako previše složen i izvodljiv pomoću računarske tehnologije radi masovnih proračuna. Ovo svakako znači uvažavanje sve teorijske aparature koja je validna za primenu, ali i poštovanje svakog mogućeg praktičnog iskustva koje se može iskoristiti za aproksimaciju i postizanje validnosti modela. Svakako i različiti ciljevi modelovanja mogu da podrazumevaju i različite pristupe, te je ovo nezaobilazno pitanje svakoga pred koga se ova problematika postavi.

Korišćenje računara je krajnje poželjno radi dostizanja poželjnog vremena izvršenja proračuna modela, ali je upotreba složenih proračuna koji su masovni nepoželjna. Tako su modeli veoma simplifikovani, pa ako se ne radi o Markovljevim lancima ili pogledu na sistem kao nedekomponovanu celinu onda primena teorijskih raspodela ne seže dalje od eksponencijalne distribucije otkaza. Razlog svemu ovome nije samo dugo izvršenje proračuna modela već i konsekvntno velika složenost strukture takvog programskog koda, dok broj proračuna eksponencijalno raste sa porastom broja komponenti usred dekomponovanja. Ipak, moćno rešenje u mnogim situacijama gde se ne može otkriti egzaktna zakonitost je Monte Carlo simulacija kao uvek dostupna alternativa reprezentovanja stohastičkih pojava.

Proces modelovanja kompleksnih tehničkih sistema bi se mogao započeti analizom situacije koja se odnosi na sistem po nekim ključnim pitanjima. Ona bi se mogla prezentovati ovako⁸³:

- Da li sistem može biti dekomponovan u set nezavisnih podsistema (komponenti)?
- Da li su sve komponente operativne ili su neke u standby režimu? (one se mogu smatrati i „automatski zamenjenim“ u odnosu na one koje zamenjuju)
- Koje je stanje komponenti nakon opravki? Da li je to stanje „dobro kao novo“?
- Koji su resursi dostupni za sprovođenje opravki?
- Da li se primenjuju neki načini preventivnog održavanja?
- Da li je stanje sistema praćeno kontinuiranom dijagnostikom ili je neophodno vršiti inspekcije?
- Da li su dostupne i druge informacije o stanju sistema?
- Kako modelovati proces propadanja komponenti i sistema? Da li je dovoljno koristiti standardne modele gde je starost komponenti jedini dostupni podatak? Kako modelovati vremena opravki/zamena komponenti?
- Da li je binarni pristup (dva stanja) komponenti dovoljan ili je potrebno koristiti pristup višestrukih stanja komponenti (multistate)?
- Kako prezentovati sistem i komponente? Da li je blok dijagram pouzdanosti odgovarajući?
- Da li uključiti dinamiku vremena u model ili je prikladniji model stacionarnog vremena?
- Kako će se određivati parametri modela? Koja vrsta ulaznih podataka je potrebna za upotrebu modela?

U zavisnosti od odgovora na ova pitanja možemo identifikovati odgovarajući model pouzdanosti koji ćemo razvijati. Jasno je da nijedan model ne može da pokrije sva očekivanja, ali put do dobrog modela svakako počinje stvaranjem jednostavnih modela koji će opisati glavne osobine sistema, te, ako kapaciteti dozvole, on se može dalje razvijati u pravcu kompleksnosti. Svakako da je ovaj način razvoja modela podesan za njegovo postupno implementiranje u softverski kod čime se stiče uvid u to da li je vreme izvršenja proračuna prihvatljivo ili ne. Drugačiji pristupi bi proizveli izuzetno složene zahteve programiranja kao i potencijalno potpuno „rušenje“ modelovanja usled neprimenljivosti. Ovakav niz pitanja je krajnje smislen i može biti podsetnik prilikom svakog od modelovanja. Modelovanje u ovom istraživanju se može podeliti u niz etapa koje će se odnositi na različite vrste potreba modelovanja. Tematske celine razvoja modela bi mogle da se podele na sledeća pitanja:

1. Dekomponovanje sistema. Poseban osvrt treba imati na mali broj otkaza u bazi podataka za pojedine sisteme ili delove sistema kao i na dekomponovanje sistema sa velikim brojem istih komponenata kakav je recimo tračni transporter.
2. Formiranje modela složenog tehničkog sistema sa nepopravljivim komponentama. U obzir uzeti Vejbulovu dvoparametarsku raspodelu i pitanje procene parametara putem aproksimacija.
3. Formiranje modela sa postojanjem popravljivih komponenti sistema.

⁸³ Aven, T., Jensen, U., Stochastic Models in Reliability, Springer-Verlag, New York, 1999.

4. Formiranje modela sa postojanjem preventivnih akcija održavanja.
5. Formiranje modela sa Vejbulovom troparametarskom raspodelom.
6. Formiranje modela sa postojanjem interaktivnih otkaza zasnovan na korelaciji otkaza afektujućih komponenti i promene pouzdanosti afektovanih.

3.3.1. DEKOMPONOVANJE SISTEMA

Ako uzmemo u obzir da je najpodesniji način predstavljanja sistema putem blok dijagrama pouzdanosti pitanje dekomponovanja sistema je početno i osnovno u osnovi postoji nekoliko problema.

Predstavljanje sistema sa velikim brojem komponentata znači i veliki broj kalkulacija koje se moraju simplifikovati kako bi bile izvodljive u razumnom vremenu. Ovde se nužno mora pribeći aproksimacijama koliko god je to moguće.

Veliki broj raznorodnih komponentata sistema znači i primenu različitih raspodela ili parametara iste raspodele na razne komponente sistema. Ovo posledično usložnjava kalkulacije, pa je potrebno imati prihvatljiv broj komponenti.

Predstavljanje sistema malim brojem komponenti znači dobijanje simplifikovane predstave sistema i nekvalitetnih podataka o otkazima. Ovo je naročito izraženo kada se sistem gleda kao jedinstven i sa aspekta jedne jedine raspodele otkaza bez dekomponovanja. Tada je modelovanje jednostavno, precizno ali i netačno, tj. podaci koji se dobijaju su gotovo po pravilu neupotrebljivi i nevalidni.

Nedostatak podataka o otkazima lako može da dovede do slabijeg dekomponovanja sistema usled toga što se ne može doći do dovoljnog broja podataka o otkazima za pojedine komponente. Ovakva vrsta nedostatka je neretka u slučajevima velikog broja preventivnih akcija održavanja koje su neretke u industriji i tada nema dobrih metoda da se modeluje pouzdanost. Potrebno je dakle razviti model koji može i ovaj nedostatak da otkloni onoliko koliko je to moguće i omogući dekomponovanje sistema čak i tako da pojedine komponente sistema imaju jako mali broj otkaza a da model bude validan. Ukoliko je razlog malog broja podataka o otkazima ipak činjenica da sistem malo otkazuje, onda je situacija puno jednostavnija i pribegava se dekomponovanju do nivoa koji je moguć. Gledajući stvari sa aspekta malog broja otkaza usled čestih preventivnih akcija održavanja što je čest slučaj u industriji, jasno je da inputi za model moraju biti i preventivne akcije održavanja koje povećavaju broj podataka po pojedinoj komponenti sistema.

Postrojenje sistema sa velikim brojem komponentata koje potpadaju pod relativno manji broj vrsta kakav je recimo sistem tračnog transportera koji ima veoma veliki broj valjaka, ali ne i veliki broj vrsta valjaka mogu da se modeluju relativno lakše, ali je centralno pitanje ovakvog modelovanja postojanje dobrog algoritma koji može da da validne proračune. Ovde je potrebno komponente iste vrste svrstavati u nizove i voditi preciznu evidenciju vremena zamena i opravki ovakvih komponenti, te o svakoj od komponenti u nizu imati preciznu evidenciju kretanja pouzdanosti.

Modeli koji se budu formirali će pokušati da dekomponuju sistem na maksimalnom mogućem broju komponenata koje ne ugrožavaju vreme proračuna a koje se mogu izvesti iz postojeće baze podataka o otkazima.

Dakle, poznavanje sturkture sistema i njegovo dekomponovanje zavise od kriterijuma dekomponovanja koji bi se mogli predstaviti sledećim koracima:

1. Način evidencije otkaza. Ukoliko su podaci grupisani na mali broj komponenata sistema dalje dekomponovanje se smatra nemogućim pa se model mora prilagoditi ovim uslovima.
2. Broj otkaza po komponenti. Ukoliko je broj otkaza po komponenti mali dekomponovanje se može obaviti kako bi pojedina komponenta imala veći broj otkaza. Uobičajena je praksa da to bude 30 ili najmanje 10 otkaza po komponenti sistema. Ipak, ovo nameće sukob između toga da se sistem (ili njegov deo) posmatra kao celina gde se dobijaju tačniji podaci o otkazima ili da se sistem dekomponuje što više i dobiju manje pouzdani podaci koji bolje oslikavaju karakter kretanja pouzdanosti celog sistema, tokom vremena.
3. Ukoliko se sistem preventivno održava onda je i te akcije održavanja moguće tretirati kao inpute u model za svaku komponentu sistema pa je broj otkaza koji pojedina komponenta može da sadrži u okviru modela znatno manji.

3.3.2. MODEL SLOŽENOG TEHNIČKOG SISTEMA SA NEPOPRAVLJIVIM KOMPONENTAMA

Ovakav model treba da predstavlja polaznu osnovu za kasniji razvoj modela i treba da omogući što jednostavnije načine da se dođe do osnova budućih modela. Najjednostavniji način jeste posmatranje sistema sa nepopraavljivim komponentama.

Pretpostavke modela se mogu formirati u skladu sa ranije postavljenim pitanjima o formiranju modela. Možemo reći da osim što se radi o sistemu koji se ne održava preventivno da:

- se sistem može dekomponovati,
- se sve komponente sistema smatraju operativnim,
- su opravke imperfektne usled opravki samo pojedinih komponenti ali da je njihovo stanje nakon zamene/opravke „dobro kao novo“, tj. da njihova pouzdanost jeste na nivou 1,
- nema ograničenja po pitanju resursa opravki,
- komponente sistema imaju dva stanja (binarni pristup)
- se sistem posmatra kroz vremensku dinamiku,
- se kao inputi koriste isključivo podaci o otkazima komponenti.

Industrijska istraživanja pokazuju da se verovatnoća bezotkaznog rada najbolje može opisati putem eksponencijalne i Weibulove raspodele za operativni period kada je

intenzitet otkaza konstantan ili u porastu⁸⁶. Kako su i eksponencijalna ali i normalna raspodela otkaza specijalni slučajevi Weibulove, to će upravo poslednje pomenuta raspodela predstavljati polaznu osnovu modela. Radi lakšeg formiranja modela polazište će predstavljati dvoparameterska Weibulova raspodela. Glavno pitanje predstavlja pitanje procene parametara Weibulove raspodele, a takođe i aspekt vremenske dinamike proračuna.

Weibulova dvoparameterska raspodela je specijalan slučaj troparameterske kada je parametar $\gamma = 0$, tj. kada mogućnost otkaza postoji odmah od početka operativnog vremena. Funkcija gustine otkaza (teorijske raspodele otkaza) za Weibulovu dvoparametersku raspodelu glasi:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta} \right)^\beta}, \quad t \geq 0, \beta > 0, \eta > 0, \quad (3.46.)$$

gde je:

t - operativno vreme,

β - parametar oblika raspodele,

η - parametar razmere raspodele.

Tada funkcija pouzdanosti glasi:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta} \right)^\beta}, \quad t \geq 0, \beta > 0, \eta > 0. \quad (3.47.)$$

Funkcija nepouzdanosti:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta} \right)^\beta}. \quad (3.48.)$$

Gustina pojave otkaza:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1}. \quad (3.49.)$$

Slika 3.15. prezentuje gustinu pojave otkaza za Weibulovu dvoparametersku raspodelu za različite vrednosti parametra oblika raspodele.

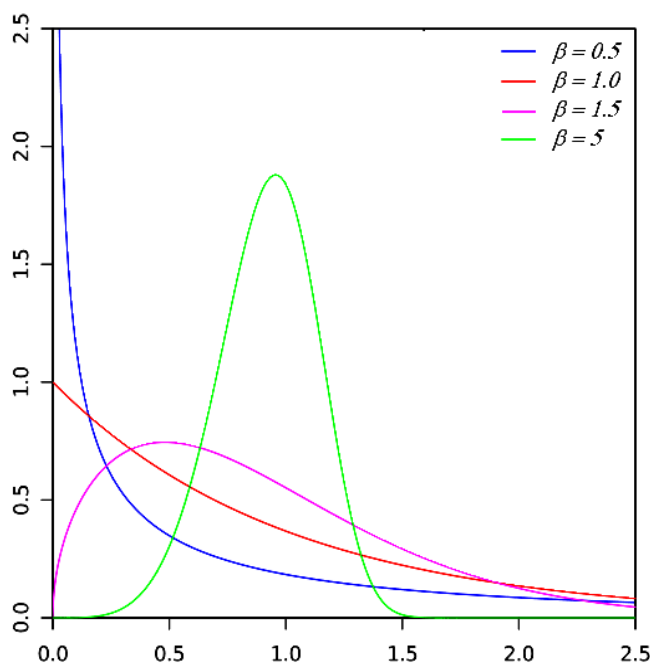
⁸⁶ Josimović, Lj., Đurić, Ž., Adamović, Ž., Radovanović, Lj., Jovanov, G., An evaluation of formed maintenance programme efficacy, *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering*, Ljubljana, 2012., 58(5), 300-308.

⁸⁷ Milošević, D., Vujović, S., Janjić, N., Metode proračuna parametara weibulove raspodele, XXXVI konferencija „Majski skup održavalaca Srbije“, „Merenje performansi indikatora održavanja tehničkih sistema u kompanijama“, Vrnjačka Banja, 2013.

Za slučaj kada je $\beta=1$ raspodela odgovara eksponencijalnoj, a za $\beta=2$ odgovara Relejevoj raspodeli, dok za veće vrednosti sve više dobija osobine normalne raspodele.

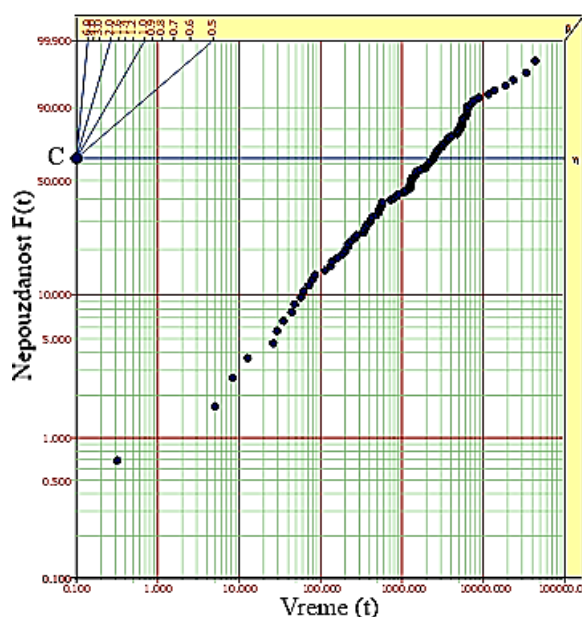
Određivanje parametara se može vršiti u nekoliko metoda prezentovanih u tekstu koji sledi.

Grafički metod je razvijen na bazi verovatnosnog papira od strane Goode-a i Kao-a. Ovaj papir poseduje koordinatni sistem koji na apscisi ima logaritamsku podelu a na ordinati dvostruku logaritamsku podelu. Na ovaj papir se unesu tačke koje se odnose na otkaze adekvatno vrednosno prevedene za ovaj papir. Dvoparameterska raspodela je primenljiva onda kada je raspored tačaka na verovatnosnom papiru približno linearan. Tada se skup ucrtanih tačaka aproksimira pravom linijom koja može biti grafički ili analitički određena. Analitičko određenje znači primenu metoda najmanjih kvadrata. Grafički se parametar razmere raspodele η nalazi na x osi čija je vrednost prave na y osi 0,632 tj. $F(t)=1-e^{-t}$. Parametar oblika raspodele β predstavljen je nagibom aproksimativne prave u odnosu na apscisu. Na slici 3.16. se vidi primer verovatnosnog papira gde se nagib aproksimativne linije povlači u tački C i na bazi toga čita vrednost parametra β .



Slika 3.15 - Grafik funkcije gustine pojave otkaza Weibulove dvoparameterske raspodele⁸⁷

⁸⁷ Milošević, D., Vujović, S., Janjić, N., Metode proračuna parametara weibulove raspodele, XXXVI konferencija „Majski skup održavalaca Srbije“, „Merenje performansi indikatora održavanja tehničkih sistema u kompanijama“, Vrnjačka Banja, 2013.

Slika 3.16 - Vejbulov verovatnosni papir⁸⁷

Analitičko određivanje parametara znači već pomenutu primenu **metoda najmanjeg kvadrata** za dobijanje aproksimativne linije na bazi skupa tačaka (x_i, y_i) . Prvo se određuju vrednosti koeficijenata a_0 i a_1 a zatim i vrednosti parametara raspodele⁸⁸:

$$a_0 = \frac{\sum x_i^2 \cdot \sum y_i - \sum x_i \cdot \sum x_i y_i}{n \cdot \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}, \quad (3.50.)$$

$$a_1 = \frac{n \cdot \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \cdot \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}. \quad (3.51.)$$

Na osnovu ovih koeficijenata se dalje parametri proračunavaju kao⁸⁸:

$$\hat{\beta} = a_1, \quad (3.52.)$$

$$\hat{\eta} = e^{-\frac{a_0}{a_1}}. \quad (3.53)$$

gde su $\hat{\beta}$ i $\hat{\eta}$ procenjene vrednosti parametara oblika i razmere raspodele.

Sledeća metoda koja se može primeniti u proceni parametara je **metoda momenata**. Ova metoda je tehnika koja je široko korišćena na polju procene parametara. Ako su x_i podaci o otkazima gde je $i = 1, 2, 3, \dots, n$ onda je nepristrasni estimator za k -ti moment:

⁸⁸ Ćatić, D., Modeliranje pouzdanosti korišćenjem Vejbulove raspodele, Tehnika, Savez inženjera i tehničara Srbije, 2006., 55(5), 1-10.

$$\widehat{m}_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^k, \quad (3.54.)$$

gde \widehat{m}_k odgovara proceni m_k . U Weibulovoj distribuciji k -ti momenat se dobija kao

$$\mu_k = \left(\frac{1}{\eta^\beta} \right)^{\frac{k}{\beta}} \Gamma \left(1 + \frac{k}{\beta} \right), \quad (3.55.)$$

gde Γ označava gama funkciju

$$\Gamma(s) = \int_0^\infty x^{s-1} e^{-x} dx, \quad (s > 0) \quad (3.56.)$$

Odavde se dalje mogu naći prvi i drugi momenat kao

$$m_1 = \widehat{\mu}_k = \left(\frac{1}{\eta} \right)^{\frac{1}{\beta}} \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right), \quad (3.57.)$$

$$m_2 = \widehat{\mu}_k^2 + \widehat{\sigma}_k^2 = \left(\frac{1}{\eta} \right)^{\frac{2}{\beta}} \left\{ \Gamma \left(1 + \frac{2}{\beta} \right) - \left[\Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \right]^2 \right\}. \quad (3.58.)$$

Kada se m_2 podeli kvadratom od m_1 dobijamo funkciju koja je izražena isključivo preko β sledi

$$\frac{\widehat{\sigma}_k^2}{\widehat{\mu}_k^2} = \frac{\Gamma \left(1 + \frac{2}{\beta} \right) - \Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{\beta} \right)}{\Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{\beta} \right)}. \quad (3.59.)$$

Korenujući izraz dobijamo koeficijent varijanse CV izražen kao

$$CV = \frac{\sqrt{\Gamma \left(1 + \frac{2}{\beta} \right) - \Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{\beta} \right)}}{\Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right)}. \quad (3.60.)$$

Odnos procenjenih vrednosti parametara β i γ je

⁸⁸ Ćatić, D., Modeliranje pouzdanosti korišćenjem Weibulove raspodele, Tehnika, Savez inženjera i tehničara Srbije, 2006., 55(5), 1-10.

$$\hat{\eta} = \left\{ \frac{\bar{x}}{\Gamma\left[\left(1/\hat{\beta}\right)+1\right]} \right\}^{\hat{\beta}} \quad (3.61.)$$

gde \bar{x} predstavlja srednju vrednost podataka tj. *MTTF* – srednje vreme do pojave otkaza⁸⁸.

Grafički metod ima problem nepreciznosti i provizornosti, dok navedeni analitički bi za veliki broj vrsta komponenti tehničkog sistema prouzrokovali veoma dugo vreme kalkulacije i time nemogućnost primene modela. Kao rešenje se može primeniti aproksimacija koja sledi.

Radi fleksibilnosti modela i njegove jednostavne primenljivosti čak i na druge kompleksne tehničke sisteme potrebno je pribеći nekim aproksimacijama. Stoga \bar{T}_{ur} – srednje vreme u radu, izračunavaće se kao aritmetička sredina svih evidentiranih otkaza iz baze podataka za određeni valjak:

$$\bar{T}_{ur} = \frac{\sum_{i=1}^N n_i}{N} \quad (3.62.)$$

gde su: N - ukupan broj otkaza, n_i - i -ti otkaz.

Kako se radi o dvoparametarskoj raspodeli to je *MTTF* (srednje vreme do pojave otkaza) jednako srednjem vremenu u radu \bar{T}_{ur} . Parametar β će se aproksimativno određivati preko odnosa $\frac{\eta}{MTTF}$ na sledeći način:

β	$\eta/MTTF$
1	1,00
2	1,15
2.5	1,12
3	1,10
4	1,06

Tabela 3.1. - $\eta/MTTF$ odnos u zavisnosti od β ⁸⁹

Prema tome je, linearnom aproksimacijom za periode između intervala čime se dobijaju korektnije vrednosti parametara⁹⁰:

⁸⁸ Čatić, D., Modeliranje pouzdanosti korišćenjem Weibulove raspodele, Tehnika, Savez inženjera i tehničara Srbije, 2006., 55(5), 1-10.

⁸⁹ <http://www.tpub.com/content/USACETechnicalletters/ETL-1110-2-560/ETL-1110-2-5600030.htm> (V 2012.)

⁹⁰ Milošević, D., Josimović, Lj., Petrov, T., Adamović, Z., Maintenance planning of btr system belt conveyors using a model based on reliability and maintenance costs, TTEM, 2013., 8(3), 1257-1265.

$$\text{za } \beta \leq 1, \frac{\eta}{MTTF} = 1; \quad (3.63.)$$

$$\text{za } 1 < \beta \leq 2, \frac{\eta}{MTTF} = 1 + 0.15 \cdot (\beta - 1); \quad (3.64.)$$

$$\text{za } 2 < \beta \leq 2.5, \frac{\eta}{MTTF} = 1.15 - 0.06 \cdot (\beta - 2); \quad (3.65.)$$

$$\text{za } 2.5 < \beta \leq 3, \frac{\eta}{MTTF} = 1.12 - 0.04 \cdot (\beta - 2.5); \quad (3.66.)$$

$$\text{za } 3 < \beta \leq 4, \frac{\eta}{MTTF} = 1.1 - 0.04 \cdot (\beta - 3); \quad (3.67.)$$

$$\text{za } 4 < \beta < 100, \frac{\eta}{MTTF} = 1.06 - \frac{0.06 \cdot (\beta - 4)}{96}; \quad (3.68.)$$

$$\text{za } \beta \leq 100 \beta, \frac{\eta}{MTTF} = 1. \quad (3.69.)$$

Radi ilustracije data je kalkulacija parametara za očekivanu vrednost parametra β između 3 i 4 pa važi aproksimacija

$$\frac{\eta}{MTTF} = 1.1 - 0.04 \cdot (\beta - 3), \quad (3.70.)$$

pa je

$$\beta = \left(\frac{1.1 - \frac{\eta}{MTTF}}{0.04} \right) + 3. \quad (3.71.)$$

Pod pretpostavkom da je na osnovu broja otkaza u bazi podataka za datu komponentu sistema N za posmatrani period vremena pouzdanost nakon maksimalnog izmerenog vremena otkaza t_{\max} (radnih časova) prema metodi simetrične kumulativne gustine otkaza (Symmetrical CDF method⁹¹) iznosi:

$$R(t_{\max}) = \frac{1}{2 \cdot N}. \quad (3.72.)$$

Koristeći jednakost (3.47), izvodimo da je

⁹¹ Al-Fawzan, A., M., Methods for Estimating the Parameters of the Weibull Distribution, King Abdulaziz City for Science and Technology, Riyadh, Saudi Arabia, 2000.

$$\beta = \log_{\left(\frac{t_{\max}}{\eta}\right)} \left(-\ln \left(\frac{1}{2 \cdot N} \right) \right). \quad (3.73.)$$

Posledično

$$\left(\frac{1.1 - \frac{\eta}{MTTF}}{0.04} \right) + 3 = \log_{\left(\frac{t_{\max}}{\eta}\right)} \left(-\ln \left(\frac{1}{2 \cdot N} \right) \right). \quad (3.74.)$$

Rešavanjem poslednje jednačine se dobija vrednost parametra η i nakon toga uvršćivanjem vrednosti u neku od prethodnih jednačina i parametar β .

Nekoliko elementarnih struktura možemo razmatrati, te uvideti kako da modelujemo pouzdanost prema njima.

Kada su u pitanju binarni kompleksni sistemi prvo možemo govoriti o strukturnim relacijama između sistema i njegovih komponenti. Pretpostavke su da govorimo o međusobno nezavisnim otkazima komponenata i da nema uticaja jednih na druge po pitanjima pouzdanosti.

Možemo razmatrati sistem od n komponenata numerisanih od 1 do n (slika 3.17.) u serijskoj strukturi komponenti sistema.



Slika 3.17 - Serijska struktura

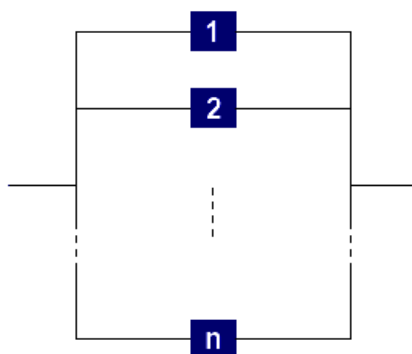
Možemo pretpostaviti samo dva stanja komponenti sistema: funkcionalno – u radu i u otkazu, a to se konsekventno odnosi i na svaki element, komponentu, podsistem i sistem u celini.

Pouzdanost serijske strukture:

$$R = \prod_{i=1}^n R_i \quad (3.75.)$$

Kada je u pitanju paralelna struktura sistema (slika 3.18.) tada je:

$$R = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) = \prod_{i=1}^n R_i \quad (3.76.)$$

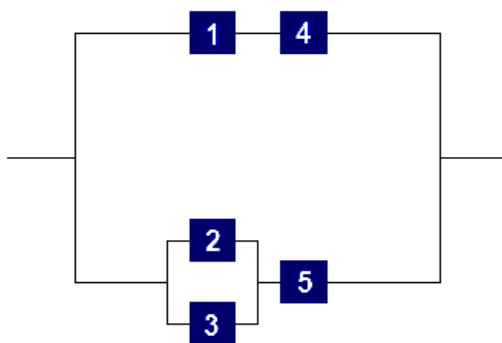


Slika 3.18 - Paralelna struktura

gde je $R = (R_1, R_2, \dots, R_n)$, $F = (F_1, F_2, \dots, F_n)$. Verovatnoće R_i i F_i odgovaraju pouzdanosti i nepouzdanosti komponente sistema i , a R i F odgovaraju pouzdanosti i nepouzdanosti celog sistema.

U osnovi, problem se svodi na to da se izračuna pouzdanost R data preko pouzdanosti komponentata p_i . Pre nego li se pristupi rešavanju ovog problema potrebno je razmotriti posebne slučajeve serijske i paralelne veze komponentata sistema.

Na primeru strukture prikazane na slici 3.19. možemo da sagledamo proračun pouzdanosti. Pretpostavka je da je sistem binaran i monoton.



Slika 3.19. - Primer blok dijagrama pouzdanosti

Razmatrajući blok dijagram pouzdanosti sistem se može sagledati kao paralelna struktura sa 2 nezavisna podsistema: prvi podsistem sa komponentama 1 i 4 i drugi podsistem sa komponentama 2, 3 i 5. Pouzdanosti ovih podsistema su dakle $R_1 \cdot R_4$ za prvi podsistem i $(1 - (1 - R_2) \cdot (1 - R_3)) \cdot R_5$ za drugi podsistem. Posledično, pouzdanost sistema se može proračunati kao:

$$R = 1 - \{1 - R_1 \cdot R_4\} \cdot \{1 - (1 - (1 - R_2) \cdot (1 - R_3)) \cdot R_5\}. \quad (3.76.)$$

Iako je ovaj matematizam krajnje jednostavan, proračun pouzdanosti za kompleksne tehničke sisteme može biti zastrašujuće težak zadatak i često nerešiv u ograničenim uslovima vremena, nedostatka podataka ili promena pouzdanosti komponenata tokom vremena usled otkaza, preventivnih ili korektivnih akcija održavanja i drugih uticaja na pouzdanost sistema. Ovakav problem traži isključivo najefikasnija algoritamska i metodološka rešenja koja svakako spadaju u važna istraživanja iz domena teorije pouzdanosti danas.

Postoje brojne metode proračuna pouzdanosti. Mnoge od njih se zasnivaju na *minimal cut set* ili *minimal put set* metodi. One se odnose na pronalaženje svih kombinacija minimalnog broja komponenata u otkazu da celi sistem bude obavezno u otkazu ili minimalnog broja komponenata u radu da celi sistem bude u radu. Pronalaženje ovih verovatnoća za veliki broj komponenata postaje preobimna kalkulacija gotovo obavezno. Neke od metoda u upotrebi su Inclusion–Exclusion metod, Minimal Cut (Path) Set predstavljanje strukture sistema, metod nabiranja stanja, Faktoring metod itd.

Ove metode je moguće primeniti na razne situacije i na popravljive i nepopravljive tehničke sisteme. Bez obzira na metod koji se koristi, ono što najviše glavobolje zadaje u proračunu pouzdanosti kompleksnih tehničkih sistema jeste upravo vremenska dinamika. Primera radi, posmatramo monotoni sistem u vremenskom intervalu pod pretpostavkom da su komponente sistema u trenutku vremena nove tj. da imaju pouzdanost 1 i da nakon otkaza neke komponente nema opravke ili zamene komponente koja je otkazala. U ovom radu se bavimo samo pitanjem nepopravljivih komponenti sistema i centralno pitanje predstavlja vremenska dinamika proračuna.

Pretpostavka je kada govorimo o strukturno složenim sistemima da svaka komponenta sistema i ima svoju distribuciju otkaza $F_i(t)$ i intenzitet otkaza $\lambda_i(t)$. Tako je za serijsku strukturu sistema pouzdanost u trenutku vremena t važeća jedankost 3.75., za paralelnu 3.76.

Za složenu strukturu sistema kakva je data na slici 3.19. pouzdanost u trenutku vremena t je:

$$R(t) = 1 - \{1 - R_1(t) \cdot R_4(t)\} \cdot \{1 - (1 - (1 - R_2(t)) \cdot (1 - R_3(t))) \cdot R_5(t)\}. \quad (3.77.)$$

Istraživanja sprovedena u industriji pokazuju da se verovatnoća neprekidnog rada sastavnih delova i/ili sistema, koji podležu slučajnim greškama, može najbolje opisati eksponencijalnom ili Weibull-ovom raspodelom tokom radnog perioda kada je intenzitet otkaza ili konstantan ili je u usponu. Kako je eksponencijalna raspodela specijalan slučaj Weibull-ove to je izbor raspodele više nego jasan. Pod pretpostavkom da svaka komponenta sistema podleže Weibull-ovoj raspodeli otkaza koja odgovara eksploatacionom periodu tehničkog sistema, relevantni parametri tehničkog sistema su dati u tabeli 1.

Tada je funkcija pouzdanosti za svaku komponentu:

$$R_i(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.78.)$$

gde su: t vreme otkaza, β parametar oblika i η parametar razmere raspodele.

Tabela 3.2 je data kao hipotetički primer za izračunavanje pouzdanosti sistema prema poznavanju parametara pojedinih komponenti.

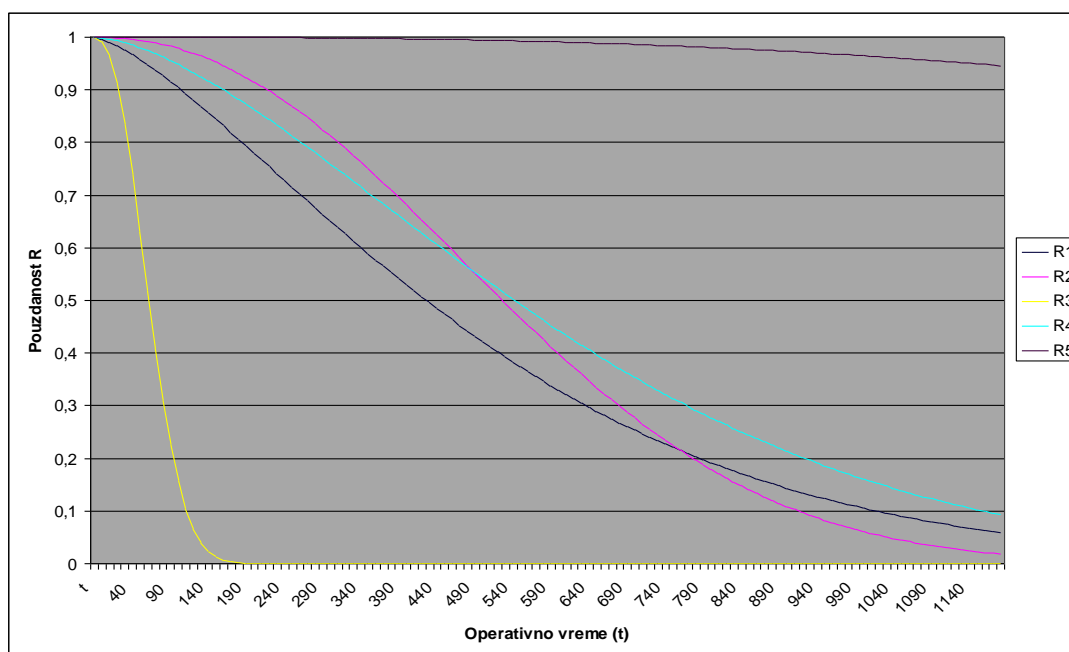
Komponenta	β	η (h)
1	1,4	566
2	2,2	633
3	2,3	84
4	1,6	693
5	2,7	3469

Tabela 3.2. - Parametri Weibull-ove raspodele za svaku komponentu sistema.

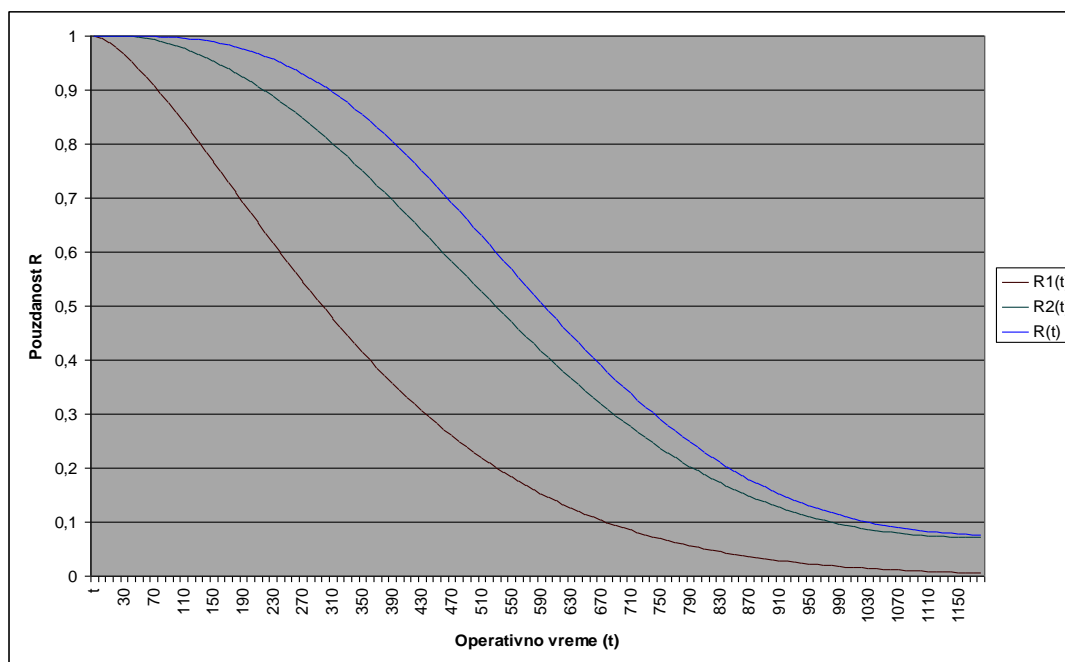
Proračun podrazumeva računanje pouzdanosti u svakoj vremenskoj tački i za svaku komponentu a onda proračun pouzdanosti čitavog sistema, čime se dobija tek podatak o pouzdanosti čitavog sistema u samo jednoj vremenskoj tački.

Tako proračunata pouzdanost je pogodna za grafičko prezentovanje.

Slika 3.20. prezentuje uporedne vrednosti pouzdanosti za svaku od komponenti. Uočljivo je da najveću pouzdanost pokazuje komponenta 5 a najmanju komponenta 3.



Slika 3.20. - Pouzdanost komponenti sistema tokom operativnog vremena



Slika 3.21. - Pouzdanost tehničkog sistema i njegovih podsistema tokom operativnog vremena

Slika 3.21. prezentuje uporedne vrednosti pouzdanosti za prvi podsistem (koji čine komponente 1 i 4) i drugi podsistem (koji čine komponente 2, 3, i 5) kao i za čitav tehnički sistem. I pored većeg broja komponenata drugi sistem pokazuje veće vrednosti pouzdanosti tokom vremena usled postojanja paralelnih veza među njima. Pouzdanost čitavog sistema je viših vrednosti od podsistema međusobno što je posledica paralelne veze među elementima.

Kao rezultat ovakvog proračuna pouzdanosti složenog tehničkog sistema sa nepopravljivim komponentama dobija se integralni model koji može biti prezentovan putem koraka navedenih u nabrojanju koje sledi:

1. Prikupljanje podataka o otkazima.
2. Dekomponovanje sistema u skladu sa podacima o otkazu kojima se raspolaže i izrada blok dijagrama pouzdanosti.
3. Procena parametara Weibulove raspodele prema nekoj od navedenih metoda.
4. Proračun pouzdanosti za svaku komponentu sistema u svakoj vremenskoj jedinici operativnog vremena.
5. Formiranje formule izračunavanja pouzdanosti sistema na bazi blok dijagrama.
6. Proračun pouzdanosti čitavog sistema za svaku vremensku jedinicu operativnog vremena na bazi formirane formule.

Nedostaci ovakvog modela su mnogobrojni pa moraju biti otklonjeni u narednim izradama modela. Pobraćemo najgrublje nedostatke modela.

Dekomponovanje sistema je jako problematično jer broj otkaza kojima se raspolaže po jednoj komponenti mora biti ne mali da bi se došlo da validnih parametara raspodele i valjane zakonitosti otkaza pojedine komponente. Optimalan broj otkaza bi morao biti preko 30 i time bi se smatralo da je broj otkaza veliki a stepen poverenja dobijenih

rezultata visok. Ipak u praksi je ovo najčešće nemoguće i sve se svodi na nedovoljno dekomponovanje sistema.

Proračun je za sisteme sa većim brojem komponenata jako spor pa je praktično i neizvodljiv za sisteme koji imaju jako veliki broj komponenata. Razlog je i taj što je kreiranje formule pouzdanosti dosta složen posao i postoji mogućnost greške, ali je još veći problem što se pouzdanost proračunava u ogromnom broju vremenskih tačaka kalkulacije čime se vreme kalkulacije značajno produžava.

Model ne razmatra mogućnosti popravke sistema kakvi su u industriji najčešći i daje jednostavnu sliku pouzdanosti sistema. Istina je da se ovakvo modelovanje često primenjuje ali da ono ne pruža puno toga što bi održavaocima pomoglo da donesu prave odluke o akcijama održavanja.

I pored svih navedenih i mnogih drugih nedostataka, postupci ovog modela su primenljivi na nepopravljive komponente sistema i mogu se uvrstiti u kompleksnije modele kao njegov deo.

3.3.3. FORMIRANJE MODELA ZA SLOŽENI SISTEM SA POPRAVLJIVIM KOMPONENTAMA (KOREKTIVNO ODRŽAVANJE)

Ovaj model će se oslanjati na prethodni. Osnovne postavke se razlikuju u tome što je sada reč o sistemu sa popravljivim komponentama na kojima se primenjuju korektivne akcije održavanja. Prvi korak modelovanja je kao i u prethodnom poglavlju, prikupljanje podataka o otkazima. Nakon toga je potrebno odrediti zakonitosti otkazivanja pojedinih komponenti. Radi lakšeg modelovanja pretpostavićemo da sistem ima veliki broj komponenti ali manji broj vrsta komponenti. Ovime ćemo pojednostaviti model i posvetiti veću pažnju formiranju algoritma nego li vremenu izvršenja koje će biti predmet kasnijih razmatranja. Takođe, pretpostavka je da komponente sistema podležu dvoparametarskoj Vejbulovoj raspodeli. Određivanje ovih parametara mora biti vremenski što efikasnije kako bi modelovanje dobilo na fleksibilnosti u slučajevima radi lakše i što šire implementacije modela. Nakon toga se proračunavaju funkcije gustina pouzdanosti, intenziteti otkaza i funkcije teorijskih raspodela otkaza za svaku vrstu komponenti.

Sledeći korak podrazumeva formiranje stohastičkih komponenata modela i određivanje parametara koji određuju model kao takav za svaku vrstu komponenti posebno.

Nakon toga sledi izrada softverskog modela koji će za operativno vreme rada sistema da simulira rad. Simulacija treba da obezbedi proračun pouzdanosti za svaku pojedinačnu vrstu komponenti i u svakoj jedinici vremena. Simuliraju se otkazi pojedinačnih komponentata prema već utvrđenim teorijskim verovatnoćama otkaza i proračunava broj otkaza po vrstama komponenata. Pretpostavka je da se posle otkaza svake od komponenti sprovodi korektivna akcija održavanja, te na mesto komponente koja je otkazala dolazi komponenta iste vrste i istih osobina koja je pouzdanosti 1.

Nakon početnog prikupljanja podataka o otkazima i njihovom klasifikovanju prema vrstama komponenti, zakonitosti otkazivanja komponenti se određuju kao u prethodnom modelu, recimo aproksimativno radi bržeg proračuna. Pošto se proračunaju vrednosti parametara oblika (β) i razmere raspodele (η) dolazi se do teorijske funkcije pouzdanosti:

$$R_v(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta_v}\right)^{\beta_v}}, \quad (3.79.)$$

i intenziteta otkaza koji glase:

$$\lambda_v(t) = \frac{\beta_v}{\eta_v} \left(\frac{t}{\eta_v}\right)^{\beta_v-1}, \quad v = 1, 2, \dots, m_v \quad (3.80.)$$

gde je v - vrsta komponente pa je tako vrednost svakog od parametara raspodele, pouzdanosti i intenziteta otkaza različita. m_v predstavlja broj komponenata sistema koje su od vrste v .

Da bi se formirao simulacioni model potrebno je dalje određene pretpostavke uvrstiti u model:

- za pouzdanost sistema su relevantne samo pouzdanosti komponenata pojedinačno,
- vreme zamene komponenti je zanemarljivo i podrazumeva samo korektivne akcije održavanja,
- po otkazivanju komponente sistema ona biva zamenjena komponentom istih karakteristika koja ima pouzdanost 1.

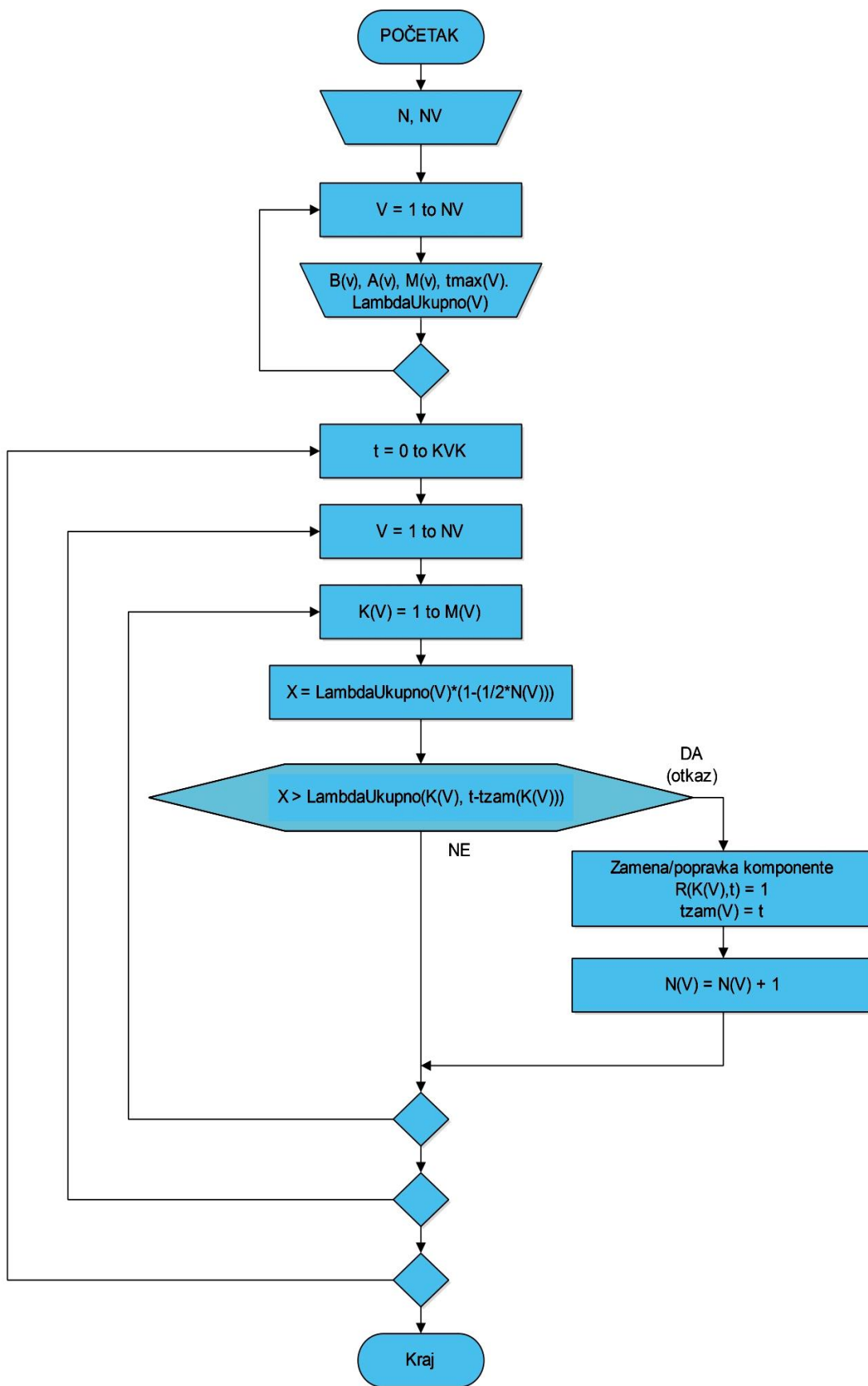
Sledeći korak je formiranje stohastičkih komponenata modela. Potrebno je formirati parametre koji će preuzeti na sebe faktor slučajnosti. Sledeći korak nakon formiranih pojedinačnih modela pouzdanosti je njihova integracija. Potrebno je na bazi već otkrivenih zakonitosti pojave otkaza putem slučajnog broja simulirati otkaze svakog od valjaka na posmatranom sistemu. Funkcija intenziteta otkaza (hazarda) je podesna za formiranje softverskog modela (jednačina 3.80.). Kontinualnu promenjivu $\lambda_v(t)$ valja pretvoriti u sekvencijalnu zbrajanjem pojedinačnih vrednosti ove promenjive za svaki radni čas pojedinačno. Dakle, proračuni se rade za vrednosti od $t_v = 0$ do maksimalne vrednosti vremena otkaza pojedine vrste komponenata od 0 do

$$t_{v,\max} \lambda_{v,Ukupno} = \sum_{t_v=0}^{t_{v,\max}} \frac{\beta_v}{\eta_v} \left(\frac{t_v}{\eta_v}\right)^{(\beta_v-1)}. \text{ Softver treba da simulira slučajan broj } X_v \in [0, t_{v,\max}]$$

jer je $\lambda_{v,Ukupno} \cdot \left(1 - \frac{1}{2 \cdot n_v}\right)$ te ako je vrednost intenziteta otkaza pojedinačne komponente

$\lambda_{v,k}(t)$ veće od slučajne pomenljive X_v tada dolazi do otkaza i adekvatne zamene komponente koja je otkazala. Ovaj postupak treba uraditi za svaku od komponenti sistema pojedine vrste, a onda i za sve druge vrste komponenti za svaku komponentu

pojedinačno. Naravno, ovo se mora implementirati u iteracije koje se odnose na svaki radni čas. Kao krajnje vreme kalkulacije uzeto se odabira željeno vreme simulacije KVK iskazano u radnim časovima (jer su i podaci o otkazima tako evidentirani). Algoritamski je ova softverska simulacija predstavljena na slici 3.22. Algoritam je zbog svoje kompleksnosti simplifikovan radi jednostavnijeg razumevanja i oslikava suštinu simulacije.



Slika 3.22. - Algoritam simulacionog modela sa popravljivim komponentama sistema

Gde su u algoritmu (slika 3.22.):

t – operativno vreme,

t_{zamene} – vreme zamene,

$K(V)$ – pojedinačna komponenta vrste V ,

$t_{zam}(K(V))$ – vreme poslednje zamene komponente $K(V)$

$t_{max}(V)$ – maksimalno vreme otkaza jedne vrste komponenti V prema evidenciji otkaza,

NV – broj vrsta komponenata,

V – vrsta komponenti,

$M(V)$ – ukupan broj otkaza komponenata vrste V ,

X – promenljiva koja određuje verovatnoću otkazivanja pojedine komponente u određenom trenutku vremena,

$\Lambda_{Ukupno}(V)$ – ukupni intenzitet otkaza za V vrstu komponenti,

$\Lambda(K(V),t)$ – intenzitet otkaza komponente $K(V)$ u trenutku vremena t ,

$N(V)$ – broj otkaza vrste komponenata V prema simulaciji.

Pošto je napravljen model, može se otpočeti sa simulacijom te pružiti primer prebrojavanja broja otkaza i popravki tokom operativnog vremena. Ovakav model je primenljiv na one tehničke sisteme koji imaju samo korektivne akcije održavanja i koji imaju veliki broj komponenti ali ne i puno vrsta komponenti. Takav tehnički sistem na primer predstavljaju tračni transporter. Njihova pouzdanost je direktno zavisna od transportnih valjaka kojih ima i po više hiljada, ali i ih je ne veliki broj vrsta pa je moguće formirati pravila otkazivanja, pogotovu jer je broj otkaza koji se može prikupiti relativno veliki pa su parametri Weibulove raspodele takvi da mogu valjano da prezentuju pouzdanost valjaka te i čitavog sistema. Kako je model stohastički, on daje rezultate primenom na velikom vremenskom intervalu operativnog vremena.

Ovakav model ima mogućnost proširivanja u domenima preventivnih akcija održavanja kako bi bio sveobuhvatniji i primenljiviji na veći broj tehničkih sistema.

3.3.4. FORMIRANJE MODELA ZA SLOŽENI SISTEM SA POPRAVLJIVIM KOMPONENTAMA (KOMBINOVANO ODRŽAVANJE)

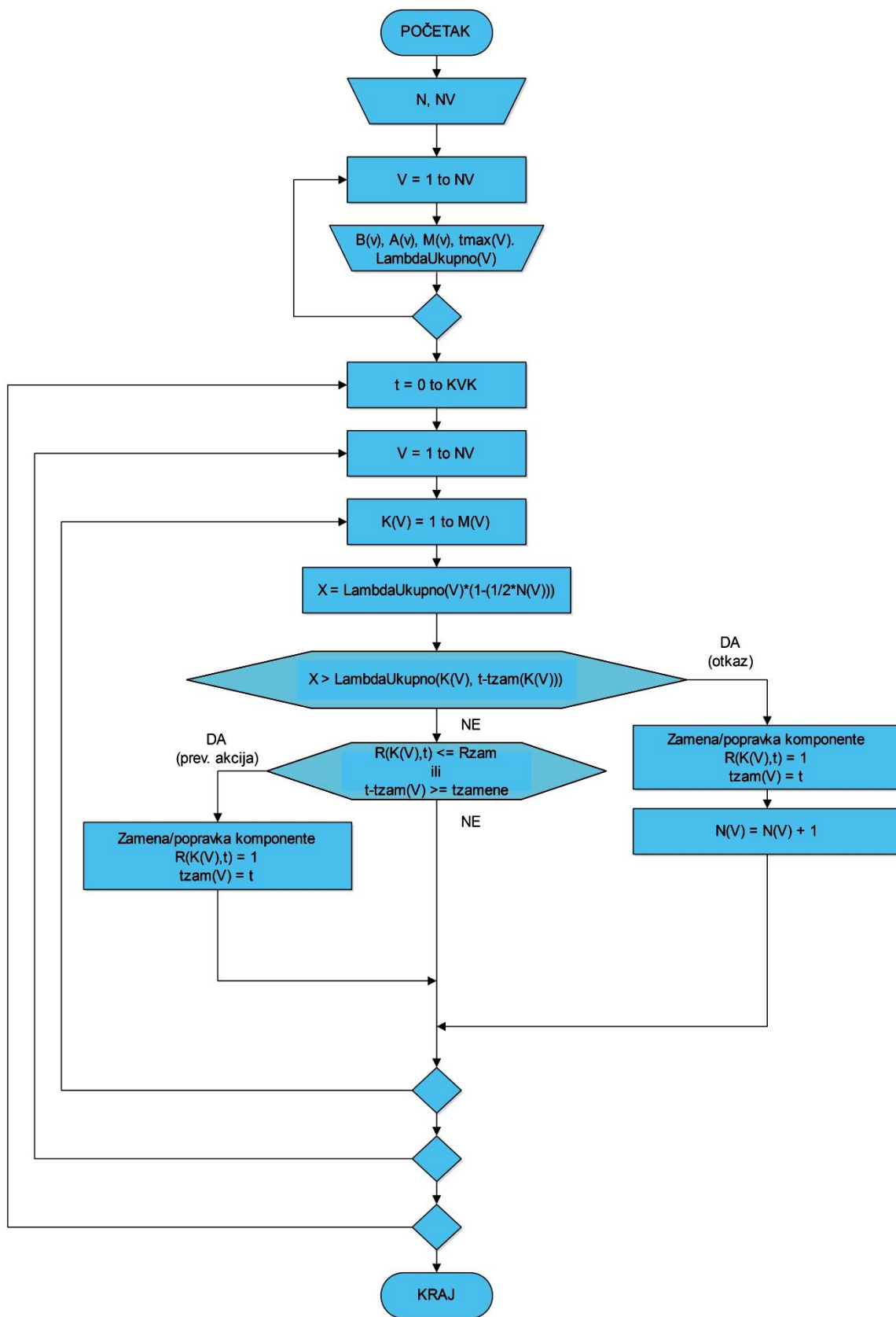
3.3.4.1 SIMULACIONI MODEL POUZDANOSTI ZA PERFEKTNO ODRŽAVANJE KOMPONENTI

Perfektno održavanje komponenti znači da se nakon popravke ili zamene pouzdanost komponente dovodi na nivo 1 tj. 100% pouzdanosti. Ovo ne znači i dovođenje pouzdanosti čitavog sistema na taj nivo već samo komponente koja je bila popravljena (zamenjena) datom akcijom održavanja.

Oslanjajući se na prethodni model koji je podrazumevao samo akcije korektivnog održavanja, sledeći modeli su posvećeni uticajima akcija kombinovanog (korektivnog i preventivnog). Dakle novi momenat je uvođenje preventivnih akcija održavanja.

Postupci ovog modela se oslanjaju na prethodni i podrazumevaju iste postupke sve osim što sam algoritam mora da predvidi i preventivno održavanje. U osnovi postoje 2 načina preventivnog održavanja. Jedan se oslanja na unapred definisano vreme akcija održavanja. Ovo važi za tehničke sisteme koji su uslovljeni proizvodnim procesom pa je samo određeno vreme podesno da se izvrše ovakve akcije održavanja. Sa druge strane postoji i planiranje akcija održavanja prema pouzdanosti koje je efikasnije i delotvornije jer se akcijama održavanje podvrgavaju upravo komponente sa najnižom pouzdanošću i time se ukupna pouzdanost sistema u datim uslovima najviše moguće povećava. Ipak planiranje održavanja prema pouzdanosti nosi teškoće modelovanja pouzdanosti a u nekim realnim situacijama i nije ostvarivo (ukoliko je rad sistema nemoguće zaustaviti osim u pojedinim momentima vremena).

Pod pretpostavkom da se kao i u prethodnom modelu došlo do zakonitosti teorijskih raspodela verovatnoće otkaza za sve vrste komponenata simulacijom je moguće vršiti predikciju zamene valjaka u tačno definisanim vremenskim razmacima ili na tačno definisanom nivou pouzdanosti svake komponente pojedinačno. Algoritamski model bi mogao biti prikazan kao na slici 3.23.



Slika 3.23. - Algoritam simulacionog modela za slučaj kombinovanog održavanja (za perfektno održavanje komponenti)

Gde su u algoritmu:

t – operativno vreme,

t_{zamene} – vreme zamene,

$K(V)$ – pojedinačna komponenta vrste V ,

$t_{zam}(K(V))$ – vreme poslednje zamene komponente $K(V)$

$t_{max}(V)$ – maksimalno vreme otkaza jedne vrste komponenti V prema evidenciji otkaza,

NV – broj vrsta komponenata,

V – vrsta komponenti,

$M(V)$ – ukupan broj otkaza komponenata vrste V ,

X – promenljiva koja određuje verovatnoću otkazivanja pojedine komponente u određenom trenutku vremena,

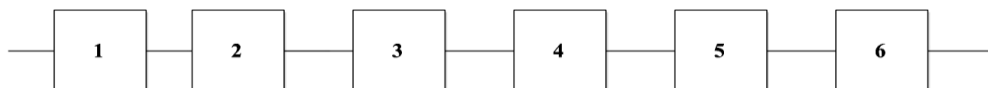
$\Lambda_{Ukupno}(V)$ – ukupni intenzitet otkaza za V vrstu komponenti,

$\Lambda(K(V),t)$ – intenzitet otkaza komponente $K(V)$ u trenutku vremena t ,

$R(K(V),t)$ – pouzdanost komponente $K(V)$ u trenutku vremena t ,

$N(V)$ – broj otkaza vrste komponenata V prema simulaciji.

Kao hipotetički primer sistema koristićemo tehnički sistem dekomponovan na 6 redno vezanih pod sistema - komponenata. Blok dijagram sistema je prikazan na slici 3.24. Smatramo da su na osnovu prethodnih iskustava sa otkazima parametri dvoparametarske Weibulove raspodele poznati za svaki od 6 pod sistema pojedinačno. Oni su navedeni u tabeli 3.3. Vrednosti parametra oblika raspodele su iskazane u radnim časovima.



Slika 3.24. - Blok dijagram složenog tehničkog sistema
(Podsistemi su obeleženi brojevima)

Komponenta	1	2	3	4	5	6
Parametar oblika raspodele β	1,04	1,49	1,33	1,34	1	1,09
Parametar razmere raspodele η	180,3	154,7	759,57	67,88	43,67	1253,367

Tabela 3.3. – Parametri Weibulove raspodele za svaku komponentu sistema.

Simulacije će biti izvedena za 3 različita pristupa održavanja gde se redosled preventivnih akcija održavanja planira na bazi:

- unapred definisanog vremena održavanja,
- pouzdanosti komponenata,
- pouzdanosti čitavog sistema.

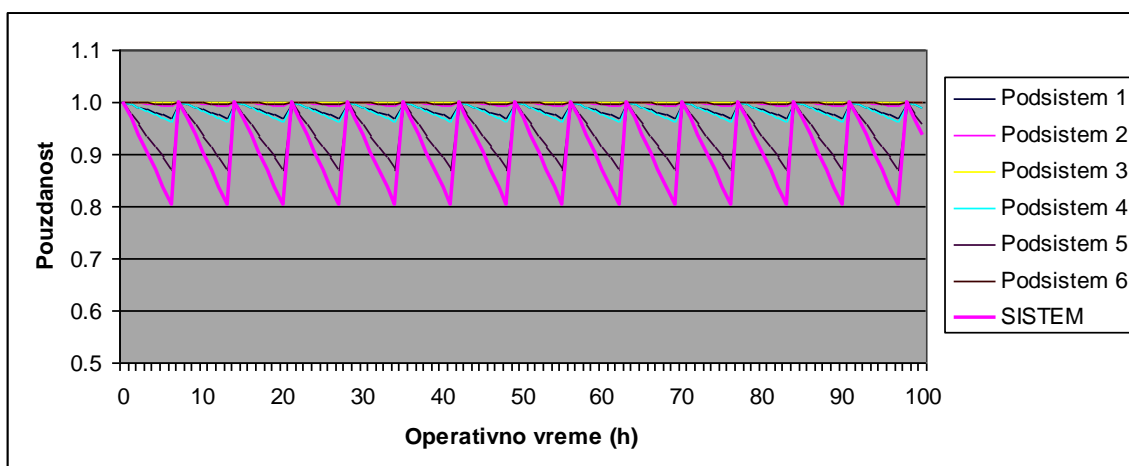
Redosled globalnog održavanja pretpostavlja da se postrojenje potpuno zaustavlja i da se preventivno održavanje sprovodi na svakom podsistemu pojedinačno čime se pouzdanost sistema dovodi na vrednost 100%. Sam redosled održavanja nije bitan iz razloga što se preventivno održavanje sprovodi na celokupnom sistemu. Vremensko određenje zavisi od momenta kada pouzdanost svakog od podsistema pa i čitavog sistema padne na predefinisani minimalni nivo tj. odigrava se u pravilno i unapred određenim vremenskim intervalima. U ovom slučaju će, kako je to i najčešće slučaj u industriji, intervali akcija održavanja biti pravilni.

Preventivno održavanje na bazi pouzdanosti podsistema se sprovodi na način da kada pojedinačni podsistem dospe na određeni predefinisani minimalni nivo pouzdanosti tada se sprovodi akcija preventivnog održavanja datog podsistema. Redosled akcija održavanja utvrđuje se putem simulacije.

Preventivno održavanje na bazi pouzdanosti sistema znači proračun pouzdanosti ne samo za svaki podsistem na osnovu teorijskih vrednosti već i celokupnog sistema na osnovu blok dijagrama pouzdanosti. Ako pouzdanost celokupnog sistema dođe na predefinisani minimalni nivo, tada se sprovodi akcija održavanja na podsistemu sa najmanjim nivoom pouzdanosti u tom trenutku i njegova se pouzdanost podiže na nivo od 100%.

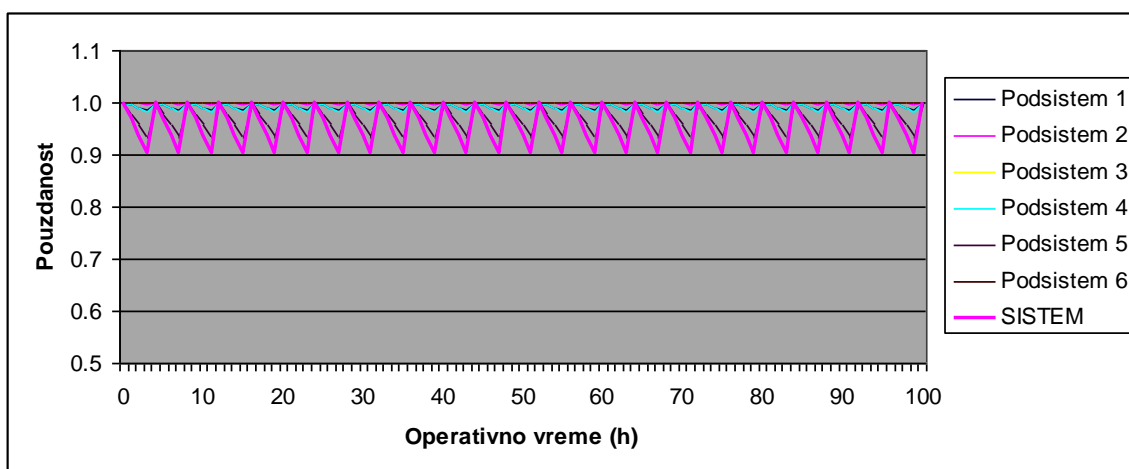
Simulacioni model će biti posebno adaptiran za svaki od navedenih pristupa posebno. Pretpostavka je da se akcije preventivnog održavanja izvode perfektno, tj. da se pouzdanost svakog pojedinačnog podsistema nakon akcija održavanja vraća na nivo pouzdanosti 100%. Za svaki od pristupa će biti razvijena po 3 scenarija, sa minimalnim predefinisanim nivoima pouzdanosti od 85%, 90% i 95%. Simulacija se izvodi za svaki radni čas u periodu od 100 operativnih časova. Pretpostavlja se da je tehnički sistem potpuno nov na početku simulacije.

Pristup redosleda globalnog održavanja za slučaj minimuma pouzdanosti od 85% , 90% i 95% predstavljen je na slikama 3.25., 3.26. i 3.27. respektivno.



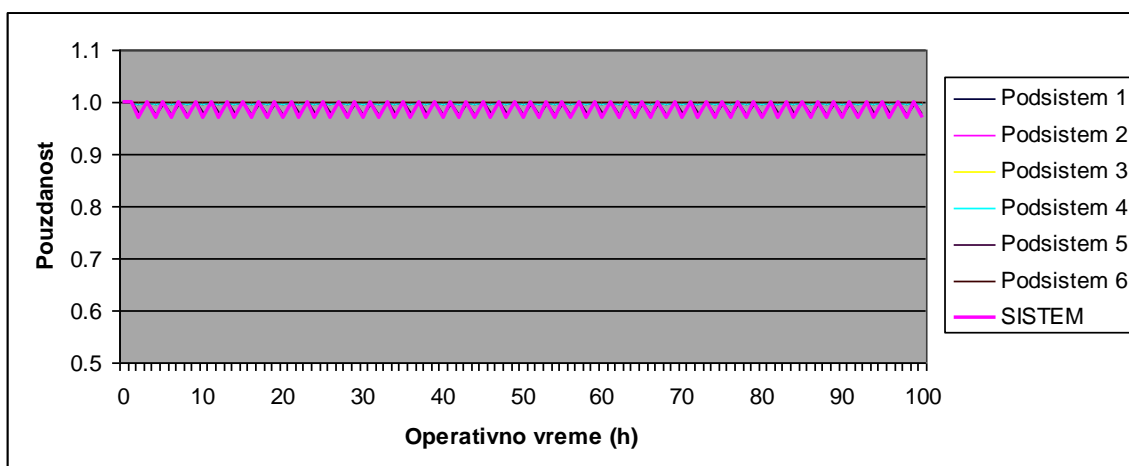
Slika 3.25. - Pristup globalnog održavanja za slučaj minimuma pouzdanosti sistema od 85%

Na slici 3.25. je uočljiva pravilnost preventivnih akcija održavanja na 7 sati kada pouzdanost najmanje pouzdanog podsistema dostigne minimum od 85%. Za period od 100 operativnih časova postoji po 14 preventivnih akcija održavanja po podsistemu, što je ukupno 84 akcija u 14 zastoja. Minimalna pouzdanost celokupnog sistema je svaki put ista i iznosi oko 80%.



Slika 3.26. - Pristup globalnog održavanja za slučaj minimuma pouzdanosti sistema od 90%

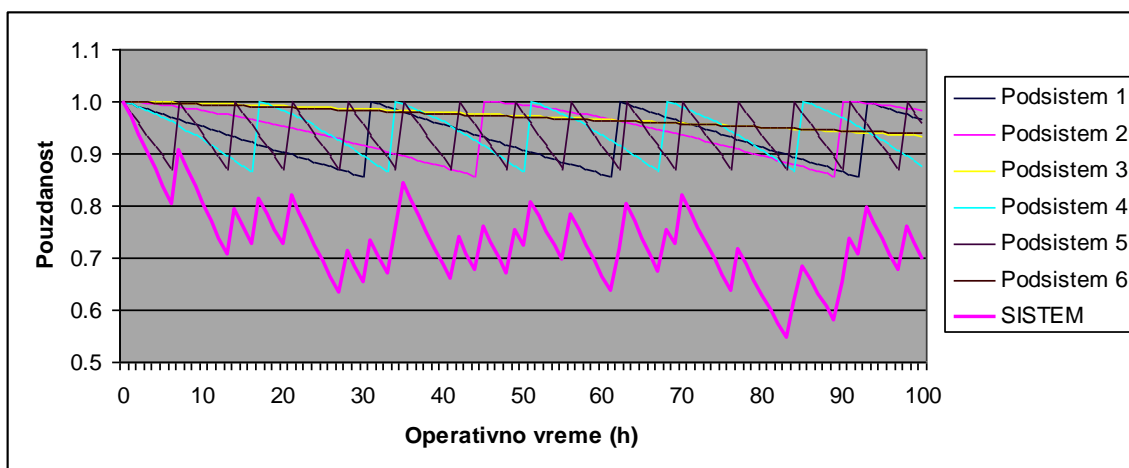
Na slici 3.26. je uočljiva pravilnost preventivnih akcija održavanja na 4 sata kada pouzdanost najmanje pouzdanog podsistema dostigne 90%. Za period od 100 operativnih časova dakle postoji po 25 preventivnih akcija održavanja po podsistemu, što je ukupno 150 akcija u 25 zastoja. Minimalna pouzdanost celokupnog sistema je svaki put ista i iznosi oko 90,22%.



Slika 3.27. - Pristup globalnog održavanja za slučaj minimuma pouzdanosti sistema od 95%

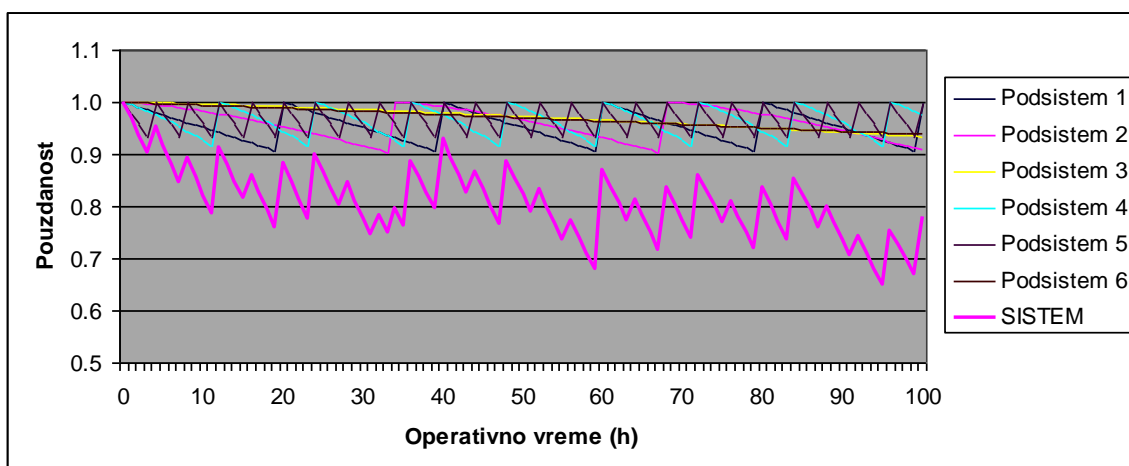
Na slici 3.27. je uočljiva pravilnost preventivnih akcija održavanja na 2 sata kada pouzdanost najmanje pouzdanog podsistema padne na 95%. Za period od 100 operativnih časova dakle postoji po 50 preventivnih akcija održavanja po podsistemu, što je ukupno 300 akcija u 50 zastoja. Minimalna pouzdanost celokupnog sistema iznosi oko 96,85%.

Pristup preventivnog održavanja na bazi pouzdanosti podsistema za slučaj minimuma pouzdanosti od 85%, 90% i 95% predstavljen je na slikama 3.28., 3.29. i 3.30. respektivno.



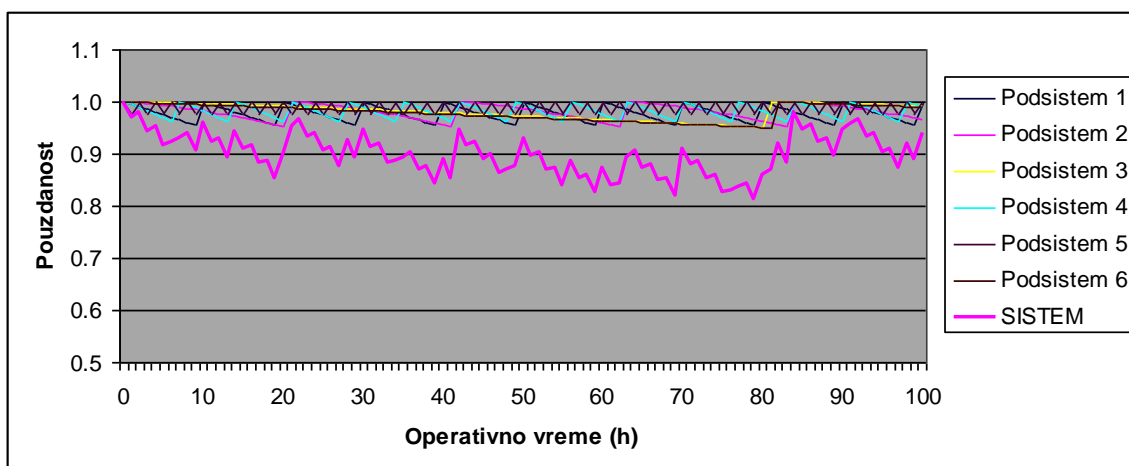
Slika 3.28. - Preventivno održavanje na bazi pouzdanosti podsistema za slučaj minimuma pouzdanosti od 85%

Na slici 3.28. je uočljivo da se akcije održavanja za dati podsistem sprovode onda kada njegova pouzdanost padne na nivo od 85%. Za period od 100 operativnih časova postoji po 24 preventivnih akcija ukupno i isto toliko zastoja a minimalna pouzdanost celokupnog sistema je 54,46%.



Slika 3.29. - Preventivno održavanje na bazi pouzdanosti podsistema za slučaj minimuma pouzdanosti od 90%

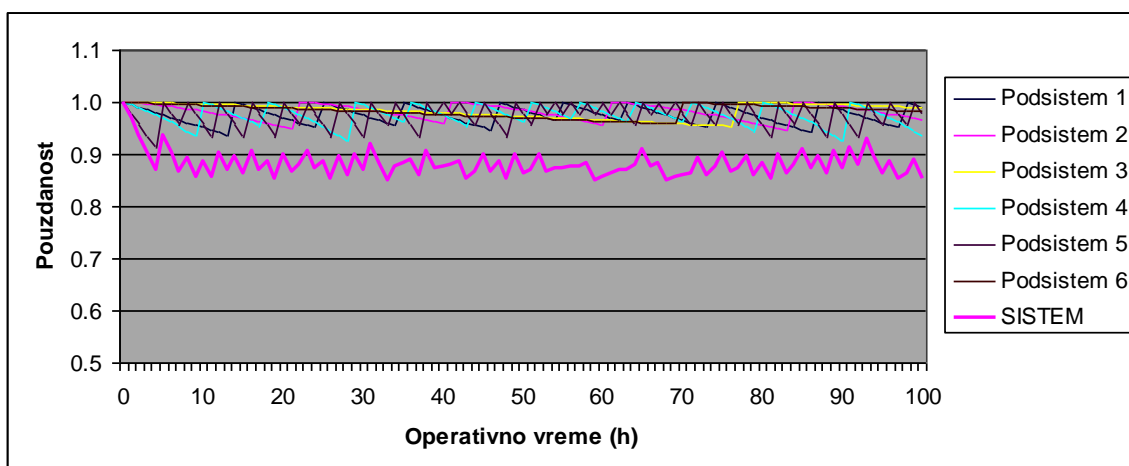
Na slici 3.29. je uočljivo da se akcije održavanja za dati podsistem sprovode onda kada njegova pouzdanost padne na nivo od 90%. Za period od 100 operativnih časova postoji po 40 preventivnih akcija održavanja ukupno i isto toliko zastoja a minimalna pouzdanost celokupnog sistema je 65,14%.



Slika 3.30. - Preventivno održavanje na bazi pouzdanosti podsistema za slučaj minimuma pouzdanosti od 95%

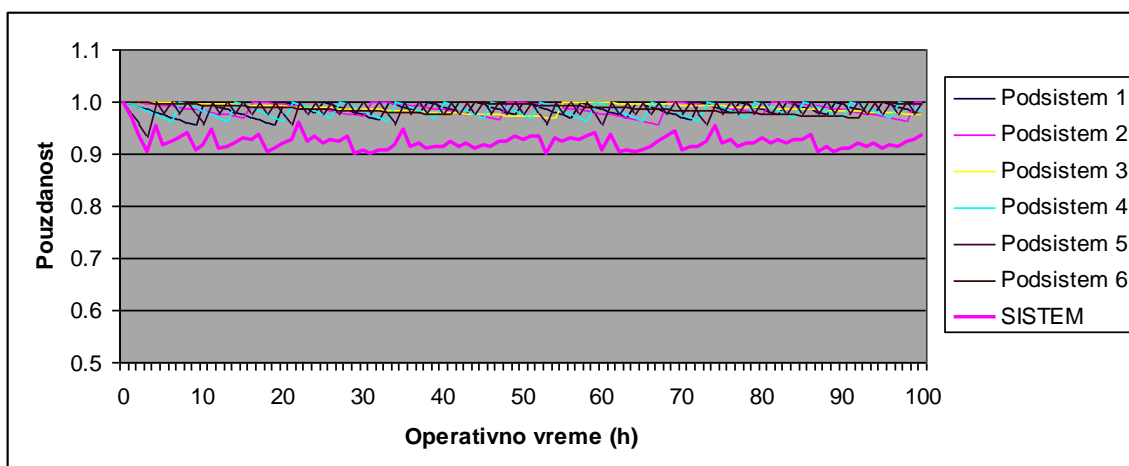
Na slici 3.30. je uočljivo da se akcije održavanja za dati podsistem sprovode onda kada njegova pouzdanost padne na nivo od 95%. Za period od 100 operativnih časova postoji po 80 preventivnih akcija održavanja i isto toliko zastoja a minimalna pouzdanost celokupnog sistema je 81,18%.

Pristup redosleda preventivnog održavanja na bazi pouzdanosti sistema za slučaj minimuma pouzdanosti od 85% , 90% i 95% predstavljen je na slikama 3.31., 3.32. i 3.33. respektivno.



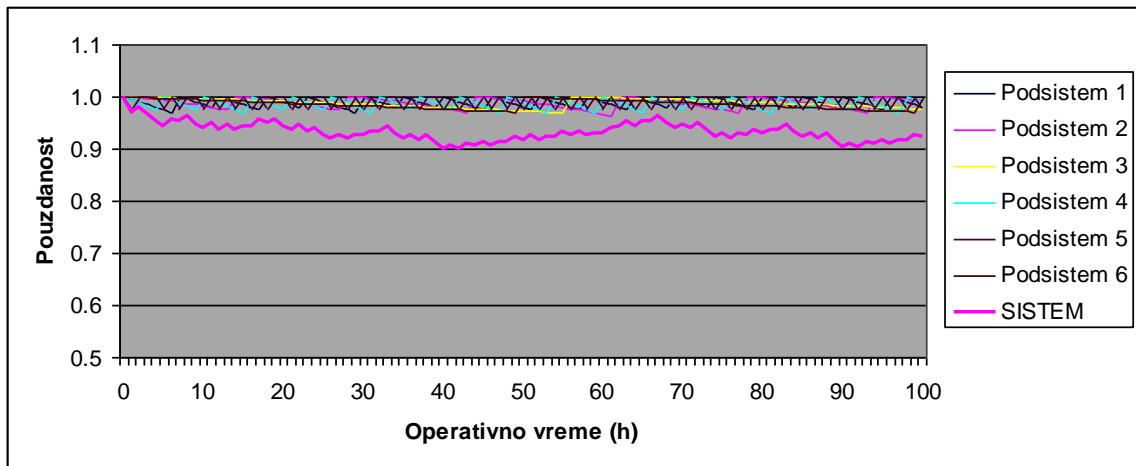
Slika 3.31. - Preventivno održavanje na bazi pouzdanosti sistema za slučaj minimuma pouzdanosti od 85%

Na slici 3.31. je uočljivo da se akcije održavanja sprovode za podsistem sa najmanjom pouzdanošću onda kada pouzdanost celokupnog sistema padne na nivo od 85%. Za period od 100 operativnih časova postoji po 58 preventivnih akcija održavanja i isto toliko zastoja.



Slika 3.32. - Preventivno održavanje na bazi pouzdanosti sistema za slučaj minimuma pouzdanosti od 90%

Na slici 3.32. je uočljivo da se akcije održavanja sprovode za podsistem sa najmanjom pouzdanošću onda kada pouzdanost celokupnog sistema padne na nivo od 90%. Za period od 100 operativnih časova postoji po 84 preventivnih akcija održavanja i isto toliko zastoja.



Slika 3.33. - Preventivno održavanje na bazi pouzdanosti sistema za slučaj minimuma pouzdanosti od 95%

Na slici 3.33. je uočljivo da se akcije održavanja sprovode za podsistem sa najmanjom pouzdanošću onda kada pouzdanost celokupnog sistema padne na nivo od 95%. Za period od 100 operativnih časova postoji po 99 preventivnih akcija održavanja i isto toliko zastoja.

Preventivno održavanje sa pristupom globalnog održavanja ima manji broj zastoja u odnosu na druge i visok nivo pouzdanosti celokupnog sistema, ali je broj akcija održavanja po podsistemu daleko najveći. Ovakav način planiranja preventivnog održavanja se može smatrati podesnim za slučajeve kada nema problema nedostatka ljudstva, kada je dostupnost svih delova koji se održavaju laka i jednostavna i naročito ako je cena zastoja visoka, a neophodno je da proizvodni sistem kontinuirano radi. Dakle, benefit je veliki ali su preduslovi vrlo specifični.

Kada se planira preventivno održavanje na bazi pouzdanosti podsistema, čini se da je to najlakši način planiranja pogotovu onda kada se radi o kompleksnim tehničkim sistemima, kada je kalkulacija pouzdanosti čitavog sistema pod znakom pitanja. Tada se dolazi do nešto većeg broja zastoja, ali i najnižeg nivoa pouzdanosti upravo zato što se ne posmatra celovitost tehničkog sistema, pa se na jednoj strani obavljaju akcije održavanja kada to nije najneophodnije, a na drugoj nivo pouzdanosti sistema pada na drastično nizak nivo. Ovime se sistem izlaže riziku neplaniranih otkaza u visokoj meri čime se dolazi do još većih problema.

Planiranje održavanja na bazi pouzdanosti sistema daje najbolju kontrolu nivoa pouzdanosti. Broj zastoja je svakako najviši, ali se postiže najviši nivo pouzdanosti sa najmanjim brojem akcija održavanja po podsistemu. Ovaj način planiranja je izuzetno pogodan kada je potrebno održavati visok nivo pouzdanosti celokupnog tehničkog sistema, što je danas najčešći prioritet. Osim toga, tada postoje najmanje mogućnosti neplaniranih otkaza a time i zastoja. Simulacioni modeli koji bi se bavili i mogućnošću pojave neplaniranih otkaza na bazi slučajnih brojeva bi mogli najbolje pokazati ispravnost planiranja preventivnog održavanja pa je razvoj ovakvih modela svrsishodan kao budući pravac istraživanja.

Iskorišćenost, performanse i pouzdanost su blisko povezani sa preventivnim održavanjem što planiranje preventivnog održavanja stavlja u centar prioriteta proizvodnih preduzeća.

U zavisnosti od vrste proizvodnje, njenih potreba, složenosti i vrste proizvodnog tehničkog sistema, zavisice i važnost kriterijuma koji se uzimaju u obzir kod planiranja preventivnog održavanja. Navedeni model može da ilustruje potencijalne pravce odlučivanja i uputi u problematiku kroz konkretan primer, te omogući analogiju odlučivanja i na druge proizvodne sisteme.

Simulacioni model je dakle u stanju da prikaže različite strategije preventivnog ili kombinovanog održavanja te pruži bolji uvid u pouzdanost sistema. Velika pogodnost modela je da daje tačan uvid u broj akcija održavanja ili zastoja pa se tako lako mogu proračunati i finansijske i duge posledice različitih pristupa planiranju akcija održavanja.

Ovakav simulacioni model ima sjajnu primenljivost na sistemima koji su, kako u praksi neretko biva, sa nedovoljnim brojem podataka o otkazima i sa velikim brojem preventivnih akcija održavanja. Ovakvih sistema ima puno u industriji i njihova pouzdanost je neretko nejasna. Model može da pruži dobar strategijski odgovor u vidu planiranih akcija održavanja.

Najveća prednost ovog modela je postojanje imperfektnih akcija održavanja sistema koje su kod kompleksnih sistema gotovo uvek slučaj, gde se nakon akcije održavanja pouzdanost sistema ne podiže na nivo 1.

Nedostatak ovog modela je što ne predviđa interakcije između pouzdanosti komponenata sistema i to što ne predviđa period bezotkaznog rada ukoliko postoji kakav se može rešiti troparametarskom Vejbulovom raspodelom.

Ipak, nedostatak koji je najozbiljniji i koji prvi treba prevazići je taj što se pouzdanost kalkuliše u svakoj vremenskoj tački te time nastaje problem kada sistem ima veliki broj komponenata. Ovo je prvo potrebno prevazići pravilnim odabirom vremenskih tačaka kalkulacije pouzdanosti komponenti. Da bi se ovaj nedostatak otklonio i model učinio primenljivijim i efikasnijim neophodno je algoritam modela doraditi na takav način da se suština simulacije ne gubi ali da broj vremenskih tačaka u kojima se vrši kalkulacija pouzdanosti bude značajno manji. Ipak, premali broj ovih tačaka kalkulacije bi mogao da dovede do toga da simulacija nema upotrebnu vrednost jer bi se mogućnost otkazivanja sistema svela na samo nekoliko mogućih vremenskih trenutaka što je svakako daleko od realnosti.

Takođe, ozbiljan nedostatak svakog modelovanja sistema sa preventivnim akcijama održavanja leži u činjenici da se prilikom procene teorijske raspodele i njenih parametara uzimaju u obzir otkazi komponenti sistema bez razmatranja uticaja preventivnih akcija održavanja na pouzdanost komponente. Ovim se dobijaju parametri raspodele koji odgovaraju istoj komponenti sistema koja nije imala preventivne akcije održavanja. Dakle, komponenta sistema se predstavlja pouzdanijom nego što zaista jeste a preventivne akcije održavanja se ne razmatraju. Ova greška u modelovanju je suštinska i dovodi do neupotrebljivih podataka o pouzdanosti sistema. Što je sistem složeniji to je i ova greška grublja.

3.3.4.2. SIMULACIONI MODEL POUZDANOSTI ZA IMPERFEKTNO ODRŽAVANJE KOMPONENTI

Preventivne akcije održavanja kao što je već rečeno mogu biti na bazi pouzdanosti, onda kada je moguće birati momenat kada će biti izvršene ili na bazi vremena, periodične, najčešće onda kada proizvodni uslovi to dozvole. Model pouzdanosti je razvijen za popravljive komponente i kao primer ćemo uzeti složeni tehnički sistem bagera. Proizvodni uslovi diktiraju da se značajnije preventivne akcije održavanja mogu sprovesti samo jednom nedeljno u trajanju od jedne smene, tj. osam sati, gde se pouzdanost ovih komponenti podiže na viši nivo.

Inicijalna vrednost parametara Vejbulove (dvoparametarske) raspodele može biti određena nekom od ranije pominjanih metoda. Nakon toga je neophodno generisati simulacioni model koji će proceniti uticaj preventivnih nedeljnih akcija održavanja na pouzdanost komponenti uzevši vremena otkaza komponenti kao inpute.

Nakon toga će biti formirana simulacija rada ovih komponenti na bazi ovih saznanja i time stvoren uvid u kretanje pouzdanosti tokom operativnog vremena. Na kraju ova simulacija rada komponenti će omogućiti i uvid u to kako preventivne akcije održavanja potencijalno mogu uticati na pouzdanost komponenti a time i čitavog sistema bagera.

Sa namerom će biti uzete komponente sa malim brojem otkaza, gde je uticaj preventivnog održavanja presudan i uočljiv. Svakako da će ovo za posledicu imati i veću razliku u vrednostima inicijalnih parametara teorijske raspodele u odnosu na korigovane. Takođe, mali broj otkaza je prilika da se pokaže mogućnost da se komponente sistema modeluju i tada. U ovom slučaju vremena preventivnih održavanja kao i njihovo trajanje predstavljaju inpute modela koji su neka vrsta zamene za nedostajuće otkaze sistema koji su izbegnuti preventivnim akcijama održavanja. Otežavajuću okolnost za nalaženje adekvatnih vremenskih tačaka kalkulacije predstavlja i evidencija otkaza iskazana u minutima operativnog rada komponenti.

Konačno poslednji i najteži korak u izradi ovog modela treba da predvidi i imprefektne akcije održavanja samih komponenti. Potrebno je model približiti realnosti u smislu da akcije održavanja ne uvek, pa čak i retko dovode do toga da se pouzdanost same komponente vrati na nivo 100%. Razlozi mogu ležati i u činjenici da su akcije održavanja neadekvatne, nestručne, itd. ili da su delovi koji se ugrađuju reparirani, polovni, loši, ali i u činjenici da i sama komponenta može biti složene strukture te da se opravke vrše na samo jednom njenom delu. Nekada su komponente sistema i toliko složene da je dovođenje njihove pouzdanosti na nivo od 100% praktično nemoguće tokom preventivnih akcija održavanja.

Dakle, planiranje održavanja sistema u industriji možemo klasifikovati na korektivno održavanje i preventivno održavanje⁹². Posmatrani tehnički sistem-bager spada u kompleksni popravljivi tehnički sistem i ima nemali broj korektivnih akcija održavanja a preventivne akcije održavanja jednom nedeljno u trajanju od 8 sati i jednom godišnje remont u trajanju od mesec dana. Predmet modelovanja će biti 2 odabrane komponente

⁹² Mahdavi, M., Mahdavi, M., Optimization of age replacement policy using reliability based heuristic model, J SCI IND RES 2009., 68(8), 68-73.

(podsistemi) tehničkog sistema na koje nedeljno održavanje ostvaruje bitan uticaj u smislu smanjenja broja otkaza i povećanja pouzdanosti.

Teorijsko operativno vreme rada je 139 časova nedeljno, a na period od godinu dana ono je oko 6.626 časova. Evidencija otkaza se vodi u minutima pa je realno operativno vreme rada izraženo u minutima negde oko 278.278 minuta godišnje. Tako se može izvesti zaključak da se nedeljne preventivne akcije održavanja up proseku sprovode na 5838 minuta operativnog vremena.

Posmatrane komponente sistema će biti komponenta 1 (K1) i komponenta 2 (K2). Tabela 3.4. prikazuje vremensku sliku stanja ovih komponenti.

Primetno je da ove komponente imaju jako mali broj otkaza sistema u toku godine te za većinu modela koji se mogu upotrebiti ovo ne predstavlja adekvatan izvor podataka da se dođe do podataka o pouzdanosti. Preventivne akcije održavanja kojih ima koliko i radnih nedelja u godini, tj. oko 50, predstavljaju još težu prepreku u kreiranju adekvatnog modela.

Komponenta	Vremena otkaza (min.)						
K1	6.120	18.525	11.470	10.000	6.995	11.355	515
K2	52.860	59.380	6.860	50.330	91.215	21.000	37.370

Tabela 3.4. Vremenska slika stanja za komponente sistema

3.3.4.3 PRORAČUN PAREMETARA IMPERFEKTNO ODRŽAVANIH KOMPONENTI

Koristeći se ranije prikazanim metodom određujemo vrednosti parametara Weibulove raspodele i beležimo da na primer za $1 < \beta \leq 2$ kalkulacija inicijalnih parametara u skladu sa jednačinom 3.64. izgleda ovako:

$$\beta = 1 + \left(\frac{\frac{\eta}{(MTTF)} - 1,1}{0,15} \right). \quad (3.81.)$$

Pod pretpostavkom da je na osnovu broja otkaza u bazi podataka za prvu komponentu K1 (7) za posmatrani period vremena pouzdanost nakon maksimalnog izmerenog vremena otkaza ($t_{\max} = 18.525$ radnih časova) prema metodi simetrične kumulativne gustine otkaza (Symmetrical CDF method⁹¹) iznosi:

$$R(t) = \frac{1}{n \cdot 2}. \quad (3.82.)$$

Koristeći jednakost $R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}$, izvodimo da je

⁹¹ Al-Fawzan, A., M., Methods for Estimating the Parameters of the Weibull Distribution, King Abdulaziz City for Science and Technology, Riyadh, Saudi Arabia, 2000.

$$\beta = \log_{\left(\frac{t_{\max}}{\eta}\right)} \left(-\ln \left(\frac{1}{n \cdot 2} \right) \right). \quad (3.83.)$$

Posledično

$$1 + \left(\frac{\frac{\eta}{(MTTF)} - 1,1}{0,15} \right) = \log_{\left(\frac{18,525}{\eta}\right)} \left(-\ln \left(\frac{1}{7 \cdot 2} \right) \right) \quad (3.84.)$$

Rešavanjem ovako formiranih jednačina dobijaju se inicijalne vrednosti parametara Weibull-ove raspodele.

Kada je u pitanju druga komponenta sve je analogno osim što je $t_{\max} = 91.215$ pa se parametri raspodele dobijaju rešavanjem jednačine

$$1 + \left(\frac{\frac{\eta}{(MTTF)} - 1,1}{0,15} \right) = \log_{\left(\frac{91,215}{\eta}\right)} \left(-\ln \left(\frac{1}{7 \cdot 2} \right) \right) \quad (3.85.)$$

Tabela 3.5. prezentuje srednja vremena do pojave otkaza (*MTTF*) i dobijene inicijalne vrednosti parametara Weibull-ove raspodele za obe komponente.

	η	B	<i>MTTF</i>
K1	10.128,41442447030	1,6072536135521	9.282,85714285714
K2	49.641,37486386820	1,5950529817736	45.573,57142857140

Tabela 3.5. Srednje vreme do pojave otkaza (*MTTF*), parametar oblik (β) i parametar razmere raspodele (η) za komponente - podsisteme rotornog bagera

Ovde bi se u najvećem broju modela završio posao određivanja parametara i pristupilo kalkulisanju pouzdanosti komponente. Ipak, ovo ne obezbeđuje pravu sliku stanja popravljivih sistema jer po nastanku otkaza pre isteka vremena kalkulacije pouzdanosti celog sistema, dolazi do promena pouzdanosti kroz preventivne i korektivne akcije održavanja i time se pouzdanost podsistema podiže na viši nivo. Softverski model u ovom radu bi simuliranjem kretanja pouzdanosti komponenti tokom operativnog vremena mogao da ukaže na to da je potrebno proceniti uticaj korektivnih i preventivnih akcija održavanja na komponentu sistema. Putem velikog broja iteracija došlo bi se do parametra koji će opisati uticaj preventivnih akcija održavanja na pouzdanost sistema. Ovaj parametar će biti izražen kao koeficijent nedeljnog preventivnog održavanja

$$C_{wpm} \in [0,1]. \quad (3.86.)$$

Vrednost koeficijenta $C_{wpm} = 0$ znači da nema uticaja preventivnog održavanja na pouzdanost komponente, a vrednost $C_{wpm} = 1$ da je sva postojeća nepouzdanost komponente (u tom trenutku) otklonjena. Realnost je da se ovaj koeficijent kreće najčešće između ove dve vrednosti čime je omogućeno modelovanje slučaja kada se

preventivnom akcijom održavanja delimično ukloni nepouzdanost sistema. Vrednosti koeficijenta C_{wpm} mogu biti i negativne, što znači da bi se time obuhvatio i slučaj preventivnih akcija kojima se umanjuje vrednost pouzdanosti, ali te slučajeve ne razmatramo u ovom modelu jer je pretpostavka da ih nema u praksi.

Algoritam za ovaj softver je prezentovan na slici 3.34.

Pretpostavke ovog proračuna su:

- nakon korektivnih akcija održavanja nivo pouzdanosti za podsistem koji je otkazao podiže se na nivo 1,
- preventivne akcije održavanja eliminišu nepouzdanost komponente u trenutku vremena kada nastaje akcija održavanja i to deo određen koeficijentom C_{wpm} .

Na osnovu broja otkaza podsistema ($NumOfFailures$) u period obzervacije se određuje i broj intervala ($NumOfIntervals$) po formuli

$$NumOfIntervals = 1 + \text{int}[3.3 \cdot \log(NumOfFailures)] \quad (3.87.)$$

U algoritmu na slici 3.34. je:

A - parametar razmere raspodele, B -parametar oblika raspodele,

CT - vreme kalkulacije, $\text{Int}()$ – funkcija koja vraća celobrojnu vrednost,

$Interval$ - period vremena između dve tačke kalkulacije pouzdanosti,

$LastChange$ - vreme poslednje preventivne akcije održavanja,

$MaxFailure$ - maksimalno vreme otkaza u periodu obzervacije,

$MSimNumFailures$ - srednji broj otkaza tokom simulacije,

$NFailures$ - simulacioni broj otkaza,

$NumOfFailures$ - broj otkaza komponente (podsistema),

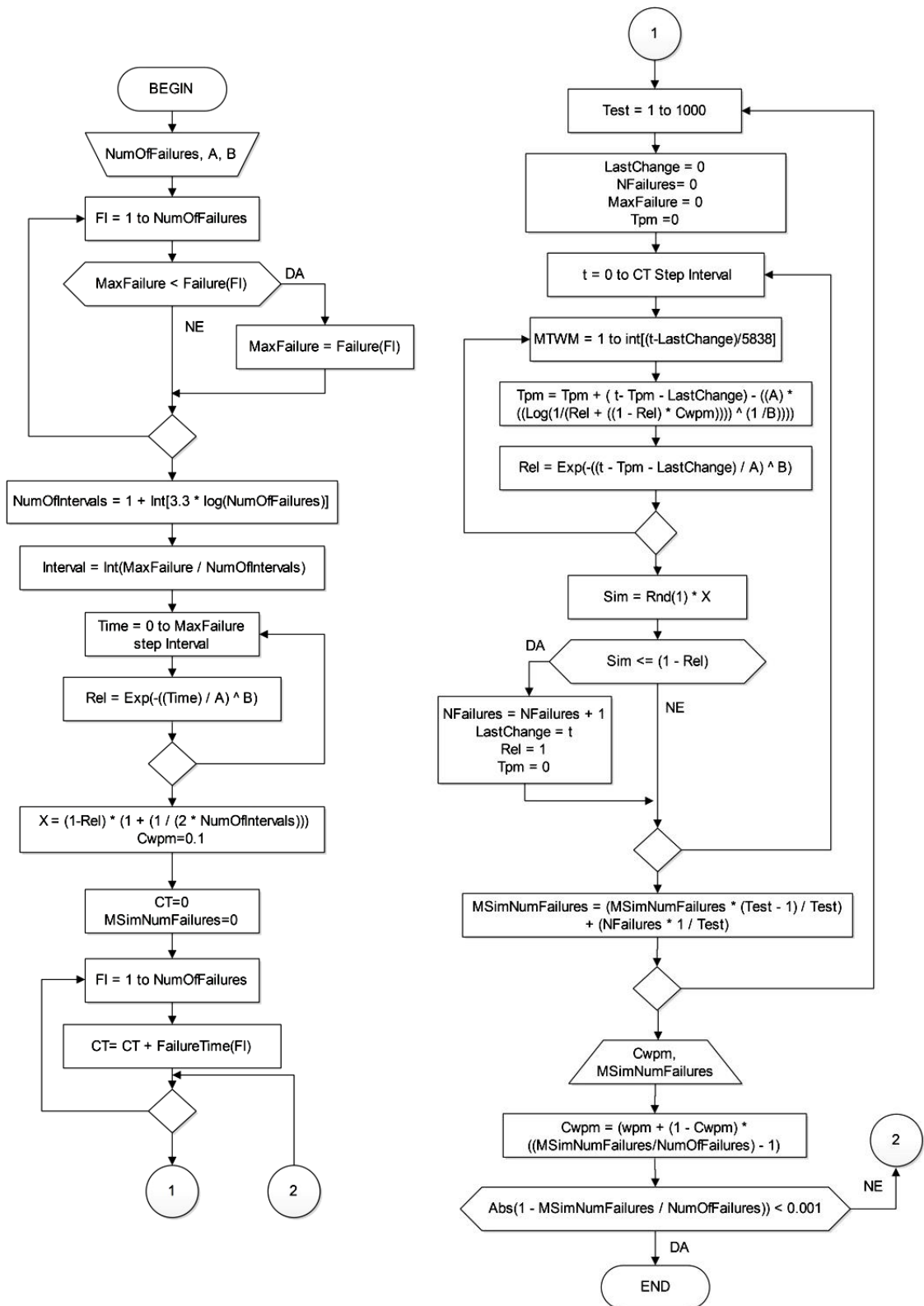
$NumOfIntervals$ -broj intervala, Rel -pouzdanost,

Sim - pseudo-slučajni broj čija vrednost određuje otkaze komponente (podsistema),

SY - broj iteracija (godina simuliranog rada sistema), t - operativno vreme,

Tpm - period za koji se operativno vreme t “vraća unazad” usled preventivnih akcija održavanja,

$Test$ - trenutna iteracija za vreme simulacije.



Slika 3.34. - Algoritam procene koeficijenta C_{wpm} ⁹³

⁹³ Milošević D., Adamović Ž., Reliability Simulation Model of Complex Technical System in Thermal Power Plants, Metalurgia International, 2013., 18(12), 55-63.

Na osnovu određenog maksimalnog vremena otkaza u periodu obzervacije (*MaxOtkaz*) određuje se vremensko trajanje intervala (*Interval*).

Dalje, za trenutak maksimalnog vremena otkaza se proračunava pouzdanost (*Rel*) na osnovu prethodno unesenih parametara oblika raspodele β (*B*) i razmere raspodele η (*A*). Na osnovu ove vrednosti definišu se granice slučajne promenljive *Sim* koja za minimalnu vrednost ima 0 a za maksimalnu *X* tj. vrednost preostale nepouzdanosti nakon trenutka vremenski maksimalnog otkaza (*MaxOtkaz*) oslanjajući se na Symmetrical CDF method⁹¹ a prema formuli:

$$X = (1 - Rel) \cdot (1 + (1 / (2 \cdot NumOfIntervals))). \quad (3.88.)$$

Zatim se postavlja inicijalna vrednost parametara C_{wpm} koja iznosi 10% i nakon toga se određuje vreme kalkulacije (*CT*) koje po svakoj iteraciji ima period obzervacije podsistema što znači zbir svih vremena otkaza u evidenciji otkaza podsistema.

Nakon toga počinje se sa iteracijama testa kojih ima 1000 i pošto se postave inicijalne vrednosti počinje se sa dinamikom operativnog vremena (*t*) koje se pomera prema već definisanim intervalima. Nakon isteka svakog pojedinačnog intervala potrebno je proračunati da li je došlo do otkaza komponente ili ne. Ipak pre toga potrebna je i korekcija pouzdanosti za svaku preventivnu akciju održavanja koja je nastala u toku tog pojedinog intervala. Broj preventivnih akcija se dobija po obrascu

$$(t - LastChange) / 5838 \quad (3.89.)$$

gde je *t* operativno vreme nakon isteka pojedinog intervala *LastChange* vremenski trenutak poslednjeg preventivnog održavanja. Razlika ove dve veličine se deli sa 5838 što je prosečan broj operativnih minuta u jednoj sedmici.

Ukoliko je razlika ove dve veličine jednaka ili veća od 5838 tada je u poslednjem intervalu bilo preventivnih akcija održavanja i vremenski trenuci ovih akcija se proračunavaju po obrascu

$$(t - T_{pm} - LastChange) \quad (3.90.)$$

gde je T_{pm} vreme za koje se operativno vreme *t* vraća unazad usled preventivnih akcija održavanja, tj. vreme za koje je komponenta "podmlađena" svim preventivnim akcijama održavanja od poslednjeg otkaza (*LastChange*) do trenutka *t*.

Proračun vremena T_{pm} koje se dobija kao kumulativna vrednost svih pojedinačnih vremena za koje je komponenta sistema "podmlađena" a prema izrazu

⁹¹ Al-Fawzan, A., M., Methods for Estimating the Parametars of the Weibull Distribution, King Abdulaziz City for Science and Technology, Riyadh, Saudi Arabia, 2000.

$$T_{pm} = T_{pm} + (t - T_{pm} - LastChange) - \alpha \cdot \left(\text{Log} \left(\frac{1}{(Rel + ((1 - Rel) \cdot C_{wpm}))} \right) \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (3.91.)$$

Po proračunu T_{pm} proračunava se pouzdanost Rel u trenutku vremena $(t - T_{pm} - LastChange)$.

Pošto se okončaju iteracije preventivnog nedeljnog održavanja za svaku vremensku tačku kalkulacije uzima period nakon isteka intervala i ukoliko je vrednost slučajne promenljive Sim manja ili jednaka vrednosti nepouzdanosti $(1 - Rel)$ dolazi do simulacionog otkaza koji se kumulativno zbrajaju ($NFailures$) a vrednost pouzdanosti (Rel) vraća na vrednost 1. Vreme poslednje zamene $LastChange$ se koriguje a T_{pm} i vraća na vrednost nula jer više nema uticaja preventivnih akcija održavanja na pouzdanost komponente. Ovaj postupak se iterativno ponavlja sve do kraja operativnog vremena tj. isteka krajnjeg vremena kalkulacije (CT).

Po okončanju ovih iteracija koriguje se vrednost prosečnog broja otkaza po osnovu simulacionog broja otkaza a prema formuli

$$MSimNumFailures = (MSimNumFailures \cdot (Test - 1) / Test) + (NFailures * 1 / Test) \quad (3.92.)$$

Ovaj postupak se ponavlja u 1000 iteracija te se dolazi do srednje vrednosti broja otkaza ($MSimNumFailures$). Ukoliko ovaj srednji broj otkaza iz simulacije odstupa od broja otkaza iz perioda obzervacije ($NumOfFailures$) za više od promila svih 1000 iteracija se ponavlja uz korigovane parametre koeficijenta C_{wpm} proporcionalno ovoj razlici. Iteracije se ponavljaju sve dok se relativna razlika ne smanji na ispod nivoa od 1 promila.

Kao izlazi algoritma se dobija vrednost koeficijenta C_{wpm} i srednji broj otkaza tokom simulacije ($MSimNumFailures$).

Pošto je putem simulacije procenjen uticaj preventivnog održavanja dve posmatrane komponente koeficijenti nedeljnog preventivnog održavanja prikazani su u tabeli 3.6.

Komponenta	C_{wpm}
K1	0,25323567350
K2	0,05969695993

Tabela 3.6. Koeficijenti nedeljnog preventivnog održavanja za komponente rotornog bagera

Ovo konkretno znači da se u svakoj preventivnoj akciji održavanja (a koja se dešava na 5838 minuta operativnog vremena komponenta K1) njena nepouzdanost eliminiše za nešto više od 25% a kada je u pitanju komponenta K2 nešto manje od 6%.

3.3.4.4 SIMULACIJA POUZDANOSTI IMPERFEKTNO ODRŽAVANIH KOMPONENTI ROTORNOG BAGERA

Pretpostavke za izradu ovog softvera su da je:

- otkaz jedne komponente nema uticaja na pouzdanost drugih komponenti,
- nakon korektivnih ili preventivnih akcija održavanja na jednoj komponenti ne dolazi do promene pouzdanosti drugih komponenti,
- remont sistema podiže pouzdanost svake komponente sistema a time i celog sistema na vrednost 1 i odvija se na kraju godinu dana rada sistema.

Softverska simulacija je prezentovana algoritmom na slici 3.35.

Algoritam za vreme kalkulacije ima period operativnog vremena sistema između 2 remonta i ono je aproksimirano na 278.278 minuta.

U algoritmu na slici 3.35. je:

A - parametar razmere raspodele, *B* – parametar oblika raspodele,

CT – vreme kalkulacije, *Int()* – funkcija koja vraća celobrojnu vrednost,

Interval - period vremena između dve tačke kalkulacije pouzdanosti,

LastChange - vreme poslednje preventivne akcije održavanja,

MaxFailure -maksimalno vreme otkaza u period obzervacije,

MSimNumFailures -srednji broj otkaza tokom simulacije,

NFailures -simulacioni broj otkaza,

NumOfFailures -broj otkaza komponente (podsistema),

NumOfIntervals -broj intervala, *Rel* -pouzdanost,

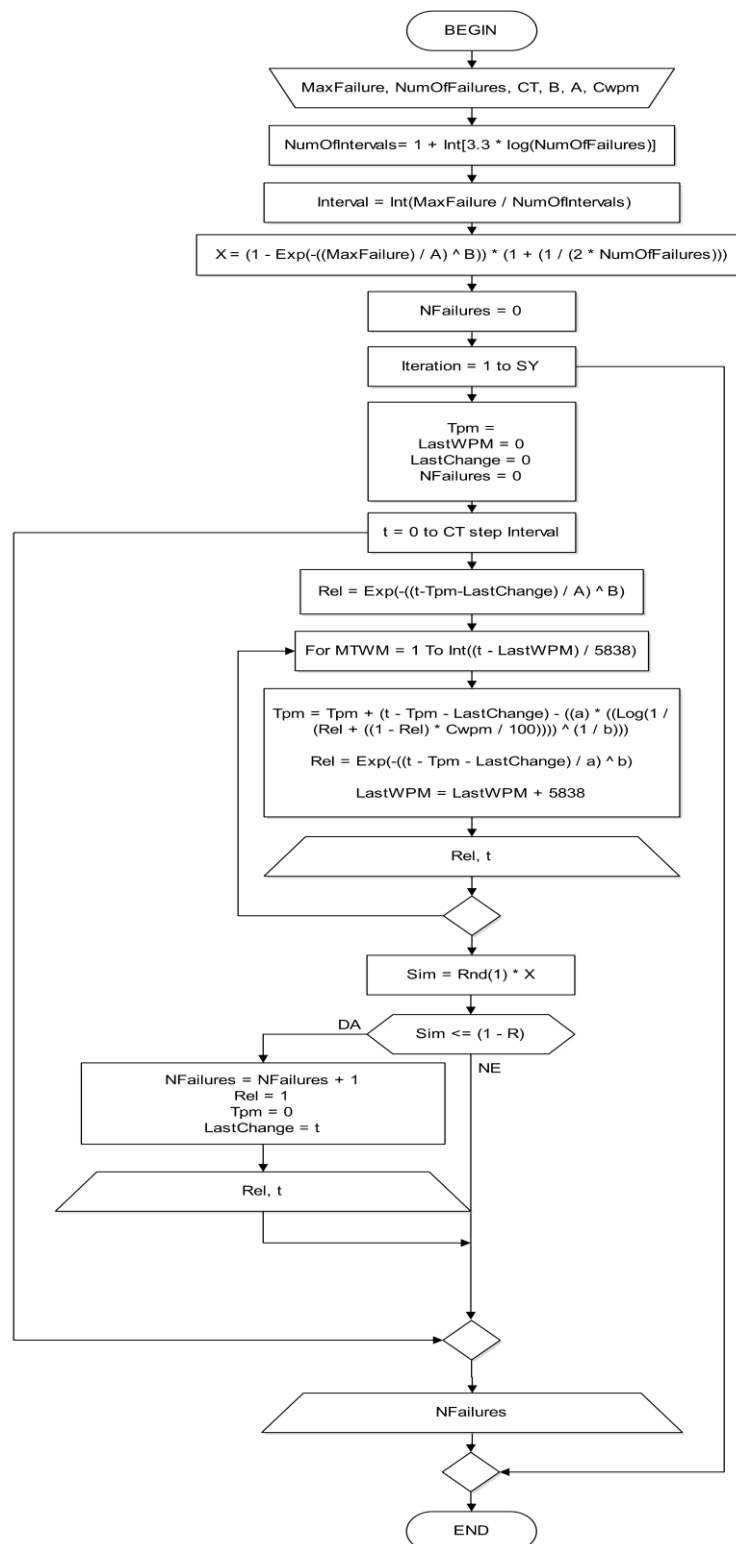
Sim - pseudo-slučajni broj čija vrednost određuje otkaze komponente (podsistema),

SY -broj iteracija (godina simuliranog rada sistema), *t*- operativno vreme,

Tpm - period za koji se operativno vreme *t* “vraća unazad” usled preventivnih akcija održavanja,

Test - trenutna iteracija za vreme simulacije,

X - vrednost preostale nepouzdanosti posle maksimalnog vremena otkaza komponente.



Slika 3.35. – Algoritam simulacije pouzdanosti komponente bagera sa kombinovanim održavanjem⁹³

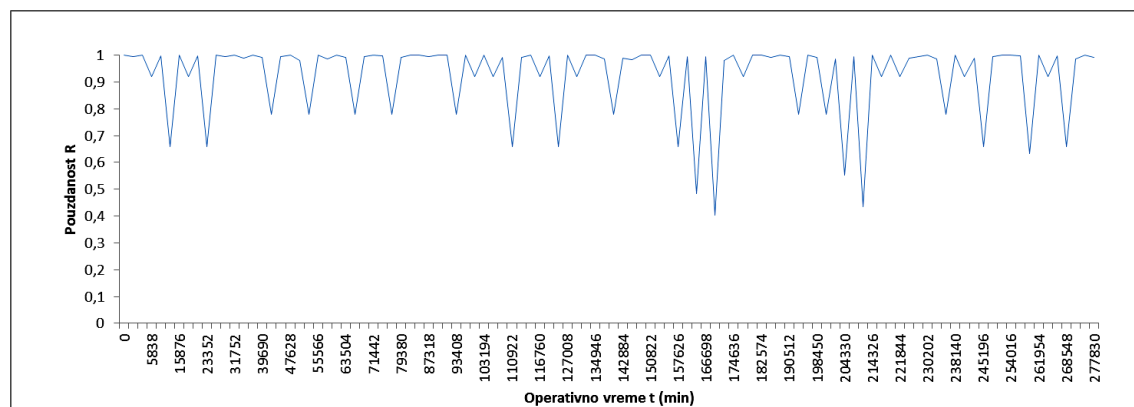
⁹³ Milošević D., Adamović Ž., Reliability Simulation Model of Complex Technical System in Thermal Power Plants, Metalurgia International, 2013., 18(12), 55-63.

Nakon unosa potrebnih parametara a to su maksimalno vreme otkaza (*MaxOfFailures*), broj otkaza tokom observacije (*NumOfFailures*), parametri Weibulove raspodele (*B* i *A*), vreme kalkulacije (*CT*) i koeficijent nedeljnog preventivnog održavanja C_{wpm} , po osnovu broja otkaza proračunava se broj i dužina intervala. Proračunava se vrednost parametra *X* koji je osnov simulacije otkaza na bazi slučajnog broja. Broj iteracija predstavljen je veličinom *SY* i predstavlja godine simulacionog rada bagera.

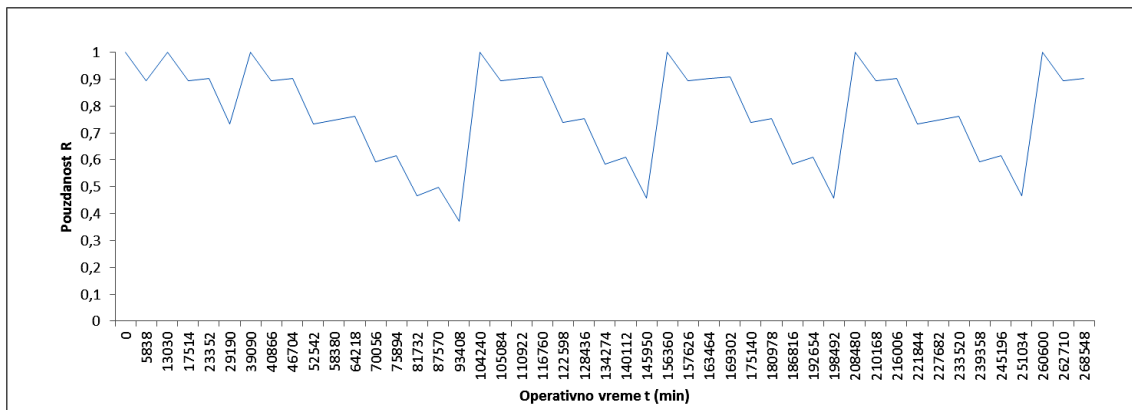
Pošto se postavle inicijalne vrednosti parametara počinje se sa simulacijom operativnog vremena koje se pomera sa korakom *Interval*. Nakon svakog pomeranja operativnog vremena proverava se broj nedeljnih preventivnih akcija ukoliko ih je bilo i koriguju vrednosti pouzdanosti na osnovu vremena T_{pm} koje se javlja nakon preventivnih akcija, te vrednosti pouzdanosti i operativnog vremena upisuju u arhivu. Nakon preventivnih akcija treba proveriti da li je bilo otkaza u periodu poslednjeg intervala i ako je bilo pouzdanost *Rel* postaviti na vrednost 1 a T_{pm} na vrednost 0. Nakon ovoga se nastavlja sa sledećim korakom te se ovo ponavlja sve do kraja operativnog vremena ($t = CT$) čime se okončava jedna godina rada bagera. Ovaj postupak se ponavlja *SY* puta. Prilikom počinjanja nove godine rada sistema podrazumeva se da je remontom čitav sistem pa i komponenta čiji se rad simulira dovedena na vrednost pouzdanosti 1.

Kao izlazni podaci se dobijaju podaci o pouzdanosti i broju otkaza tokom operativnog vremena komponente.

Kao rezultat softverske simulacije dobija se kretanje pouzdanosti komponenti rotornog bagera sa pretpostavljenim vrednostima *SY* i C_{wpm} . Softver omogućuje formiranje grafika kretanja pouzdanosti komponenti sistema tokom operativnog vremena. Na slikama 3.36. i 3.37. su prezentovana kretanja pouzdanosti komponenti za period od godinu dana rada. Uočljivi su trenuci vremena kada vrednost pouzdanosti postaje 1 a koja se odnose na trenutke korektivnih akcija održavanja nakon otkaza komponente.

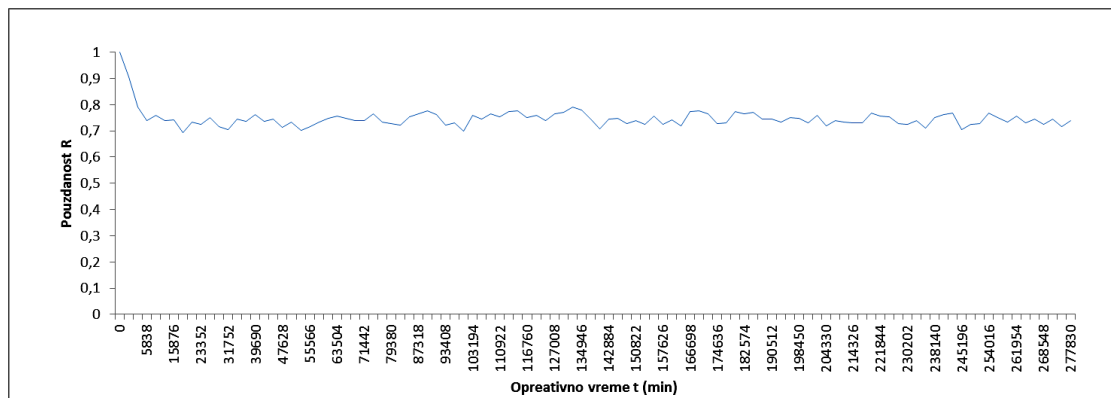


Slika 3.36. - Prosečne vrednosti pouzdanosti komponente K1
($SY = 1$ godina, $C_{wpm} = 25,323567349692\%$)

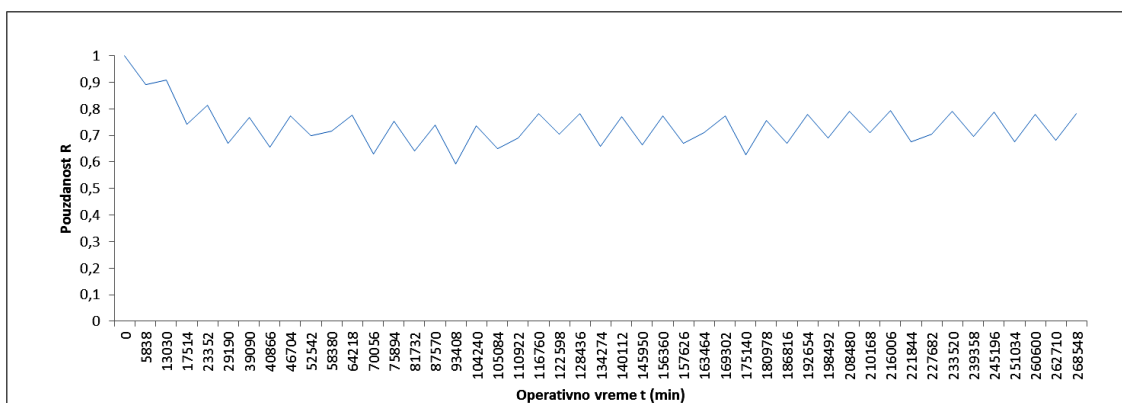


Slika 3.37. -Prosečne vrednosti pouzdanosti komponente K2
($SY = 1$ godina, $C_{wpm} = 5,96969599287974\%$)

Softverom je takođe omogućeno da se povećavanjem vrednosti SY dobiju pouzdanije srednje vrednosti pouzdanosti komponenti ili broja otkaza tokom godine dana rada. Grafici prosečnih pouzdanosti komponenti sistema tokom operativnog vremena od 100 godina su prezentovani na slikama 3.38. i 3.39. Ovo su dakle vrednosti pouzdanosti koje važe za slučaj preventivnog održavanja kakvo se inače sprovodilo nad komponentama u periodu obzervacije.



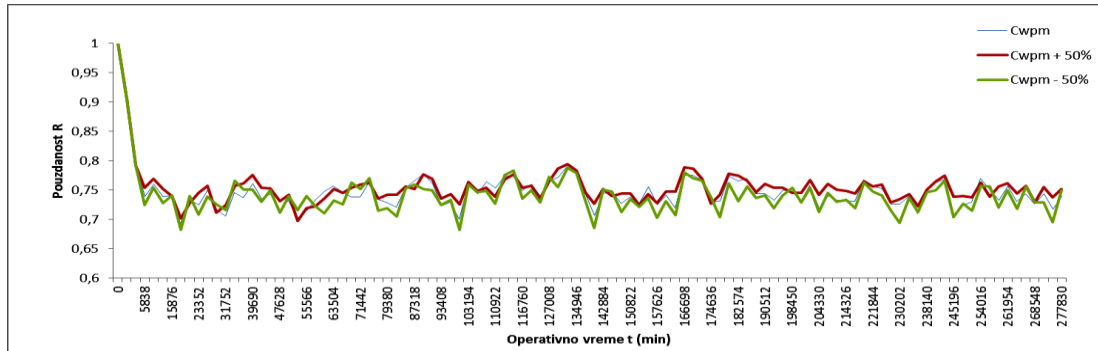
Slika 3.38. -Prosečne vrednosti pouzdanosti komponente K1
($SY = 100$ godina, $C_{wpm} = 25,323567349692\%$)



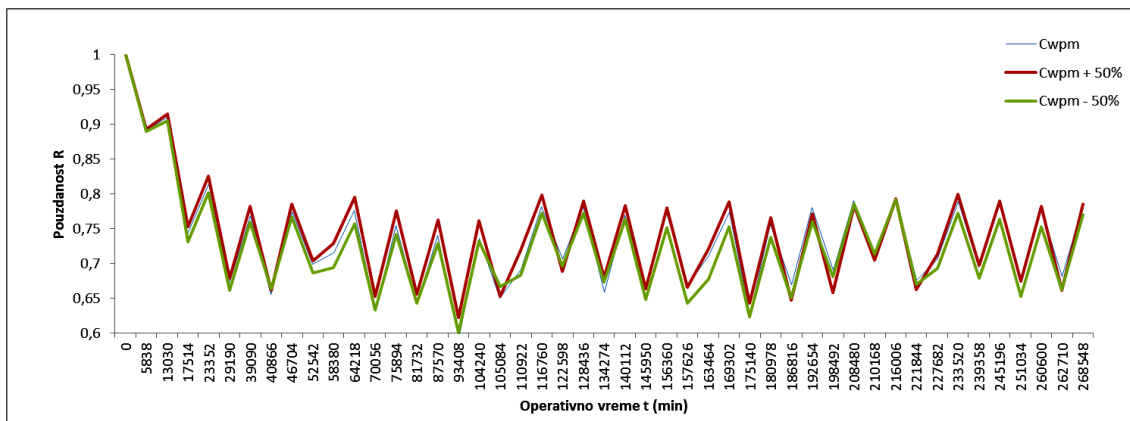
Slika 3.39. - Prosečne vrednosti pouzdanosti komponente K2
($SY = 100$ godina, $C_{wpm} = 5,96969599287974\%$)

Simulacioni softver dozvoljava da se promenom koeficijenta C_{wpm} stekne uvid u to kakve posledice bi izazvale promene preventivnog održavanja. Ovo je jedina promena

koja je moguća kada su u pitanju pomenute komponente imajući u vidu da vremenske promene nisu moguće i da se nedeljne preventivne akcije održavanja sprovode jednom nedeljno u istom terminu u trajanju od 8 sati. Imajući u vidu pomenuto, na slikama 3.40. i 3.41. su prezentovani uporedni slučajevi kretanja prosečne vrednosti pouzdanosti u kojima je koeficijent C_{wpm} umanjen i uvećan za 50% u odnosu na inicijalne vrednosti.



Slika 3.40. - Prosečne vrednosti pouzdanosti komponente K1 za različite vrednosti C_{wpm} ($SY = 100$ godina)



Slika 3.41. - Prosečne vrednosti pouzdanosti komponente K2 za različite vrednosti C_{wpm} ($SY = 100$ godina)

Simulacioni model dozvoljava i dalje deriviranje podataka poput prosečnog broja otkaza ili kumulativne pouzdanosti za svaki od slučajeva simulacije kao i uvid u finansijske troškove održavanja.

Nakon razvijanja i prezentovanja modela pouzdanosti popravljivih komponenti složenog tehničkog sistema na primeru rotornog bagera kao i dobijenih rezultata mogu se izvući sledeći zaključci:

- razvijeni model pouzdanosti je stohastički, originalan i potpuno primenljiv na složene sisteme;
- model uvažava postojanje korektivnih i preventivnih akcija održavanja različitog efekta na pouzdanost komponenti što omogućuje razvoj kompleksnije i realnije slike o stanju tehničkog sistema;
- model uvodi veličinu C_{wpm} koja odražava efekte nedeljnog preventivnog održavanja na pouzdanost komponente sistema ali je ovaj koeficijent primenljiv na svaku vrstu preventivnog održavanja;

- model je primenljiv za slučajeve nedostatka potpune evidencije o otkazima kao i u slučaju malog broja otkaza pojedinog podsistema što je čest slučaj kada je preventivno održavanje frekventno ili je potrebno održati stalno visok nivo pouzdanosti sistema;
- softver simulacije ima prihvatljivo vreme izvršenja za dugo operativno vreme usled optimalno odabranog broja vremenskih tačaka u kojima se rade proračuni pouzdanosti pa je podesan za brzo dobijanje rezultata;
- model predstavlja odličnu osnovu za dobijanje finansijskih efekata različitih scenarija kombinovanog održavanja;
- model je fleksibilan za implementaciju svake vrste preventivnog održavanja pa i nekoliko istovremenih (dnevno, nedeljno, mesečno, itd). Preventivno održavanje je moguće lako usmeriti i na održavanje prema pouzdanosti;
- ovakvi modeli mogu osim za predviđanje stanja komponenti tehničkih sistema analizom dobijenih rezultata poslužiti optimizaciji akcija održavanja kada se uoče odstupanja od predviđenih vrednosti pouzdanosti;
- model je odličan osnov za prevenciju incidenata i oštećenja na sistemu kao i povećanje ukupne raspoloživosti kapitalne opreme⁹⁴.

3.3.4.5 PRORAČUN PARAMETARA PERFEKTNO ODRŽAVANIH KOMPONENTI

U slučaju kada se komponente tehničkog sistema održavaju zamenom te instalacijom novih ili je komponenta sistema krajnje jednostavna za održavanje onda se popravke komponenti ne mogu sagledavati iz ugla imperfektne popravke, te se njihova popravka nakon preventivnog održavanja smatra “perfektnom” i tada se nivo pouzdanosti komponente vraća na 100% a onda smatra “dobrom kao nova”. Postupak se može u početku određivanja parametara ovih komponenti svesti na istovetan kao i kod prethodno navedenih ali se u koraku korekcije parametara, logično, mora pribeći drugačijoj korekciji. Kako bi stekli bolji uvid u ovaj metod upotrebićemo iste podatke o komponentama sistema $K1$ i $K2$ iz tabele 3.5. Radi lakše izrade softvera pretpostavka je da komponente pribegavaju samo korektivnom održavanju.

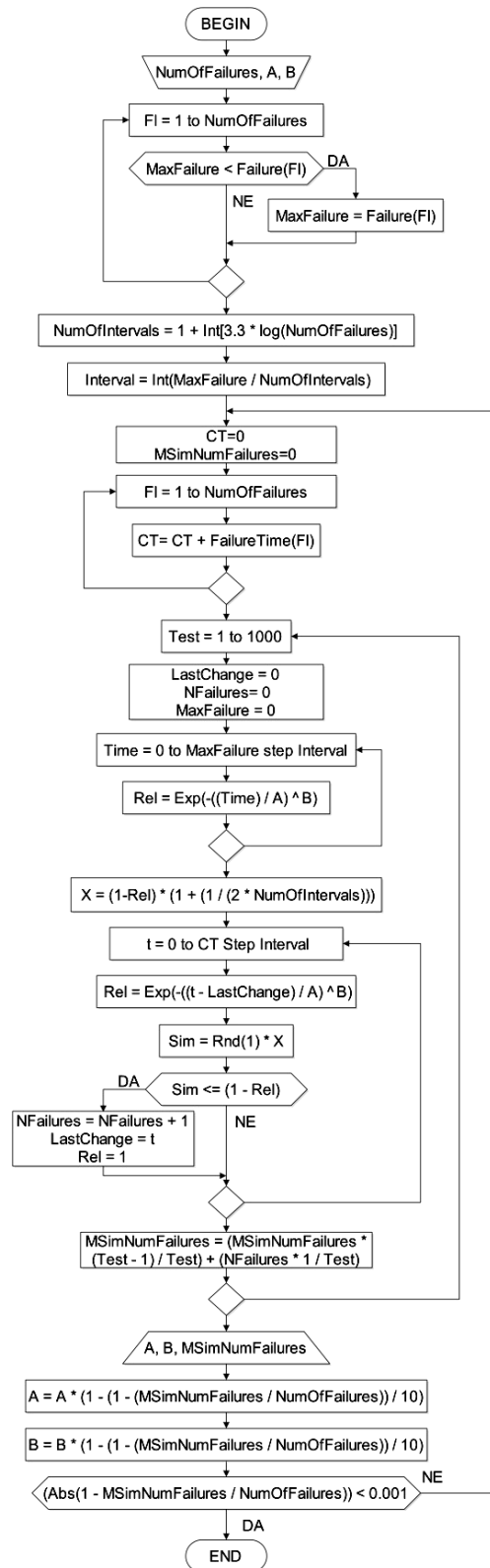
Algoritam korekcije parametara bi sada mogao biti razvijen na sledeći način. Pretpostavke ovog proračuna su da je:

- nakon korektivnih akcija održavanja nivo pouzdanosti za podsistem koji je otkazao podiže se na nivo 1,
- preventivne akcije održavanja nemaju većeg uticaja na pouzdanost podsistema.

Algoritam se izvršava za svaki podsistem/komponentu i predstavljen je na slici 3.42. Na osnovu broja otkaza podsistema (*NumOfFailures*) u periodu obzervacije se određuje i broj intervala (*NumOfIntervals*) po već korišćenoj formuli 3.86.

Na osnovu određenog maksimalnog vremena otkaza u periodu obzervacije (*MaxFailure*) određuje se vremensko trajanje intervala (*Interval*). Zatim se određuje vreme kalkulacije (*CT*) koje po svakoj iteraciji ima period obzervacije podsistema što znači zbir svih vremena otkaza u evidenciji otkaza podsistema.

⁹⁴ Prvulović S., Josimović Lj., Savić N., The Implementation of Remote Maintenance of Bucket Wheel Excavator, *Metalurgia International*, 2013., 18(1), 59-62.



Slika 3.42. - Algoritam korekcije parametara raspodele za perfektno opravke komponenti⁹⁵

⁹⁵ Milošević D., Adamović Ž., Reliability Simulation Model for Bucket Wheel Excavator, Metalurgia International, 2013, 18(11), 13-20.

U algoritmu na slici 3.42. je:

A - parametar razmere raspodele,

B - parametar oblika raspodele,

CT – vreme kalkulacije,

$\text{Int}()$ – funkcija koja vraća celobrojnu vrednost,

$Interval$ - period vremena između dve tačke kalkulacije pouzdanosti,

$LastChange$ - vreme poslednje preventivne akcije održavanja,

$MaxFailure$ - maksimalno vreme otkaza u period obzervacije,

$MSimNumFailures$ - srednji broj otkaza tokom simulacije,

$NFailures$ - simulacioni broj otkaza,

$NumOfFailures$ - broj otkaza komponente (podсистема),

$NumOfIntervals$ - broj interval,

Rel - pouzdanost,

Sim - pseudo-slučajni broj čija vrednost određuje otkaze komponente (podсистема),

$\text{Rnd}()$ - funkcija koja vraća pseudo-slučajan broj,

t - operativno vreme,

$Test$ - trenutna iteracija za vreme simulacije.

Dalje, za trenutak maksimalnog vremena otkaza se proračunava pouzdanost (Rel) na osnovu prethodno unesenih parametara oblika raspodele β (B) i razmere raspodele η (A). Na osnovu ove vrednosti definišu se granice slučajne promenljive Sim koja za minimalnu vrednost ima 0 a za maksimalnu X tj. vrednost preostale nepouzdanosti nakon trenutka vremenski maksimalnog otkaza ($MaxFailure$) oslanjajući se na Symmetrical CDF method a prema formuli 3.87.

Nakon toga se za svaku vremensku tačku kalkulacije uzima period nakon isteka a i ukoliko je vrednost slučajne promenljive Sim manja ili jednaka vrednosti nepouzdanosti ($1 - Rel$) dolazi do otkaza koji se kumulativno zbrajaju ($NumOfFailures$) a vrednost pouzdanosti (Rel) vraća na vrednost 1 i postupak nastavlja do isteka krajnjeg vremena kalkulacije (CT).

Ovaj postupak se ponavlja u 1000 iteracija te se dolazi do srednje vrednosti broja otkaza ($MSimNumFailures$). Ukoliko ovaj srednji broj otkaza iz simulacije odstupa od broja otkaza iz perioda obzervacije ($NumOfFailures$) za više od promila svih 1000 iteracija se ponavlja uz korigovane parametre A i B . Iteracije se ponavljaju sve dok se relativna razlika ne smanji na ispod nivoa od 1 promila.

Kao izlazi algoritma se dobijaju vrednosti parametara raspodele A i B i srednji broj otkaza tokom simulacije ($MSimNumFailures$).

Tabela 3.7. pokazuje izlazni rezultat softvera tj. broj otkaza svakog podsistema iz uzorka kao i srednji broj otkaza simulacije i vrednosti parametara Weibull-ove raspodele za oba podsistema/komponente.

Komponenta	Br. otkaza (uzorak)	SrSim BrOtkaza	η	β
K1	7	6.996	11439,62316	1,818684018
K2	7	7.006	55916,86258	1,827971952

Tabela 3.7. Broj otkaza iz uzorka, srednji broj otkaza simulacije i parametri Weibull-ove raspodele za obe komponente sistema

3.3.5. FORMIRANJE MODELA SA VEJBULOVOM TROPARAMETARSKOM RASPODELOM

Sledeći model pouzdanosti se odnosi na upotrebu Vejbulove troparametarske raspodele otkaza za simuliranje rada sistema. Ova raspodela otkaza nije često primenjivana iz mnogo razloga, ali ona ima svoju upotrebnu vrednost. Primena ove raspodele otkaza treba da omogući da model predvidi jedan period bezotkaznog rada sistema. U slučaju postojanja malog broja otkaza primena Vejbulove troparametarske raspodele bi bila veoma diskutabilna jer mali broj otkaza ne ukazuje jasno koji je najraniji mogući trenutak otkaza komponente tokom operativnog vremena. Takođe, upotreba ovog modela iziskuje i veći broj operacija tokom simulacije, te je logičnije upotreba ovog modela na sisteme koji su brojevno a ne strukturno složeni. Pretpostavka je i da je izvesnije da period bezotkaznog vremena rada postoji na komponentama koje su manje složenosti. Dakle, ovaj model je primenljiv na sistemima velike brojevne, a ne strukturne složenosti sa velikim brojem podataka o otkazima komponenti. Jasno je da se najbolja primenljivost ovog modela kada su u pitanju postrojenja koja se tiču ovog istraživanja očekuje na primeru tračnih transportera.

Prvi korak u kreiranju modela će biti pregled mogućih metoda određenja parametara troparametarske Vejbulove raspodele. Prema ovoj raspodeli pouzdanost glasi:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}, \quad t \geq \gamma, \quad \gamma \geq 0, \quad \beta > 0, \quad \eta > 0, \quad (3.92.)$$

gde je:

t - operativno vreme,

β - parametar oblika raspodele,

η - parametar razmere raspodele,

γ - parametar položaja.

Prvi korak primene ove raspodele svodi se na određenje parametra položaja γ (minimalnog rada do pojave otkaza). Njegova vrednost se nalazi negde između vrednosti 0 i vrednosti t_1 , gde t_1 predstavlja vreme rada do pojave prvog otkaza, mada kod velikog uzorka ovo predstavlja donju granicu prvog intervala. Vrednost parametra γ može biti određena na više načina.

Grafički metod podrazumeva da nakon unošenja podataka o otkazima u verovatnosni papir i po konstatovanju da se radi o troparametarskoj raspodeli, vrednost γ se sukcesivno smanjuje i podaci ponovo ucrtavaju sa koordinatama $(\ln(t_i - \gamma), \ln[\ln(1/F(t_i))])$. Ponovo se sada formira aproksimativna linija. Ukoliko je ona i dalje konveksna, onda vrednost γ treba i dalje smanjivati, dok ako je konkavna treba je povećavati. Postupak se ponavlja sve dok se ne dobije linearna aproksimativna linija. Od tog momenta je određivanje parametara svedeno na problem dvoparametarske raspodele.

Ipak, ovakav postupak određivanja parametra γ ume biti više nego naporan pa je u tom cilju razvijen **grafoanalitički postupak**. Vrednosti se unose na verovatnosni papira a onda aproksimativno određuje kriva linija te parametar računa iz izraza⁸⁸:

$$\gamma = t_2 - \frac{(t_3 - t_2) \cdot (t_2 - t_1)}{(t_3 - t_2) - (t_2 - t_1)}, \quad (3.93.)$$

gde su:

t_1 - vrednost apscise u tački t_{\min} ,

t_2 - vrednost apscise na krivoj kojoj je ordinata aritmetička sredina tačaka t_1 i t_3 ,

t_3 - vrednost apscise u tački t_{\max} .

Posle određivanja parametra γ ispravnost postupka se potvrđuje time što je posle unosa podataka sa koordinatama $(\ln(t_i - \gamma), \ln[\ln(1/F(t_i))])$ aproksimativna linija prava.

⁸⁸ Ćatić, D., Modeliranje pouzdanosti korišćenjem Weibulove raspodele, Tehnika, Savez inženjera i tehničara Srbije, 2006., 55(5), 1-10.

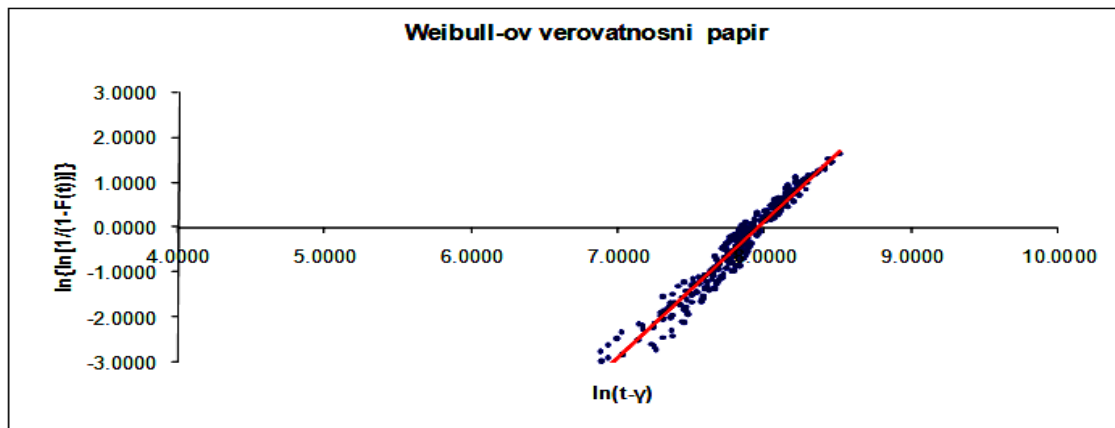
Kada govorimo o **analitičkom postupku** određivanja parametra γ koji se svodi na pronalaženje aproksimacije pravom linijom, to se može izvesti traženjem odstupanja empirijskih tačaka od aproksimativne prave, te je pokazatelj rasporeda tačaka upravo zbir svih odstupanja. U tu svrhu može poslužiti pronalaženje maksimalne vrednosti koeficijenta determinacije KD koji se izračunava kao⁸⁸:

$$KD = \frac{\left(\sum x_i y_i - \frac{\sum x_i \sum y_i}{n} \right)^2}{\left[\sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n} \right] \cdot \left[\sum y_i^2 - \frac{(\sum y_i)^2}{n} \right]} \quad (3.94.)$$

Vrednost KD se inače kreće u intervalu od 0 do 1. U ovom interval treba naći maksimum vrednosti koji se može naći i programskim putem iterativno povećavajući ili smanjujući vrednost parametra γ . Ovakav način je jako podesan za kreiranje softvera koji može pomoći u određivanju parametra γ .

3.3.5.1 PRIMER

U primeru ćemo se pozabaviti određivanjem parametara troparametarske Weibulove raspodele za hipotetički slučaj. Kada se radi o velikom broju otkaza onda su analitički metodi dosta dugotrajni nekada, a ni grafički ne ubrzavaju postupak previše. Slika 3.43. pokazuje jedan takav primer.



Slika 3.43. - Weibulov verovatnosni papir za primer velikog broja otkaza

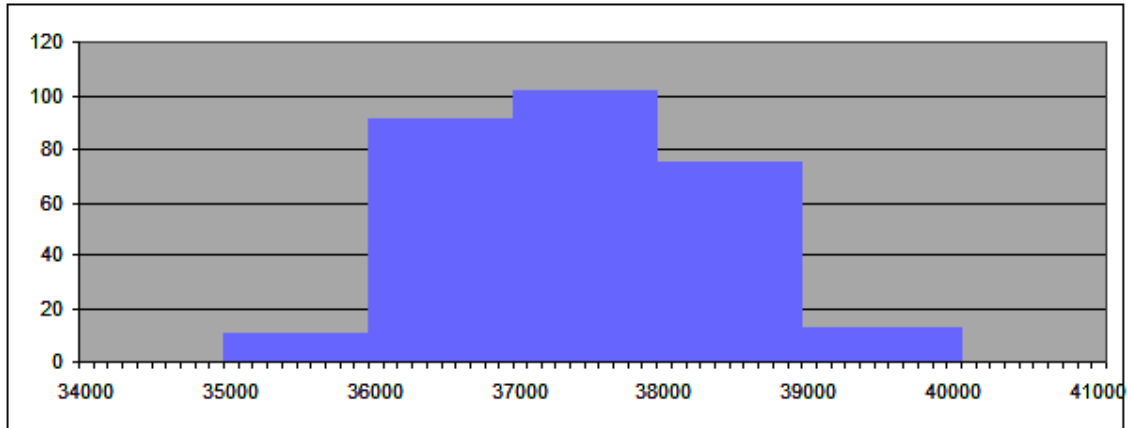
Ovde bi kompjuterska tehnika svakako mogla pomoći ali ne i onda kada ovaj postupak treba ponoviti veliki broj puta.

Postupak se može znatno ubrzati kreiranjem intervala kakvi su dati u tabeli 3.7. za isti primer. Ovo je prikazano i putem histograma na slici. 3.44.

⁸⁸ Ćatić, D., Modeliranje pouzdanosti korišćenjem Weibulove raspodele, Tehnika, Savez inženjera i tehničara Srbije, 2006., 55(5), 1-10.

radni časovi	35.000 - 36.000	36.000 - 37.000	37.000 - 38.000	38.000 - 39.000	39.000 - 40.000
broj otkaza	11	91	102	75	13

Tabela 3.8. - Otkazi sistema grupisani u intervale



Slika 3.44. - Histogram otkaza sistema

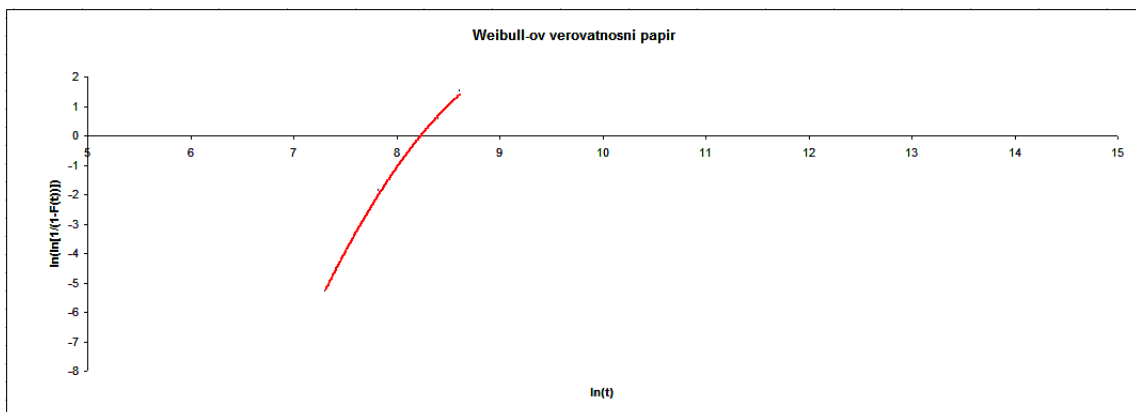
Dalje je potrebno naći srednje vrednosti na apscisi za formirane intervale i proračunati sledeće vrednosti

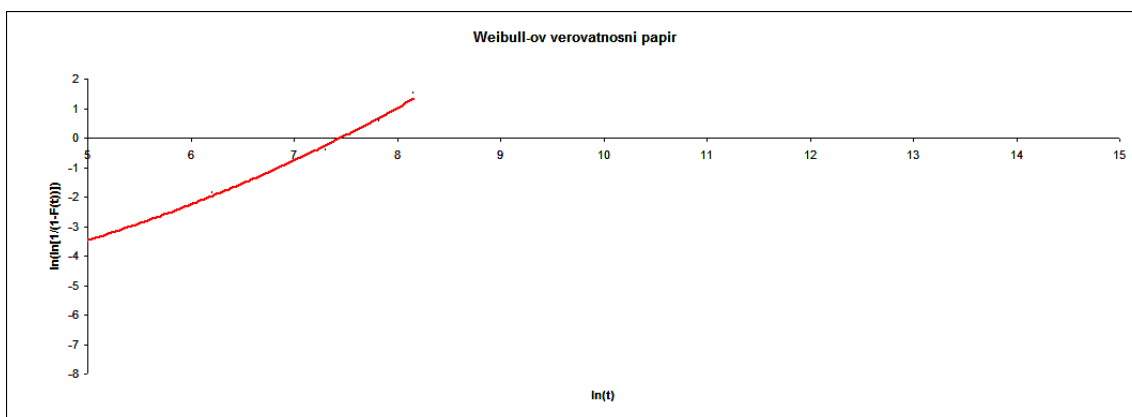
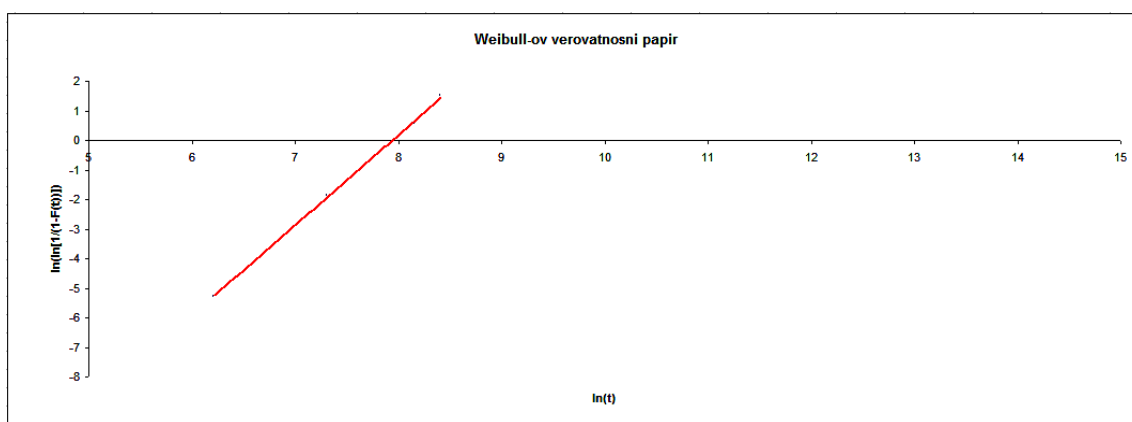
$$x_i = \ln(t - \gamma) \quad (3.95.)$$

$$y_i = \ln[\ln(1/F(t_i))] \quad (3.96.)$$

i te vrednosti uneti u verovatnosni papir.

Probom se ustanovljuje aproksimativna vrednost parametra γ za koju je aproksimativna linija linearna. Slike 3.45., 3.46. i 3.47. prikazuju izgled aproksimativne linije za različite vrednosti parametra položaja.

Slika 3.45. - Verovatnosni papir za vrednost $\gamma = 34000h$

Slika 3.46. - Verovatnosni papir za vrednost $\gamma = 36000h$ Slika 3.47. - Verovatnosni papir za vrednost $\gamma = 35000h$

t	$t - \gamma$	x_i	y_i	$R(t)$	$F(t)$
35.500	500	6,214608	-5,268710	0,994863	0,005137
36.500	1.500	7,313220	-1,836960	0,852740	0,147260
37.500	2.500	7,824046	-0,406290	0,513699	0,486301
38.500	3.500	8,160518	0,573677	0,169521	0,830479
39.500	4.500	8,411833	1,521293	0,010274	0,989726

Tabela 3.9. – Relevantne vrednosti proračuna za $\gamma = 35000h$

Iz priloženog se jasno vidi da je odgovarajuća vrednost parametra $\gamma = 35000h$. Tabela 3.9. prikazuje sve relevantne vrednosti ovog proračuna.

S obzirom na očekivanu vrednost parametra $3 < \beta \leq 4$ možemo aproksimirati odnos

parametara kao $\frac{\eta}{T_{ur} - \gamma} = 1,1 - 0,04 \cdot (\beta - 3)$ pa je odatle

$$\beta = \left(\frac{1,1 - \frac{\eta}{T_{ur} - \gamma}}{0,04} \right) + 3. \quad (3.98.)$$

Zatim prema metodi simetrične kumulativne gustine otkaza (Symmetrical CDF method) sledi:

$$F(t) = \frac{292 - 0,5}{292} = \frac{291,5}{292} \quad (3.99.)$$

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \frac{291,5}{292} = \frac{0,5}{292} = \frac{1}{292 \cdot 2} \quad (3.100.)$$

Koristeći jednakost 3.92., sledi da je:

$$\frac{1}{292 \cdot 2} = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (3.101.)$$

a odatle:

$$\beta = \log_{\left(\frac{t_{\max}-\gamma}{\eta}\right)} \left(-\ln \left(\frac{1}{292 \cdot 2} \right) \right) \quad (3.102.)$$

Izjednačavanjem prethodne jednačine (3.102.) i jednačine (3.101.) dobijamo:

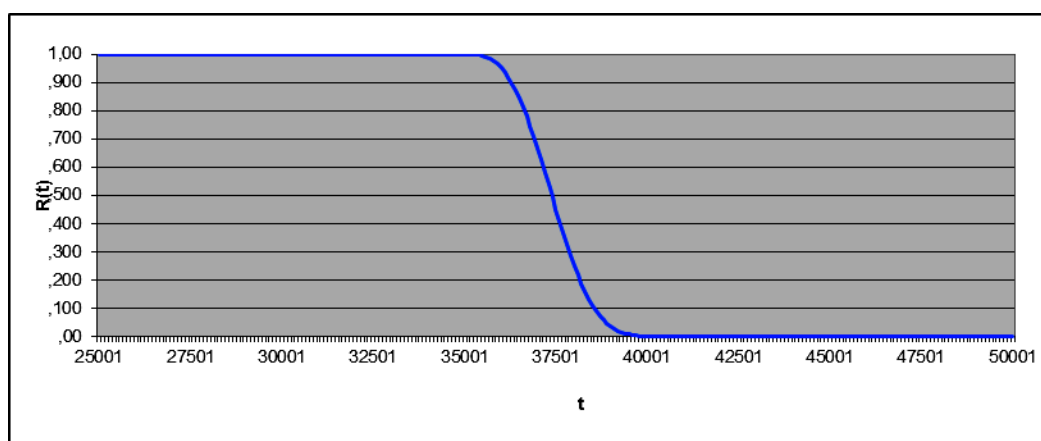
$$\left(\frac{1,1 - \frac{\eta}{\bar{T}_{ur} - \gamma}}{0,04} \right) + 3 = \log_{\left(\frac{t_{\max}-\gamma}{\eta}\right)} \left(-\ln \left(\frac{1}{292 \cdot 2} \right) \right). \quad (3.103.)$$

Kako je $\bar{T}_{ur} = 37.455,216$ a otkaza nema pre 35.000 radnih časova, vrednost parametra γ je 35.000. Sledi da je srednje vreme do pojave otkaza $MTTF = \bar{T}_{ur} - \gamma = 2.455,216$. Rešavanjem prethodne jednačine dobija se da je parametar $\eta = 2697,668$, a parametar $\beta = 3,031$. Prema tome, funkcija pouzdanosti glasi (grafik na slici 48.):

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-35000}{2697,668}\right)^{3,031}}, \quad (3.104.)$$

Funkcija nepouzdanosti:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-35000}{2697,668}\right)^{3,031}}. \quad (3.105.)$$



Slika 3.48. - Funkcija pouzdanosti

Sledeći korak je formiranje stohastičkih komponenata modela. Potrebno je formirati parametre koji će preuzeti na sebe faktor slučajnosti. Sledeći korak nakon formiranih pojedinačnih modela pouzdanosti, je njihova integracija. Potrebno je na bazi već otkrivenih zakonitosti pojave otkaza putem slučajnog broja simulirati otkaze svake komponente sistema koja pripada ovoj vrsti. Funkcija gustine otkaza (hazarda) je

podesna za formiranje softverskog modela $(\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1})$. Kontinualnu

promenljivu $\lambda(t)$ valja pretvoriti u sekvencijalnu zbrajanjem pojedinačnih vrednosti ove promenjive za svaki radni čas pojedinačno. Na primeru gde je $\gamma = 35000$ do $t_{\max} = 40000$ radnih časova, a prema formuli

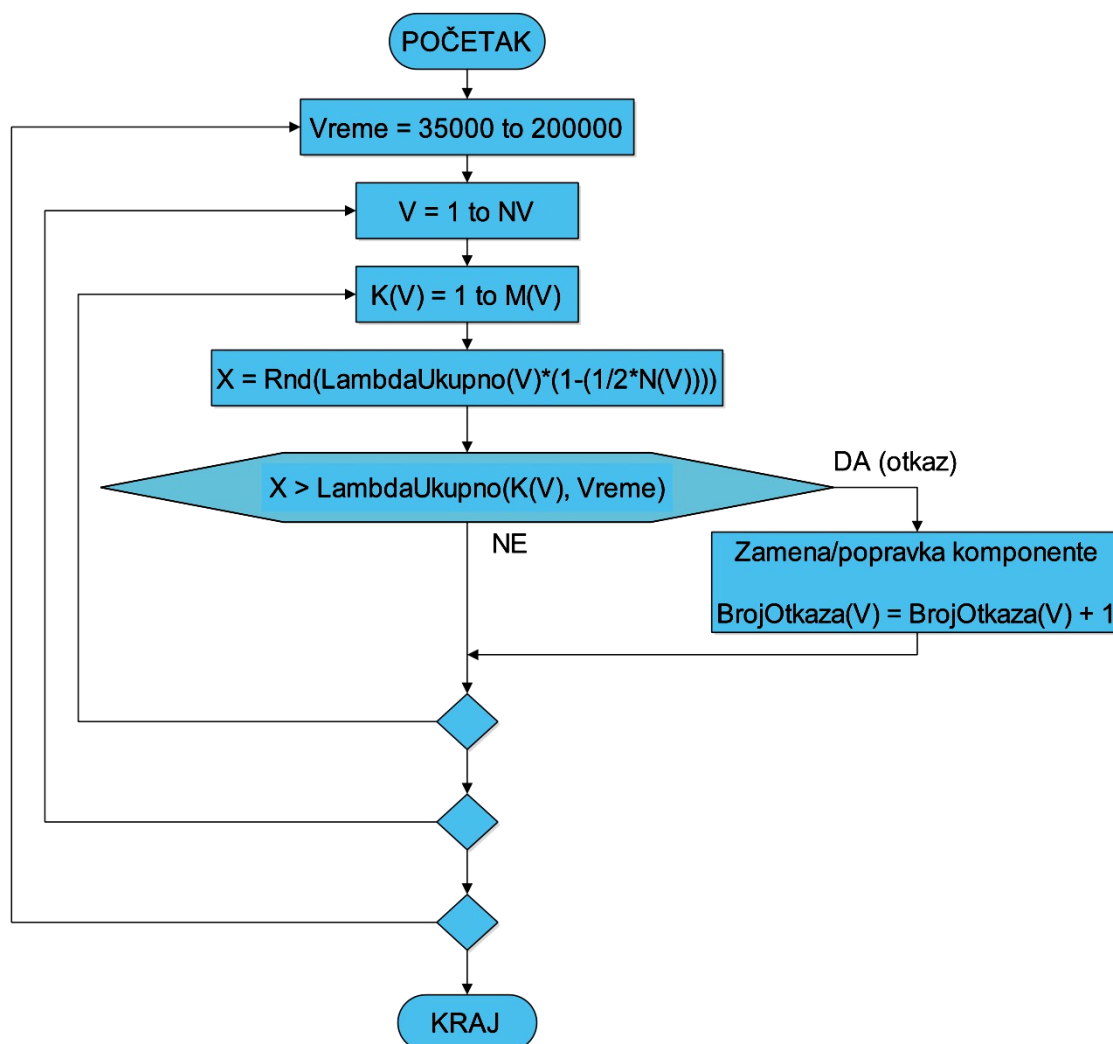
$$\lambda_{Ukupno} = \sum_{t=\gamma}^{t_{\max}} \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} = 6,49309499887513 \quad (3.106.)$$

Softver treba da simulira slučajan broj $X \in [0, 6,4819766855209]$ jer je

$$\lambda_{Ukupno} \cdot \left(1 - \frac{1}{292 \cdot 2}\right) = 6,4819766855209 \quad (3.107.)$$

te ako je vrednost $\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1}$ veće od slučajne pomenljive X tada dolazi do

otkaza i adekvatne zamene delova. Ovaj postupak treba uraditi za svaku od pojedinačnih komponenti ove vrste, a onda i za sve preostale vrste komponenti za svaku komponentu ponaosob. Naravno, ovo se mora implementirati u iteracije koje se odnose za svaki radni čas. Kao početno vreme simulacije je treba uzeti najmanju vrednost parametra položaja, a u svrhu kraćeg vremena rada simulacije. Kao krajnje vreme kalkulacije uzeto je 200000 radnih časova. Algoritamski je ova softverska simulacija predstavljena na pojednostavljen način na slici 3.49. Treba napomenuti da ovaj algoritam razmatra samo korektivne akcije održavanja te da će kombinovano održavanje biti primenjeno u sledećem algoritmu.



Slika 3.49. –Algoritam simulacije

Na slici 3.49. u algoritmu simulacije važi:

Vreme - operativno vreme

V - vrsta komponente

NV - broj vrsta komponenti

M(V) - broj komponenti vrste *V*

K(V) - komponenta vrste *V*

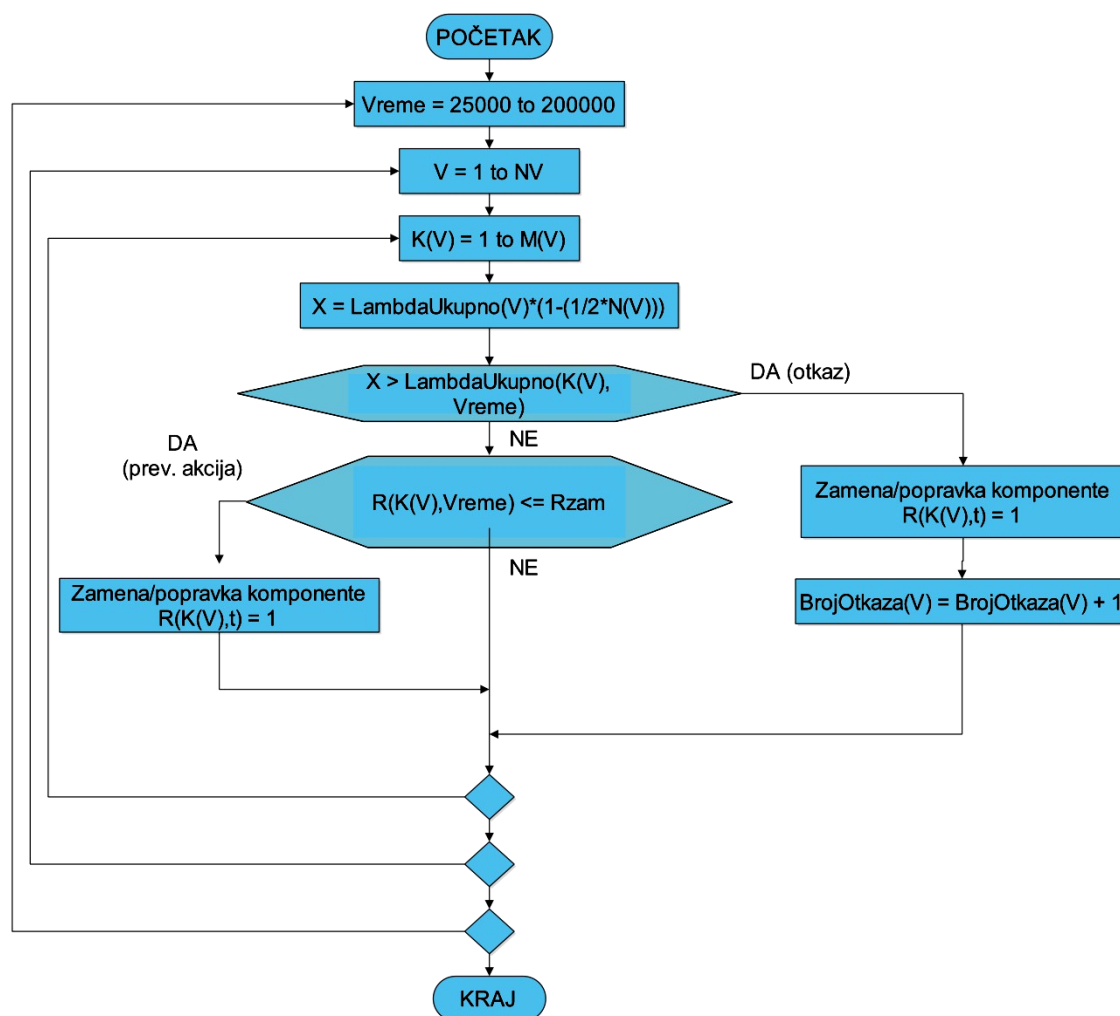
BrojOtkaza(V) - broj otkaza komponente *V*

X - pseudo-slučajna promenljiva koja određuje otkaz pojedine komponente

LambdaUkupno –suma svih hazarda u tačkama kalkulacije sve do maksimalnog vremena otkaza jedne vrste komponenti.

Ovaj algoritam predstavlja modifikovani algoritam sa slike 3.22. Činjenica da izvršenje algoritma duže traje usled toga što postoji veći broj tačaka kalkulacije ne ometa model iz razloga što to omogućuje manji broj vrsta komponenti u odnosu na druge sisteme. Ukoliko bi vreme izvršenja ipak bilo predugo postoje mogućnosti da se skрати operativno vreme sistema koje se simulira ili da se pribegne redukovanju broja tačaka kalkulacije. Ovaj algoritam je primenljiv u slučaju da nema kombinovanog održavanja pa je potrebno razmotriti i ovaj slučaj.

Kada se u obzir uzmu i preventivne akcije održavanja valja napomenuti i to da je zamene ili opravke komponenti moguće vršiti prema pouzdanosti. Ovime se, putem većeg broja simulacija može odabrati i adekvatan nivo pouzdanosti koji može doneti najbolje akcije održavanja prema određenim kriterijumima koji su najčešće finansijske prirode. Izmenjeni algoritam sa slike 3.23. nam može pomoći u ostvarenju simulacije i prikazan je na slici 3.50.



Slika 3.50. - Algoritam simulacije za slučaj kombinovanog održavanja

Algoritam uzima u obzir da je moguće zameniti komponente i da se nakon korektivne ili preventivne akcije održavanja pouzdanost pojedine komponente podiže na nivo 100%. Formirani model se zasniva na proračunu pouzdanost svake pojedine komponente sistema u svakoj vremenskoj jedinici. Ovime se na period operativnog rada

tokom simulacije dobijaju validni podaci o prosečnom nivou pouzdanost, otkaza ili troškova održavanja ukoliko se uvrste u simulaciju. Model je podesan za sistem tračnog transportera kao postrojenje koje ima veliki broj komponenata ali mali broj vrsta.

3.3.6. FORMIRANJE MODELA SA POSTOJANJEM INTERAKTIVNIH OTKAZA

Kreiranje modela sa postojanjem interaktivnih otkaza je najkompleksniji pojedinačni model ovog istraživanja koji će biti podeljen u module prema koracima izrade. Prvo je neophodno definisati odnose komponenti unutar sistema radi lakše izrade modela. Komponente neretko interaguju unutar sistema kao što je poznato i dovode do toga da promene pouzdanosti jedne komponente može proizvesti otkaz druge komponente. Ona komponenta koja inicijalno izaziva promene pouzdanosti druge komponente nazvana je u ovom radu **afektujućom komponentom**. Komponenta čija se pouzdanost menja pod uticajem pouzdanost afektujuće komponente nazvana je **afektovana komponenta**. Sasvim je izvesno da afektovanih na jednoj strani ili afektujućih komponenti na drugoj strani može biti i više od jedne. Jasno je da u jednom sistemu jedna komponenta može biti i afektujuća i afektovana istovremeno, ali i da se može dogoditi specijalan slučaj formiranja cirkularnog uticaja dve ili više komponenti te da se time formiraju uslovi za kaskadni otkaz komponenti. Da bi ovaj uticaj bio ostvaren, model mora da predvidi promenljive veličine koje mogu **efikasno i što jednostavnije** da izraze uticaj afektujuće komponente na afektovanu.

U skladu sa navedenim možemo reći da postoji 3 različita slučaja međusobne interakcije komponenti:

1. jedna afektujuća komponenta utiče na pouzdanost jedne afektovane
2. jedna afektujuća komponenta utiče na pouzdanost više afektovanih
3. više afektujućih komponenti utiče na pouzdanost jedne afektovane

Posmatrajući pojedinačni uticaj i efekte otkaza jedne komponente na drugu možemo podeliti na dve vrste:

1. otkaz afektujuće komponente uzrokuje momentalni otkaz afektovane komponente.
2. otkaz afektujuće komponente smanjuje nivo pouzdanosti afektovane komponente.

U skladu sa prethodnom podelom efekata **interaktivne otkaze komponenti** možemo smatrati **momentalnim i postepenim**¹.

Model koji uvažava interakciju komponenti zasniva se na kombinovanom uticaju komponenti što će reći da otkaz jedne komponente utiče na drugu promenom nivoa pouzdanosti i hazarda putem "ostarivanja komponente" za određeni vremenski interval. Uticaj afektujuće komponente će prouzrokovati postepeni ili momentalni otkaz

¹ Sun, Y., "Reliability Prediction Of Complex Repairable Systems: An Engineering Approach", Thesis submitted in total fulfilment of requirements of the degree of Doctor of Philosophy, Faculty of Built Environment and Engineering, University of Technology, Queensland, 2006.

afektovane komponente u zavisnosti od veličine vremenskog intervala kojim se komponenta “ostarila”.

Model ne može biti arbitrirajući usled mnogobrojnosti proračuna i velikog vremenskog perioda obzervacije koji je nužan da se dođe do kvalitetnijeg inputa podataka, čime otpada mogućnost ubacivanja iskustava inženjera održavaoca za ovako kompleksne sisteme. Takođe, veoma dug vremenski period posmatranja znači i veliki broj preventivnih akcija održavanja koje mogu da utiču na interakciju komponenti tokom određenog vremenskog perioda, pa je kreiranje mehanizma otkazivanja jedino relevantno kao zaključak posmatranja u što dužem vremenskom periodu. Model koji bi se zasnivao na stohastičkim procesima i teoriji verovatnoće bi uvek mogao dobro da odslika interakciju modela ali je takav model po pravilu matematički kompleksan. Ipak, matematička kompleksnost može biti izbegnuta simuliranjem na bazi kvazi slučajnog broja ili jednostavnijim matematičkim aproksimacijama, modularanjem problema, itd. Modelovanje zasnovano na Markovljevim lancima su tipičan način izbegavanja matematičke kompleksnosti modela, ali sa puno mana. One ne uspevaju da oslikaju nejednak uticaj komponenti jedne na drugu tokom vremena a sa porastom broja komponenti broj proračuna eksponencijalno raste i dolazi do nemogućnosti simuliranja većeg broja komponenti na dugi vremenski period. Stoga se mora iznaći originalno i novo rešenje za ovu problematiku.

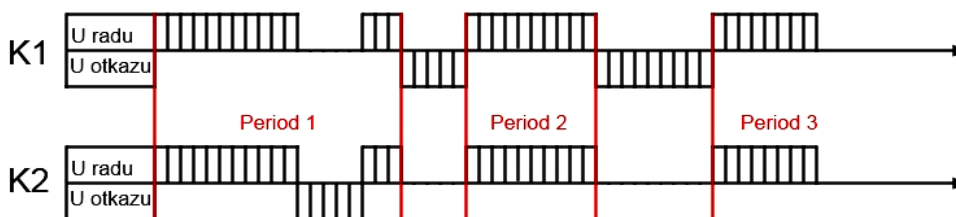
Pretpostavke ovog modela su:

- sistem kontinuirano radi,
- sistem se održava kombinovano i to korektivno po otkazu komponente sistema za datu komponentu, a preventivno tokom remonta,
- svaka komponenta sistema nakon otkaza biva zamenom ili popravkom dovedena na nivo pouzdanosti od 100%,
- sistem jednom godišnje ima remont – veliku periodičnu opravku, nakon koje biva doveden u stanje pouzdanosti 100%,
- model polazi od pretpostavke da sve komponente sistema mogu imati interakciju čime se ne stvara mogućnost previda pojedinih interakcija.

Model sa postojanjem interaktivnih otkaza komponenti sistema bi se mogao predstaviti sledećim koracima:

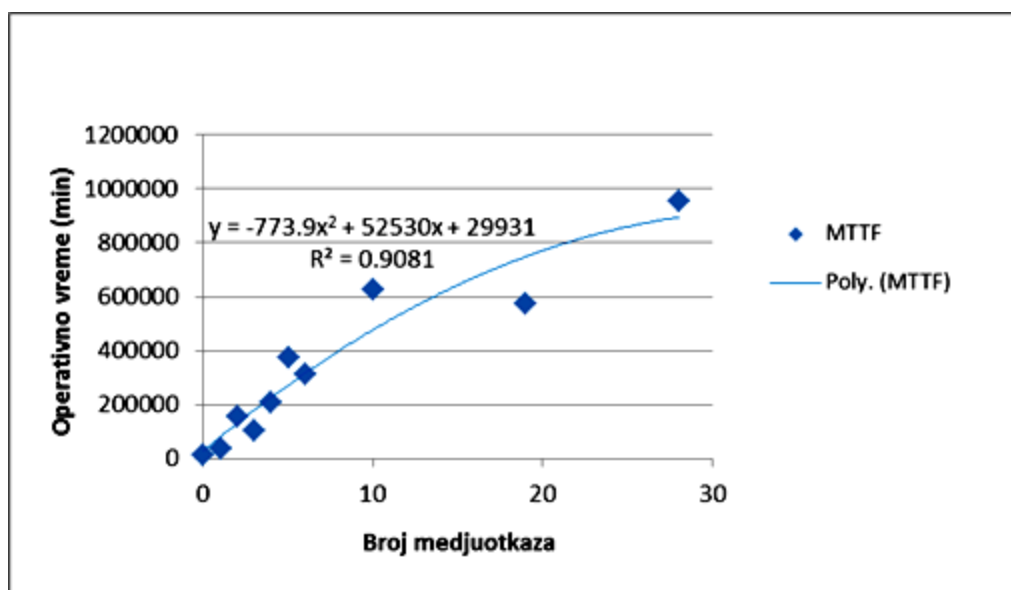
- 1. Skupljanje podataka iz baze podataka koja je uslovila i dekomponovanje.** Baze podataka su ažurno i precizno vođene za dugi vremenski period. Ipak, njihova klasifikacija je štura i ne dozvoljava preveliko dekomponovanje sistema. Ovo će usloviti i izradu Blok dijagrama pouzdanosti, ali i sa manjim brojem komponenti omogućiti simulacije sa većim brojem vremenskih tačaka kalkulacije.
- 2. Dekomponovanje sistema i izrada blok dijagrama pouzdanosti.** Klasifikacija otkaza komponenti kao i dugi vremenski period obzervacije radi kvalitetnijih inputa modela direktno uslovljavaju ovaj korak modela. Jedino je eventualno potrebno voditi računa da broj komponenti ne bude prevelik.
- 3. Deriviranje vremena otkaza i vremena u radu iz baze podataka.** Za svaku komponentu sistema treba utvrditi vremena u otkazu i vremena u radu. Zasebno

treba odvojiti vremena bezotkaznog rada prema broju međuotkaza svake od ostalih komponenti kako bi se utvrdio uticaj svake od njih. Prikaz je dat na slici 3.51. i ukazuje na odnos otkaza afektovane i afektujuće komponente. Obeleženi periodi rada ukazuju na mogućnost da postoje međuotkazi afektujuće komponente (K2) tokom bezotkaznog rada afektovane komponente (K1) poput perioda 1 ili da ih nema poput perioda 2 i perioda 3. Naravno, postoji i mogućnost višestrukih međuotkaza.



Slika 3.51. – Odnos otkaza afektovane (K1) i afektujuće (K2) komponente

4. **Kvadratna regresiona analiza srednjeg vremena do pojave otkaza (MTTF) afektovane komponente u zavisnosti od broja međuotkaza afektujuće komponente.** Analizom srednjeg vremena do pojave otkaza afektovane komponente za različite brojeve međuotkaza potencijalno afektujuće komponente dobija se jasna slika o postojanju i karakteru interakcije komponenti koje su obuhvaćene analizom. Rezultat je kvadratna jednačina koja može poslužiti i trendovanju. Kriterijum valjanosti regresione jednačine je koeficijent determinacije (R^2). Broj kombinacija koje treba analizirati zavisi od dekomponovanja sistema i potrebno je svaku komponentu smatrati potencijalno afektujućom u odnosu na sve ostale komponente sistema. Usled toga je neophodno napraviti softver koji će automatizovati rešavanje ovog problema. Primer uticaja otkaza afektujuće komponente na srednje vreme do pojave otkaza afektovane je grafički prikazan na slici 3.52.



Slika 3.52. - Uticaj broja međuotkaza afektujuće komponente (K2) na srednje vreme do pojave otkaza afektovane komponente (K1) i jednačina kvadratne regresije

Jednačina je oblika

$$y = ax^2 + bx + c, \quad x \geq 0, y \geq 0, x \in N_0 \quad (3.108.)$$

gde je:

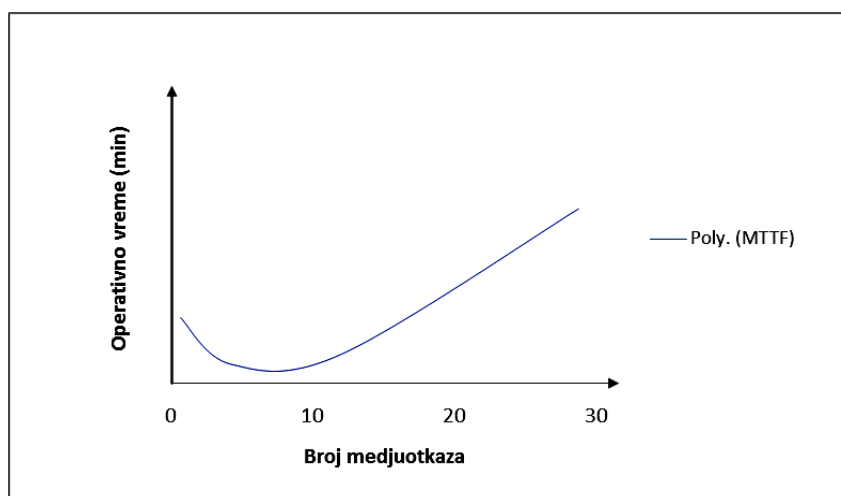
y - zavisna promenljiva (srednje vreme do pojave otkaza afektovane komponente),

x - nezavisna promenljiva (broj međuohtaka afektujuće komponente).

Koeficijenti polinoma a i b omogućuju identifikovanje uticaja održavanja i interakcije komponenti ukoliko oni postoje.

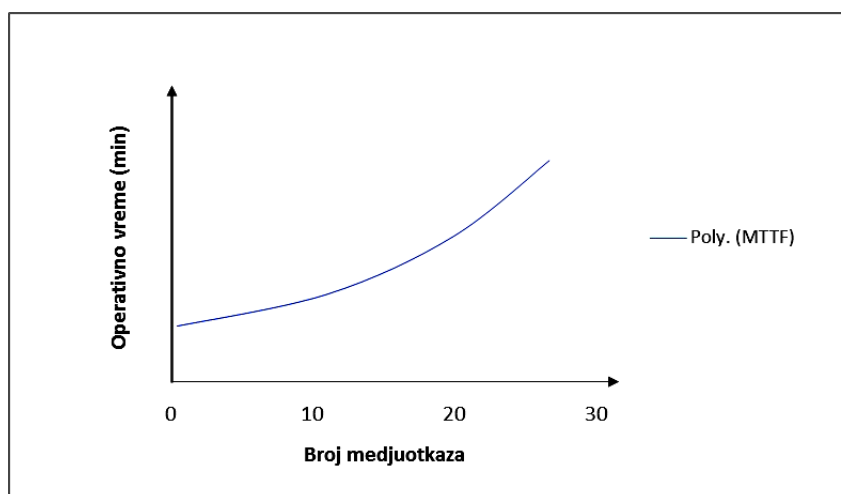
U zavisnosti predznaka koeficijenata jednačine a i b razlikujemo 4 moguća oblika jednačine i pod pretpostavkom da se akcijama održavanja produžava životni vek komponente a interakcijom komponenti skraćuje, možemo izvući sledeće zaključke o ovim oblicima jednačine:

- 1) $a > 0, -\frac{b}{2a} > 0$. Regresiona funkcija daje konveksnu parabolu koja ima minimum u nekoj od vrednosti međuohtaka koji se pojavljuju. Srednje vreme do pojave otkaza afektovane komponente se sa brojem međuohtaka afektujuće u jednom periodu smanjuje a zatim „nelogično povećava“. Kako je $b < 0$ lako je razgraničiti pozitivni uticaj održavanja na povećanje srednjeg vremena do pojave otkaza u monomu ax^2 i negativan usled uticaja afektujuće komponente preko monoma bx . Može se reći da sa manjim brojem međuohtaka dolazi do smanjivanja vrednosti *MTTF* ali vremenom usled sticanja iskustva održavalaca ili više potrebnog vremena da se neke od kompleksnih operacija održavanja ostvare, vrednosti *MTTF* povećavaju. Primer je dat na slici 3.53.



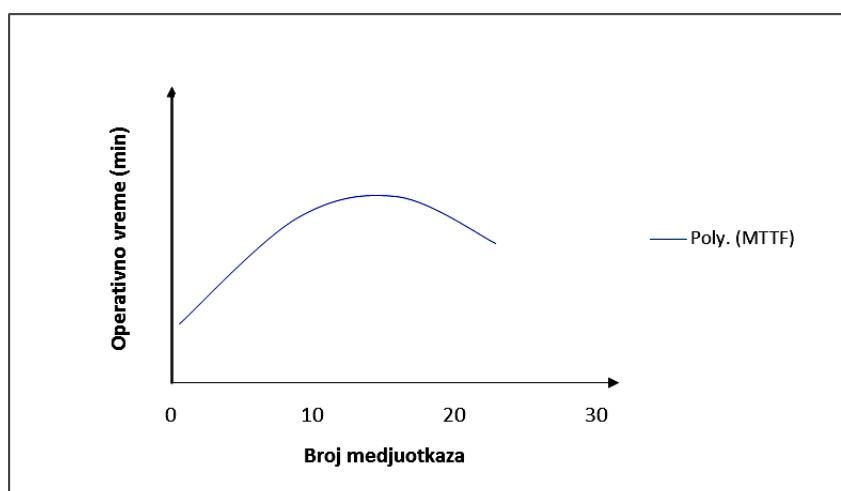
Slika 3.53. - Uticaj broja međuohtaka afektujuće komponente na srednje vreme pojave otkaza afektovane komponente $a > 0, -\frac{b}{2a} > 0$

- 2) $a > 0$, $-\frac{b}{2a} < 0$. Regresiona funkcija daje konveksnu parabolu koja ima minimum u negativnoj vrednosti pa je funkcija y za pozitivnu vrednost promenljive x stalno rastuća. Srednje vreme do pojave otkaza afektovane komponente se sa brojem međutokaza afektujuće u stalno povećava. Kako je $b > 0$ nema jasnog razgraničenja uticaja održavanja ili afektujuće komponente na povećanje $MTTF$ iako oba faktora na taj način utiču i njihov zajednički uticaj je definisan polinomom $ax^2 + bx$. Razlozi mogu biti da su održavaoci sa pojavom većeg broja međutokaza efikasniji i/ili da interakcija komponenti sa svakim novim međutokazom „jenjava“. Primer je dat na slici 3.54.



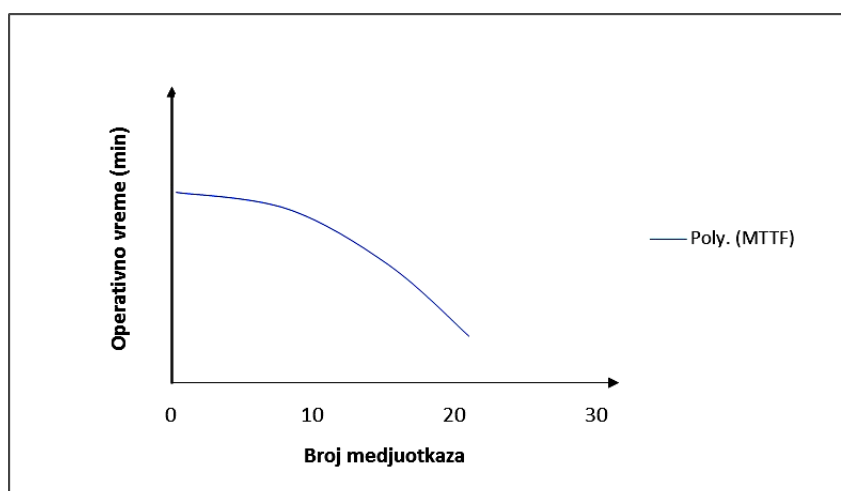
Slika 3.54. - Uticaj broja međutokaza afektujuće komponente na srednje vreme do pojave otkaza afektovane komponente $a > 0$, $-\frac{b}{2a} < 0$

- 3) $a < 0$, $-\frac{b}{2a} > 0$. Regresiona funkcija daje konkavnu parabolu koja ima minimum u nekoj od vrednosti međutokaza koji se pojavljuju. Vrednost srednjeg vremena do pojave otkaza afektovane komponente se sa brojem međutokaza afektujuće u jednom periodu povećava a zatim smanjuje. Pod pretpostavkom pozitivnog uticaja održavanja na povećanje srednjeg vremena do pojave otkaza u monomu bx , $b > 0$ i negativan usled uticaja afektujuće komponente preko monoma ax^2 , može se zaključiti da sa manjim brojem međutokaza dolazi do smanjivanja povećanja vrednosti $MTTF$, jer u početku održavaoci „dobijaju trku“ sa interaktivnim negativnim uticajem afektujuće komponente ali vremenom usled eksponencijalnog rasta interakcije održavanje ima sve manji uticaj i $MTTF$ ponovo dobija sve manje vrednosti. Primer je dat na slici 3.55.



Slika 3.55. - Uticaj broja međuočkaza afektujuće komponente na srednje vreme do pojave otkaza afektovane komponente $a < 0$, $-\frac{b}{2a} > 0$

- 4) $a < 0$, $-\frac{b}{2a} < 0$. Regresiona funkcija daje konkavnu parabolu koja ima minimum u negativnoj vrednosti pa je funkcija y za pozitivnu vrednost promenljive x stalno opadajuća. Srednje vreme do pojave otkaza afektovane komponente se sa brojem međuočkaza afektujuće u stalno povećava. Kako je $b > 0$ nema jasnog razgraničenja uticaja održavanja ili afektujuće komponente na povećanje $MTTF$ iako oba faktora na taj način utiču i njihov zajednički uticaj je definisan polinomom $ax^2 + bx$. Razlozi mogu biti da su održavaoci sa pojavom većeg broja međuočkaza efikasniji i/ili da interakcija komponenti sa svakim novim međuočkomom „jenjava“. Primer je dat na slici 3.56.



Slika 3.56. - Uticaj broja međuočkaza afektujuće komponente na srednje vreme do pojave otkaza afektovane komponente $a < 0$, $-\frac{b}{2a} < 0$

Iako ovo nisu svi potencijalni teorijski oblici funkcije, svi ostali su specijalni slučajevi jedne od ovih oblika funkcije koji ne utiču na dalju analizu ali govore o prirodi interakcije i daju mogućnost njenog boljeg razumevanja. Razlog aproksimacije uticaja interakcije i održavanja na *MTTF* afektovane komponente putem funkcije oblika $y = ax^2 + bx + c$ je upravo taj što se polinomom drugog stepena mogu razgraničiti ova dva uticaja.

- 5. Selekcija slučajeva u kojima postoji interakcija komponenata.** Potrebno je dalje izolovati slučajeve u kojima je postojanje interakcije sigurno u odnosu na one gde ono ne postoji. Kriterijumi moraju biti u vezi sa time da se odbacuju slučajevi gde ne postoji dovoljan broj podataka da se izvede ovakav zaključak ili oni gde je jasno da interakcije nema.

Kriterijumi za prihvatanje postojanja? koeficijenata interakcije će biti:

- broj stepeni slobode aproksimativne krive koji je određen brojem tačaka različitih brojeva međutokaza (minimum 3, tj. minimum 5 tačaka),
- vrednošću koeficijenta determinacije ($R^2 > 0,9$).

- 6. Određivanje odgovarajuće raspodele pojave otkaza između Weibulove troparametarske (u daljem tekstu W3) ili dvoparametarske (u daljem tekstu W2).** Da bi se ovaj zadatak obavio opet se mora posegnuti za softverskim rešenjem usled velikog broja proračuna koji se očekuje. Matematičko rešenje je kompleksno pa je efikasan način numeričko rešavanje problema koje treba da nađe odgovarajuću raspodelu a onda i vrednosti parametara raspodele sa zadovoljavajućom tačnošću. Ovaj proračun treba da uzme u obzir samo otkaze afektovanih komponenti koje nemaju međutokaze njihovih afektujućih komponenti kako bi se došlo do raspodele. Određivanje parametara se svodi na pokušaj određenja u okvirima W3 raspodele a onda ukoliko nema rešenja koje zadovoljava parametar položaja raspodele γ dobija vrednost 0 i nastavlja se sa određivanjem parametara W2 raspodele. Za rešavanje ovog problema moguće je koristiti bilo koji ranije opisan metod određivanja ovih parametara.
- 7. Stvaranje matrice interakcije.** Potrebno je formirati matricu oblika

$$Y := (y_{k_1, k_2})_{m \times m} \quad (3.109.)$$

gde je:

y_{k_1, k_2} - regresiona kvadratna funkcija,

k_1 - afektovana komponenta,

k_2 -afektujuća komponenta,

m - broj komponenata sistema,

i važi:

$$y_{k1,k2} = a_{k1,k2}x^2 + b_{k1,k2}x + c_{k1,k2}. \quad (3.110.)$$

Ovaj korak treba da obezbedi formiranje slike sveukupne interakcije među komponentama sistema. Ukoliko ne postoji interakcija između komponenti tada je $y_{k1,k2} = 0$. Potrebno je da softver učitava vrednosti iz matrice, te u trenutku pojave otkaza pruži vrednost promene *MTTF* afektovane komponente *K1* usled pojedinog otkaza afektujuće komponente iz matrice.

Da bi softver mogao da simulira rad sistema prema pouzdanosti potrebno je prethodno definisati promene pouzdanosti afektovane u trenutku pojave otkaza afektujuće komponente. U tu svrhu služi matrica interakcije i kao opšte rešenje za sve slučajeve možemo navesti sledeći proračun.

Posle svakog otkaza afektujuće komponente *K2* dolazi do promene vrednosti *MTTF* afektovane komponente *K1* u smislu njenog smanjenja kada se komponente „ostaruje“ ili povećanja kada se komponenta „podmlađuje“. Ovaj vremenski „pomak“ vrednosti *MTTF* afektovane komponente *K1* bi se mogao formulisati uvođenjem nove promenljive τ_p koja za negativne vrednosti ($\tau_p < 0$) označava ostarivanje komponente a za pozitivne ($\tau_p > 0$) njeno podmlađivanje nakon otkaza afektujuće komponente i preventivnog održavanja. Kako bi se došlo do opšteg obrasca za ovu promenljivu potrebno je razmotriti šta se dešava u svakom od međuotkaza pojedinačno. Tabela 3.10. vrednosti *MTTF* i njihove promene u odnosu na broj međuotkaza.

Broj međuotkaza <i>K2</i> (x)	<i>MTTF</i> _{x} od <i>K1</i> ($y_{k1,k2}$)	Promena <i>MTTF</i> _{x} - <i>MTTF</i> _{$x-1$}
0	$c_{k1,k2}$	/
1	$a_{k1,k2} + b_{k1,k2} + c_{k1,k2}$	$a_{k1,k2} + b_{k1,k2}$
2	$4a_{k1,k2} + 2b_{k1,k2} + c_{k1,k2}$	$3a_{k1,k2} + b_{k1,k2}$
3	$9a_{k1,k2} + 3b_{k1,k2} + c_{k1,k2}$	$5a_{k1,k2} + b_{k1,k2}$
4	$16a_{k1,k2} + 4b_{k1,k2} + c_{k1,k2}$	$7a_{k1,k2} + b_{k1,k2}$
5	$25a_{k1,k2} + 5b_{k1,k2} + c_{k1,k2}$	$9a_{k1,k2} + b_{k1,k2}$

Tabela 3.10. –Vrednosti *MTTF* afektovane komponente i njihove promene u odnosu na broj međuotkaza afektujuće komponente

Nakon pregleda datog u tabeli 3.10. lako je izraziti poneke vrednosti *MTTF* u opštim brojevima kao:

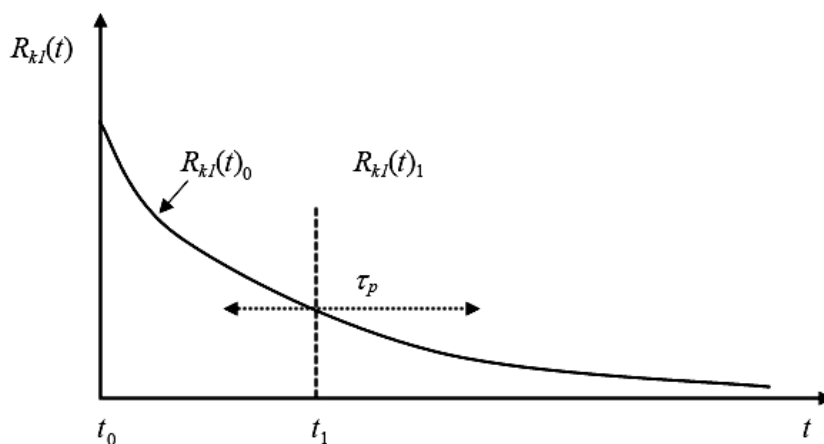
$$MTTF_x - MTTF_{x-1} = (2x-1) \cdot a_{k1,k2} + x \cdot b_{k1,k2} \quad (3.111.)$$

Sada je neophodno utvrditi za koliko to treba afektovanu komponentu sistema podmladiti ili ostariti sa svakim otkazom afektujuće komponente kako bi se

promena $MTTF_x - MTTF_{x-1}$ izvršila za celokupno kretanje pouzdanosti. Slika 3.58. pokazuje primer prvog međuotkaza afektujuće komponente u trenutku vremena t_1 . Pošto se u trenutku prvog međuotkaza t_1 događa zastoje sistema i preventivno održavanje afektovane komponente $K1$, vrednost pouzdanosti se menja od $R_{k1}(t)_0$ u vrednost $R_{k1}(t)_1$. Ove dve vrednosti se nalaze u sledećoj relaciji:

$$R_{k1}(t)_1 = R_{k1}(t + \tau_p)_0. \quad (3.112.)$$

Kako je već prethodno definisano vrednost vremenskog pomaka τ_p definiše da li će nakon međuotkaza vrednost pouzdanosti afektovane komponente opasti ili porasti. Negativna vrednost promenljive τ_p podmlađuje komponentu i time povećava pouzdanost afektovane komponente dok pozitivne vrednosti promenljive τ_p ostaruju afektovanu komponentu i smanjuju vrednost pouzdanosti. Promene se posledično događaju i po pitanju hazarda pa je model kombinovan jer obuhvata promene i hazarda i pouzdanost. Na slici 3.57 negativna vrednost τ_p "pomera vreme" ulevo a pozitivna udesno. Pitanje na koje treba dati odgovor je: **Kako definisati vrednost promenljive τ_p kako bi se nakon međuotkaza afektujuće komponente dogodila odgovarajuća promena srednje vrednosti do pojave otkaza afektujuće komponente $MTTF_x - MTTF_{x-1} = (2x-1) \cdot a_{k1,k2} + x \cdot b_{k1,k2}$?**



Slika 3.57. - Promene pouzdanosti afektovane komponente nakon prvog međuotkaza afektujuće komponente

Ukoliko vrednost $MTTF$ posmatramo kao vremensku tačku koja površine ispod krive pouzdanosti deli na dva jednaka dela onda možemo zaključiti da vremenski pomak τ_p menjajući samo pouzdanost nakon međuotkaza utiče na ukupnu vrednost $MTTF$ u zavisnosti od odnosa vrednosti pouzdanosti pre međuotkaza $R_{k1}(t)_0$ i preostale pouzdanosti u slučaju da se međuotkaz nije ni

dogodio, tj. nepouzdanosti afektovane komponente $F_{k1}(t_1)_0 = 1 - R_{k1}(t_1)_0$. Tako je vremenski pomak za slučaj prvog otkaza definisan kao:

$$\tau_p = \frac{2 \cdot (MTTF_1 - MTTF_0) \cdot (1 - R_{k1}(t_1)_0)}{R_{k1}(t_1)_0} = \frac{2 \cdot (MTTF_1 - MTTF_0) \cdot F_{k1}(t_1)_0}{R_{k1}(t_1)_0}. \quad (3.113.)$$

Predstavljajući promene u opštim brojevima nakon x -tog međuotkaza može se napisati:

$$\tau_p = \frac{2 \cdot (MTTF_x - MTTF_{x-1}) \cdot (1 - R_{k1}(t_x)_{x-1})}{R_{k1}(t_x)_{x-1}}. \quad (3.114.)$$

Povezivanjem jednačina 3.111. i 3.114. dobija konačni oblik potrebnog vremenskog pomaka afektovane komponente τ_p nakon međuotkaza x afektujuće komponente:

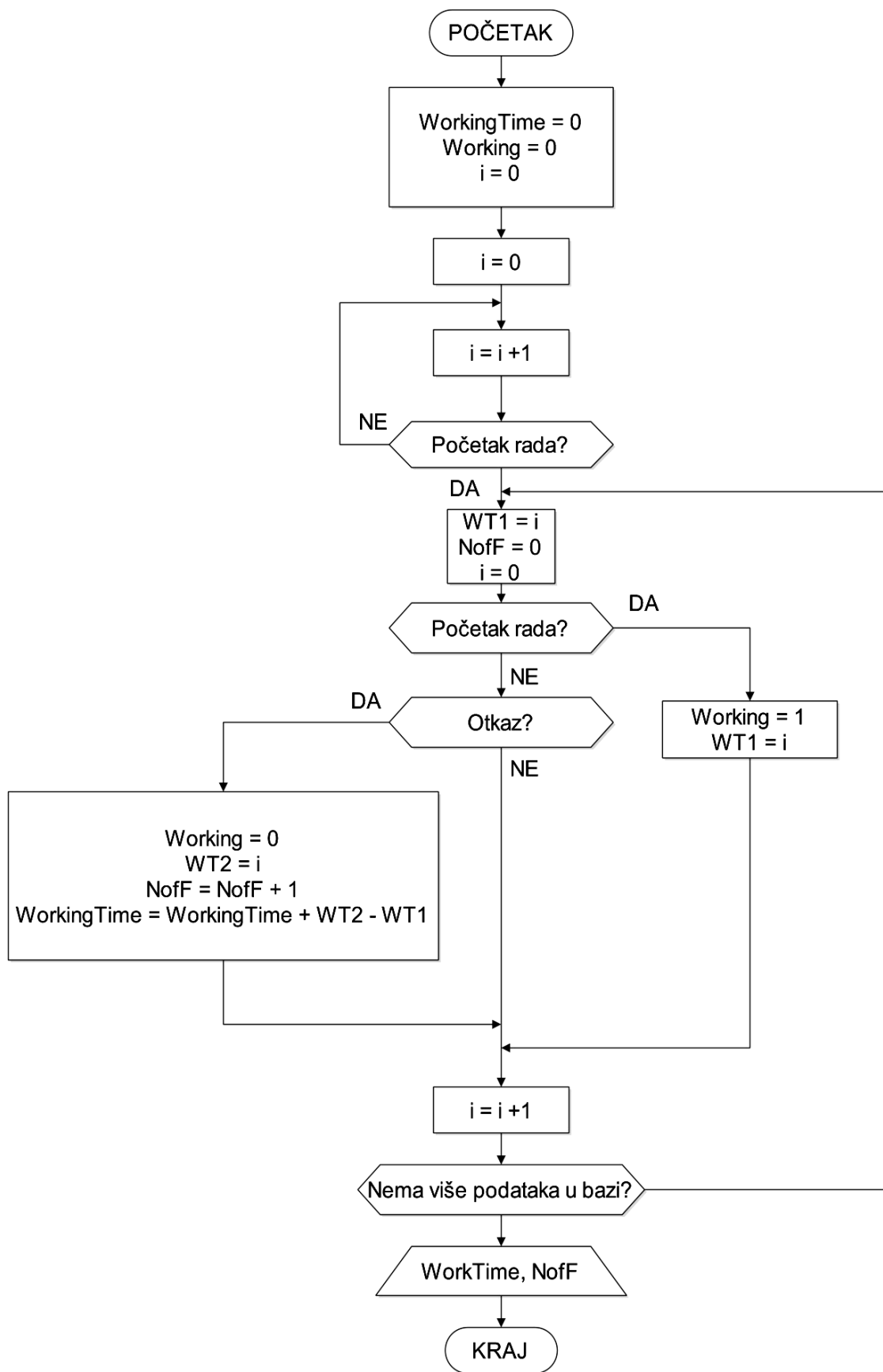
$$\tau_p = \frac{2 \cdot ((2x-1) \cdot a_{k1,k2} + x \cdot b_{k1,k2}) \cdot (1 - R_{k1}(t_x)_{x-1})}{R_{k1}(t_x)_{x-1}}. \quad (3.115.)$$

8. Korekcija parametara i simulacije pouzdanosti sistema bloka elektrane

Pošto su definisani matematizmi za ostvarivanje modela dalje je neophodno obezbediti da simulacija bude validna. Potrebno je da broj otkaza u simulaciji reprezentuje broj otkaza iz baze podataka a zatim kreirati simulaciju pouzdanosti celog sistema. Ovo je neophodno uraditi u 3 koraka:

- kreiranje softvera za prikupljanje neophodnih podataka iz baze,
- korekcija parametara putem simulacije,
- simulacija rada sistema.

Prvi korak podrazumeva da pošto se radi o velikom broju podataka nemoguće je doći do potrebnih podataka iz baze na jednostavan način pa to podrazumeva izradu softvera koji će obezbediti osnovne podatke. Softver treba da obezbedi podatke o ukupnom radu sistema i prosečnom operativnom vremenu tokom kalendarske godine, ukupnom i prosečnom broju otkaza svakog podsistema. Algoritam ovog softvera, najjednostavnijeg u nizu od tri potrebna, je predstavljen na slici 3.58.



Slika 3.58. - Algoritam softvera za prikupljanje potrebnih podataka iz baze

Na slici 3.58. u algoritmu simulacije važi:

WorkingTime - operativno vreme sistema,

Working - radno stanje sistema,

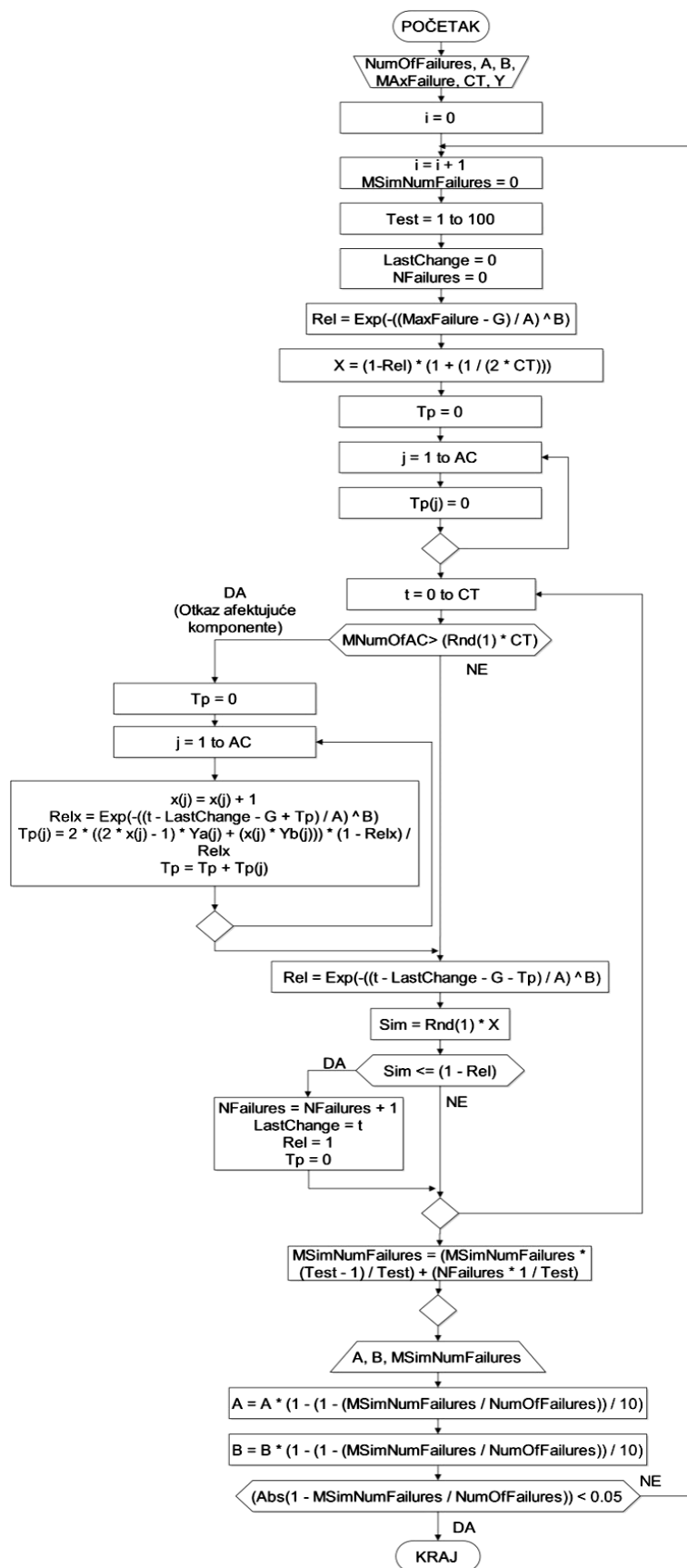
WT1 - vremenska tačka uključivanja u rad sistema,

WT2 - vremenska tačka otkaza sistema.

Nakon dobijanja potrebnih podataka, **drugi korak** jeste korekcija parametara *W3* ili *W2* raspodele. Inicijalni parametri se odnose na kontinualne promenljive i prelazak na diskretne je neophodan radi formiranja simulacije rada sistema. Svakako da broj tačaka proračuna utiče na to koliko će iznositi vrednosti korigovanih parametara raspodele pa je neophodno da one budu identične za vreme obe simulacije, tj. i za vreme korekcije parametara i simulacije pouzdanosti sistema. Za osnovu algoritma će biti iskorišćen algoritam na slici Slika 3.42 i kao modifikovan će odgovoriti zahtevima modelovanja. Algoritam korekcije parametara je prezenotovan na slici 3.59.

Ovaj algoritam je kompleksniji u toliko u koliko je neophodno simulirati i otkaze afektovane komponente i svih njoj afektujućih komponenti. Kada ne postoje afektujuće za datu komponentu sve je dosta simplifikovano. Kada je prisutna samo jedna, nešto složenije, no još složenije sa više afektujućih komponenti. Ipak najkompleksniji slučajevi mogu biti i oni kod kojih je više komponenti afektovanih i afektujućih uzajamno i u takvoj situaciji korekcija parametara je nemoguća usled toga što su sve promenljive i zavisne i nezavisne istovremeno. Ovde se mora pribeći univerzalnom rešenju preko srednjeg broja otkaza afektujuće komponente tokom godine i preko kvazi slučajne promenljive simlifikovano simulirati broj otkaza afektujućih komponenti. Ovime se postiže mogućnost da se jedna po jedna komponenta izlože simulaciji i koriguju njeni parametri raspodele pojave otkaza. Ovim se pravi jedna aproksimacija te pojava otkaza afektujuće komponente smatra jednako verovatnom u svakom trenutku vremena. Ovo nije gruba greška usled toga što na dugi period simulacije nije od ključne važnosti kada je nastao otkaz afektujuće komponente pa je aproksimacija zadovoljavajuća.

Treći i poslednji korak ovog modela je simulacija pouzdanosti celokupnog sistema. Kako bi dobijeni parametri za svaku komponentu oslikavali realne verovatnoće otkaza, vremenske tačke kalkulacije pouzdanosti u simulaciji rada sistema moraju biti iste kao i u prethodnom algoritmu. Simulacija je prezentovana algoritmom na slici 3.60.



Slika 3.59. - Algoritam korekcije parametara sistema sa interaktivnim otkazima komponenti

Na slici 3.59. u algoritmu simulacije važi:

NumOfFailures - broj otkaza afektovane komponente,

G, B, A - parametri položaja, oblika i razmere raspodele afektovane komponente,

MaxFailures - vreme maksimalnog otkaza afektovane komponente,

CT - krajnje vreme kalkulacije,

Y - matrica interakcije

LastChange - vreme poslednje zamene/popravke afektovane komponente,

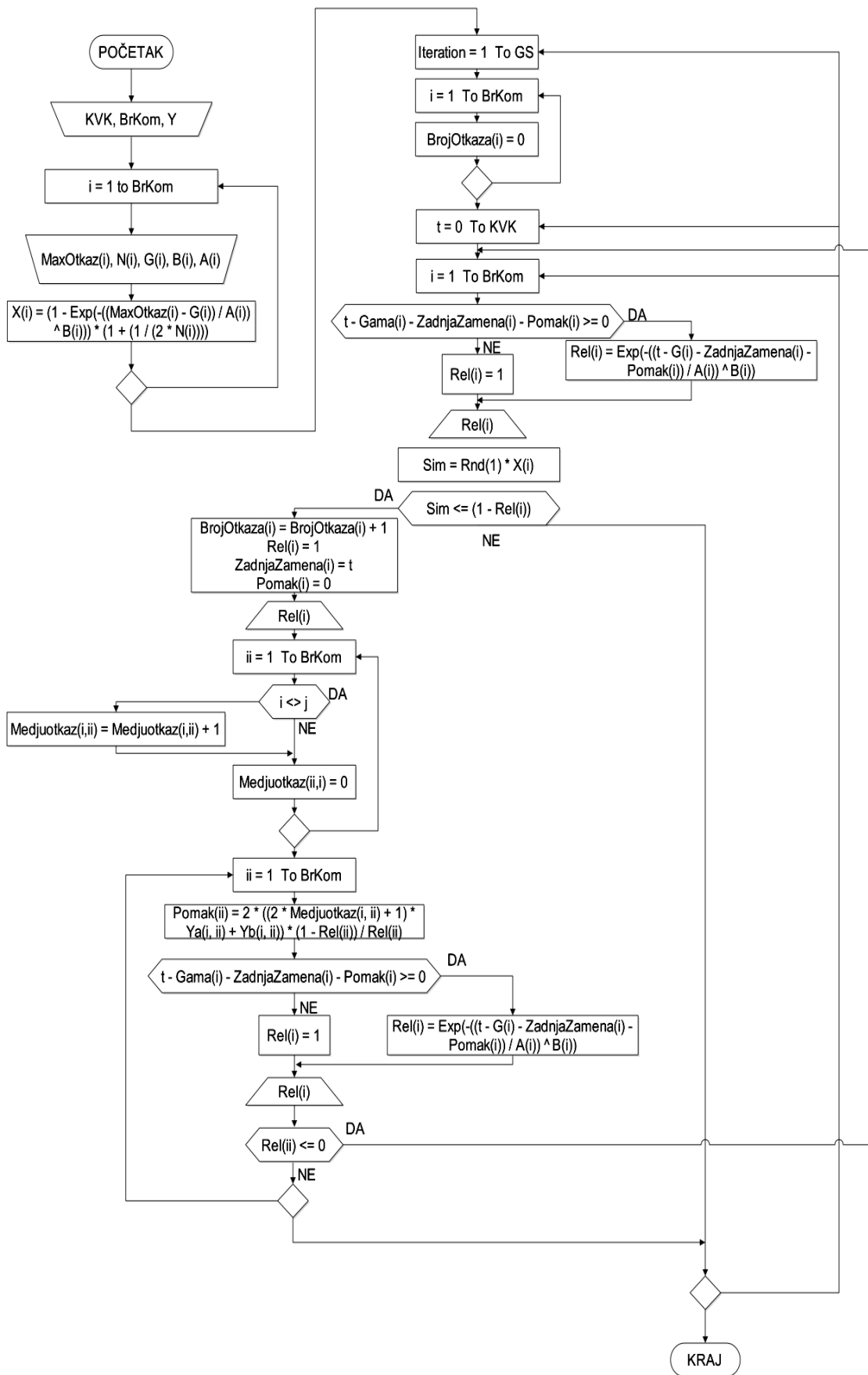
X - promenljiva koja određuje otkaz afektovane komponente,

Sim - pseudo-slučajni broj čija vrednost određuje otkaze komponente (podсистема),

Tp - vreme pomaka usled međuotkaza afektujućih komponenti,

Tp(i)- vreme pomaka usled međuotkaza afektujuće komponente *i*,

MSimNumFailures - srednji broj otkaza afektovane komponente tokom simulacije.



Slika 3.60. - Algoritam softvera simulacije pouzdanosti sistema bloka elektrane

Na slici 3.60. u algoritmu simulacije važi:

KVK - krajnje vreme kalkulacije,

BrKom - broj komponenti sistema,

Y - matrica interakcije,

MaxOtkaz - vreme maksimalnog otkaza afektovane komponente,

N(i) - broj otkaza komponente *i*,

G, B, A - parametri položaja, oblika i razmere raspodele,

GS - broj iteracija testa tj. broj godina simulacije rada sistema,

BrojOtkaza(i) - simulacioni broj otkaza komponente *i*,

Rel(i) - pouzdanost komponente *i*,

X - promenljiva koja određuje otkaz pojedine komponente,

Sim - pseudo-slučajni broj čija vrednost određuje otkaze komponente (podsistema),

Zadnja zamena - vreme poslednje zamene/popravke afektovane komponente,

Pomak(i)- vreme pomaka usled međuotkaza afektujuće komponente *i*,

Medjuotkaz - simulacioni broj međuotkaza afektujuće komponente.

4. EKSPLOATACIONA ISTRAŽIVANJA

Eksploaciona istraživanja odnosiće se na modelovanje sledećih sistema u termoelektranama:

- tračni transporter BTO sistema,
- rotorni bager,
- sistem blokova u termoelektranama.

Tračni transporteri su primer tehničkog sistema složenog po brojnosti komponenata kojih ima i po više hiljada. Radi boljeg sagledavanja efekata različitih načina održavanja i alokacije pouzdanosti razmatraće se tračni transporter BTO sistema na površinskom kopu uglja PD "Termoelektrane i kopovi Kostolac" doo, Kostolac. Posmatrani tračni transporter služi transport uglja od bagera do odlagališta te prilikom njenog otkaza dolazi do zastoja celog BTO sistema. Iz ovog razloga je neophodno da je nivo pouzdanosti tračnog transportera na visokom nivou.

Istraživanja ovog sistema su mnogobrojna i postoje u svim domenima. Ipak, novina je upravo simulacioni softver koji je teško oformiti za kompleksne tehničke sisteme. Ovaj rad se odnosi na sistem sastavljen od velikog broja elemenata ali ne i velikog broja vrsta elemenata, pa je simulaciju moguće izvršiti u razumnom roku za dati period operativnog vremena sistema koji se ispituje. Ovakav pristup je zbog složenosti algoritma simulacije do sada retko primenjivan, a potpuno nov na ovom tehničkom sistemu.

Model će omogućiti predikciju pouzdanosti i troškova celokupnog tehničkog sistema za veliki period operativnog vremena radi izvođenja zaključaka o najboljoj strategiji održavanja.

Rotorni bager je vitalni deo proizvodnog procesa i složen po svojoj strukturi i raznovrsnosti komponenata. Kako su u eksploataciji zastupljeni različiti modeli rotornih bagera razvijeni model pouzdanosti mora biti implementiran na način da ga je moguće upotrebiti i za druge rotorne bagere. U svrhu modelovanja biće razmatran sistem koji ima nešto veći broj otkaza - rotorni bager SRs 1200x24/4x0 (400kW) + VR koji radi na površinskom kopu uglja u Kolubari.

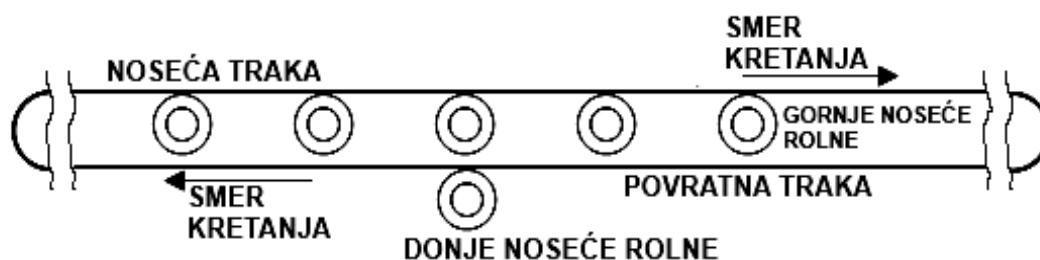
Sistem blokova termoelektrane biće posmatran na primeru blokova B1 i B2 PD "Termoelektrane i kopovi Kostolac" doo koji su locirani u mestu Drmno. Ovi podrazumevaju i modelovanje pouzdanosti mnogih složenih sistema unutar blokova poput turbogeneratora, parnog kotla, itd. kao i obavezno uključivanje interakcije među komponentama sistema kao faktora usled velike složenosti blokova kao tehničkih sistema.

4.1. ISTORIJSKI PODACI I DEKOMPOZICIJU TEHNIČKIH SISTEMA U TERMOELEKTRANAMA

4.1.1. TRAČNI TRANSPORTER SISTEMA BTO5 NA POVRŠINSKOM KOPU DRMNO U PD „TERMOELEKTRANE I KOPOVI KOSTOLAC“ DOO, KOSTOLAC

Tračni transporter se koristi za transport uglja od bagera do odlagališta, te čini redno vezani deo BTO5 sistema. Za bezotkazni rad tračnog transportera, a time i BTO sistema, neophodno je da su valjci ispravni, što iziskuje njihovu pouzdanost na što višem nivou. Potrebno je dakle doći do podataka o otkazima svih vrsta valjaka koji ulaze u sastav novog sistema tračnog transportera. Ove podatke je moguće naći u arhivi koja se odnosi na otkaze tračnih transportera na površinskom kopu.

Prvo valja razmotriti strukturu sistema tračnog transportera kako bi se došlo do selekcije potrebnih podataka. Sistem ima daleko najveći broj otkaza transportnih valjaka i može se simplifikovano posmatrati kao sistem redno vezanih valjaka tj. rolni. Šematski prikaz ovako posmatranog sistema tračnog transportera dat je na slici 4.1.



Slika 4.1. – Šematski prikaz tračnog transportera sa osnovnim delovima

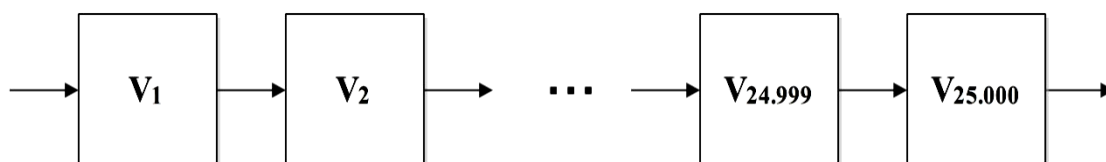
Izgled transportne trake BTO5 sistema data je na slici 4.2.

Za pouzdanost tračnog transportera u obzir će se uzimati otkazi valjaka jer su samo oni faktički najveći uzrok svih otkaza. Posmatrani tračni transporter je nov sistem na površinskom kopu TE KO Kostolac, pa se njegova pouzdanost može projektovati na osnovu znanja o otkazima valjaka na drugim tračnim transporterima na kopu. Uslovi rada ovih valjaka su slični a sistemi gotovo identični. Sistem posmatranog tračnog transportera čine valjci dva proizvođača: domaćeg proizvođača - **Prim** i stranog proizvođača - **Precismeca**. U sistem se tokom vremena putem zamene delova mogu uvrstiti i reparirani valjci ovih proizvođača. Za svaku od ove četiri vrste valjaka su prikupljeni podaci o vremenima otkaza (prilog 1). Kod svih vrsta valjaka su primetni dugi periodi bezotkaznog rada na početku eksploatacije. Na osnovu toga i ranijih teorijskih razmatranja zaključuje se da troparameterska Weibull-ova (W3) raspodela najopštije opisuje ovu zakonitost otkazivanja. Za razliku od nje, dvoparameterska raspodela ne uzima u obzir period bezotkaznog rada, tako da nije pogodna za upotrebu kod ovog modela.



Slika 4.2. – Izgled transportne trake BTO5 sistema

Sledeće, potrebno je da se formira blok dijagram pouzdanosti sistema tračnog transportera. On bi se mogao posmatrati kao sistem sastavljen iz 4 podsistema gde svaki od njih predstavlja po jednu od 4 vrste valjaka, ali to bi bila simplifikovana slika sistema i radi mogućnosti da se predvide postupci otkaza i zamene pojedinačnih valjaka potrebno je svaki od njih zasebno predstaviti blok dijagramom pouzdanosti. Ipak kako se broj valjaka ne menja, ali usled zamene onih koji otkazu menjaju se vrste valjaka to je sistem u stanju stalne promene valjaka pa ga je najbolje predstaviti kao niz od 25.000 redno vezanih valjaka njegove karakteristike pouzdanosti će odrediti o kojoj vrsti valjka je reč. Posledično, blok dijagram bi mogao biti predstavljen kao na slici 4.3.



Slika 4.3. – Blok dijagram pouzdanosti transportne trake

4.1.2. ROTORNI BAGER 1200X24/4X0 (400KW) + VR KOJI RADI NA POVRŠINSKOM KOPU UGLJA RB KOLUBARA

Posmatrani tehnički sistem rotorni bager SRs 1200x24/4x0 (400kW) + VR radi na površinskom kopu uglja Polje D, RB Kolubara. Njegov izgled dat je na slici 4.4.

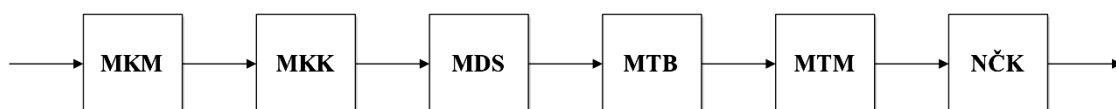


Slika 4.4. – rotorni bager SRs 1200x24/4x0 (400kW) + VR u toku eksploatacije jalovine

Prema karti otkaza formirana je vremenska slika stanja za 6 podсистema rotornog bagera. Dakle sistem je prema evidenciji otkaza neophodno dekomponovati na:

1. MKM – mehanizam za kopanje materijala
2. MKK – mehanizam za kružno kretanje
3. MDS – mehanizam za dizanje strele rotora
4. MTB – mehanizam za transport bagera
5. MTM – mehanizam za transport materijala
6. NČK – noseća čelična konstrukcija

Blok dijagram pouzdanosti sistema je predstavljen na slici 4.5.



Slika 4.5.- Blok dijagram pouzdanosti rotornog bagera SRs 1200x24/4x0 (400kW)+VR

Vremenska slika stanja svih 6 podsistema/komponenti sistema rotornog bagera je prezentovana u prilogu 2.

4.1.3. BLOKOVI B1 I B2 TERMOELEKTRANE KOSTOLAC B

Sistemi blokova B1 i B2 se moraju posmatrati kao nezavisni sistemi i kao takvi modelovati. Izgled termoelektrane Kostolac B sa blokovima B1 i B2 dat je na slici 4.6.



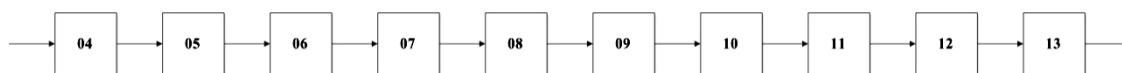
Slika 4.6.- Termoelektrana Kostolac B, blokovi B1 i B2

Baza podataka o otkazima potiče od 1987. godine za blok B1 i 1991. godine za blok B2. Broj podataka je ogroman i obuhvata po preko 2.000 promena radnog stanja za svaki od blokova. Ova baza podataka je sačinjena tako da su podaci klasifikovani na 13 različitih vrsta podataka smeštenih u .xls fajlove pa je baratanje njima dostupno preko MS Excel softvera. Baza podataka podrazumeva evidenciju pogonskih stanja koja je klasifikovana na sledeći način:

- mreža (rad sistema) - 00,
- hladna rezerva - 01,
- remont - 02,

- nega - 03,
- cevni sistem sa napojnim pumpama - 04.
- kotao - 05,
- turbina - 06,
- generator - 07,
- elektro zaštita - 08,
- loženje - 09,
- doprema uglja - 10,
- doprema mazuta - 11,
- ostali uređaji - 12,
- ispad mreže - 13.

Iako bi dalje dekomponovanje verovatno dalo preciznije podatke i omogućilo bolje modelovanje pouzdanosti, način prikupljanja podataka iziskuje dekomponovanje na osnovu klasifikacije pogonskih stanja koja je postojeća. Svako drugačije prikupljanje podataka koje može danas biti efikasnije dovodi u sumnju broj otkaza po komponenti čime se preciznost podela ozbiljno narušava a pojedine komponente verovatno dugo ne bi imale niti jedan otkaz. Takođe, ovakav, precizniji način sakupljanja otkaza bi mogao da se sprovede za period od samo par godina kako da bi broj otkaza po komponenti još više bio redukovan. Nužno, moramo se osloniti na podatke koje imamo kao jedini mogući izvor za dekomponovanje i modelovanje sistema. U skladu sa izrečenim blok dijagram pouzdanosti jednog bloka (identičan za oba bloka elektrane) prezentovan je na slici 4.7.



Slika 4.7. - Blok dijagram pouzdanosti bloka elektrane Kostolac B

Ukupna pouzdanost bloka termoelektrane može se izraziti jednačinom:

$$R_S = R_{04} \cdot R_{05} \cdot R_{06} \cdot R_{07} \cdot R_{08} \cdot R_{09} \cdot R_{10} \cdot R_{11} \cdot R_{12} \cdot R_{13} \quad (4.1.)$$

ili u dinamici vremena posmatrano da pouzdanost glasi:

$$R_S(\tau) = R_{04}(\tau) \cdot R_{05}(\tau) \cdot R_{06}(\tau) \cdot R_{07}(\tau) \cdot R_{08}(\tau) \cdot R_{09}(\tau) \cdot R_{10}(\tau) \cdot R_{11}(\tau) \cdot R_{12}(\tau) \cdot R_{13}(\tau) \quad (4.2.)$$

4.2. IMPLEMENTACIJA SOPSTVENIH MODELA OBEZBEĐENJA POUZDANOSTI SLOŽENIH POSTROJENJA U TERMoeLEKTRANAMA

4.2.1. TRAČNI TRANSPORTER SISTEMA BTO5 NA POVRŠINSKOM KOPU DRMNO U PD "TERMoeLEKTRANE I KOPOVI KOSTOLAC" DOO, KOSTOLAC

Operativno vreme rada BTO sistema a time i tračnog transportera je od ukupnog vremena umanjeno za po sat vremena planskog zastoja prilikom primopredaje smene i jednu smenu (8 časova) tokom sedmice radi preventivnih akcija održavanja. Time je

ukupno maksimalno operativno vreme BTO sistema 139 časova nedeljno. Posmatrani sistem tračnog transporterera je nov. Otkazi ovog sistema su u potpunosti povezani sa otkazima valjaka na ovom sistemu. Šematski prikaz transportne trake već je dat na slici 4.1. Kao što je već rečeno za pouzdanost tračnog transporterera u obzir će se uzimati otkazi valjaka a blok dijagram pouzdanosti je dat na slici 4.2. Posmatranje traka je nov sistem na površinskom kopu PD "Termoelektrane i kopovi Kostolac" doo, Kostolac, pa se njegova pouzdanost može projektovati na osnovu znanja o otkazima valjaka na drugim tračnim transporterima na kopu. Uslovi rada ovih valjaka su slični, a sistemi gotovo identični. Sistem posmatrane transportne trake čine valjci dva proizvođača: domaćeg proizvođača - Prim i stranog proizvođača - Precismeca. Radi se dakle o sistemu sa velikim brojem redno vezanih komponenata - valjaka.

Pretpostavke modela su sledeće:

- sistem se održava kombinovano, tj. korektivno po otkaz komponente sistema a preventivno održavanje je moguće nakon perioda jedne smene,
- valjci koji otkazu se zamenjuju novim ili repariranim valjcima,
- valjci istog proizvođača imaju iste karakteristike pouzdanosti,
- sistem tračnog transporterera nov i početni broj valjaka je 15625 Primovih novih valjaka i 9375 Precismeca novih valjaka,
- mogućnost otkazivanja svakog valjka se zasebno proračunava te se pouzdanost i zamena svakog valjka zasebno simuliraju.

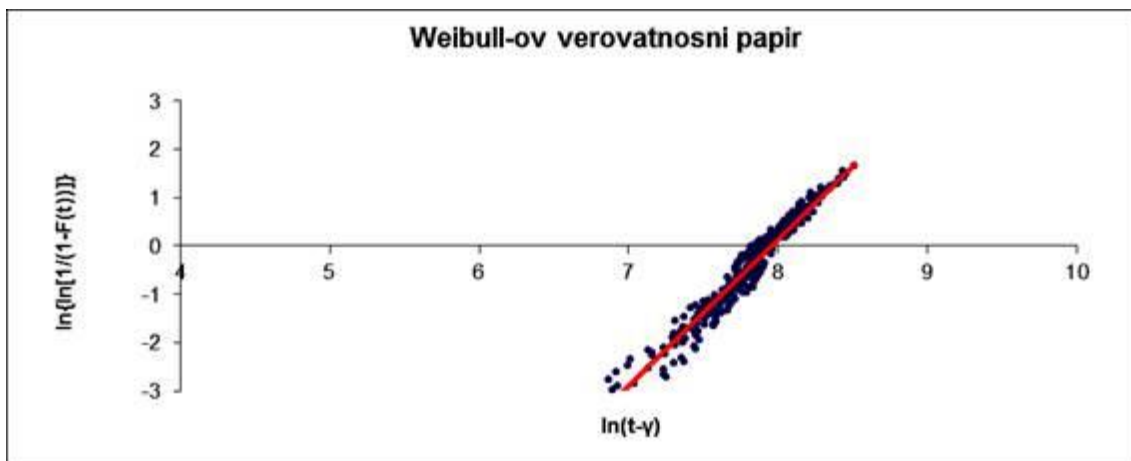
Model razvijen u poglavlju 3.3.5. je podesan za primenu na ovom tehničkom sistemu i zasniva se na proračunu parametara W3 raspodele za svaku vrstu valjka kao i na algoritmima simulacije pouzdanosti sistema i zatim na slikama 3.49. i 3.50. u kojima se razmatraju opcije korektivnog i kombinovanog održavanja respektivno.

Prvi korak proračuna parametara W3 raspodele jeste određivanje parametra položaja γz na koji će biti primenjena grafička metoda. Rukovodeći se podacima iz priloga 1 možemo formirati tabelu 4.1. sa podacima potrebnim za proračun gde dobijamo podatke o srednjem vremenu do pojave otkaza *MTTF* i ukupnom broju otkaza svake vrste valjka za obzervirani period vremena.

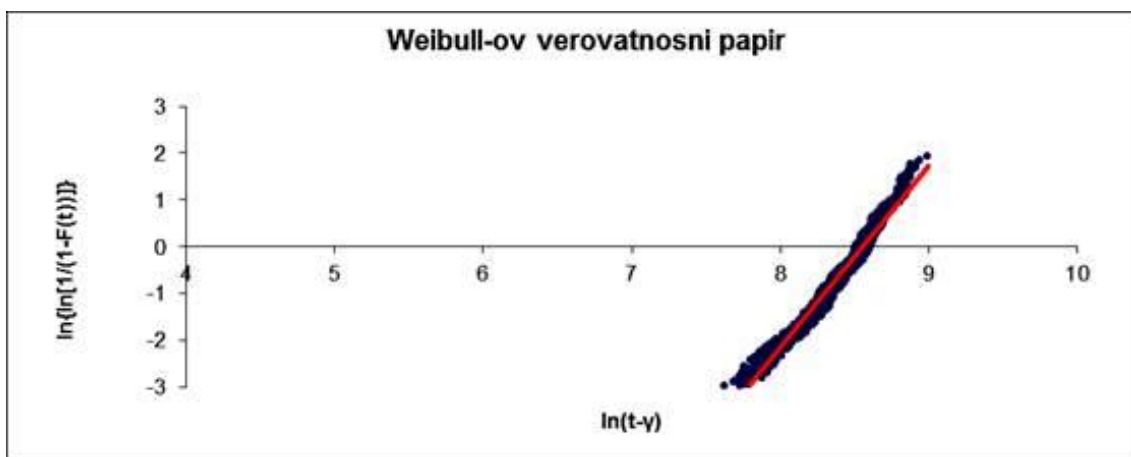
	PRIM novi	PRIM reparirani	PRECISMECA novi	PRECISMECA reparirani
Broj otkaza	292	1.435	116	676
<i>MTTF</i>	37.455,216	29.998,758	47.139,84	39.929,5

Tabela 4.1. - Broj otkaza i *MTTF* za sve vrste valjaka

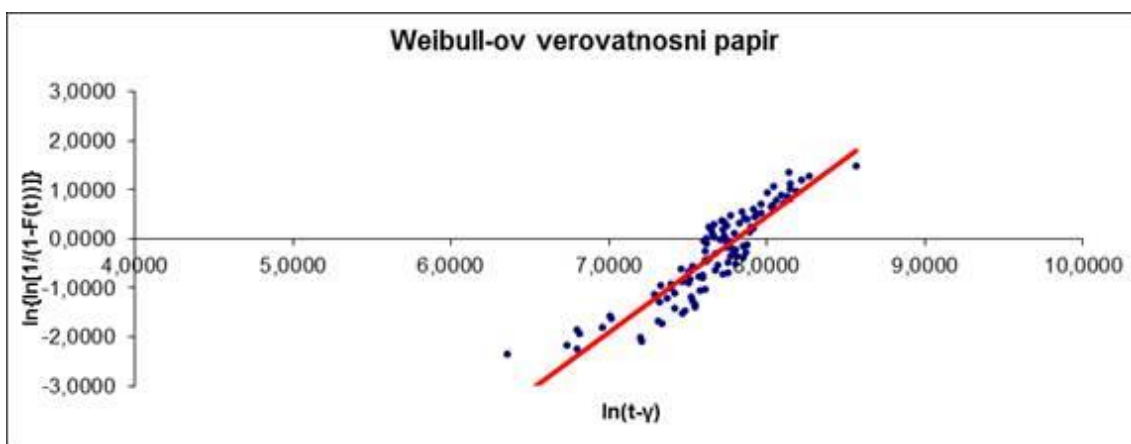
Sledi izrada Vejbulovog verovatnosnog papira gde se svaki od podataka o otkazu postavlja u koordinatni sistem prema formulama 3.95. i 3.96. i dobijaju nove koordinatne tačke za svaki otkaz sa vrednostima x_i i y_i . Formiranjem verovatnosnog papira se menja vrednost za parametar γ sve dok aproksimativna linija drugog stepena ne postane linearna. Dobijaju se sledeći grafikoni za sve 4 vrste valjaka prezentovani na slikama 4.8. do 4.11.



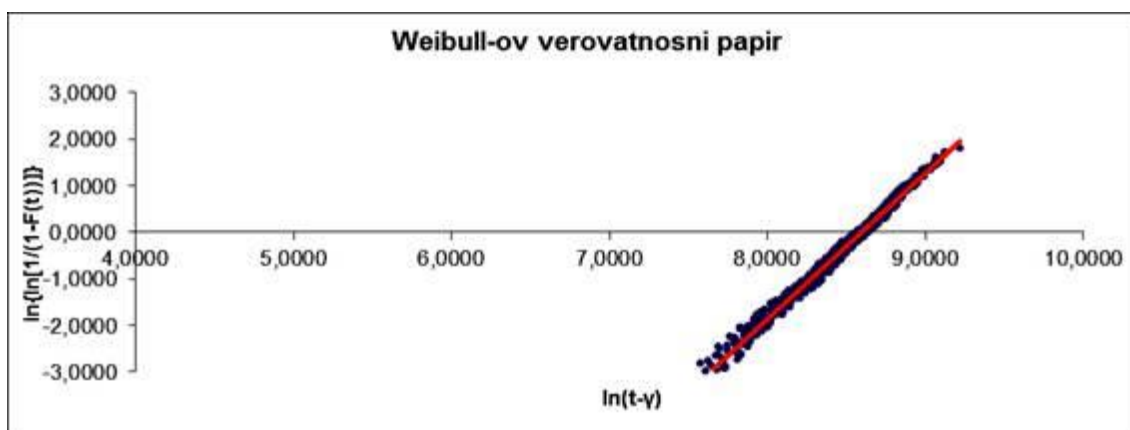
Slika 4.8. - Wejbulov verovatnosni papir za nove valjke proizvođača PRIM, Kostolac ($\gamma = 35.000 \text{ h}$)



Slika 4.9. - Wejbulov verovatnosni papir za reparirane valjke proizvođača PRIM, Kostolac ($\gamma = 25.000 \text{ h}$)



Slika 4.10. - Wejbulov verovatnosni papir za nove valjke proizvođača PRECISMECA ($\gamma = 45.000 \text{ h}$)



Slika 4.11. - Wejbulov verovatnosni papir za reparirane valjke proizvođača PRECISMECA ($\gamma = 35.000$ h)

Dalje, proračun se nastavlja proračunom parametara β i η putem primene adekvatnog obrasca od navedenih od 3.63. do 3.69. koje treba akomodirati za W3 raspodelu. Tako za **Primove nove valjke** prema formuli 3.67. važi:

$$\frac{\eta}{37.455,216 - 35.000} = 1,1 - 0,04 \cdot (\beta - 3), \quad (4.3.)$$

pa je odatle prema 3.70.

$$\beta = \left(\frac{1,1 - \frac{\eta}{37.455,216 - 35.000}}{0,04} \right) + 3 \quad (4.4.)$$

Iz baze podataka se dobija da je maksimalno vreme otkaza ($t_{\max} = 39.969$ radnih časova) Zatim prema metodi simetrične kumulativne gustine otkaza (Symmetrical CDF method) i formuli 3.73. važi

$$\beta = \log_{\left(\frac{39.969-35.000}{\eta}\right)} \left(-\ln \left(\frac{1}{292 \cdot 2} \right) \right) \quad (4.5.)$$

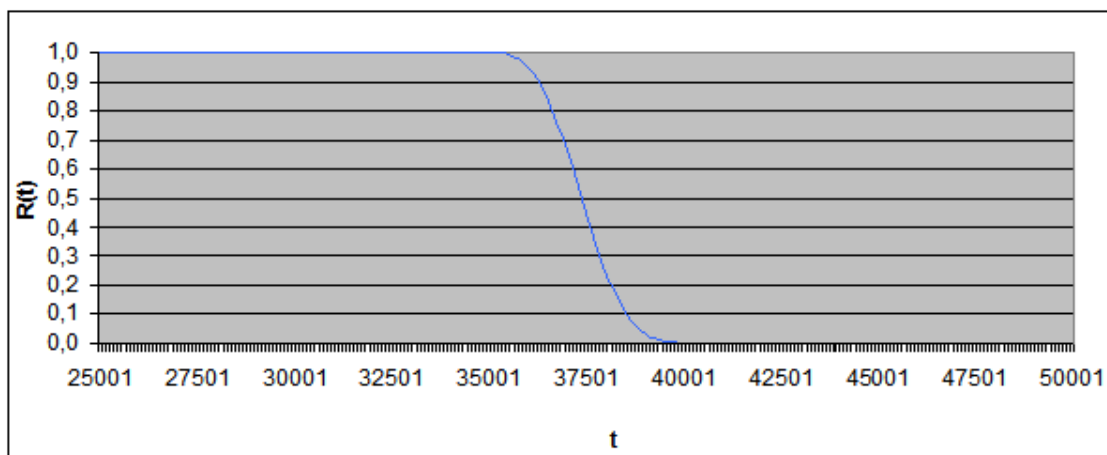
Izjednačavanjem prethodne jednačine 4.5. i jednačine 4.4. dobijamo:

$$\left(\frac{1,1 - \frac{\eta}{37.455,216 - 35.000}}{0,04} \right) + 3 = \log_{\left(\frac{39.969-35.000}{\eta}\right)} \left(-\ln \left(\frac{1}{292 \cdot 2} \right) \right). \quad (4.6.)$$

Softverskim, numeričkim rešavanjem prethodne jednakosti se dobija vrednost parametara $\eta = 2.697,668$, a parametar $\beta = 3,031$.

Prema tome funkcija pouzdanosti za nove valjke proizvođača PRIM (Kostolac) glasi (grafik na slici 4.12.):

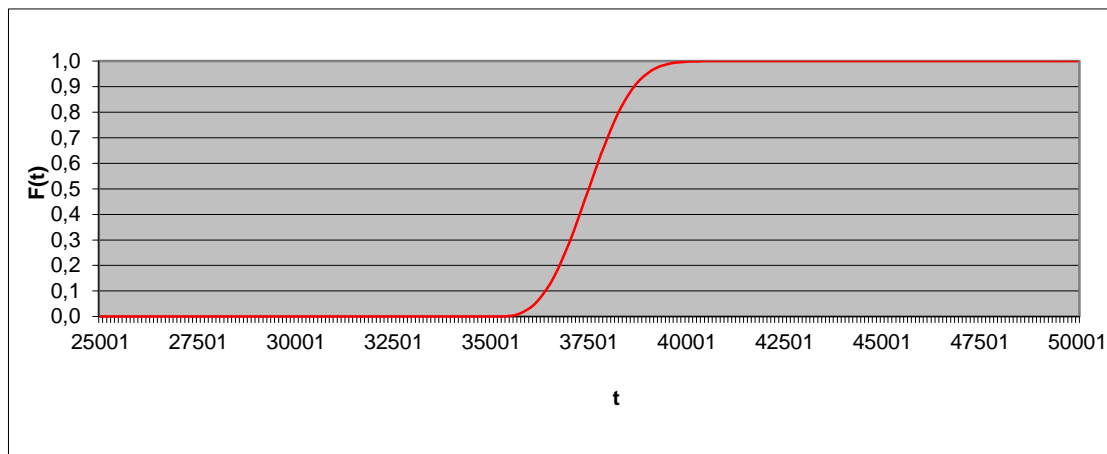
$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-35.000}{2.697,668}\right)} \quad (4.7.)$$



Slika 4.12. – Funkcija pouzdanosti za nove valjke PRIM, Kostolac

Funkcija nepouzdanosti (grafik na slici 4.13.):

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-35000}{2697,668}\right)^{3,031}} \quad (4.8.)$$

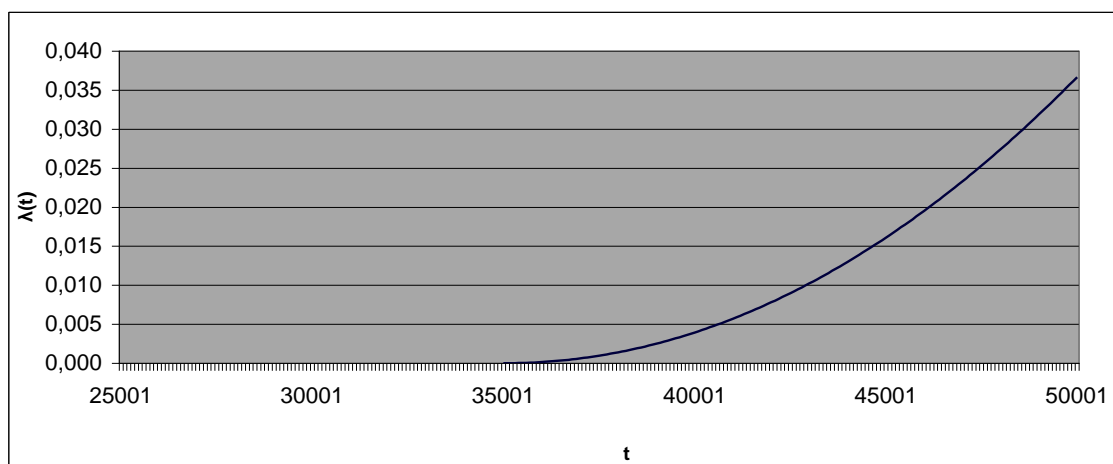


Slika 4.13. - Funkcija nepouzdanosti za nove valjke PRIM, Kostolac

Funkcija intenziteta otkaza za nove valjke proizvođača Prim glasi:

$$\lambda(t) = \frac{3,031}{2.697,668} \left(\frac{t-35.000}{2.697,668}\right)^{3,031-1} \quad (4.9.)$$

Grafik funkcije intenziteta otkaza je dat na slici 4.14.

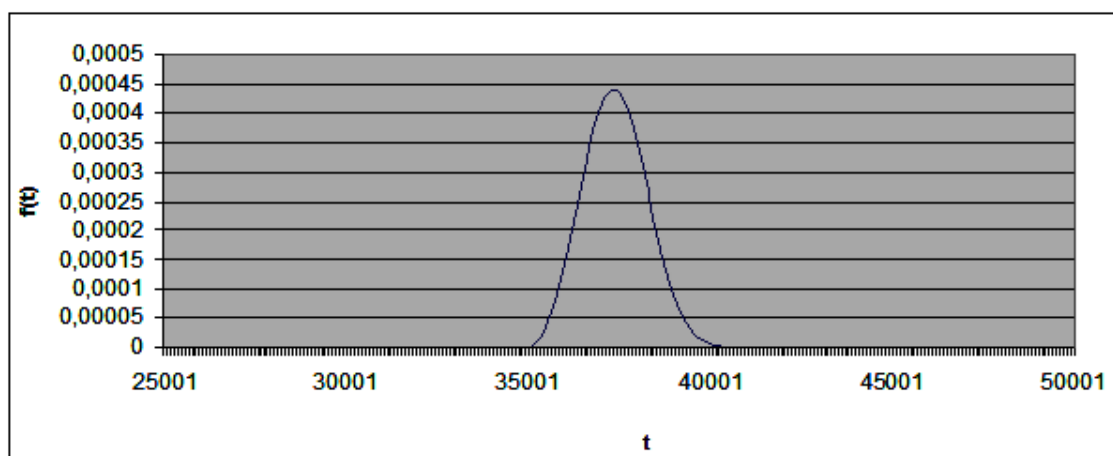


Slika 4.14. – Funkcija intenziteta otkaza za nove valjke PRIM, Kostolac

Funkcija raspodele otkaza glasi:

$$f(t) = \frac{3,031}{2697,668} \left(\frac{t-35000}{2697,668} \right)^{3,031-1} e^{-\left(\frac{t-35000}{2697,668} \right)^{3,031}}, \quad (4.10.)$$

a njen je izgled prikazan na slici 4.15.



Slika 4.15. – Funkcija raspodele otkaza za nove valjke PRIM, Kostolac

Kada su u pitanju **reparirani valjci proizvođača Prim** s obzirom na način otkaza očekivana vrednost za parametar β je između 3 i 4, pa zato važi aproksimacija:

$$\frac{\eta}{29.998,758 - 25.000} = 1,1 - 0,04 \cdot (\beta - 3), \quad (4.11.)$$

pa je parametar oblika raspodele

$$\beta = \left(\frac{1,1 - \frac{\eta}{29.998,758 - 25.000}}{0,04} \right) + 3. \quad (4.12.)$$

Na osnovu broja otkaza u bazi podataka za Primove reparirane valjke (1435) za posmatrani period vremena pouzdanost nakon maksimalnog izmerenog vremena otkaza ($t_{\max} = 34.997$ radnih časova)

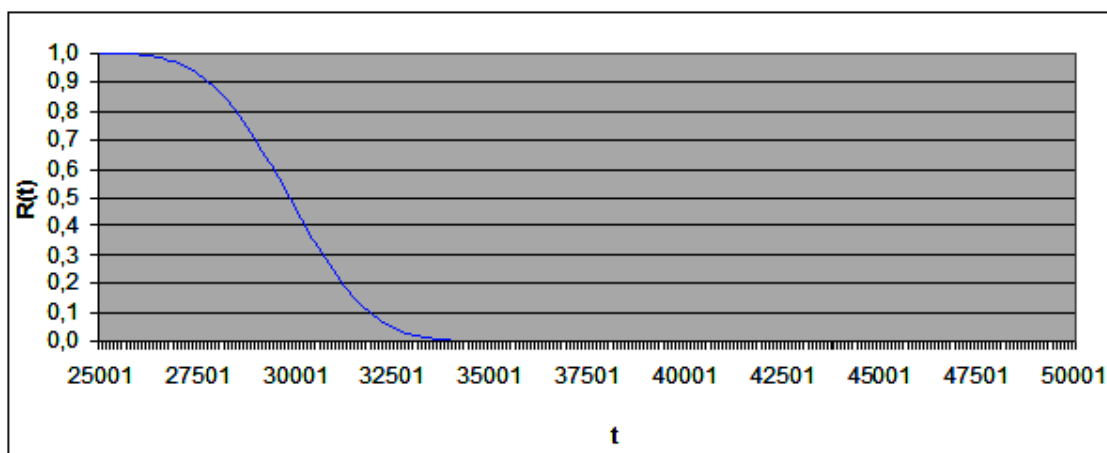
$$\beta = \log_{\left(\frac{34.997-25.000}{\eta}\right)} \left(-\ln \left(\frac{1}{1435 \cdot 2} \right) \right). \quad (4.13.)$$

Izjednačavanjem prethodne dve jednačine dobijamo:

$$\left(\frac{1,1 - \frac{\eta}{29.998,758}}{0,04} \right) + 3 = \log_{\left(\frac{34.997-25.000}{\eta}\right)} \left(-\ln \left(\frac{1}{1435 \cdot 2} \right) \right). \quad (4.14.)$$

Rešavanjem prethodne jednačine se dobija da je parametar $\eta = 5.420,714$, a parametar $\beta = 3,39$. Prema ovome funkcija pouzdanosti (slika 4.16.) za reparirane valjke proizvođača Prim glasi:

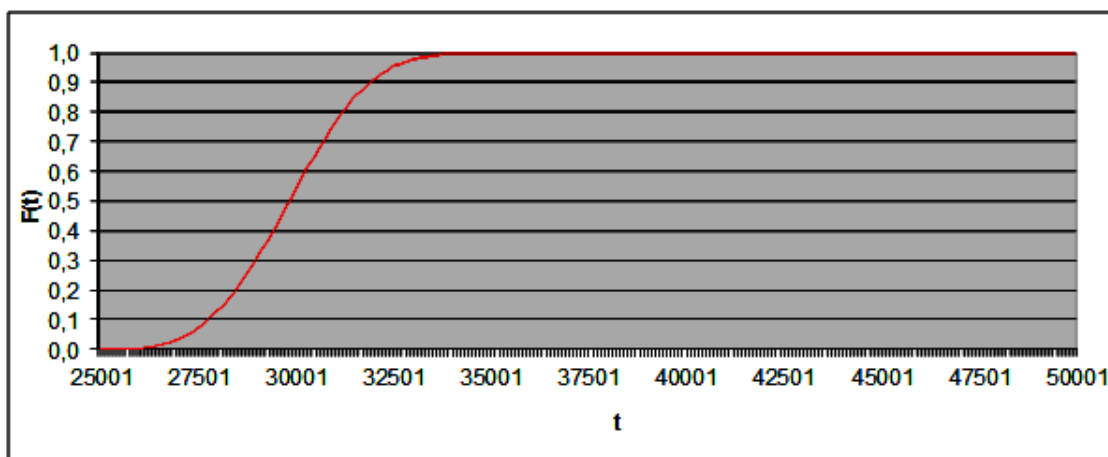
$$R(t) = e^{\left(\frac{t-25.000}{5.420,714}\right)^{3,39}} \quad (4.15.)$$



Slika 4.16. – Funkcija pouzdanosti za reparirane valjke PRIM, Kostolac

Funkcija nepouzdanosti (grafik na slici 4.17.):

$$F(t) = 1 - e^{\left(\frac{t-25.000}{5.420,714}\right)^{3,39}} \quad (4.16.)$$

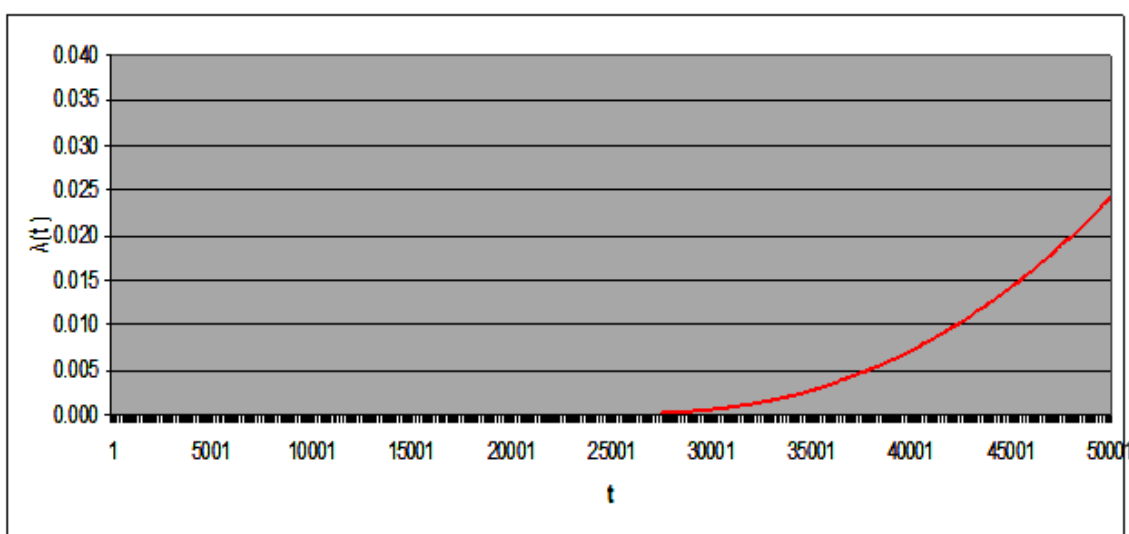


Slika 4.17. – Funkcija nepouzdanosti za reparirane valjke PRIM, Kostolac

Funkcija intenziteta otkaza glasi:

$$\lambda(t) = \frac{3,39}{5.420,714} \left(\frac{t - 25000}{5.420,714} \right)^{3,39-1}, \quad (4.17.)$$

dok je grafik funkcije intenziteta otkaza dat na slici 4.18.

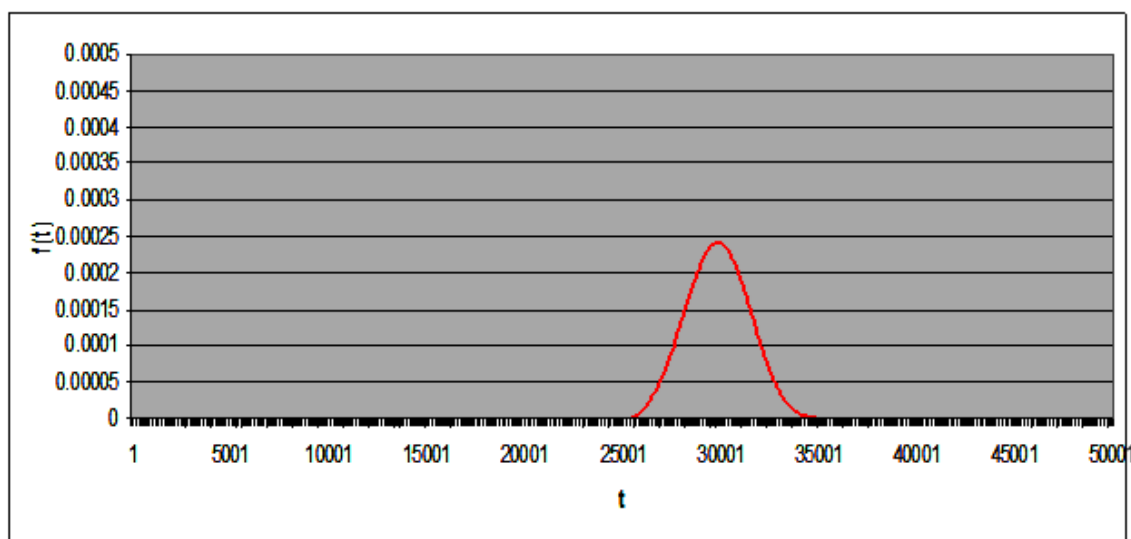


Slika 4.18. – Funkcija intenziteta otkaza za reparirane valjke PRIM, Kostolac

Funkcija raspodele otkaza glasi:

$$f(t) = \frac{3.39}{5.420,714} \left(\frac{t - 25000}{5.420,714} \right)^{3.39-1} e^{-\left(\frac{t-25000}{5.420,714} \right)^{3.39}} \quad (4.18.)$$

a izgled funkcije raspodele otkaza je prezentovan na slici 4.19.



Slika 4.19. – Funkcija raspodele otkaza za reparirane valjke PRIM, Kostolac

Za slučaj **novih valjaka proizvođača Precismeca** očekivana vrednost za parametar β je između 2 i 2,5 a $MTTF = 47.139,84$ te važi aproksimacija:

$$\frac{\eta}{47.139,84 - 45.000} = 1,5 - 0,06 \cdot (\beta - 2), \quad (4.19.)$$

pa je odatle

$$\beta = \left(\frac{1,5 - \frac{\eta}{(47.139,84 - 45.000)}}{0,06} \right) + 2. \quad (4.20.)$$

Na osnovu broja otkaza za strane nove valjke (116) za posmatrani period vremena pouzdanost nakon maksimalnog izmerenog vremena otkaza ($t_{\max} = 49.998$ radnih časova)

Kako je

$$\beta = \log_{\left(\frac{49.998 - 45.000}{\eta}\right)} \left(-\ln \left(\frac{1}{116 \cdot 2} \right) \right). \quad (4.21.)$$

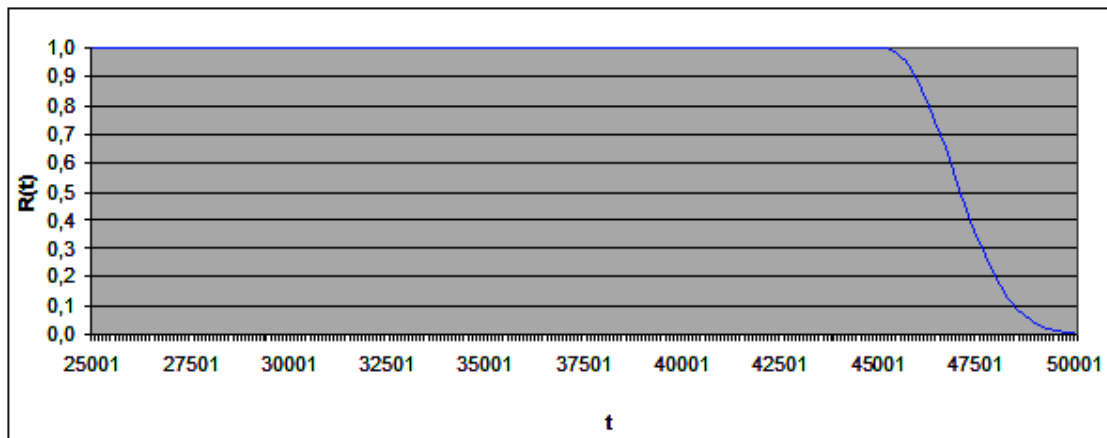
Sledi:

$$\left(\frac{1,1 - \frac{\eta}{(47.139,84 - 45.000)}}{0,06} \right) + 2 = \log_{\left(\frac{t_{\max} - \gamma}{\eta}\right)} \left(-\ln \left(\frac{1}{116 \cdot 2} \right) \right). \quad (4.22.)$$

Rešavanjem prethodne jednačine se dobija da je parametar $\eta = 2.417,9$, a parametar $\beta = 2,3$. Prema tome funkcija pouzdanosti za nove valjke stranog proizvođača glasi:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-45.000}{2.417,9}\right)^{2,3}} \quad (4.23.)$$

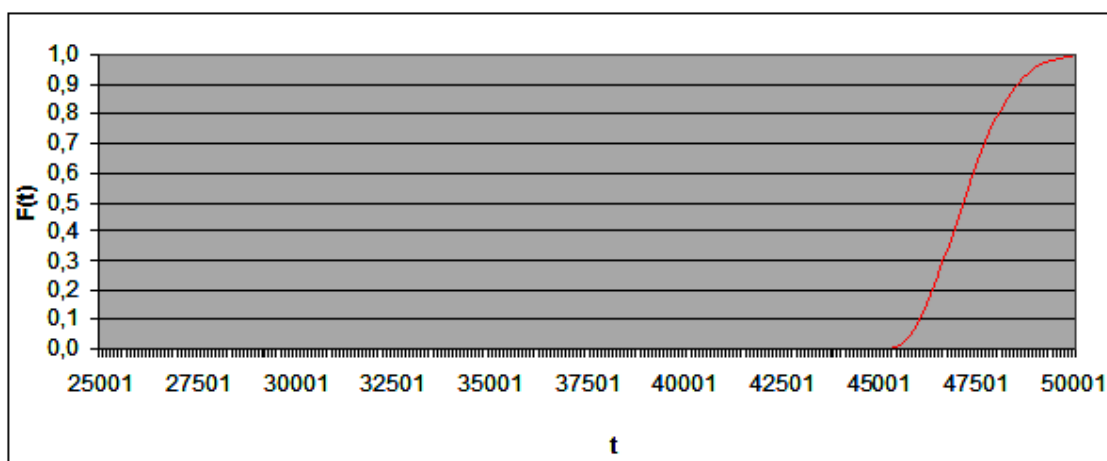
a njen grafik izgleda kao na slici 4.20.



Slika 4.20. – Funkcija pouzdanosti za nove valjke stranog proizvođača - PRECISMECA

Funkcija nepouzdanosti (grafik na slici 4.21.):

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-25.000}{5.420,714}\right)^{3,39}} \quad (4.24.)$$



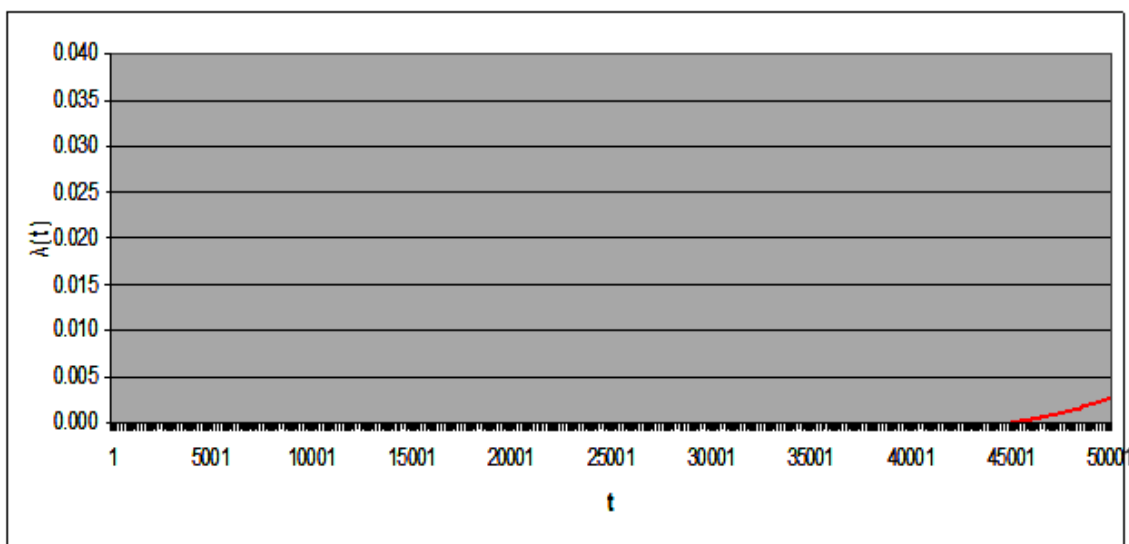
Slika 4.21. – Funkcija nepouzdanosti za nove valjke proizvođača PRECISMECA

Ovime su dobijene vrednosti na kojima je kasnije moguće zasnivati simulacione modele.

Funkcija intenziteta otkaza glasi:

$$\lambda(t) = \frac{2,3}{2417,9} \left(\frac{t - 45000}{2417,9} \right)^{2,3}, \quad (4.25.)$$

dok je grafik funkcije intenziteta otkaza dat na slici 4.22.

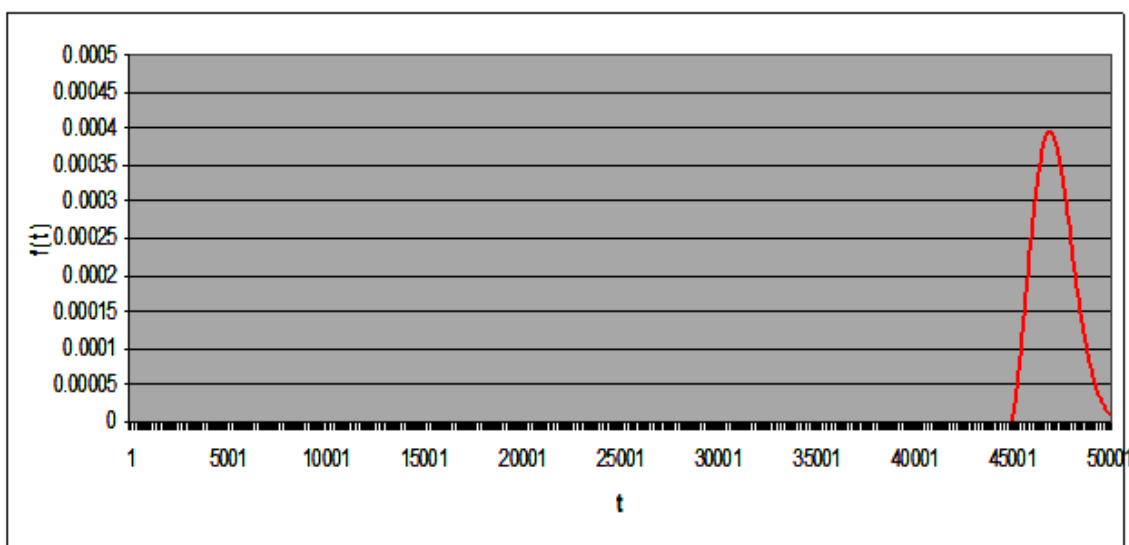


Slika 4.22. – Funkcija intenziteta otkaza za nove valjke proizvođača Precismeca

Funkcija raspodele otkaza glasi:

$$f(t) = \frac{2,3}{2.417,9} \left(\frac{t - 45.000}{2.417,9} \right)^{2,3-1} e^{-\left(\frac{t-45.000}{2417,9} \right)^{2,3}} \quad (4.26.)$$

a izgled funkcije raspodele otkaza je prezentovan na slici 4.23.



Slika 4.23. – Funkcija raspodele otkaza za nove valjke proizvođača Precismeca

Za **reparirane valjke proizvođača Precismeca** $MTTF = 39.929,5$ a očekivana vrednost za parametar β je između 3 i 4, pa zato važi aproksimacija:

$$\frac{\eta}{39.929,5 - 35.000} = 1,1 - 0,04 \cdot (\beta - 3), \quad (4.27.)$$

pa je

$$\beta = \left(\frac{1,1 - \frac{\eta}{(39.929,5 - 35.000)}}{0,04} \right) + 3. \quad (4.28.)$$

Na osnovu broja otkaza za strane reparirane valjke (676) za posmatrani period vremena pouzdanost nakon maksimalnog izmerenog vremena otkaza ($t_{\max} = 44.995$ radnih časova) te izvodimo da je

$$\beta = \log_{\left(\frac{44.995 - 35.000}{\eta}\right)} \left(-\ln \left(\frac{1}{676 \cdot 2} \right) \right). \quad (4.29.)$$

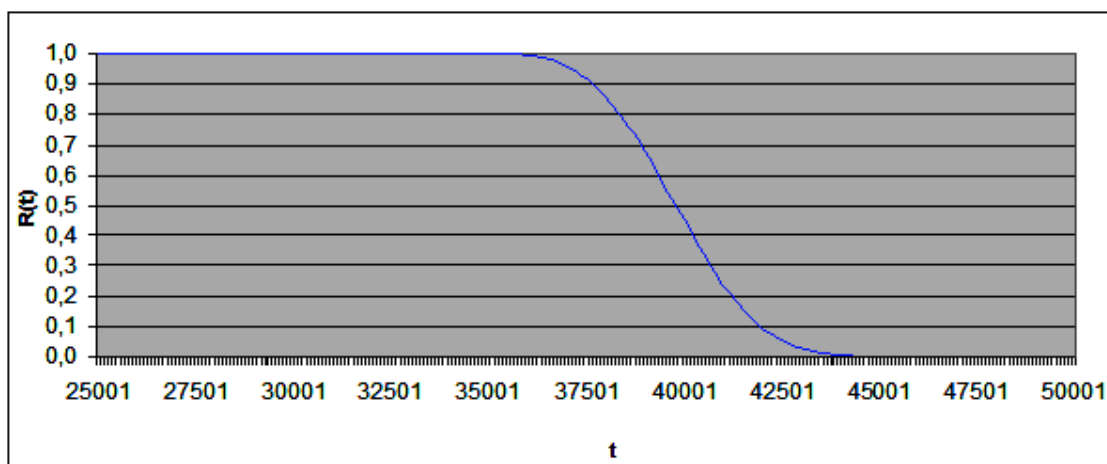
Posledično:

$$\left(\frac{1,1 - \frac{\eta}{(39.929,5 - 35.000)}}{0,04} \right) + 3 = \log_{\left(\frac{44.995 - 35.000}{\eta}\right)} \left(-\ln \left(\frac{1}{676 \cdot 2} \right) \right). \quad (4.30.)$$

Rešavanjem prethodne jednačine se dobija da je parametar $\eta = 5.384,33$, a parametar $\beta = 3,19$ pa funkcija pouzdanosti za reparirane valjke stranog proizvođača glasi:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t - 35.000}{538,33}\right)^{3,19}} \quad (4.31.)$$

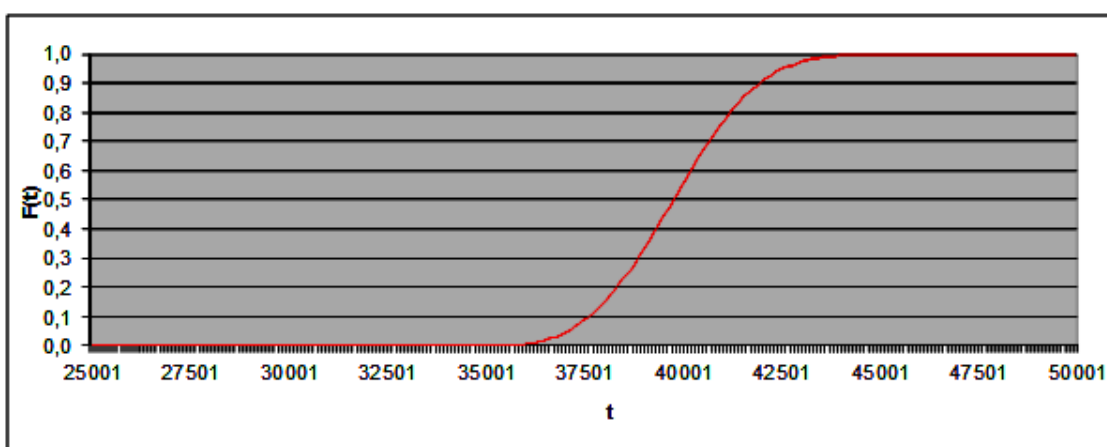
a njen grafik izgleda kao na slici 4.24.



Slika 4.24. – Funkcija pouzdanosti za reparirane valjke proizvođača Precismeca

Funkcija nepouzdanosti (grafik na slici 4.25.):

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-35.000}{538,33}\right)^{3,19}} \quad (4.32.)$$

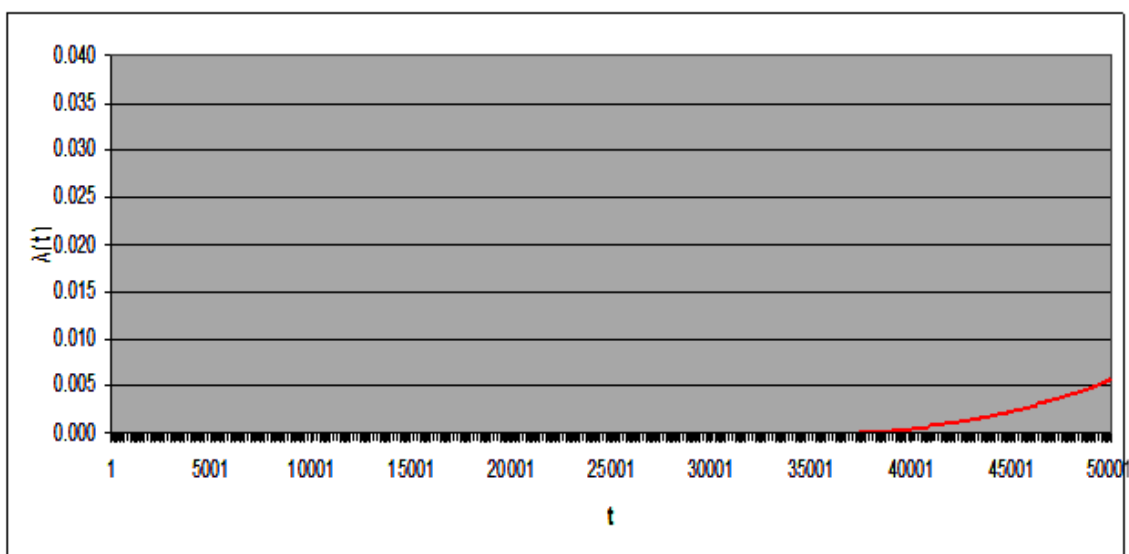


Slika 4.25. – Funkcija nepouzdanosti za reparirane valjke proizvođača Precismeca

Funkcija intenziteta otkaza glasi:

$$\lambda(t) = \frac{3,19}{5.384,33} \left(\frac{t-35.000}{5.384,33}\right)^{3,19-1}, \quad (4.33.)$$

dok je grafik funkcije intenziteta otkaza dat na slici 4.26.

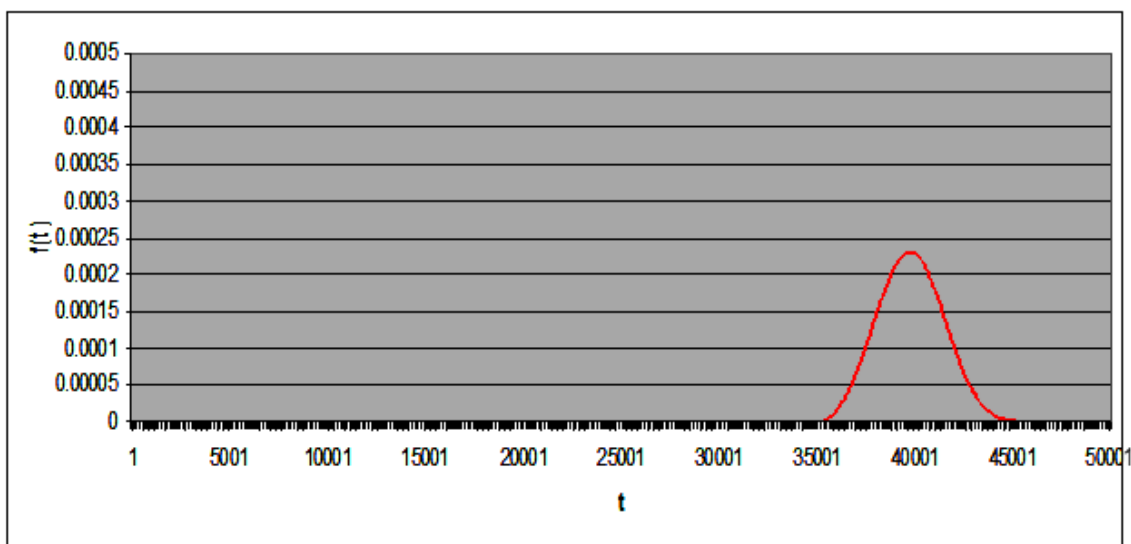


Slika 4.26. – Funkcije intenziteta otkaza za reparirane valjke proizvođača Precismeca

Funkcija raspodele otkaza glasi:

$$f(t) = \frac{3,19}{5.384,32} \left(\frac{t-35.000}{5.384,32} \right)^{3,19-1} e^{-\left(\frac{t-35.000}{5.384,32} \right)^{3,19}} \quad (4.34.)$$

a izgled funkcije teorijske raspodele otkaza je prezentovan na slici 4.27.

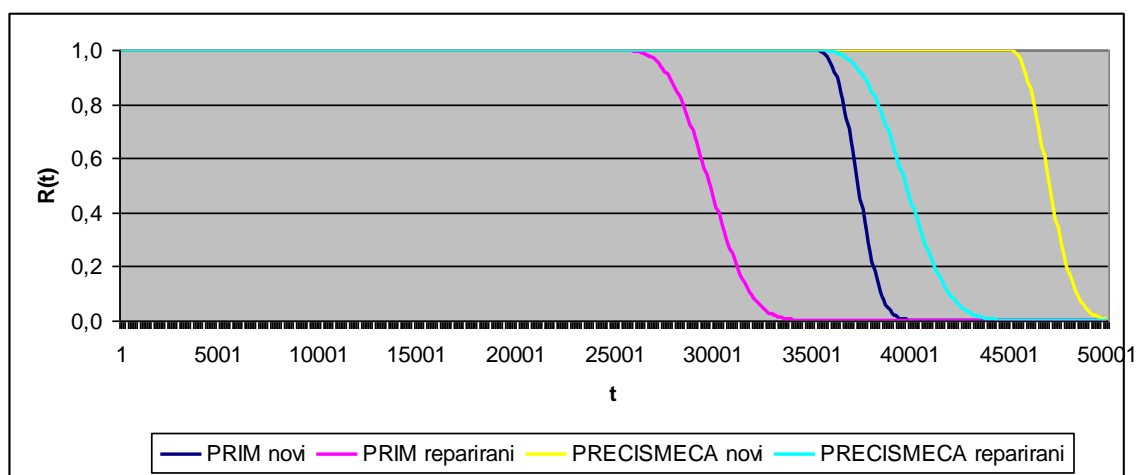
Slika 4.27. – Funkcija teorijske raspodele otkaza za reparirane valjke proizvođača
Precismeca

Parametri funkcija pouzdanosti za sve valjke prikazani su u tabeli 4.2.

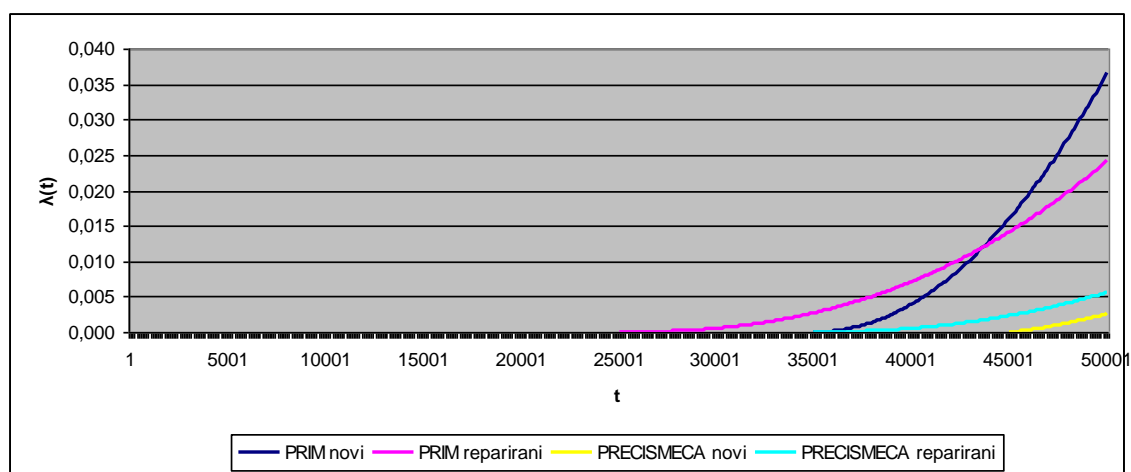
	PRIM novi	PRIM reparirani	PRECISMECA novi	PRECISMECA reparirani
$\gamma(h)$	35.000	25.000	45.000	35.000
$\eta(h)$	2.697,66789281524	5.420,71356429045	2.417,8933786018	5.384,32288862073
β	3,031254239	3,38969522057959	2,33427994154341	3,19333737723255

Tabela 4.2. - Parametri funkcija pouzdanosti za sve valjke

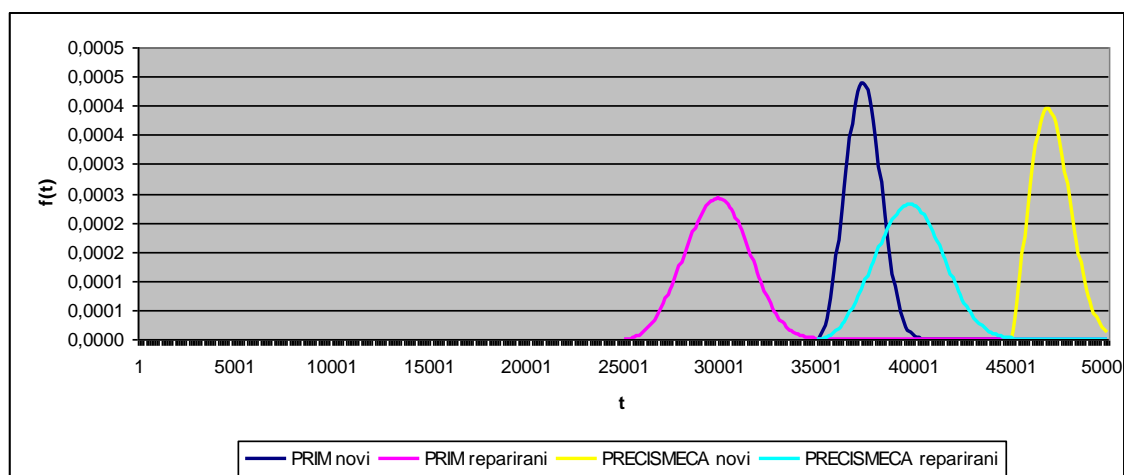
Uporedni grafici funkcija pouzdanosti, gustine otkaza i teorijske raspodele otkaza za sve vrste valjaka su date na slikama 4.28., 4.29. i 4.30.



Slika 4.28. – Grafici funkcija pouzdanosti za sve vrste valjka



Slika 4.29. – Grafici funkcija gustine otkaza za sve vrste valjka



Slika 4.30. – Grafici funkcija teorijske raspodele otkaza za sve vrste valjaka

Sve vrednosti dobijene ovim proračunima koje se odnose na 4 vrste valjaka postaju inputi softverskih simulacija koje se odnose na rad sistema tračnog transportera.

Možemo govoriti o 3 načina održavanja sistema tračnog transportera:

- korektivno održavanje,
- kombinovano održavanje,
- preventivno održavanje.

Svaki od načina održavanja može imati svoj scenario koji će biti simuliran da pruži odgovor na kretanje **pouzdanosti**, **broja otkaza**, **troškove** itd. Kombinovano održavanje ukoliko to ima svoju opravdanost može biti svedeno na svoj specijalni slučaj tj. isključivo preventivno održavanje.

Prvi ciklus simulacija se odnosi na primenu **korektivnog održavanja** koje je dominantno na površinskom kopu gde se sistem eksploatiše. Za ovu vrstu simulacije biće primenjen algoritam na slici 3.53. Inputi su podaci o sve 4 vrste valjka koji su dobijeni u prethodnim proračunima. Jedina izmena se odnosi na vreme simulacije tj. varijablu *Vreme* koja se kreće u granicama između najmanje vrednosti parametra položaja W3 raspodele 25.000 h i krajnjeg vremena kalkulacije 200.000 h. Tri scenarija prvog načina održavanja koja se mogu uzeti u razmatranje su sledeća:

- zamena valjaka koji otkazu istom vrstom novih valjaka,
- zamena valjaka istom vrstom repariranih valjaka,
- zamena valjaka onim sa najboljim karakteristikama pouzdanosti.

Prvi scenario treba da obezbedi iste performanse pouzdanosti sistema, drugi da omogući potencijalno smanjenje finansijskih resursa za održavanje a poslednji najviši nivo pouzdanosti. Ova tri scenarija treba da putem modela pouzdanosti pruže odgovor na broj otkaza i troškove tokom dugog perioda eksploatacije sistema na površinskom kopu. Kako bi se došlo do ukupnih troškova potrebno je kao inpute imati i sledeće pretpostavke:

- Ukupni troškovi održavanja se sastoje od troškova neplaniranog zastoja i troškova zamene. Troškovi zamene su jednaki ceni novih ili troškovima reparacije polovnih valjaka;
- Troškovi zamene valjaka prema vrstama iznose: Prim novi 90,77 €, Prim reparirani 36,31 €, Precismeca novi 83,81 €, Precismeca reparirani 58,67 €;
- Troškovi neplaniranog zastoja po satu iznose 20.000 € (jer zastoj tračnog transportera znači i zastoj čitavog BTO sistema);
- vreme zamene jednog valjka je konstantno i iznosi 60 minuta i kod korektivnih i kod preventivnih zamena;
- sistem transportne trake je nov i početni broj valjaka je 15.625 Primovih novih valjaka i 9.375 Precismeca novih valjaka;
- akcije preventivnog održavanja je moguće izvoditi u prvoj smeni poslednjeg dana sedmice u trajanju od 8 sati.

Primena simulacije koja se odnosi na algoritam sa slike 3.49. znači jedino zamenu valjaka koji otkazu odgovarajućom prema određenom scenariju. Dobijeni rezultati su prezentovani u narednom poglavlju.

Za slučaj održavanja koje se odnosi na **kombinovano održavanje** potrebno je primeniti simulaciju zasnovanu na algoritmu prezentovanom na slici 3.50. Pošto se putem simuliranja korektivnog održavanja ustanovi najpovoljniji scenario prema kriterijumu najmanji nivo otkaza odnosno troškova održavanja, potrebno je primeniti ovaj scenario na kombinovano održavanje. S obzirom na već odgonetnute zakonitosti teorijskih raspodela verovatnoće otkaza za sve vrste valjaka simulacijom je moguće vršiti predikciju troškova na bazi zamene valjaka na tačno definisanom nivou pouzdanosti svakog valjka pojedinačno, te promenom tog nivoa pouzdanosti utvrditi na kom nivou pouzdanosti je najbolje izvršiti preventivnu zamenu valjaka. Svakako ovakav algoritam simulacije omogućuje i održavanje prema unapred određenom vremenu ali i prema nivou pouzdanosti. Naravno, posledično se događa i otkaz određenog broja valjaka pa se u ukupne troškove kalkulišu i troškovi zamene ovih valjaka ali i troškovi zastoja.

Kombinovano održavanje treba da ima onaj broj scenarija koji je dovoljan da se utvrdi na kom nivou pouzdanosti je potrebno zameniti svaki valjak, a u vremenskim okvirima kada je preventivno održavanje moguće kako bi se postigao najmanji nivo troškova. Ovakav vid zamene valjaka znači da određeni broj valjaka ipak otkazuje i oni se održavaju korektivno prema već ranije definisanim uslovima i pretpostavkama.

Ukoliko zamena valjaka na nivo pouzdanosti od 100% daje najmanje troškove održavanja tada se pribegava simulaciji preventivnog održavanja u kome se može raspravljati o minimalnom broju zamena koje obezbeđuju minimalne troškove održavanja. Naime, preveliki i nepotreban broj zamena izlaže višim troškovima održavanja koji su nepotrebni. Ovime se dolazi do optimalnog broja zamena tokom perioda predviđenog za preventivno održavanje.

Ove tri vrste održavanja treba da putem različitih scenarija sukcesivno daju odgovore na pitanja:

- Kojom vrstom valjaka je najbolje vršiti zamene?
- Na kom nivou pouzdanosti valjaka vršiti zamene?
- Koji broj valja zameniti u jednom periodu održavanja?

a sve za kriterijum minimalnih troškova održavanja prema stvorenom modelu pouzdanosti sistema tračnog transportera.

Rezultati dobijeni ovim modelom su prezentovani u sledećem poglavlju.

4.2.2. ROTORNI BAGER 1200X24/4X0 (400KW) + VR KOJI RADI NA POVRŠINSKOM KOPU UGLJA RB KOLUBARA

Ovaj sistem valja tretirati kao sistem sa popravljivim komponentama i sve ih na taj način tretirati. Ovo upućuje na mogućnost da se na sistem primene modeli razvijeni u poglavlju 3.3.4. koji se odnose na preventivno održavan sistem. Rotorni bager se održava jednom nedeljno u trajanju od 8 sati a remont se sprovodi jednom godišnje.

Komponente koje je moguće posmatrati sa aspekta imperfektnog održavanja treba tako tretirati jer je to bolji opis realne situacije, dok one komponente sistema koje se ne mogu tako posmatrati treba tretirati kao perfektno održavane. Ovo upućuje na redosled primene modela na sistem rotornog bagera koji bi se nakon prikupljanja podataka i dekomponovanja mogao opisati sledećim redosledom koraka:

- primena modela popravljivih imperfektno održavanih komponenti,
- primena modela popravljivih perfektno održavanih komponenti na preostale komponente sistema,
- simulacija pouzdanosti sistema rotornog bagera.

Primena modela popravljivih imperfektno održavanih komponenti podrazumeva, nakon inicijalnog određivanja parametara W_2 raspodele, primenu algoritma procene koeficijenta C_{wpm} (slika 3.34). Komponente bagera su zapravo podsistemi velike složenosti na koje tekuće održavanje može imati veoma malo uticaja osim u pojedinim slučajevima. Tamo gde je ono moguće podrazumeva se imperfektnost akcija održavanja najpre usled malog vremena održavanja ovih kompleksnih komponenti sistema. Pretpostavke će biti da se ovakve komponente održavaju perfektno onda kada dođe do zastoja usled otkaza ali u nedeljnim akcijama održavanja u trajanju jedne smene se procenjuje za koliko se pouzdanost sistema povećala.

Podaci koji se odnose na sistem rotornog bagera su dati u prilogu 2 i tada se pristupa proračunu inicijalnih vrednosti parametara W_2 raspodele. Primenom obrazaca 3.63. do 3.69. dobijamo jednačine oblika

$$1 + \left(\frac{\frac{\eta}{(MTTF)} - 1,1}{0,15} \right) = \log_{\left(\frac{t_{max}}{\eta}\right)} \left(-\ln \left(\frac{1}{2 \cdot N} \right) \right) \quad (4.35.)$$

čijim rešavanjem dobijamo inicijalne vrednosti parametara η te putem jednačine

$$\beta = 1 + \left(\frac{\frac{\eta}{(MTTF)} - 1,1}{0,15} \right) \quad (4.36.)$$

i inicijalne vrednosti parametra β . Srednje vreme do pojave otkaza proračunato je putem obrasca 3.62. za svaku komponentu. Sve tri vrednosti su date u tabeli 4.3. za svaku komponentu.

K	<i>MTTF</i>	β	η
MKM	1105,35079725818	1,04382146926536	1098,13253012048
MKK	10128,41442447030	1,60725361355211	9282,85714285714
MDS	49641,37486386820	1,59505298177364	45573,57142857140
MTB	4298,71453732971	1,36922793589175	4073,12765957447
MTM	2623,79974006546	1,00902076021700	2620,25423728814
NČK	76328,03020175040	1,09977772917571	75202,50000000000

Tabela 4.3. - Srednje vreme do pojave otkaza (*MTTF*) i inicijalne vrednosti parametra oblika (β) i parametara razmere raspodele (η) za svaki podsistem rotornog bagera

Nakon ovoga za svaku komponentu sistema sledi algoritam procene koeficijenta C_{wpm} (slika 3.38). Primenom algoritma ustanovljeno je da se koncept imperfektne održavanja komponente može primeniti na 2 komponente i to MKK - mehanizam za kružno kretanje i MDS - mehanizam za dizanje strele rotora. Vrednosti koeficijenta nedeljnog preventivnog održavanja C_{wpm} za ove dve komponente su date u tabeli 4.4.

Komponenta	C_{wpm}
MKK	0,25323567350
MDS	0,05969695993

Tabela 4.4. - Koeficijenti nedeljnog preventivnog održavanja za komponente rotornog bagera

Ovime je obezbeđen validan model pouzdanosti za ove dve komponente, tj. da će prosečan broj otkaza biti upravo onaj empirijski ustanovljen. Ostale komponente nisu mogle da budu ovim konceptom obuhvaćene, tj. vrednosti koeficijenta nedeljnog preventivnog održavanja C_{wpm} su izlazile izvan predviđenih granica od 0 do 1.

Primena modela popravljivih perfektno održavanih komponenti na preostale komponente sistema. Ostale 4 komponente sistema treba tretirati kao perfektno održavane komponente. Svakako da se tekuće održavanje ne može uzeti kao ono koje

može ovako složene sisteme dovesti do pouzdanosti 100% pa se ono smatra irelevantnim jer se u prethodnom koraku nije pokazalo značajnim faktorom. Korišćenjem podataka iz tabele 4.3. kao inputa za algoritam korekcije parametara raspodele (slika 3.42.) dobijaju se vrednosti parametara W2 raspodele kao u tabeli 4.5.

K	Br. otkaza (uzorak)	SrSim BrOtkaza	η	β
MKM	166	165.869	1526,451866	1,441481956
MTB	47	46.992	5704,795807	1,817093394
MTM	118	118.005	3572,352494	1,373800666
NČK	4	4.002	91957,07828	1,324969955

Tabela 4.5. - Broj otkaza iz uzorka, srednji broj otkaza simulacije i parametri Weibull-ove raspodele za svaki od 6 komponenti sistema rotornog bagera

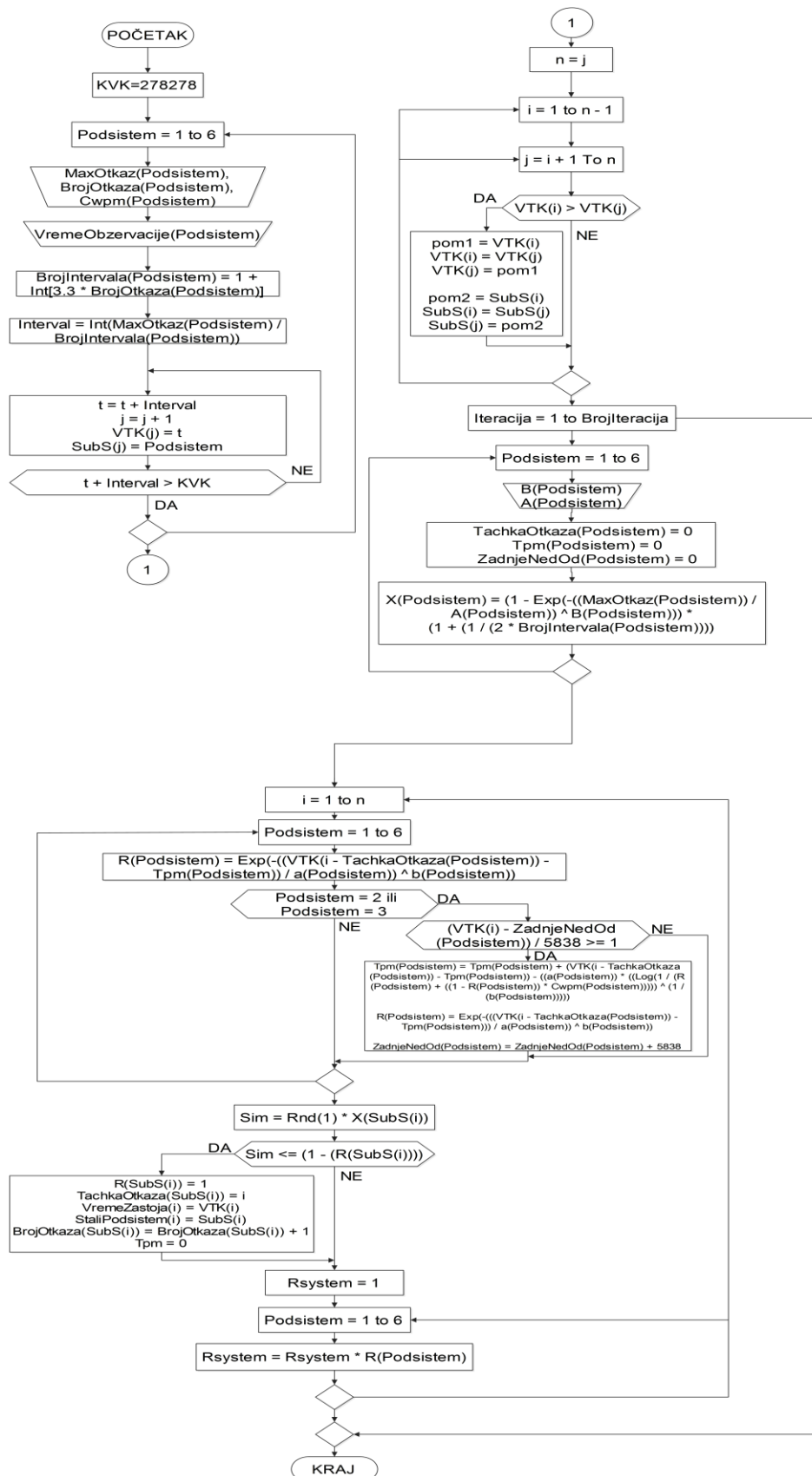
Simulacija pouzdanosti sistema rotornog bagera.

Nakon što se utvrde komponente sistema na koje je primenljiv koncept imperfektnog održavanja primenjuje se algoritam simulacije pouzdanosti ovih komponenti (slika 3.39.) a one komponente koje su perfektno održavane korektivnim akcijama održavanja potrebno je uvrstiti u isti algoritam. Ovo znači integrisanje oba koncepta u jedan algoritam simulacije sistema rotornog bagera.

Pretpostavke simulacije su da je:

- otkaz jednog podsistema/komponente nema uticaja na pouzdanost drugih podsistema/komponenti,
- nakon korektivnih akcija održavanja na jednoj komponenti ne dolazi do promene pouzdanosti drugih komponenti sistema,
- remont sistema podiže pouzdanost svake komponente a time i celog sistema na vrednost 1 i odvija se na kraju godinu dana rada sistema,
- nakon korektivnih akcija održavanja nivo pouzdanosti za komponente koje su otkazale podiže se na nivo 1,
- preventivne akcije održavanja nemaju uticaja na većinu komponenti a na one komponente na koje imaju uticaja ostvaruje se imperfektno popravlanje komponenti,
- svaka komponenta sistema ima svoje vremenske tačke kalkulacije pouzdanosti u kojima je moguće njihovo otkazivanje,
- vrednosti pouzdanosti se proračunavaju za sve komponente sistema u svakoj od vremenskih tačaka kalkulacije kako bi se dobio bolji uvid u kretanje pouzdanosti sistema.

Algoritam simulacije prezentovan je na slici 4.31.



Slika 4.31. – Integralni algoritam simulacije pouzdanosti sistema rotornog bagera SRs 1200x24/4x0 (400kW) + VR

U algoritmu 4.31 je:

KVK - vreme kalkulacije,

MaxOtkaz - maksimalno vreme otkaza u periodu obzervacije,

BrOtkaza - broj otkaza komponente (podсистема),

VremeObzervacije - ukupno vreme u radu svakog podсистема,

C_{wpm} - koeficijenti nedeljnog preventivnog održavanja,

A - parametar razmere raspodele,

B - parametar oblika raspodele,

Int() - funkcija koja vraća celobrojnu vrednost,

Interval - period vremena između dve tačke kalkulacije pouzdanosti,

n - ukupan broj vremenskih tačaka kalkulacije pouzdanosti svih komponenti,

TackaOtkaza - vreme poslednje korektivne akcije održavanja,

ZadnjeNedOd - vreme poslednje preventivne akcije održavanja,

R - pouzdanost,

Sim - pseudo-slučajni broj čija vrednost određuje otkaze komponente (podсистема),

BrojIteracija - broj iteracija (godina simuliranog rada sistema),

Iteracija - trenutna iteracija za vreme simulacije,

t - operativno vreme,

Tpm - period za koji se operativno vreme "vraća unazad" usled preventivnih akcija održavanja.

Algoritam za vreme kalkulacije ima period operativnog vremena sistema između 2 remonta i ono je aproksimirano na 278.278 minuta. Nakon unosa potrebnih parametara *KVK* kao i *MaxOtkaz*, *BrOtkaza*, *VremeObzervacije* i C_{wpm} za svaki podсистem, proračunavaju se intervali, te hronološki slažu vremenske tačke (*VTK*) kalkulacije svih podсистema. Broj iteracija u kojima se dalje simulira pouzdanost svakog podсистema kao i mogući otkazi predstavlja broj godina rada rotornog bagera.

Najveći izazov u izgradnji ovog softvera predstavlja linerano postavljanje vremenskih tačaka kalkulacija pouzdanosti svakog podsistema kako bi se pouzdanost preispitala hronološki. Prvo se dakle ove tačke odrede za svaki podsistem a onda se sortiraju. Pouzdanost svakog od podsistema ($R(\text{Podsistem})$) se računa u toj tački iako je otkaz moguć samo za asociirani podsistem a sve radi preglednije slike stanja sistema. Softver omogućuje uvid u pouzdanost sistema ($R(\text{System})$) kroz primer jedne godine operativnog rada a može se takođe iterativno simulirati i veoma veliki broj godina rada bagera. Kompleksnost proračuna pouzdanosti nastaje u domenu razdvajanja komponenti koje imaju perfektno korektivno održavanje i onih koje su i imperfektno preventivno održavane a koje su prepoznate u algoritmu kao podsistemi 2 i 3. Za ove komponente je potrebno proračunavati i vremena T_{pm} kao vremena podmlađivanja sistema usled preventivnih akcija održavanja a prema koeficijentu nedeljnog preventivnog održavanja C_{wpm} i trenutnoj vrednosti pouzdanosti tokom.

Ovako dobijeni izlazni podaci o pouzdanosti svakog podsistema i sistema u celini su jako pogodni za grafičko prezentovanje i kao takvi su dati u narednom poglavlju.

4.2.3. BLOKOVI B1 I B2 TERMoeLEKTRANE KOSTOLAC B

Sistemi blokova B1 i B2 su i predstavljeni blok dijagramom na slici 4.5. Njihovo dekomponovanje je izvedeno na prikazan način kao posledica načina vođenja evidencije otkaza. Radi se o velikoj bazi podataka sa preko 2000 radnih stanja za svaki od blokova. Kako su baze podataka velikog obima promene radnih stanja koje su otkazi su prikazane u tabeli 4.6. a prema klasifikaciji iz baze podataka za oba bloka elektrane.

Komponenta	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13
Broj otkaza (Blok B1)	248	166	138	59	95	3	4	14	53	19
Broj otkaza (Blok B2)	231	197	135	60	60	2	5	8	41	13

Tabela 4.6. - Broj otkaza komponenti prema klasifikaciji iz baze podataka

Radna stanja prema klasifikaciji otkaza su posmatrana kao komponente sistema a prema odgovarajućoj šifri radnog stanja u klasifikaciji:

- mreža (rad sistema) - 00,
- hladna rezerva - 01,
- remont - 02,
- nega - 03,
- cevni sistem sa napojnim pumpama - 04.
- kotao - 05,
- turbina - 06,
- generator - 07,
- elektro zaštita - 08,
- loženje - 09,
- doprema uglja - 10,
- doprema mazuta - 11,
- ostali uređaji - 12,
- ispad mreže - 13.

Proces implementacije modela iz poglavlja 3.3.6. kao najsloženijeg i prikladnog može teći paralelno za oba bloka elektrane.

Deriviranje vremena otkaza i vremena u radu iz baze podataka

Implementacijom algoritma softvera za prikupljanje potrebnih podataka iz baze prezentovanog na slici 3.58 dobijaju se potrebni podaci koji se odnose na srednje vreme do pojave otkaza (*MTTF*) afektovane komponente a prema različitom broju međuotkaza afektujuće komponente. Ovi podaci dati su tabelarno u prilogu 3.

Kvadratna regresiona analiza srednjeg vremena do pojave otkaza (*MTTF*) afektovane komponente u zavisnosti od broja međuotkaza afektujuće komponente.

Sledeći korak jeste regresiona analiza *MTTF* afektovane komponente u zavisnosti od međuotkaza afektujuće komponente i ovo se radi tako što se u odnos afektovane i afektujuće međusobno stavi svaka komponenta sa svakom. Ovo znači 90 ovakvih analiza za svaki blok tj. 90 aproksimativnih funkcija oblika $y = ax^2 + bx + c$, gde je zavisna promenljiva y oznaka vrednosti za *MTTF* afektovane komponente sistema a nezavisna promenljiva x broj međuotkaza afektujuće komponente. Sve ove funkcije date su u prilogu 4. Ova tabela osim aproksimativne funkcije sadrži i vrednosti koeficijenta determinacije (R^2), kao i broj stepena slobode koji je jednak broju tačaka umanjen za 2 jer se radi o krivi drugog reda.

Selekcija slučajeva u kojima postoji interakcija komponenata

Prvi kriterijum selekcije slučajeva u kojima postoji interakcija je **broj stepena slobode**. Kako je broj stepena slobode jednak $n - 2$ gde je n broj tačaka *MTTF* za određeni broj međuotkaza i kako je kao kriterijum uzet minimum stepena slobode 3 to je minimalni broj tačaka 5. Kada se izuzmu slučajevi koji ne ispunjavaju ovaj kriterijum ostaje 90 slučajeva za oba bloka termoelektrane koji ispunjavaju i mogu se dalje razmatrati. U prilogu 4 su slučajevi koji ispunjavaju kriterijum osenčeni.

Kao sledeći kriterijum selekcije je odabran da **vrednost koeficijenta determinacije** bude veća od 0,9 ($R^2 > 0,9$). Kada se eliminišu slučajevi po osnovu ovog kriterijuma ostane svega 11 slučajeva pobrojanih u tabeli 4.7.

Blok-afektovana-afektujuća K	$y = ax^2 + bx + c$	R^2	Stepeni slobode ($n - 2$)
B1-6-4	$y = 2640 x^2 - 1200 x + 34869$	0,9382	9
B1-7-5	$y = -1016 x^2 + 54650 x + 3377$	0,916	9
B1-11-8	$y = -1348 x^2 + 58856 x + 72405$	0,9886	5
B1-12-6	$y = -773,9 x^2 + 52530 x + 29931$	0,9081	8
B1-13-4	$y = 49,952 x^2 + 13599 x + 92177$	0,9586	7
B1-13-5	$y = 53,922 x^2 + 25680 x + 31459$	0,9451	9
B1-13-6	$y = 55,36 x^2 + 26748 x + 36971$	0,9748	6
B2-5-8	$y = 1411 x^2 + 10147 x + 30229$	0,9662	3
B2-10-6	$y = 62,60 x^2 + 25679 x + 10103$	0,9251	3
B2-12-6	$y = -745,07 x^2 + 66630 x - 51873$	0,9571	8
B2-12-8	$y = -1761 x^2 + 10856 x - 14845$	0,9908	5

Tabela 4.7. - Slučajevi interakcije otkaza komponenti koji ispunjavaju kriterijume selekcije

Ovih 11 slučajeva je sada moguće i grafički prezentovati jer se ne radi o velikom broju slučajeva kao do sada. Ovih 11 slučajeva je sada moguće pojedinačno posmatrati jedan po jedan redom.

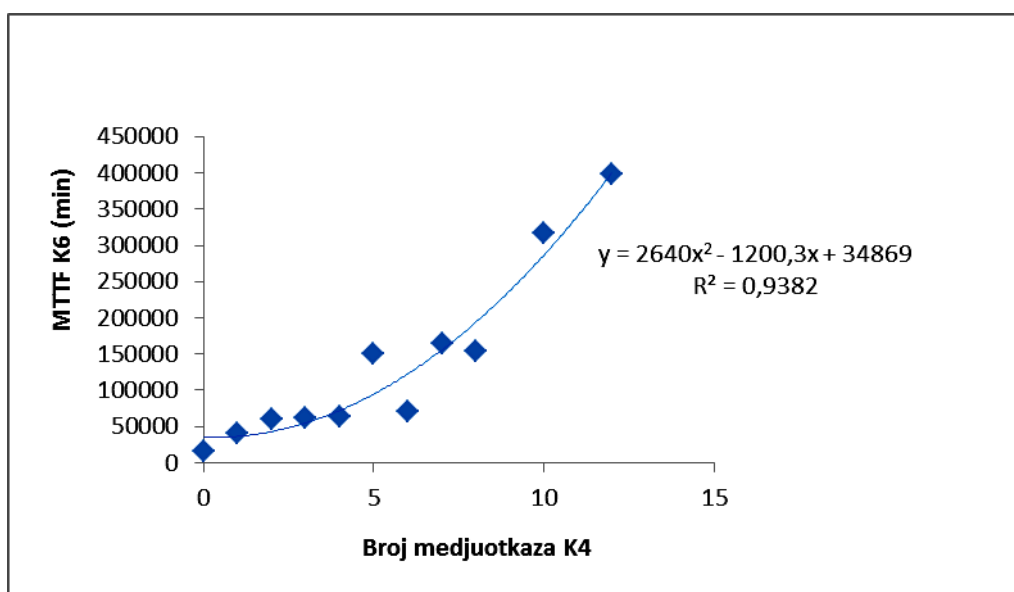
Slučaj B1-6-4 prezentovan je na slici 4.32. On prezentuje uticaj otkaza komponente K4 na otkaze komponente K6 u okviru bloka B1.

Kako je

$$a = 2640 > 0 \quad (4.37)$$

i

$$-\frac{b}{2a} \approx 0.2273 > 0 \quad (4.38)$$



Slika 4.32. – MTTF K6 u odnosu na broj međuohtkaza K4 bloka B1

Očito se radi o obliku regresione pod rednim brojem 1 jednačine iz poglavlja 3.3.6. Ipak kako $x \in \mathbb{N}_0$ to je realni minimum u $(x, y) = (0, 34869)$ pa se jednačina ipak svodi na drugi oblik kada je regresiona funkcija stalno rastuća i konveksna. Nema jasnog razgraničenja uticaja održavanja u odnosu na uticaj samog otkaza afektujuće komponente ali je uočljiv dominantan uticaj održavanja tokom otkaza afektujuće komponente K4 na afektovanu komponentu K6. Logično objašnjenje je da su održavaoci sa pojavom većeg broja međuohtkaza K4 efikasniji tokom zastoja u održavanju komponente K6.

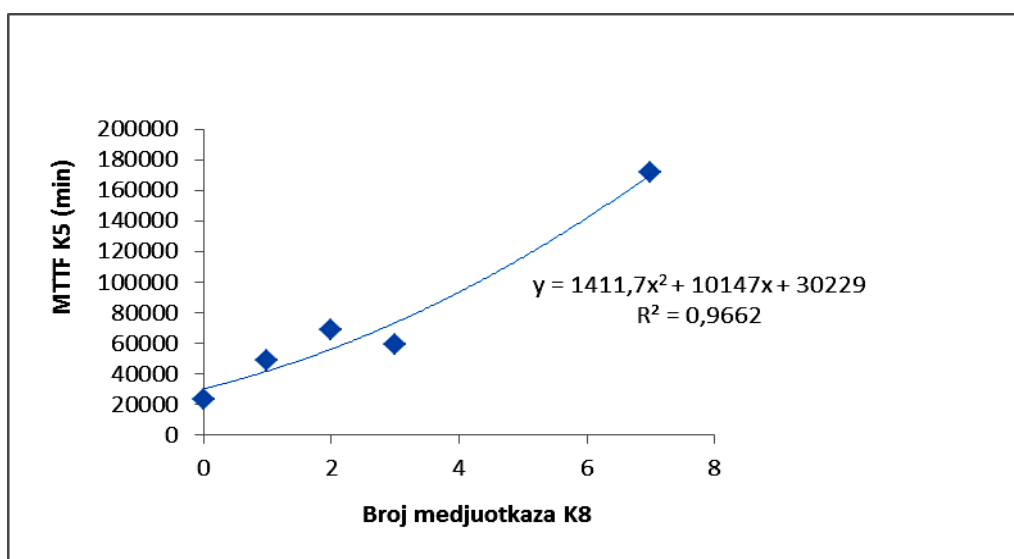
Na slici 4.33. je prezentovan slučaj interakcije otkaza B2-5-8. On prezentuje uticaj otkaza komponente K8 na otkaze komponente K5 u okviru bloka B2. Ovde važi

$$a = 1411,7 > 0 \quad (4.39)$$

i

$$-\frac{b}{2a} \approx -3,5939 < 0 \quad (4.40)$$

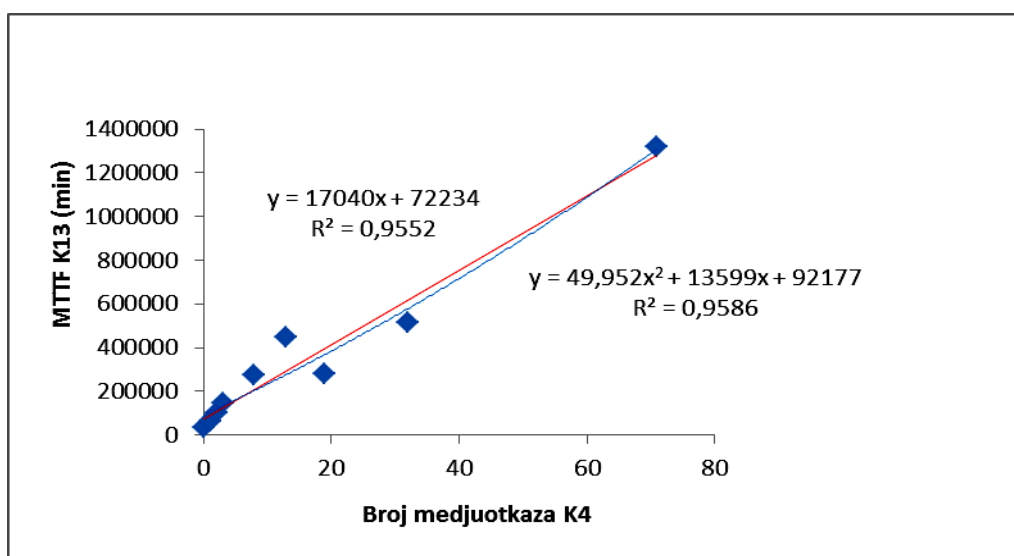
te regresiona jednačina odgovara drugom obliku kada je regresiona funkcija stalno rastuća i konveksna.



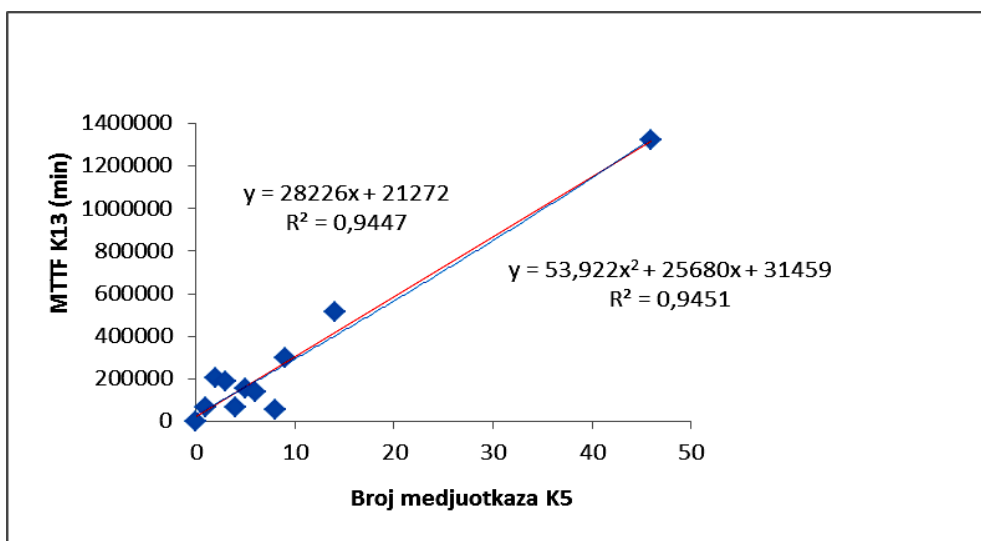
Slika 4.33. – MTTF K5 u odnosu na broj međuoatkaza K8 bloka B2

Naredna četiri slučaja interakcije B1-13-4, B1-13-5, B1-13-6 i B2-10-6 prikazana su na slikama 4.34. do 4.37. respektivno. Sva četiri sučaja pripadaju drugom obliku jednačine kada važi $a > 0$, i $-\frac{b}{2a} < 0$.

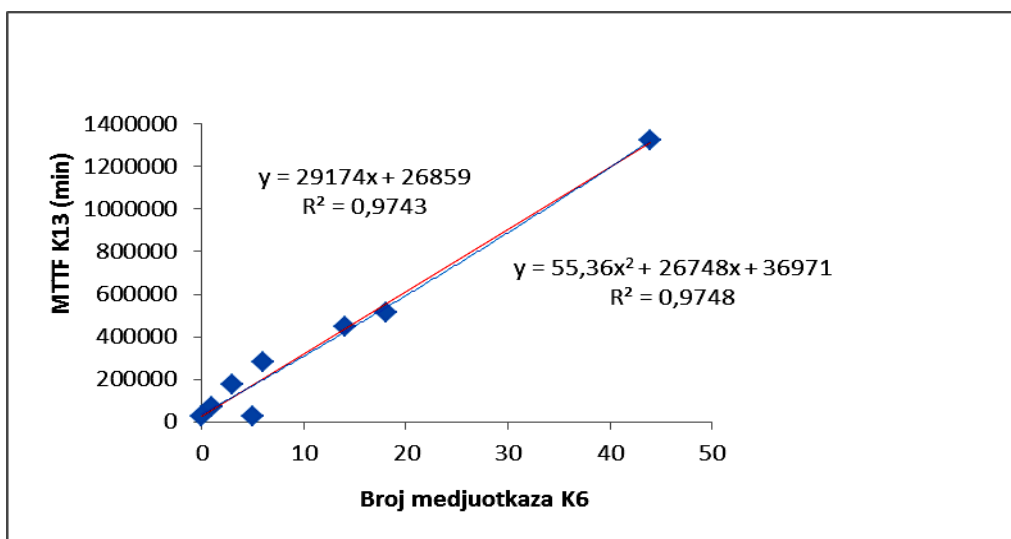
Ipak, uočljive su izrazito male vrednosti koeficijenta a uz kvadratni član regresione funkcije što je dovodi na gotovo linearni nivo. Poređenja radi na svakoj od slika uporedo su date i linearne regresione funkcije kako bi se uočila bliskost kvadratnih i linearnih funkcija. Kako je sa većom vrednošću MTTF afektovane komponente očekivano da se linearno povećava i broj međuoatkaza afektujuće komponente, to je jasno da su ovi slučajevi i pored jake veze između ovih veličina neprihvatljivi usled toga što nema stvarne interakcije između otkaza komponenata sistema. Usled toga ova četiri slučaja eliminišemo iz dalje analize uz mogućnost da se model proširi time da **vrednost koeficijenta a ne sme biti mala ili bliska nuli** kao trećim kriterijumom selekcije.



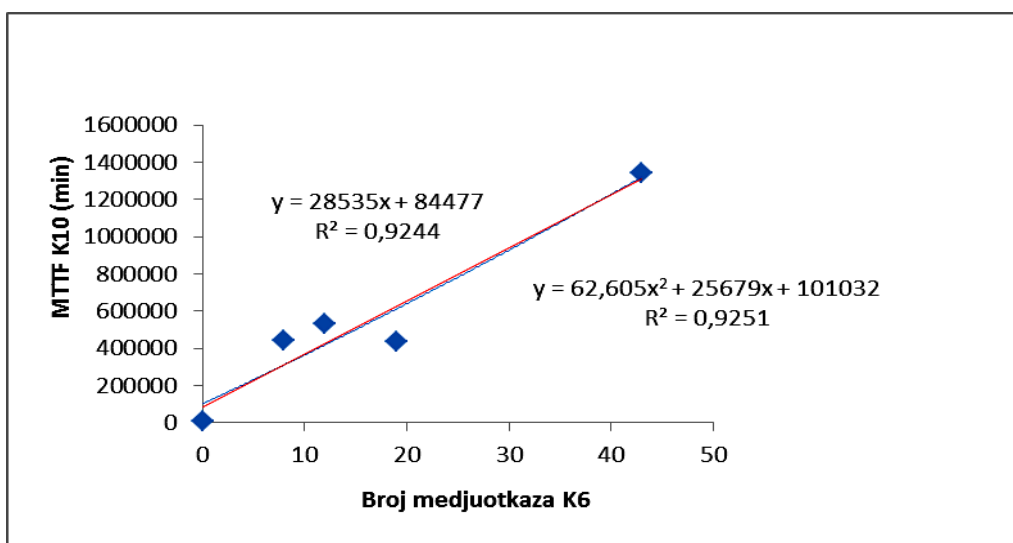
Slika 4.34. – MTTF K13 u odnosu na broj međuoatkaza K4 bloka B1



Slika 4.35. – MTTF K13 u odnosu na broj međjuotkaza K5 bloka B1



Slika 4.36. – MTTF K13 u odnosu na broj međjuotkaza K6 bloka B1



Slika 4.37. – MTTF K10 u odnosu na broj međjuotkaza K6 bloka B2

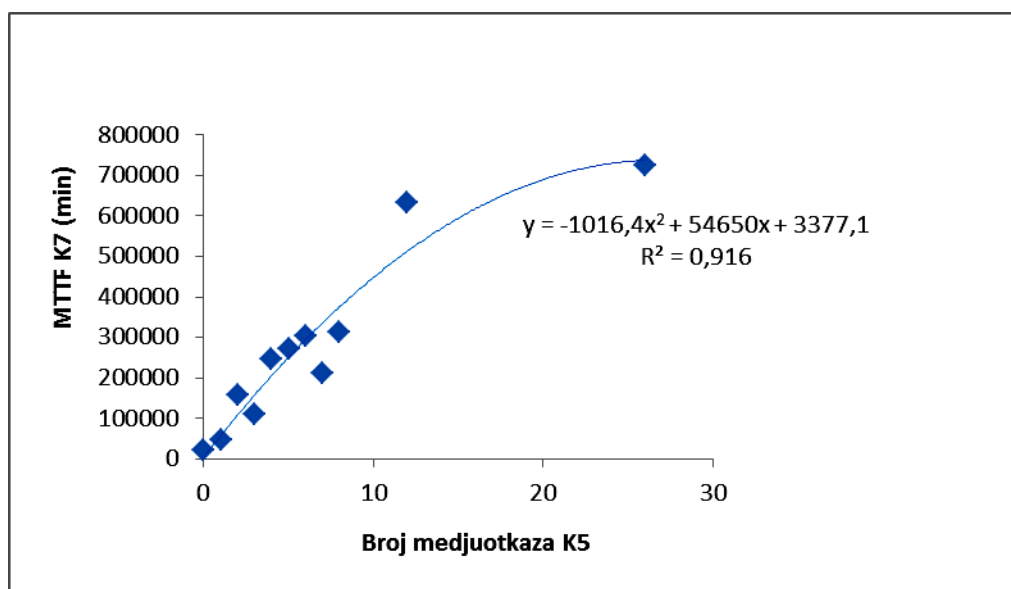
Preostali slučajevi interakcije su prikazani na slikama od 4.38. do 4.42. Oni predstavljaju treći tip regresione funkcije koji podrazumeva da je $a < 0, -\frac{b}{2a} > 0$.

Regresiona funkcija daje konkavnu parabolu koja raste do maksimalne vrednosti te opada. Ako pretpostavimo pozitivan uticaj održavanja u periodu zastoja nakon pojave međuotkaza na povećanje srednjeg vremena do pojave otkaza može se reći da je on uočljiv u monomu bx , $b > 0$. Pretpostavljajući negativan uticaj međuotkaza afektujuće komponente na $MTTF$ afektovane preko monoma ax^2 , $a < 0$ može se zaključiti da sa manjim brojem međuotkaza dolazi do smanjivanja povećanja vrednosti $MTTF$ jer u početku održavaoci „dobijaju trku“ sa interaktivnim negativnim uticajem afektujuće komponente ali vremenom usled eksponencijalnog rasta interakcije održavanje ima sve manji uticaj i $MTTF$ ponovo dobija sve manje vrednosti. Treba pronaći vrednosti maksimuma $MTTF$ afektovane komponente za svaki od slučajeva i time dobiti jasniju sliku o međusobnoj interakciji.

Sa slučaj interakcije B1-7-5 važi

$$-\frac{b}{2a} \approx 26,8841 > 0 \quad (4.41)$$

pa kako $x \in \mathbb{N}_0$ maksimum funkcije se nalazi u tački $(x, y) = (27, 737.971,5)$. Najveći ostvareni broj međuotkaza u periodu obzervacije je 26. Ovo čini da je funkcija u posmatranom opsegu međuotkaza stalno rastuća ali se nipošto ne bi moglo reći da je realno da broj međuotkaza afektujuće komponente učini i otkaze afektujuće komponente opadajućom.

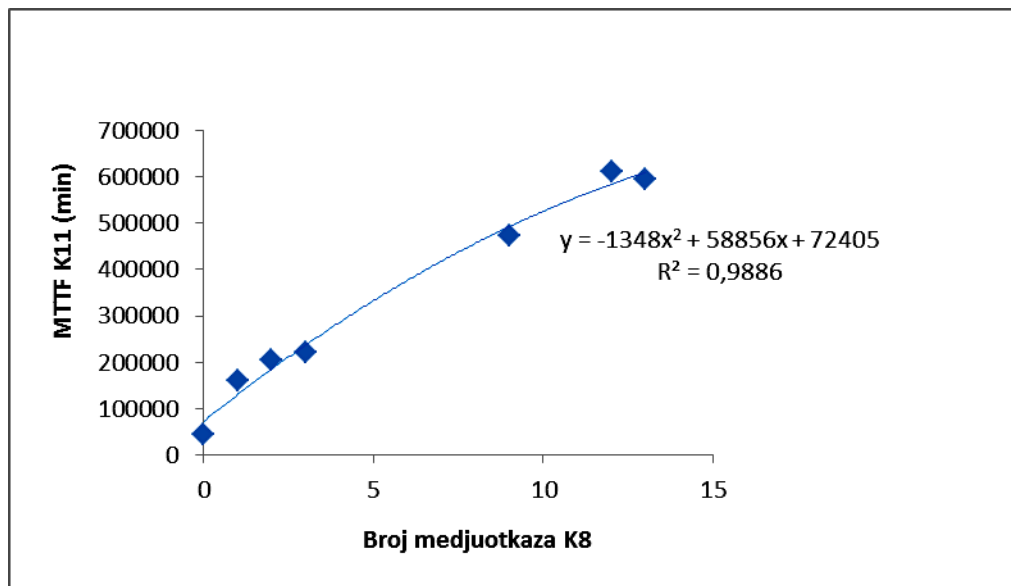


Slika 4.38. – $MTTF$ K7 u odnosu na broj međuotkaza K5 bloka B1

Za slučaj interakcije B1-11-8 važi

$$-\frac{b}{2a} \approx 21,8309 > 0 \quad (4.42)$$

pa kako $x \in \mathbb{N}_0$ maksimum funkcije se nalazi u tački $(x, y) = (22, 714.805)$. Najveći ostvareni broj međuočkaza u periodu obzervacije je 13. Ovo čini da je funkcija u posmatranom opsegu međuočkaza stalno rastuća.

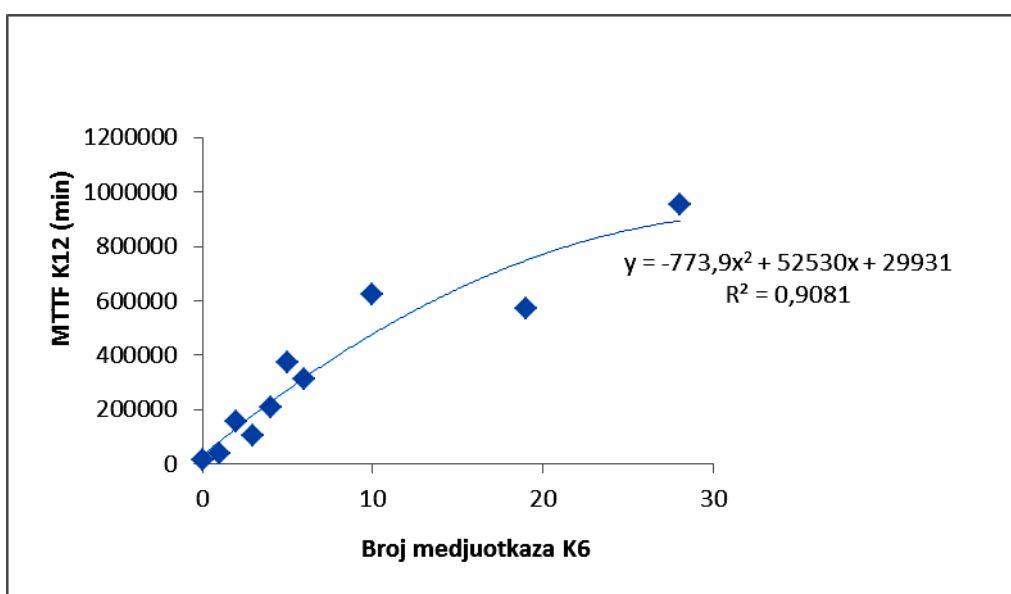


Slika 4.39. – MTTF K11 u odnosu na broj međuočkaza K8 bloka B1

Sa slučaj interakcije B1-12-6 važi

$$-\frac{b}{2a} \approx 33,9385 > 0 \quad \text{b (4.43)}$$

pa kako $x \in \mathbb{N}_0$ maksimum funkcije se nalazi u tački $(x, y) = (34, 921.322,6)$. Najveći ostvareni broj međuočkaza u periodu obzervacije je 28 pa je regresiona funkcija u posmatranom opsegu međuočkaza stalno rastuća.

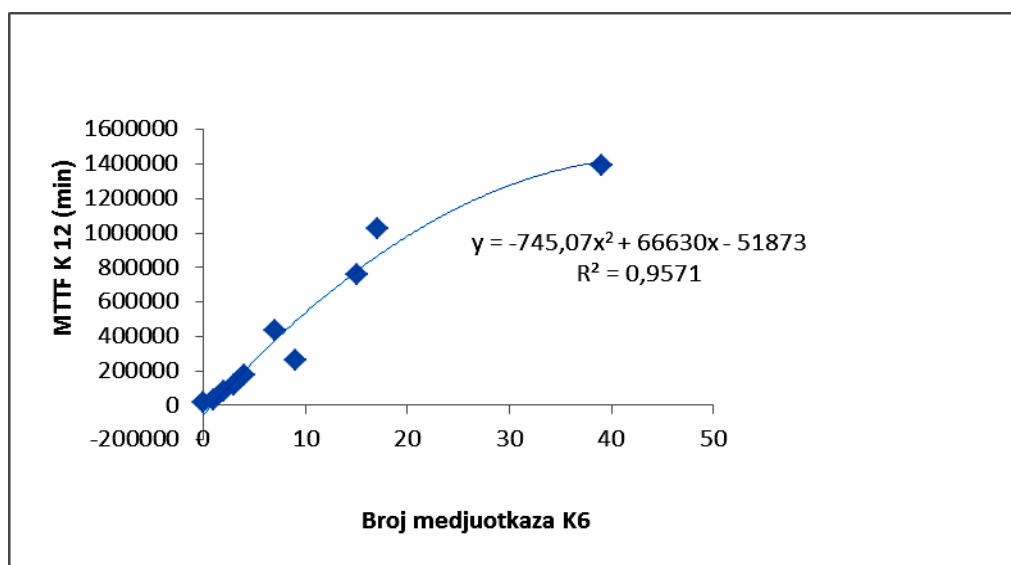


Slika 4.40. – MTTF K12 u odnosu na broj međuočkaza K6 bloka B1

Za slučaj interakcije B2-12-6 važi

$$-\frac{b}{2a} \approx 44,7139 > 0 \quad (4.44)$$

pa kako $x \in \mathbb{N}_0$ maksimum funkcije se nalazi u tački $(x, y) = (45, 1.437.710,25)$. Najveći ostvareni broj međuočkaza u periodu obzervacije je 39, pa je regresiona funkcija u posmatranom opsegu međuočkaza stalno rastuća ali se ne može reći da broj međuočkaza neće dovesti i do opadanja funkcije u nekom periodu vremena.

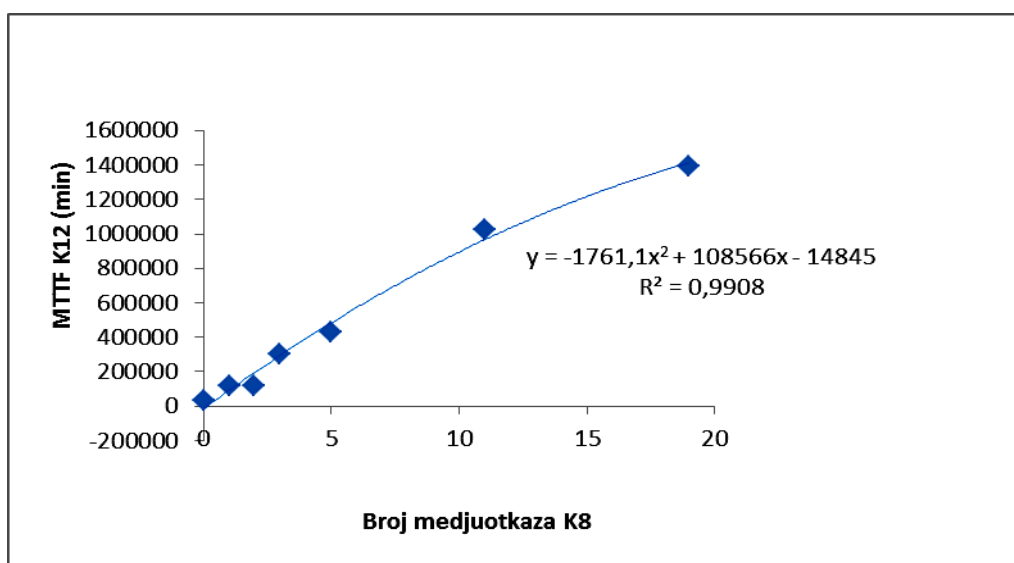


Slika 4.41. – MTTF K12 u odnosu na broj međuočkaza K6 bloka B2

Za slučaj interakcije B2-12-8 važi

$$-\frac{b}{2a} \approx 30,8233 > 0 \quad (4.45)$$

pa kako $x \in \mathbb{N}_0$ maksimum funkcije se nalazi u tački $(x, y) = (34, 1.658.283,9)$. Najveći ostvareni broj međuočkaza u periodu obzervacije je 19, pa je regresiona funkcija u posmatranom opsegu međuočkaza stalno rastuća.



Slika 4.42. – MTTF K12 u odnosu na broj međuoatkaza K8 bloka B2

Ovime su određeni svih slučajevi gde je uočljiva interakcija otkaza komponenata i ima ih ukupno 7 i to su:

- B1-6-4
- B2-5-8
- B1-7-5
- B1-11-8
- B1-12-6
- B2-12-6
- B2-12-8

Određivanje odgovarajuće raspodele pojave otkaza između Weibulove troparametarske (W3) ili dvoparametarske (W2).

Prioritet u određivanju ima W3 raspodela kao opštija, pa ako ona nije moguća onda W2. Prvi korak je dakle primena modela izloženog u poglavlju 3.3.5 i proračun parametara W3 raspodele. Radeći prema priloženom primeru u tom poglavlju prvo je potrebno izolovati sve otkaze isključivši one koji su pretrpeli interakciju afektujućih međuoatkaza komponenti. Na primer, komponenta K4 bloka B1 nije imala afektujuće komponente. Stoga je potrebno sve otkaze, ukupno 248 poređati prema veličini i formirati kumulativne vrednosti vremena otkaza. Nakon toga je potrebno preći na rad u koordinatnom sistemu gde su koordinate predstavljene kao

$$x_i = \ln(t_i - \gamma) \quad (4.46.)$$

$$y_i = \ln \left[\ln \left(\frac{1}{F(t_i)} \right) \right] \quad (4.47.)$$

kako bi se Weibulovim verovatnosnim papirom ustanovilo postojanje odnosno veličina parametra položaja raspodele γ .

Promenom vrednosti parametra γ se traga za lineranim oblikom kvadratne aproksimativne funkcije tačaka u koordinatnom sistemu oblika

$$y = ax^2 + bx + c \quad (4.48.)$$

čime se osim parametra γ dobijaju i vrednosti preostala dva parametra kao

$$\beta = b \quad (4.49.)$$

i

$$\eta = e^{-\frac{c}{b}} \quad (4.50.)$$

pa su tako vrednosti ovih parametara za slučaj B1-K4:

$$\gamma = 46,8587774 \quad (4.51.)$$

$$\beta = 1,53486067299128 \quad (4.52.)$$

$$\eta = 66719,4342409221 \quad (4.53.)$$

Ovaj postupak je rađen softverski i vrednosti parametara su analitički nalažene kako bi se veliki broj slučajeva mogao u kraćem vremenskom roku rešiti. Ukoliko se promenom parametra γ ne može doći do linearne vrednosti aproksimativne funkcije za $\gamma > 0$ tada se dalji postupak svodi na određivanje parametara W2 raspodele.

Rešavanjem jednačine

$$\frac{MTTF}{\Gamma\left(\frac{1+\beta}{\beta}\right)} = (-t_{\max} / \ln\left(\frac{1}{2 \cdot (n-2)}\right))^{\frac{1}{\beta}} \quad (4.54.)$$

dobijaju se vrednosti parametra β a onda i parametra η preko jednačine

$$\eta = \frac{MTTF}{\Gamma\left(\frac{1+\beta}{\beta}\right)}. \quad (4.55.)$$

Postupak rešavanja ovih jednačina je numerički i u tu svrhu su opet kreirana softverska rešenja radi brzog dolaska do rezultata u većem broju potrebnih proračuna.

Ilustracije radi za komponentu K5 bloka B1 nije imala afektujuće komponente. Stoga je

potrebno sve otkaze, ukupno 166 poređati prema veličini i formirati kumulativne vrednosti vremena otkaza, te rešiti prethodno navedeni sistem jednačina (4.54 i 4.55.) pa su tako vrednosti ovih parametara za slučaj B1-K5:

$$\gamma = 0 \quad (4.56.)$$

$$\beta = 1,06241980886249 \quad (4.57.)$$

$$\eta = 42723,2348216958 \quad (4.58.)$$

Tabela 4.8. prikazuje vrednosti parametara teorijskih raspodela kao i broj otkaza koji se uzima u obzir (N) za sve komponente oba bloka elektrane.

Blok-Komponenta	γ	β	η	N
B1-K4	46,85878	1,534860673	66719,43	248
B1-K5	0	1,062419809	42723,23	166
B1-K6	0	1,104346654	16673,42	52
B1-K7	0	1,072485250	21808,20	29
B1-K8	0	1,020669375	68865,92	95
B1-K9	0	1,033600727	443045,60	3
B1-K10	0	1,010741476	245298,30	4
B1-K11	0	1,008933103	43539,33	4
B1-K12	13,90037	1,113878771	65510,54	21
B1-K13	0	0,988281153	209049,60	19
B2-K4	48,0787597	1,533678285	59846,6022	231
B2-K5	0	1,063198989	23981,26597	158
B2-K6	0	1,011722678	44232,7631	135
B2-K7	0	0,988821323	96316,34872	60
B2-K8	0	1,028422814	96606,68398	60
B2-K9	0	1,028191181	188539,9914	2
B2-K10	0	1,003906409	553355,0996	5
B2-K11	0	0,996118663	283290,1707	8
B2-K12	0	1,033787906	17353,77229	16
B2-K13	0	1,058308404	173781,4195	12

Tabela 4.8. - Inicijalni parametri teorijskih raspodela i broj otkaza bez međuohtkaza afektujućih komponenata svake od komponenti oba bloka termoelektrane

Stvaranje matrice interakcije

Sledi stvaranje matrice interakcije oblika $Y := (y_{k_1, k_2})_{m \times m}$ a prema formuli 3.109. gde je prema 3.110. $y_{k_1, k_2} = a_{k_1, k_2} x^2 + b_{k_1, k_2} x + c_{k_1, k_2}$. Potrebno je formirati matricu interakcije za svaki od blokova termoelektrane. Da je neka od vrednosti $y_{k_1, k_2} = 0$, jasno je da otkaz

komponente k_2 ne ostvaruje uticaj na $MTTF$ komponente k_1 . Matrica interakcije komponenta bloka B1 je data kao:

$$Y_{B1} := \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2.640 \cdot x^2 - 1.200 \cdot x + 34.871 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1.016 \cdot x^2 + 54.650 \cdot x + 3.377,3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1.348 \cdot x^2 + 58.856 \cdot x + 72.407 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -773,9 \cdot x^2 + 52.530 \cdot x + 29.933 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (4.59.)$$

a matrica interakcije komponenta bloka B2 je data kao:

$$Y_{B2} := \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.411,7 \cdot x^2 + 10.147 \cdot x + 30.231 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -745,1 \cdot x^2 + 66.630 \cdot x - 51.875 & 0 & 1.761 \cdot x^2 + 108.566 \cdot x - 14.847 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (4.60.)$$

Preko ovih vrednosti u matricama je dalje moguće definisati vremenske pomake ulevo i udesno definisane veličinom τ_p koja zapravo označava podmlađivanje ili ostarivanje afektovane komponente usled međutokaza afektujuće. Za negativne vrednosti vremenskog pomaka ($\tau_p < 0$) označava ostarivanje komponente, a za pozitivne ($\tau_p > 0$) njeno podmlađivanje nakon otkaza afektujuće komponente i preventivnog održavanja. Vremenski pomak je prethodno definisan opštim obrascem u odnosu na trenutnu pouzdanost afektujuće komponente i trenutni broj međutokaza kao

$$\tau_p = \frac{2 \cdot ((2x-1) \cdot a_{k1,k2} + x \cdot b_{k1,k2}) \cdot (1 - R_{k1}(t_x)_{x-1})}{R_{k1}(t_x)_{x-1}} \quad (4.61.)$$

gde je

x - redni broj međutokaza afektujuće komponente,

$k1$ - afektovana komponenta,

$k2$ - afektujuća komponenta,

$R_{k1}(t_x)_{x-1}$ - pouzdanost afektovane komponente pre pojave međutokaza.

Ovime se definiše uticaj međutokaza afektujuće komponente na $MTTF$ afektovane u svih 7 slučajeva interakcije komponenta.

Korekcija parametara i simulacija pouzdanosti sistema bloka elektrane

Prvi korak se odnosi na primenu softvera za prikupljanje neophodnih podataka iz baze. On je prezentovan algoritmom na slici 3.62. On je primenjen na svaku od komponenti oba bloka elektrane, a dobijeni podaci su mnogobrojni i preobimni za prezentovanja, međutim oni su neophodna osnova sledećih koraka korekcije parametara i simuliranja pouzdanosti sistema. Ipak moguće je prezentovati najbitnije podatke koji se odnose na veličine *WorkingTime* - operativno vreme sistema i *NofF* - broj otkaza sistema (komponenti). Ovi podaci su dati u tabeli 4.9.

Blok-Komponenta	Prosečno godišnje operativno vreme (h)	Prosečan godišnji broj otkaza
B1-K4		12,53883
B1-K5		7,842306
B1-K6		7,22201
B1-K7		2,658409
B1-K8		4,430681
B1-K9		0,177227
B1-K10		0,221534
B1-K11		1,196284
B1-K12		3,145784
B1-K13		0,886136
B1 ukupno	5.138	40,31919962
B2-K4		13,28571429
B2-K5		10,93516484
B2-K6		7,46043956
B2-K7		3,372527473
B2-K8		3,474725275
B2-K9		0,153296703
B2-K10		0,306593407
B2-K11		0,715384615
B2-K12		2,708241758
B2-K13		0,766483516
B2 ukupno	5.131	43,17857143

Tabela 4.9. - Broj otkaza svake komponente i sistema i operativna vremena sistema B1 i B2 ukupno

Ovi podaci su neophodni inputi **drugog koraka** - korekcije parametara W3 ili W2 raspodele. Ovaj korak znači primenu softvera prezentovanog algoritmom na slici 3.63. koji simulira rad svake pojedinačne komponente. Inputi u softveru su i parametri raspodele koji su inicijalne vrednosti prezentovane u tabeli 4.8. i za koje je važno da se očuva odnos veličina parametra β i η dok parametar γ ostaje nepromenjene vrednosti. Softver menja vrednosti parametara proporcionalno tako da se prosečan broj otkaza prema simulaciji dovede na stvarni godišnji prosek iz tabele 4.9. Nakon toga se dobijaju

konačne vrednosti parametara za slučajeve. Softver dakle koriguje vrednosti parametara i u skladu sa verovatnoćom pojave otkaza afektujućih komponenata te u skladu sa već definisanim vremenskim pomakom τ_p koriguje trenutni nivo pouzdanosti komponente. U ovim slučajevima nije bilo teškoća da se realizuje simulacija pogotovu što nije bilo pojave kružnog afektovanja komponenti koji bi mogao da zada određene ne male probleme u realizaciji ovog koraka.

Nakon završetka korekcije parametara dobijaju se vrednosti prezentovane u tabeli 4.10.

Blok-Komponenta	γ	β	η
B1-K4	46,8587774	1,106793748	48111,63253
B1-K5	0	1,298967929	52235,57709
B1-K6	0	1,602465983	24194,02829
B1-K7	0	2,066075985	42012,13186
B1-K8	0	1,398475025	94356,97013
B1-K9	0	1,869664118	801418,2603
B1-K10	0	1,978733203	480221,5146
B1-K11	0	2,216156534	95635,64565
B1-K12	13,9003654	1,595019355	93807,85985
B1-K13	0	1,705503416	341142,7287
B2-K4	48,0787597	1,10434268	43093,2339
B2-K5	0	1,316000267	29683,39205
B2-K6	0	1,296029204	56662,71401
B2-K7	0	1,407753248	137122,5009
B2-K8	0	1,405367947	132015,68
B2-K9	0	2,256622074	413798,0507
B2-K10	0	1,654387432	911901,4621
B2-K11	0	1,689153944	480385,2463
B2-K12	0	2,180171632	36597,64429
B2-K13	0	1,822532337	299272,1739

Tabela 4.10. - Parametri raspodele svake od komponenti oba bloka termoelektrane

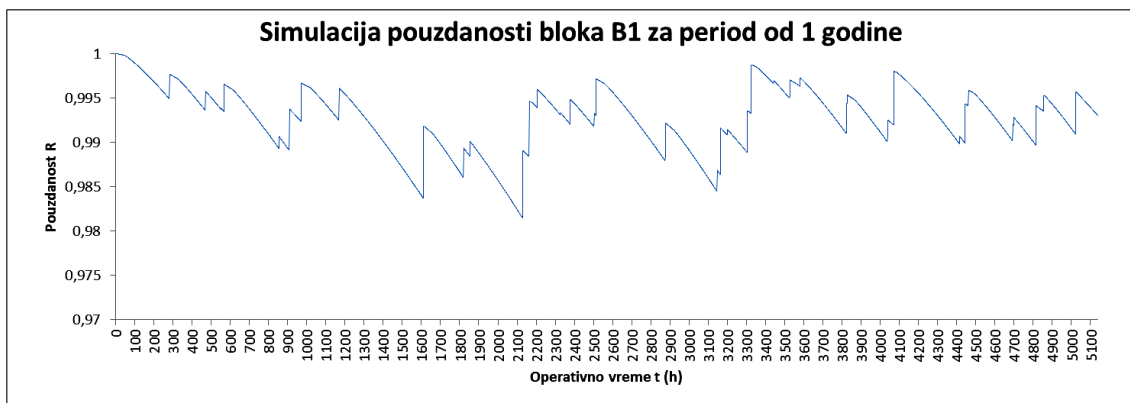
Treći i poslednji korak je simulacija pouzdanosti celokupnog sistema. Ona je rutinski posao primene kompleksnog softvera prezentovanog algoritmom na slici 3.64. Svi do sada dobijeni podaci predstavljaju inpute u softver. Vreme njegovog izvršenja nije beznačajno ukoliko postoji veći broj iteracija. Svaka iteracija je zapravo simulacija pouzdanosti za period od jedne godine operativnog rada sistema.

Kao rezultat simulacije dati su primeri kretanja pouzdanosti svake komponente pojedinačno za oba bloka u prilogu broj 5. Tabela 4.11. prikazuje broj otkaza svake komponente pojedinačno kao i blokova B1 i B2 ukupno tokom iste simulacije.

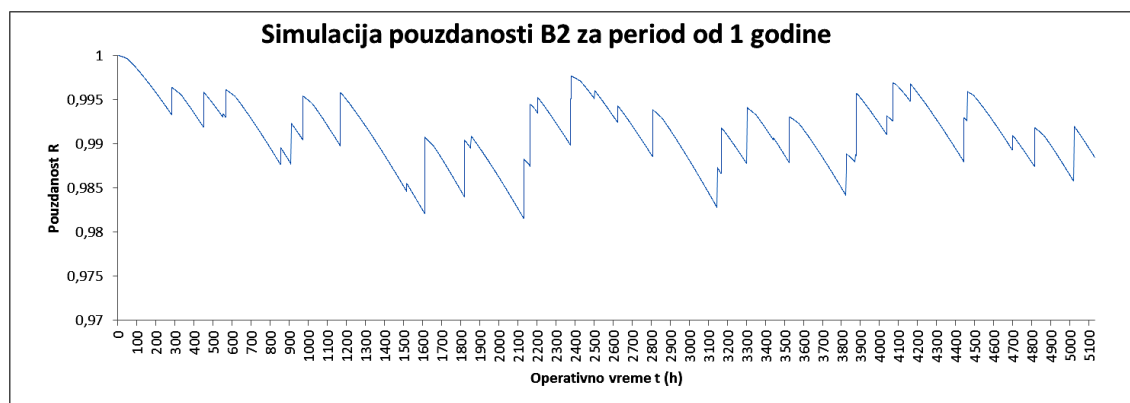
Komponenta	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	Σ
Broj otkaza (Blok B1)	13	9	18	12	5	0	0	6	8	1	72
Broj otkaza (Blok B2)	13	13	5	4	4	0	0	0	11	1	51

Tabela 4.11. - Broj otkaza komponenti tokom simulacije za period od godinu dana

Zbirno, simulacija pouzdanosti oba sistema izgleda kao na slikama 4.43. i 4.44.



Slika 4.43. – Simulacija pouzdanosti sistema B1



Slika 4.44. – Simulacija pouzdanosti sistema B2

5. REZULTATI ISTRAŽIVANJA

5.1. KLJUČNI REZULTATI ISTRAŽIVANJA

Kako je jasno da nam u modelovanju i prognostici pouzdanosti mašina softverska rešenja mogu mnogo pomoći tako smo i ovde putem softverskih simulacija dobili rezultate koje valja prezentovati^{96,97,98,99}. Rezultati istraživanja se mogu podeliti u tri grupe prema tome na koji tehnički sistem su bili primenjivani onako kako je to prezentovano i u eksploatacionim istraživanjima:

- tračni transporter BTO sistema,
- rotorni bager,
- sistem blokova u termoelektranama.

5.1.1. TRAČNI TRANSPORTER SISTEMA BTO5 NA POVRŠINSKOM KOPU DRMNO U PD "TERMoeLEKTRANE I KOPOVI KOSTOLAC" DOO, KOSTOLAC

Prvi ciklus simulacija rada sistema transportne trake odnose se na korektivne akcije zamene valjaka u otkazu u sva tri scenarija održavanja.

Prvi scenario podrazumeva isključivo korektivne akcije zamene valjaka repariranim iste vrste i proračun troškova neplanskog zastoja. Osim troškova zastoja postoje i troškovi zamene valjaka koji otkazu sa pretpostavljenim cenama.

Broj otkaza koji se dogodio prema simulaciji za period operativnog vremena od 200.000 sati je prema vrstama valjaka prikazan na slici 5.1. Ovime su direktno uslovljeni i troškovi zamene.

Na slici 5.1. se može uočiti da nakon otkaza svih novih valjaka počinju otkazi i repariranih valjaka. Zbog postojanja perioda bezotkaznog rada za svaku vrstu valjaka obuhvaćenog u modelu parametrom položaja γ primetna je pojava otkaza "u talasima", pri čemu se vremenom oni "gube" usled rasipanja vremena otkaza.

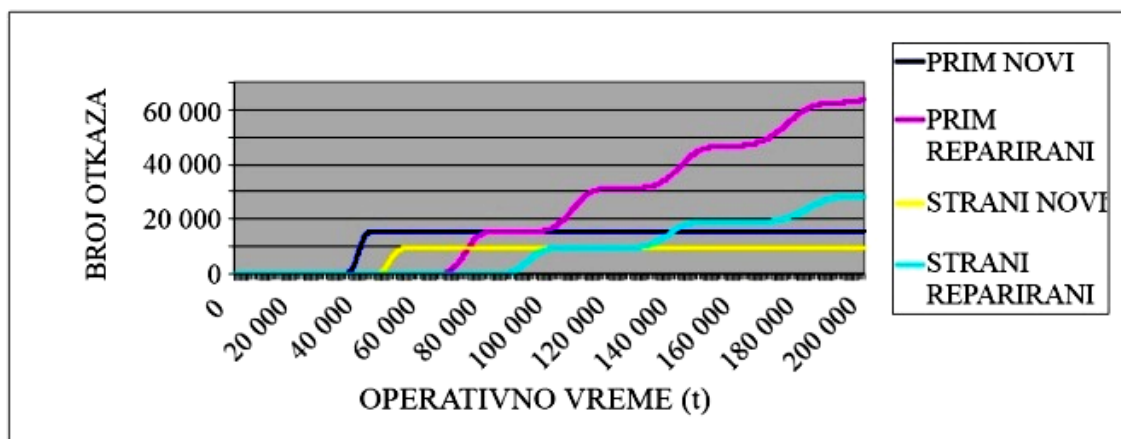
Kada su u pitanju ukupni troškovi, potpuno dominantni su troškovi zastoja. Nakon perioda od 200.000 časova operativnog vremena troškovi zamene su dosegli 6.801.701 €, a troškovi neplaniranih zastoja 2.338.420.000 €, što će reći da troškovi neplaniranih zastoja čine 99,71% ukupnih troškova. Ukupni troškovi su za 200.000 radnih časova dosegli nivo od 2.345.221.701 €.

⁹⁶ Milošević, D., Softver za praćenje pouzdanosti mašina u procesu eksploatacije, Magistarska teza, Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin", Zrenjanin, 2009.

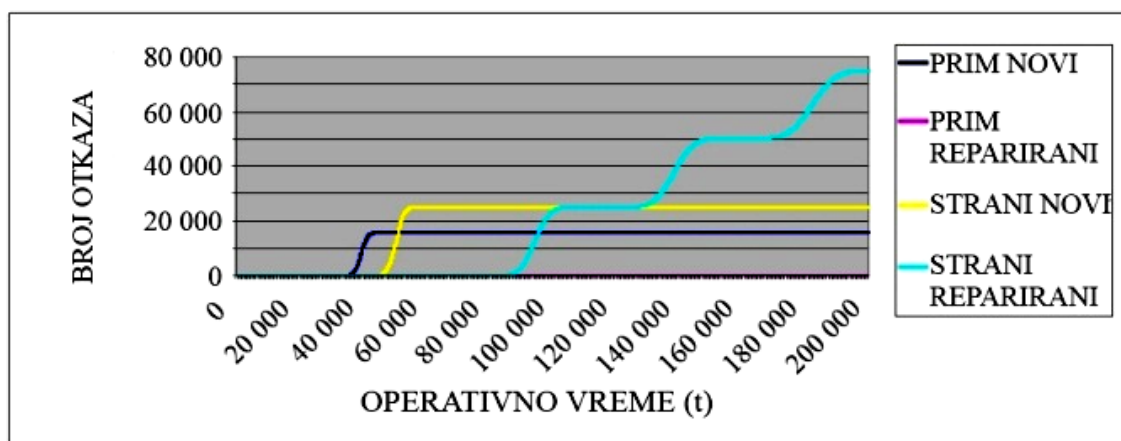
⁹⁷ Milošević, D., Adamović, Ž., Ašonja, A., Dijagnostika i prognostika stanja mašina u elektranama i toplanama, Tehnička dijagnostika, Banja Luka, 2014. (1-2), 66-72.

⁹⁸ Milošević, D., Veljković, D., Josimović, Lj., "Softver za praćenje i predviđanje pouzdanosti tehničkih sistema", Rad u zborniku radova 10. simpozijum hidrauličara i ekologičara Srbije, Vršac, 2008.

⁹⁹ Milošević, D., Adamović, Ž., i dr., Proračun i analiza pouzdanosti univerzalne mašine za bušenje U3-365, časopis „Menadžment znanja“, Smederevo, 2009., (3-4), 51-56.

Slika 5.1. – Broj otkaza valjaka prema vrstama za prvi scenario⁹⁰

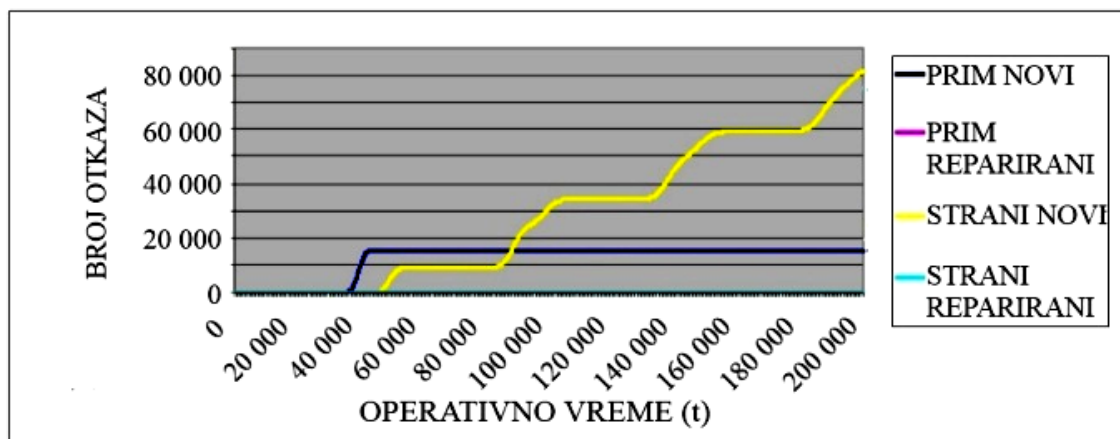
Drugi scenario podrazumeva isključivo korektivne akcije zamene valjaka i to PRIM-ove novim stranim, a Precismeca nove – repariranim, što zapravo predstavlja strategiju postepenog prelaska na isključivu upotrebu valjaka Precismeca proizvođača. Broj otkaza koji se dogodio prema simulaciji prema vrstama valjaka prikazan je na slici 5.2. Ovime su direktno uslovljeni i troškovi zamene. Uočava se da nema otkaza koji se odnose na Primove reparirane valjke a da je broj otkaza repariranih valjaka proizvođača Precismeca značajno uvećan.

Slika 5.2. – Broj otkaza valjaka prema vrstama za drugi scenario⁹⁰

Kada su u pitanju ukupni troškovi potpuno dominantni su troškovi zastoja. Nakon perioda od 200.000 časova operativnog vremena troškovi zamene su povećani usled zamene skupljom vrstom valjaka i dosegli su 11.757.037 €, a troškovi neplaniranih zastoja iznose 2.312.020.000 €. Ovaj pad neplaniranih troškova zastoja od 1,12% potiče od dužeg radnog veka valjaka stranog proizvođača. Troškovi neplaniranih zastoja čine 99,49% ukupnih troškova. Ukupni troškovi su za 200.000 radnih časova dosegli nivo od 2.323.777.037 € što je za 0,91% manje nego u prethodnom slučaju.

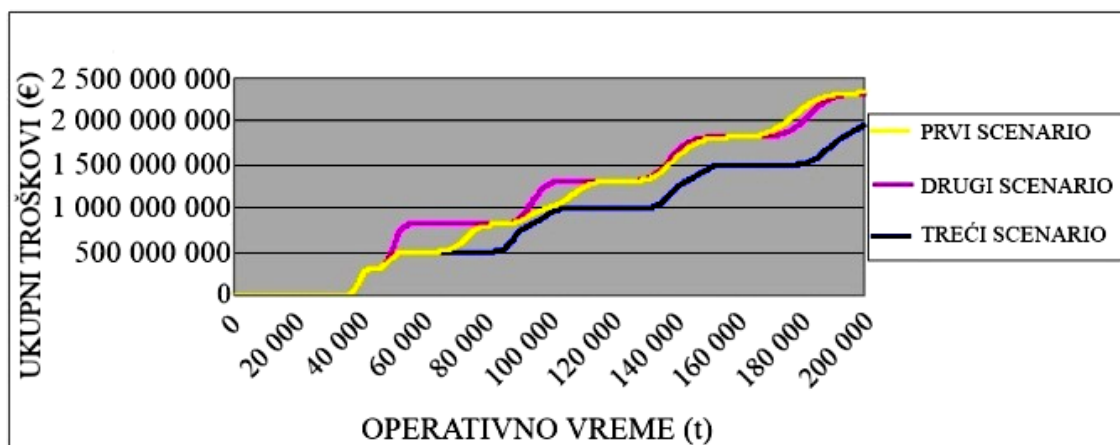
⁹⁰ Milošević, D., Josimović, Lj., Petrov, T., Adamović, Ž., Maintenance planning of btr system belt conveyors using a model based on reliability and maintenance costs, TTEM, 2013., 8(3), 1257-1265.

Treći scenario podrazumeva isključivo korektivne akcije zamene valjaka novim Precismeca. Broj otkaza koji se dogodio prema simulaciji prema vrstama valjaka prikazan je na slici 5.3. Uočava se da nema otkaza koji se odnose na reparirane valjke oba proizvođača a da je broj otkaza novih valjaka proizvođača Precismeca logično daleko najveći.



Slika 5.3. – Broj otkaza valjaka prema vrstama za treći scenario⁹⁰

Troškovi zamene su usled manjeg broja otkaza pali na vrednost 8.161.874 €, troškovi neplaniranih zastoja iznose 1.947.720.000 €. Ovaj pad neplaniranih troškova zastoja od 15,76% potiče od dužeg radnog veka valjaka proizvođača Precismeca. Troškovi neplaniranih zastoja čine 99,58% ukupnih troškova. Ukupni troškovi su dosegli nivo od 1.955.881.874 € što je za 15,83% manje nego u prethodnom slučaju. Uporedno, ukupni troškovi sva tri scenarija tokom operativnog vremena sistema prikazani su na slici 5.4.



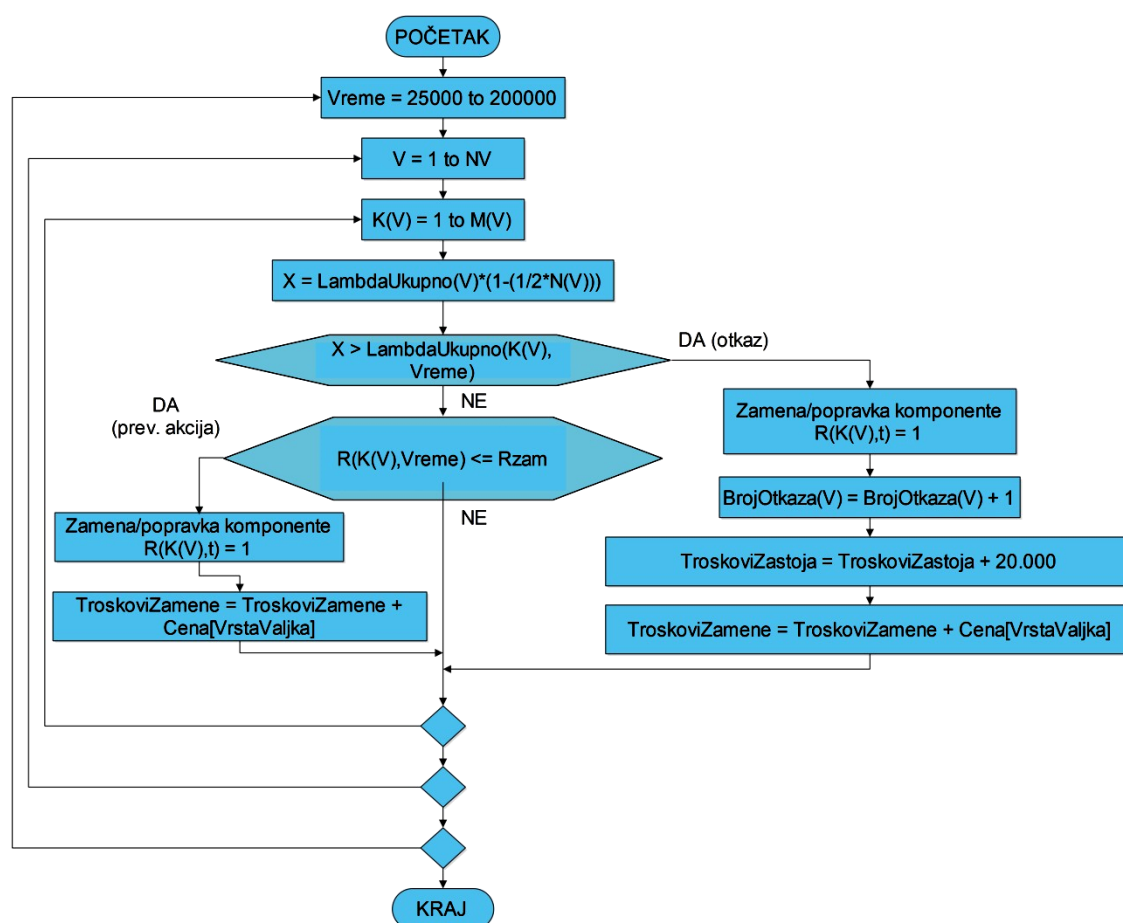
Slika 5.4. – Uporedni troškovi održavanja za tri scenarija korektivnog održavanja⁹⁰

Iz prethodna tri scenarija je jasno da troškovi zamene imaju mali uticaj na ukupne troškove pa je najbolji scenario onaj u kome se valjci u otkazu menjaju novim valjcima stranog proizvođača jer su najvišeg nivoa pouzdanosti.

⁹⁰ Milošević, D., Josimović, Lj., Petrov, T., Adamović, Ž., Maintenance planning of btr system belt conveyors using a model based on reliability and maintenance costs, TTEM, 2013., 8(3), 1257-1265.

Prethodna tri scenarija su se odnosila samo na akcije korektivnog održavanja, pa su sledeći posvećeni uticajima akcija **kombinovanog (korektivnog i preventivnog) održavanja** sa ciljem smanjenja ukupnih troškova čime se ispituje uticaj preventivnog održavanja.

S obzirom na već odgonetnute zakonitosti teorijskih raspodela verovatnoće otkaza za sve vrste valjaka simulacijom je moguće vršiti predikciju troškova na bazi zamene valjaka na tačno definisanom nivou pouzdanosti svakog valjka pojedinačno, te promenom tog nivoa pouzdanosti utvrditi na kom nivou pouzdanosti je najbolje izvršiti preventivnu zamenu valjaka. Naravno, posledično se događa i otkaz određenog broja valjaka pa se u ukupne troškove kalkulišu i troškovi zamene ovih valjaka ali i troškovi zastoja. Izmenjeni algoritam simulacije kombinovanog održavanja 3.50. prikazan je na slici 5.5. čime je dobijena mogućnost proračuna troškova održavanja.

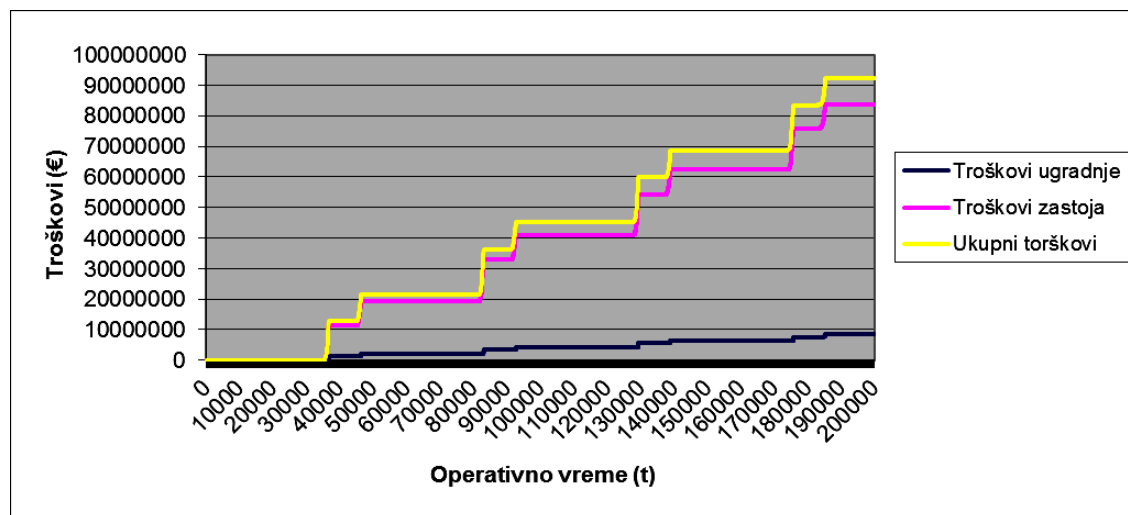


Slika 5.5. – Algoritam simulacije za slučaj kombinovanog održavanja sa proračunom troškova⁹⁰

Algoritam uzima u obzir da je moguće zameniti sve valjke tokom perioda planiranog zastoja a da se zamena vrši uvek novim valjcima proizvođača Precismeca.

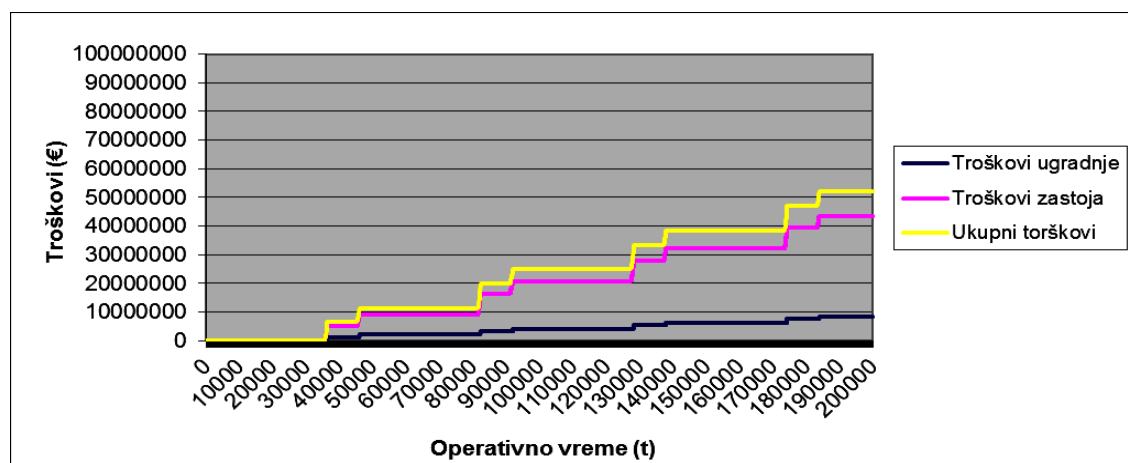
⁹⁰ Milošević, D., Josimović, Lj., Petrov, T., Adamović, Ž., Maintenance planning of btr system belt conveyors using a model based on reliability and maintenance costs, TTEM, 2013., 8(3), 1257-1265.

Prvi scenario kombinovanog održavanja podrazumeva zamenu svih valjaka čija pouzdanost prema teorijskoj raspodeli padne na nivo od 80%. Nakon perioda od 200.000 časova operativnog vremena troškovi zamene iznose 8.380.952 €, a troškovi neplaniranih zastoja 83.820.000 €, što će reći da troškovi neplaniranih zastoja čine 90,91% ukupnih troškova. Ukupni troškovi su dosegli nivo od 92.200.952 €. Kretanje ovih troškova tokom vremena je prikazan na slici 5.6.



Slika 5.6. – Ukupni troškovi, troškovi zastoja i ugradnje za prvi scenario kombinovanog održavanja⁹⁰

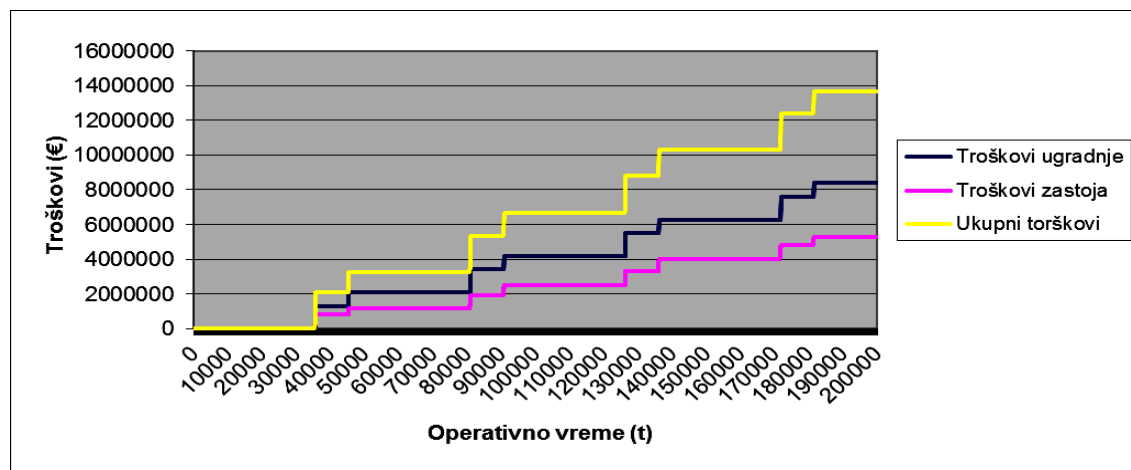
Drugi scenario kombinovanog održavanja podrazumeva zamenu svih valjaka novim valjcima stranog proizvođača čija pouzdanost prema teorijskoj raspodeli padne na nivo od 90%. Za drugi scenario nakon perioda od 200.000 časova operativnog vremena troškovi zamene iznose 8.380.952 €, a troškovi neplaniranih zastoja 43.580.000 €, što će reći da troškovi neplaniranih zastoja čine 83,87% ukupnih troškova. Ukupni troškovi su za 200.000 radnih časova dosegli nivo od 51.960.952 €. Kretanje ovih troškova tokom vremena je prikazan na slici 5.7.



Slika 5.7. – Ukupni troškovi, troškovi zastoja i ugradnje za drugi scenario kombinovanog održavanja⁹⁰

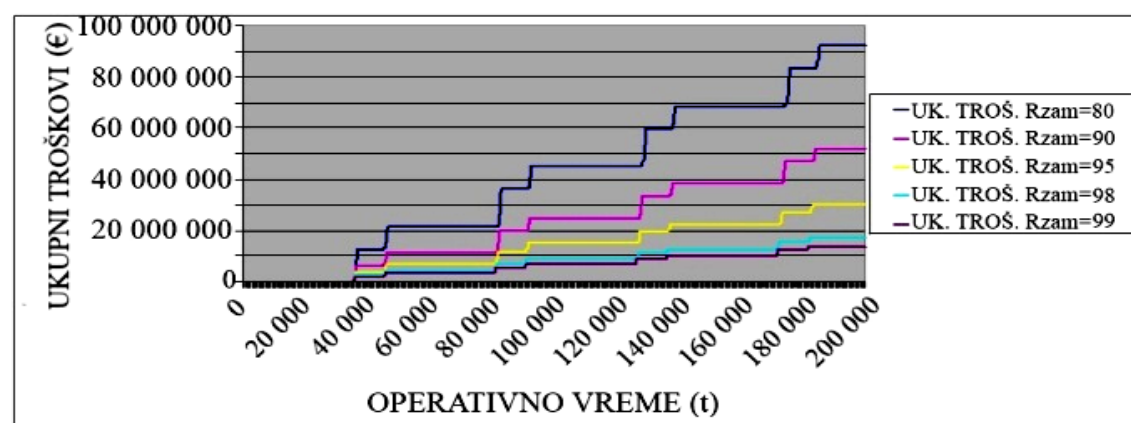
⁹⁰ Milošević, D., Josimović, Lj., Petrov, T., Adamović, Ž., Maintenance planning of btr system belt conveyors using a model based on reliability and maintenance costs, TTEM, 2013., 8(3), 1257-1265.

Treći scenario kombinovanog održavanja podrazumeva zamenu svih valjaka novim valjcima stranog proizvođača čija pouzdanost prema teorijskoj raspodeli padne na nivo od 99%. Broj neplaniranih zastoja – otkaza je ukupno svega 262 što se odražava na smanjenje troškova zastoja te nakon perioda od 200.000 časova operativnog vremena troškovi zamene iznose 8.380.952 €, a troškovi neplaniranih zastoja 5.280.000 €, što će reći da troškovi neplaniranih zastoja čine 38,65% ukupnih troškova. Ukupni troškovi su za 200.000 radnih časova dosegli nivo od 13.660.952 €. Kretanje ovih troškova tokom vremena je prikazan na slici 5.8.



Slika 5.8. – Ukupni troškovi, troškovi zastoja i ugradnje za treći scenario kombinovanog održavanja⁹⁰

Poređenjem ukupnih troškova za različite scenarije kombinovanog održavanja, a prema nivou pouzdanosti (99%, 98%, 95%, 90% i 80%) na kome se vrši zamena svih valjaka novim valjcima proizvođača Precismeca, bez ograničenja u broju valjaka koji se menja, dobija grafik na slici 5.9.



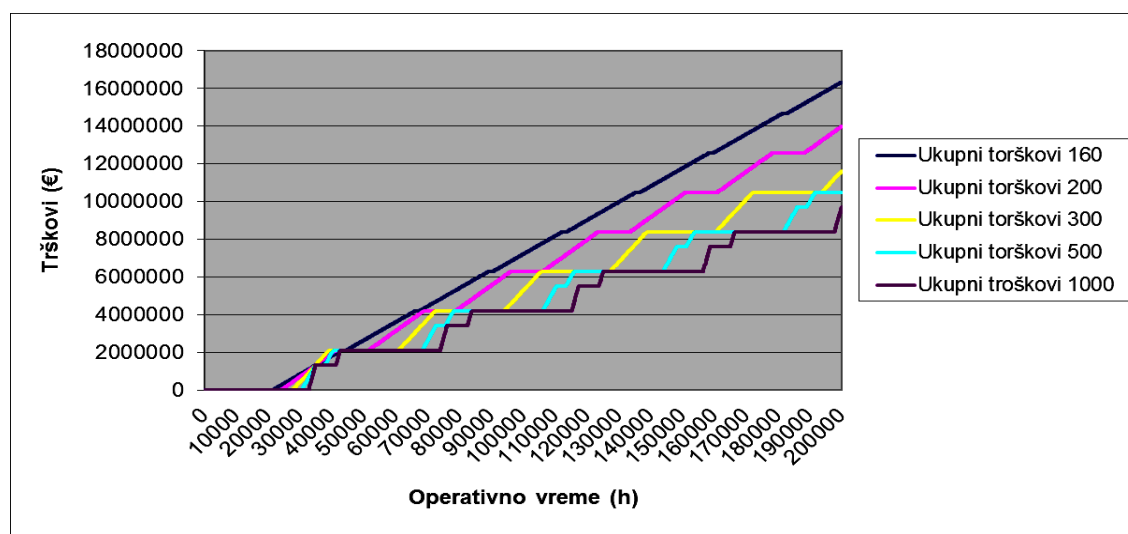
Slika 5.9. – Uporedni troškovi različitih scenarija kombinovanog održavanja⁹⁰

Poređenjem troškova kombinovanog održavanja jasno je uočljivo da što je manje korektivnih akcija održavanja u strategiji kombinovanog održavanja, to su ukupni

⁹⁰ Milošević, D., Josimović, Lj., Petrov, T., Adamović, Ž., Maintenance planning of btr system belt conveyors using a model based on reliability and maintenance costs, TTEM, 2013., 8(3), 1257-1265.

troškovi manji jer su troškovi zastoja manji. Izvesno je da bi strategija preventivnog održavanja dala najbolje rezultate. Ipak pretpostavljeni modeli su do sada imali apstrakciju ograničenja u pogledu broja valjaka koji se mogu zameniti u toku perioda planiranog zastoja (nedeljno jedna smena od 8 sati). Treći set simulacija će se stoga bazirati na pretpostavci **preventivnog održavanja** sa različitim brojem valjaka koji se mogu zameniti u periodu planskih zastoja. Pretpostavka je da se vodi stroga evidencija zamene valjaka te da se valjci menjaju tako da se što više iskoristi period njihovog bezotkaznog rada prema teorijskoj raspodeli, tj. oni se ne menjaju sve dok je njihovo operativno vreme u opsegu parametra položaja γ . Zamena valjaka se počinje tako da se ne dozvoli da operativno vreme nijednog valjka ne premaši γ , što praktično znači da mogućnost zamene većeg broja valjaka podrazumeva i bolje iskorišćenje ovog perioda bezotkaznog rada valjaka. Posledično ukupni troškovi će biti manji. Jasno je da sada ukupni troškovi održavanja predstavljaju samo troškove zamene.

Broj valjaka koji se može zameniti valjcima stranog proizvođača u periodu planskog zastoja od 8 sati je manjan počevši od 1.000 komada i smanjivan na 500, 300, 200 itd. Simuliranjem je ustanovljeno da je zamena 160 valjaka marginalni slučaj, jer sa manjim brojem zamena se prelazi na kombinovano održavanje usled pojave otkaza. Slika 5.10. predstavlja poređenje troškova ovih slučajeva.



Slika 5.10. – Uporedni troškovi različitih slučajeva preventivnog održavanja⁹⁰

Tabela 5.1. prezentuje iznose troškova održavanja nakon perioda od 200.000 operativnih časova za svaku od simulacija a prema maksimalnom broju zamene valjaka.

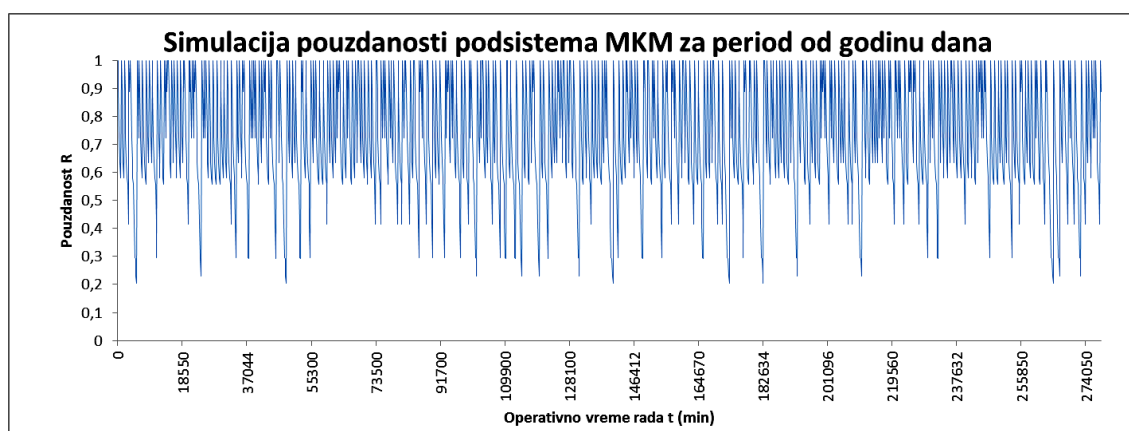
Broj valjaka	160	200	300	500	1000
Ukupni troškovi	16.324.921,90	13.981.607,62	11.609.798,10	10.476.190,48	9.690.476,19

Tabela 5.1. – Troškovi održavanja transportne trake prema maksimalnom broju zamene valjaka tokom preventivnog održavanja za period od 200.000 operativnih časova⁹⁰

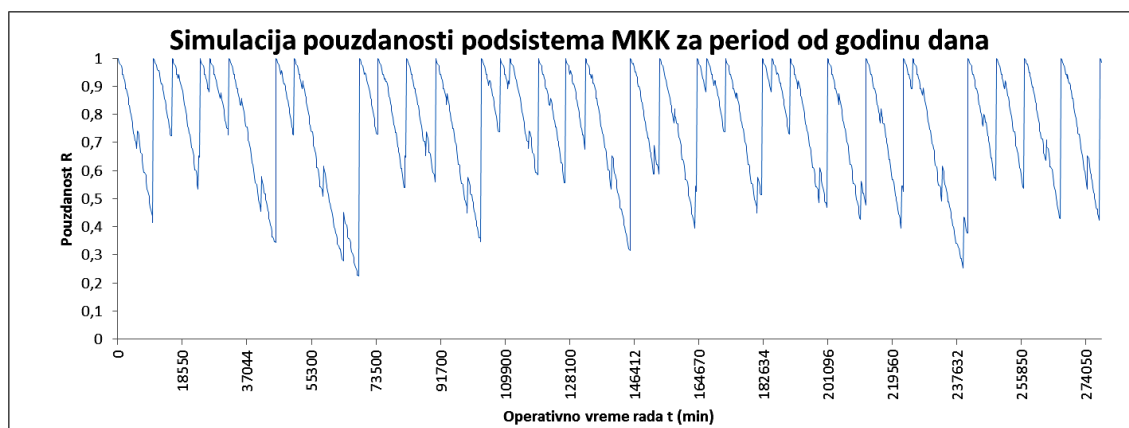
⁹⁰ Milošević, D., Josimović, Lj., Petrov, T., Adamović, Ž., Maintenance planning of btr system belt conveyors using a model based on reliability and maintenance costs, TTEM, 2013., 8(3), 1257-1265.

5.1.2. ROTORNI BAGER 1200X24/4X0 (400KW) + VR KOJI RADI NA POVRŠINSKOM KOPU UGLJA RB KOLUBARA

Kao rezultat softverske simulacije prezentovane slikom 4.31. koji je kao modifikovan primenjivan i na druge tehničke sisteme¹⁰⁰ dobija se moguća slika rada celog sistema rotornog bagera sa podacima o pouzdanosti svakog pojedinog podsistema a u svakoj vremenskoj tački kalkulacije (VTK) tokom operativnog vremena. Istovremeno je moguće dobiti i integracije pouzdanosti podsistema i sliku o pouzdanosti čitavog rotornog bagera tokom vremena. Primer kretanja pouzdanosti za svaki od 6 podsistema tokom operativnog vremena od 278.278 minuta (jedne godine rada) je dat na slikama 5.11. do 5.16. Pouzdanost čitavog sistema rotornog bagera tokom operativnog vremena je prikazana na slici 5.17.



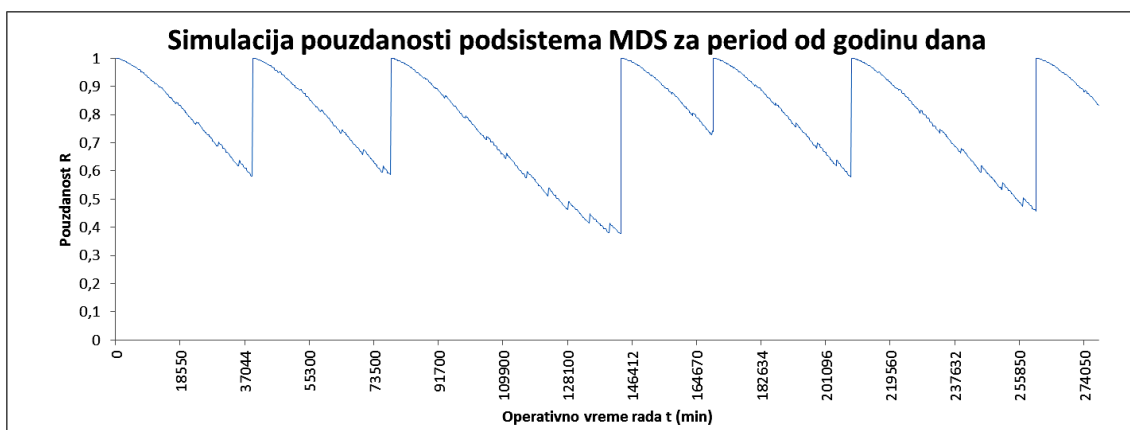
Slika 5.11. – Kretanje pouzdanosti podsistema mehanizam za kopanje materijala tokom operativnog vremena⁹⁵



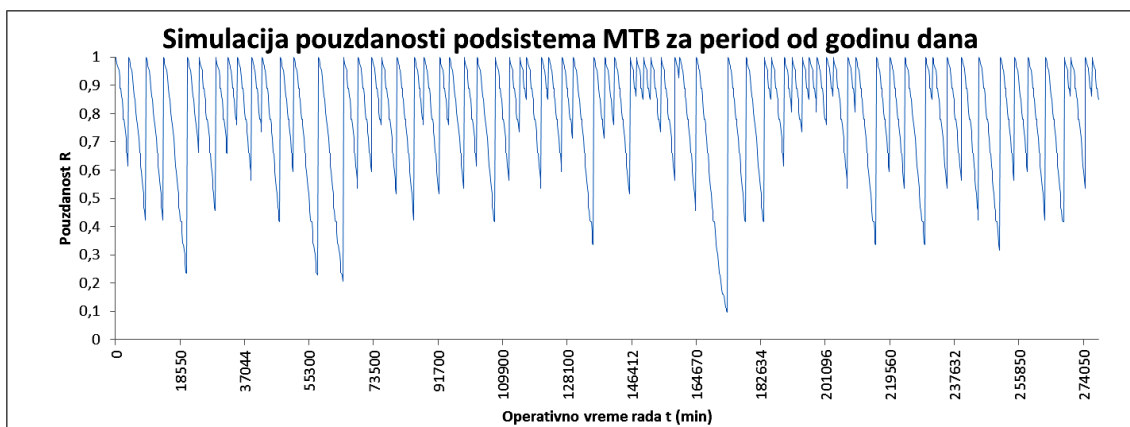
Slika 5.12. – Kretanje pouzdanosti podsistema mehanizam za kružno kretanje tokom operativnog vremena⁹⁵

¹⁰⁰ Milošević, D., Janić, N., Vulović, M., Adamović, Ž., Optimization of preventive maintenance of lubrication subsystem by reliability simulation model of V46-6 engine., Journal of the Balkan Tribological Association, 2016., 22(1).

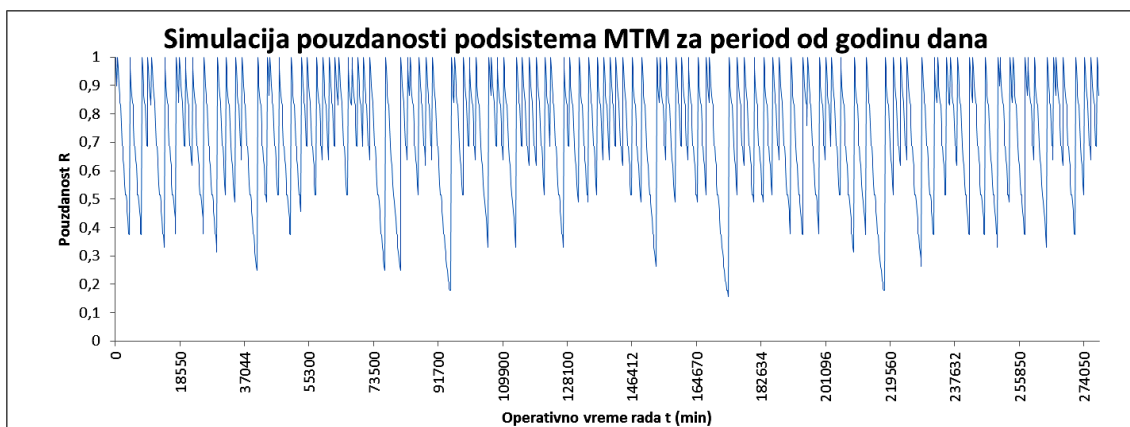
⁹⁵ Milošević D., Adamović Ž., Reliability Simulation Model for Bucket Wheel Excavator, Metalurgia International, 2013., 18(11), 13-20.



Slika 5.13. – Kretanje pouzdanosti podsistema mehanizam za dizanje strele rotora tokom operativnog vremena⁹⁵

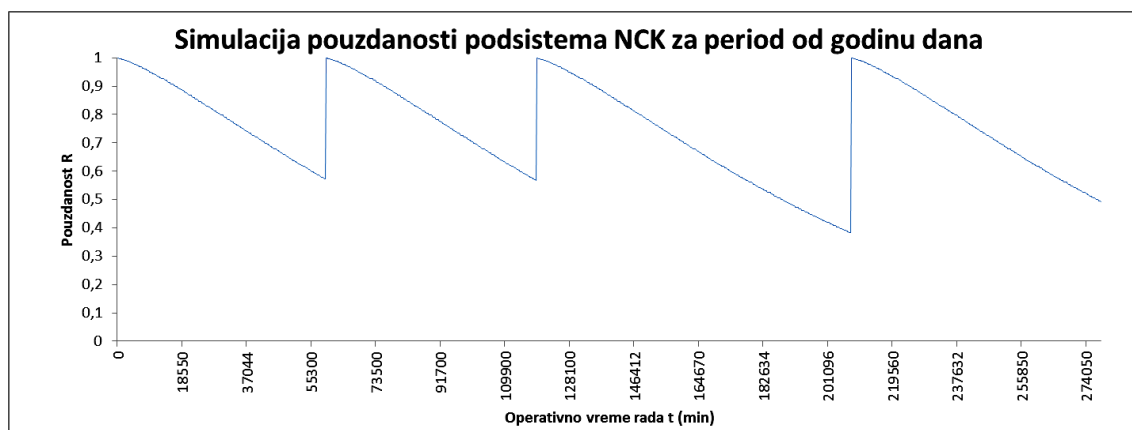


Slika 5.14. – Kretanje pouzdanosti podsistema mehanizam za transport bagera tokom operativnog vremena⁹⁵

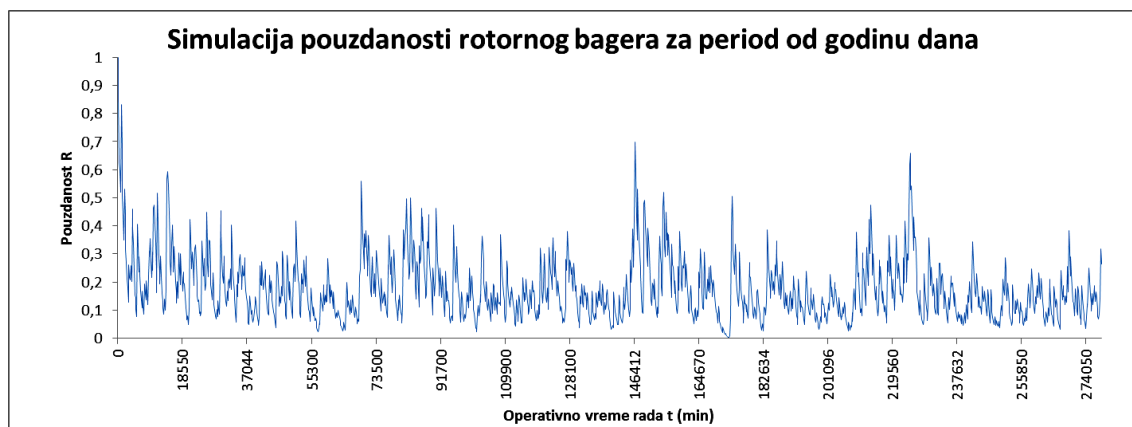


Slika 5.15. – Kretanje pouzdanosti podsistema mehanizam za transport materijala tokom operativnog vremena⁹⁵

⁹⁵ Milošević D., Adamović Ž., Reliability Simulation Model for Bucket Wheel Excavator, Metalurgia International, 2013., 18(11), 13-20.



Slika 5.16. – Kretanje pouzdanosti podsistema noseća čelična konstrukcija tokom operativnog vremena⁹⁵



Slika 5.17. – Kretanje pouzdanosti sistema rotorni bager SRs 1200x24/4x0 (400kW) + VR tokom operativnog vremena od godinu dana⁹⁵

Broj otkaza prema komponentama sistema koji se dogodio tokom simulacije prezentovan je u tabeli 5.2.

Komponenta	Broj otkaza
MKM	324
MKK	34
MDS	6
MTB	74
MTM	121
NČK	3
Ukupno	562

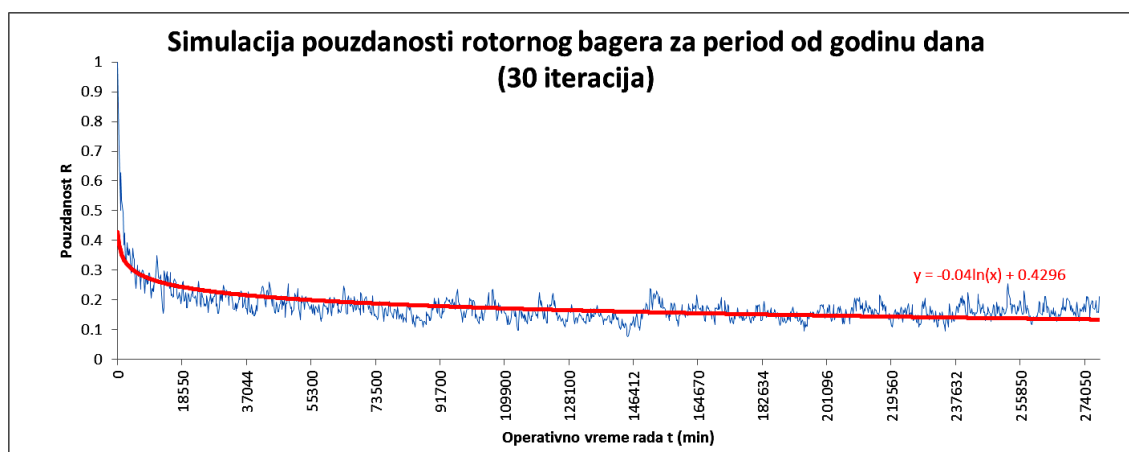
Tabela 5.2. - Broj otkaza prema komponentama sistema rotornog bagera za simulacioni period od godinu dana rada sistema

Broj otkaza sad je drugačiji u odnosu na period obzervacije kao i ukupno jer je simulirani period različit. Ipak, jasno je koja prva komponenta MKM ima najveći broj otkaza a najmanje NČK. Ovo je samo jedna od mogućnosti otkazivanja komponenti

⁹⁵ Milošević D., Adamović Ž., Reliability Simulation Model for Bucket Wheel Excavator, Metalurgia International, 2013., 18(11), 13-20.

sistema koja ne znači sama po sebi puno ukoliko nema veći broj iteracija kako bi se došlo do preciznijih informacija o broju otkaza.

Softver omogućava čak i veliki vremenski period simuliranja rada sistema pa se time može dobiti bolje uočavanje pravilnosti kretanja pouzdanosti koje se bilo kojim drugim načinom ne može dobiti. Simuliranjem rada sistema na duži vremenski period se mogu dobiti prosečne vrednosti pouzdanosti u vremenskim tačkama kalkulacije. Slika 5.18. ilustruje kretanje prosečne vrednosti pouzdanosti sistema za simulacioni period od 30 godina jer se 30 može uzeti kao veliki broj iteracija simulacije a ne ugroziti vreme izvršenja i u razumnom roku doći do rezultata.



Slika 5.18. – Prosečne vrednosti pouzdanosti sistema rotorni bager SRs 1200x24/4x0 (400kW) + VR tokom operativnog vremena za simulaciju rada bagera od 30 godina.

Kako je došlo do uprosečenja vrednosti pouzdanosti za duži simulacioni period tako je sada lakše implementacijom regresione funkcije doći do pravilnosti kretanja prosečne pouzdanosti sistema. Regresiona funkcija je dobijena metodom minimalne razlike kvadrata kao logaritamska i glasi:

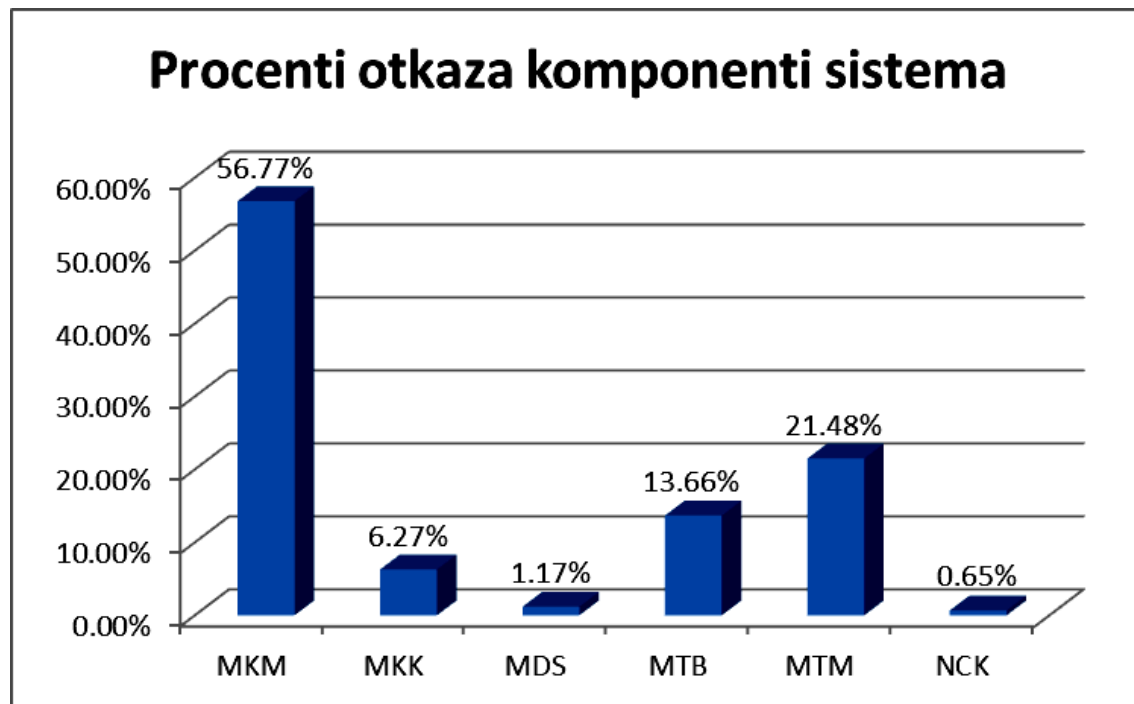
$$\gamma = -0,04 \ln x + 0,4296 \quad (5.1.)$$

Simulacijom se dobija realnija slika kretanja pouzdanosti sistema a prosečan godišnji broj otkaza za ovaj period prikazan je u tabeli 5.3.

Komponenta	Broj otkaza
MKM	306,9
MKK	33,9
MDS	6,3
MTB	73,83
MTM	116,1
NČK	3,53
Ukupno	540,57

Tabela 5.3. – Prosečan godišnji broj otkaza prema komponentama sistema rotornog bagera za simulacioni period od 10 godina rada sistema

Procentualno to izgleda kao na slici 5.19.



Slika 5.19. – Procenti otkaza komponenti sistema rotornog bagera SRs 1200x24/4x0 (400kW) + VR za simulacioni period od 30 godina

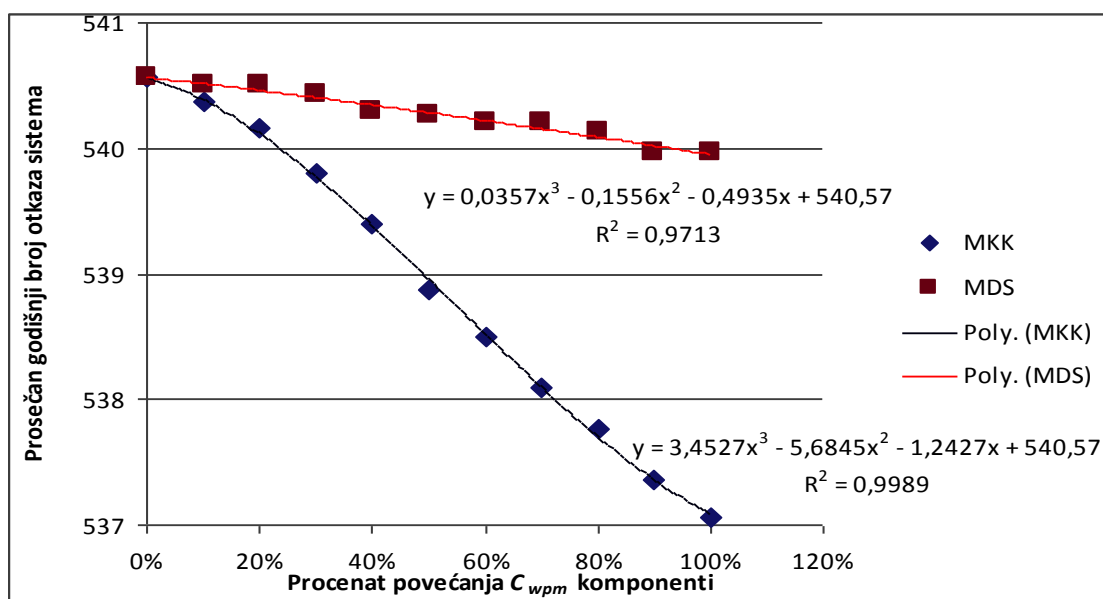
Iz priloženog se vidi da je mogući uticaj preventivnog održavanja preko komponenata MKK i MDS relativno mali te da otkazi ovih komponenti čine oko 7,44% ukupnih ali je taj uticaj simuliranjem moguće preciznije ustanoviti te doći do prosečnog broja otkaza, kao relevantne vrednosti da se ustanovi kako promene kvaliteta preventivnih akcija održavanja utiču na celokupan sistem i koji su potencijalni finansijski efekti toga. Za broj iteracija simulacije se bira 30 kao veliki broj a simulacije se ponavljaju za povećane efekte preventivnog održavanja povećavanjem za po 10%, ali podsisteme MKK i MDS posebno kako bi se uočio uticaj preventivnog održavanja svakog od podsistema. Podsistemi koji se preventivno održavaju se nužno moraju posebno posmatrati zbog nejednakog načina održavanja, razlika u finansijskim ulaganjima kao i svih ostalih mogućih razlika.

Ova serija simulacija je dala brojeve otkaza za različite vrednosti C_{wpm} kod podsistema koji se preventivno održavaju i što je prikazano u tabeli 5.4.

Ukoliko se tabela 5.4. predstavi grafički i u koordinatni sistem smesti prosečan broj otkaza celog sistema u zavisnosti od promena koeficijenta C_{wpm} za podsisteme MKK i MDS moguće je dobiti i regresione funkcije što je grafički prikazano na slici 5.20.

MKK	MDS	Broj otkaza sistema
$C_{wpm} + 0\%$	$C_{wpm} + 0\%$	540,57
$C_{wpm} + 10\%$	$C_{wpm} + 0\%$	540,37
$C_{wpm} + 20\%$	$C_{wpm} + 0\%$	540,17
$C_{wpm} + 30\%$	$C_{wpm} + 0\%$	539,80
$C_{wpm} + 40\%$	$C_{wpm} + 0\%$	539,40
$C_{wpm} + 50\%$	$C_{wpm} + 0\%$	538,87
$C_{wpm} + 60\%$	$C_{wpm} + 0\%$	538,50
$C_{wpm} + 70\%$	$C_{wpm} + 0\%$	538,10
$C_{wpm} + 80\%$	$C_{wpm} + 0\%$	537,77
$C_{wpm} + 90\%$	$C_{wpm} + 0\%$	537,37
$C_{wpm} + 100\%$	$C_{wpm} + 0\%$	537,07
$C_{wpm} + 0\%$	$C_{wpm} + 0\%$	540,57
$C_{wpm} + 0\%$	$C_{wpm} + 10\%$	540,50
$C_{wpm} + 0\%$	$C_{wpm} + 20\%$	540,50
$C_{wpm} + 0\%$	$C_{wpm} + 30\%$	540,43
$C_{wpm} + 0\%$	$C_{wpm} + 40\%$	540,30
$C_{wpm} + 0\%$	$C_{wpm} + 50\%$	540,27
$C_{wpm} + 0\%$	$C_{wpm} + 60\%$	540,20
$C_{wpm} + 0\%$	$C_{wpm} + 70\%$	540,20
$C_{wpm} + 0\%$	$C_{wpm} + 80\%$	540,13
$C_{wpm} + 0\%$	$C_{wpm} + 90\%$	539,97
$C_{wpm} + 0\%$	$C_{wpm} + 100\%$	539,97

Tabela 5.4. – Prosečan godišnji broj otkaza sistema rotornog bagera za simulacioni period od 30 godina rada sistema za različite vrednosti C_{wpm}



Slika 5.20. – Prosečan godišnji broj otkaza sistema u zavisnosti od promena C_{wpm} komponenti MKK i MDS (na bazi simulacije za period od 30 godina)

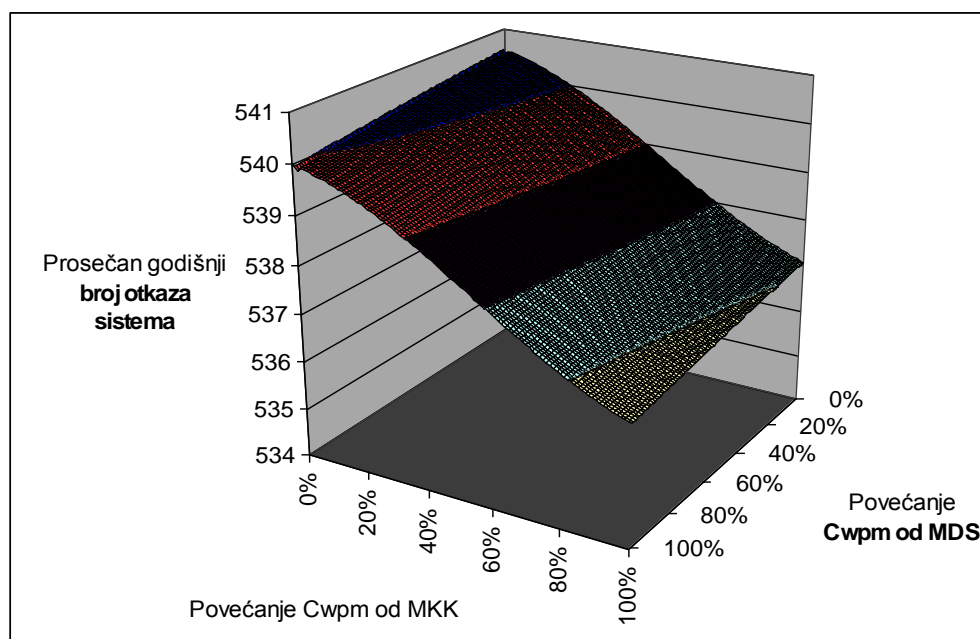
Dobijene vrednosti su iskorišćene radi dobijanja linearnih regresionih funkcija. Tako broj otkaza sistema u zavisnosti od povećanja C_{wpm} komponente MKK opada prema funkciji:

$$y = 3,4527 x^3 - 5,6845 x^2 - 1,2427 x + 540,57 \quad (5.1.)$$

a u zavisnosti od povećanja C_{wpm} komponente MDS prema funkciji:

$$y = 0,0357 x^3 - 0,1556 x^2 - 0,4935 x + 540,57 . \quad (5.2.)$$

Iz grafika na slici 5.20. se uočava da se sa povećanjem C_{wpm} komponenti nejednako menja i prosečan broj otkaza celog sistema. Jasno je takođe da to ne znači da je prioritetno ulaganje u preventivne akcije komponente koja sa istim procentualnim povećanjem postiže veći efekat. Razlog je taj što se ne postiže jednako lako povećanje koeficijenta C_{wpm} za različite komponente. Efekti procentualnih povećanja koeficijenata C_{wpm} za komponente MKK i MDS se vide na slici 5.21.



Slika 5.21. – Potrebna uvećanja koeficijenata C_{wpm} komponenti MKK i MDS radi postizanja odgovarajućeg prosečnog godišnjeg broja otkaza sistema rotornog bagera za simulacioni period od 30 godina

Ovime su jasno izražene potrebe u kom smeru je potrebno uložiti napore po pitanju preventivnih akcija održavanja i na kojoj komponenti sistema konkretno kako bi se postigli odgovarajući efekti na smanjenje broja otkaza i pouzdanost sistema u celini. Ovi efekti su i finansijski merljivi sa aspekta proizvodnih gubitaka usled prinudnog zastoja. Ukoliko se na osnovu proizvodnog kapaciteta bagera i pretpostavljenog prosečnog vremena zastoja pretpostavi prosečna cena gubitka usled pojedinačnog otkaza lako je umesto broja otkaza postaviti finansijske efekte smanjenja broja otkaza postignute boljim preventivnim delovanjem na komponente MKK i MDS, te planirati preventivne akcije održavanja na osnovu toga. Poređenjem ovih troškova sa troškovima

ulaganja u preventivno ulaganje može se doći do optimuma finansijskog ulaganja u preventivno održavanje.

5.1.3. BLOKOVI B1 I B2 TERMoeLEKTRANE KOSTOLAC B

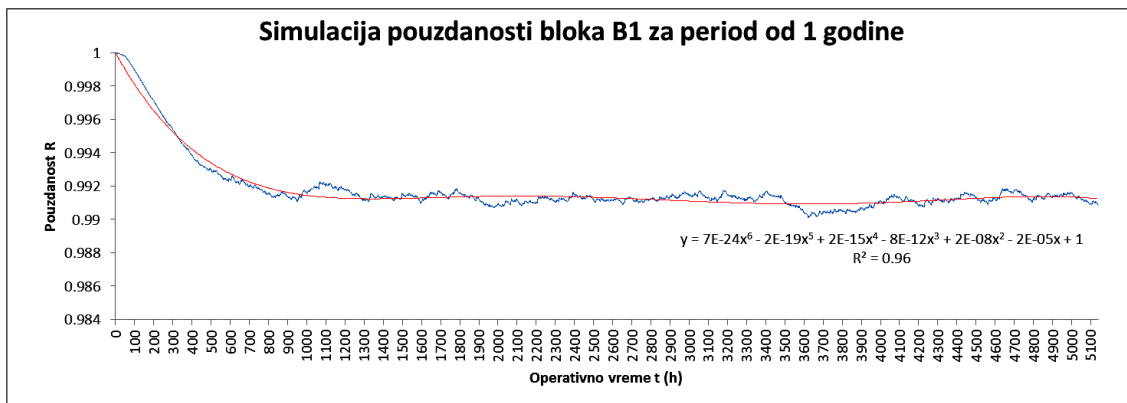
Rezultati modela pouzdanosti koji je primenjen na blokove termoelektrane Kostolac B su proistekli, kao i u prethodnom modelu, iz iterativnog ponavljanja simulacije blokova usled čega je moguće dobiti širu sliku o pouzdanosti elektrane. Model omogućuje takođe i praćenje izolovanih slučajeva razmatranja boljeg preventivnog delovanja na pojedine komponente sistema u određenom procentu promenom parametara u matrici interakcije što je rezultat potencijalnih preventivnih akcija održavanja.

Prvi rezultati simulacije se odnose na iterativno ponavljanje simulacije pouzdanosti čitave elektrane te dobijanje prosečnih vrednosti pouzdanosti celih blokova elektrane i njenih komponenti. Broj iteracija je 100. Monte Carlo pristup omogućava da se dođe do prosečnog broja otkaza komponenti sistema kao i sistema u celini. Tabela 5.5. prikazuje upravo ove simulacione otkaze.

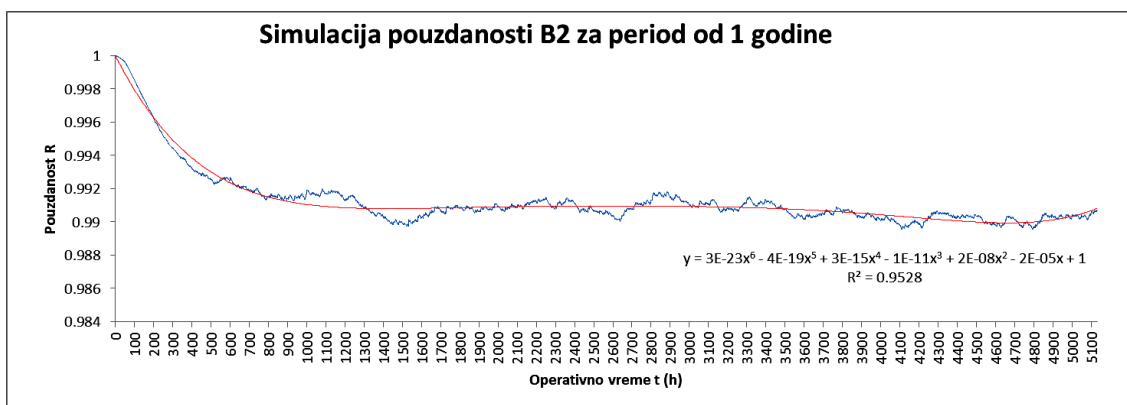
Blok-Komponenta	Prosečno godišnje operativno vreme (h)	Prosečan simulacioni godišnji broj otkaza
B1-K4		11,53
B1-K5		7,98
B1-K6		7,2
B1-K7		2,38
B1-K8		4,39
B1-K9		0,07
B1-K10		0,07
B1-K11		1,09
B1-K12		2,83
B1-K13		0,69
B1 ukupno	5138	38,23
B2-K4		12,31
B2-K5		11,27
B2-K6		7,72
B2-K7		3,35
B2-K8		3,56
B2-K9		0,06
B2-K10		0,13
B2-K11		0,45
B2-K12		2,43
B2-K13		0,51
B2 ukupno	5131	41,79

Tabela 5.5. – Prosečan broj simulacionih otkaza komponenti i sistema blokova elektrane za period od godinu dana (100 iteracija)

U prilogu 6 su dati grafici kretanja pouzdanosti svake od komponenti sistema za oba bloka elektrane za period od godinu dana rada a kao prosek 100 iteracija. Takođe su date i regresione funkcije za svaku komponentu. Za ceo sistem ovi isti podaci su dati na slikama koje slede 5.22 i 5.23.



Slika 5.22. – Prosečna vrednost pouzdanosti tokom godinu dana rada bloka B1 i regresiona funkcija (100 iteracija simulacije)

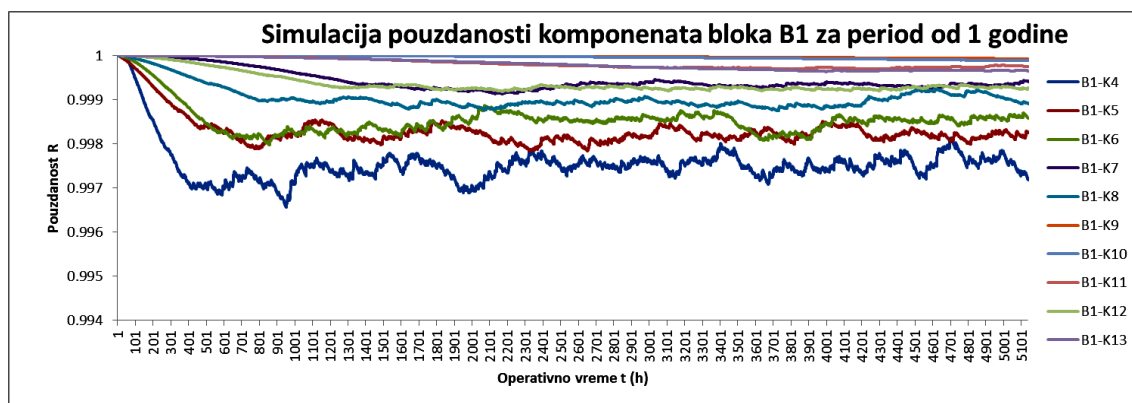


Slika 5.23. – Prosečna vrednost pouzdanosti tokom godinu dana rada bloka B2 i regresiona funkcija (100 iteracija simulacije)

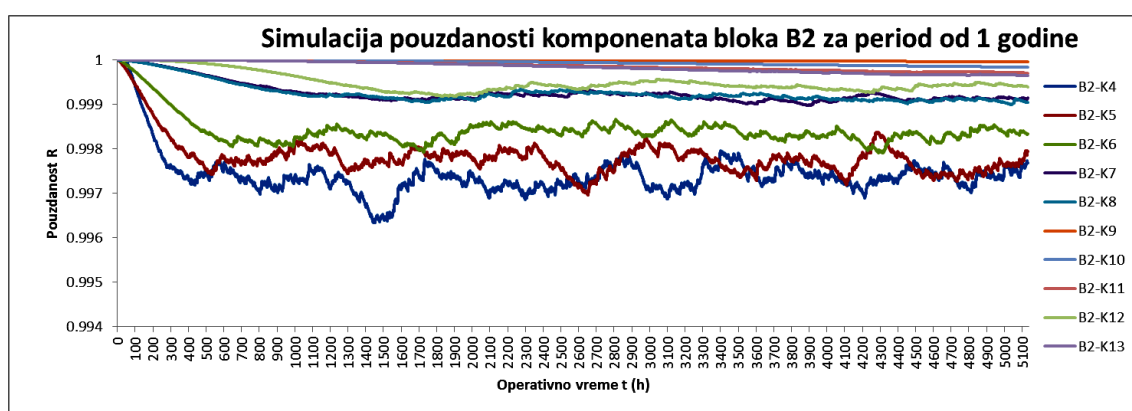
Regresione funkcije na slikama 5.22. i 5.23. su iskazane kao polinomi šestog stepena i za blok B1 i B2. Slično tome sve regresivne funkcije su istog oblika i približne po pitanju vrednosti R^2 za svaku komponentu sistema. Ovo ukazuje na kvalitet simulacije jer su bez obzira na odvojenost blokova elektrane zbog sličnih tehničkih rešenja kretanja pouzdanosti slična.

Uporedne srednje prosečne vrednosti komponenata blokova za 100 iteracija simulacije date su na slikama 5.24. i 5.25.

Pogledom na slike 5.24 i 5.25 lako je uočiti gotovo identičan raspored pouzdanosti komponenti tokom vremena za oba bloka. Na ovo utiče modulirana struktura blokova elektrane kao i slična konstrukcijska rešenja te ugradnja delova slične pouzdanosti kao i slične akcije održavanja koje se preduzimaju na oba bloka elektrane a najviše relativno mala razlika u starosti blokova elektrana.



Slika 5.24. – Uporedo prikazana prosečna vrednost pouzdanosti tokom godinu dana rada komponenti bloka B1 (100 iteracija simulacije)



Slika 5.25. – Uporedo prikazana prosečna vrednost pouzdanosti tokom godinu dana rada komponenti bloka B2 (100 iteracija simulacije)

Pitanje je kako se promenom efekata akcija održavanja može uticati na pouzdanost komponenata elektrane koje su u interakciji. Održavanje ostalih komponenti je takvo da ima samo korektivnog održavanja kao i remonta koji mogu više uticati na pouzdanost ovako složenog tehničkog sistema. Ipak koliki je uticaj u interakciji je definisano matricama interakcije za oba bloka te je simulaciju potrebno obaviti za slučajeve većih ili manjih efekata interakcije među komponentama. To znači da je vrednosti koeficijenata $a_{k1,k2}$ i $b_{k1,k2}$ u jednačinama matrice interakcije oblika $y_{k1,k2} = a_{k1,k2}x^2 + b_{k1,k2}x + c_{k1,k2}$ potrebno menjati za određeni procenat vrednosti proporcionalno a koeficijentima $c_{k1,k2}$ ne menjati vrednosti kao onu na koju međuotkazi afektujuće komponente nemaju uticaj. Tako se, za isti procenat u tom procentu za koji su i promenjeni dati koeficijenti, menja i uticaj preventivnih akcija održavanja tokom međuotkaza te ispituje njihov uticaj na pouzdanost komponenti i čitavog sistema. Broj iteracija će biti ponovo 100 kao i do sada.

Povećavanjem efekata preventivnih akcija održavanja za po 50% tj. uvećavanjem parametara koji utiču na vremenski pomak tj. podmlađivanje ili ostarivanje afektovanih komponenti sistema iz obrasca 4.61. možemo doći do jasnije slike efekata preventivnih akcija održavanja. Simulacije je potrebno sprovesti u iteracijama od po 100 za svih sedam relevantnih uticaja iz matrice interakcije posebno i to:

- B1-6-4
- B2-5-8
- B1-7-5
- B1-11-8
- B1-12-6
- B2-12-6
- B2-12-8

Specifičan slučaj za blok B1 jeste uticaj međuotkaza komponente K4 na komponentu K6 bloka B1 jer se indirektno ostvaruje i uticaj na komponentu K12, međutim način izvođenja simulacije je identičan.

Nakon svake pojedinačne serije simulacije može se doći do podataka o promeni pouzdanosti celog sistema ili relativnim razlikama koje vremenom nastaju. Kumulativne razlike ili regresivne funkcije nisu dobro sredstvo da se utvrdi da se kvantifikuje uticaj boljeg preventivnog održavanja neke komponente sistema usled međuotkaza afektujuće. Razlog je taj što preventivno održavanje može održavati nivo pouzdanosti afektovane komponente na nižem nivou ali dovoljno visokom da se otkazi pojavljuju ređe nego kada nema preventive. Time je zapravo zaključak da je jedino pogodan podatak za kvantifikaciju uticaja preventivnog održavanja prosečan broj otkaza tokom iteracije simulacije odnosno razlika koja postoji između pouzdanosti bez preventivnog održavanja (R) i projektovane pouzdanosti sa preventivnim održavanjem (Rp).

Kada se radi o potencijalnom lošem uticaju afektujuće komponente na afektovanu onda je moguće reći da postoji mogućnost kvantifikacije uticaja i regresivnom funkcijom ili kumulativnim funkcijama pouzdanosti, relativnih razlika pouzdanosti itd., međutim podatak o broju otkaza i dalje ostaje validan iako u nekim prilikama i šturiji da objasni pojave. Nakon serija simulacija dobijaju se sledeći podaci o prosečnim otkazima komponenti sistema, prezentovani u tabeli 5.6.

Blok	Povećanja uticaja interakcije	Promena prosečnog broja otkaza bloka
B1	$150\% \cdot \tau_{6,4}$	-0,239999999999899
	$150\% \cdot \tau_{7,5}$	-0,0800000000000027
	$150\% \cdot \tau_{11,8}$	-0,00000000000020872192862952900
	$150\% \cdot \tau_{12,6}$	-0,0999999999999996
B2	$150\% \cdot \tau_{5,8}$	-0,289999999999996
	$150\% \cdot \tau_{12,6}$	-0,2600000000000027
	$150\% \cdot \tau_{12,8}$	-0,2500000000000027

Tabela 5.6 – Prosečan nivo otkaza sistema tokom simulacije a za povećanja vrednosti matrica interakcije za 50% (100 iteracija)

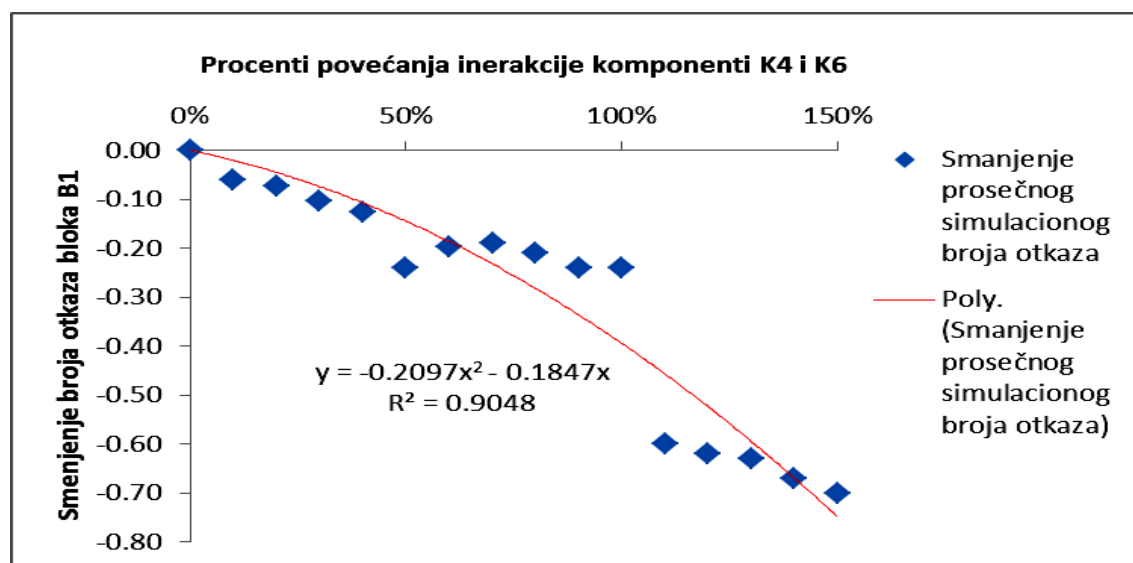
Podaci koji su dostupni mogu ukazati na pravce preventivnog delovanja tokom međuotkaza koji mogu doneti najmanji broj otkaza elektrane u perspektivi. Da bi se dobila jasnija slika o efektima ovih preventivnih akcija za slučaj najvećeg smanjenja prosečnog broja otkaza za oba bloka simulirani su primeri sa različitim procentima efekata interakcije kako bi se odbila određenija pravilnost. Rezultati ove serije

simulacija za interakciju komponenti B1-K4 kao afektujuće i B1-K6 afektovane su dati u tabeli 5.7. koja sledi.

Procenti povećanja $\tau_{6,4}$	Smanjenje prosečnog simulacionog broja otkaza
0%	0,0000000000000000
10%	-0,0614000000000007
20%	-0,0727999999999967
30%	-0,1041999999999965
40%	-0,1255999999999953
50%	-0,2399999999999899
60%	-0,1983999999999933
70%	-0,1900000000000029
80%	-0,2100000000000048
90%	-0,2400000000000057
100%	-0,2400000000000057
110%	-0,5999999999999995
120%	-0,6200000000000003
130%	-0,6299999999999993
140%	-0,6700000000000017

Tabela 5.7. – Tabelarni prikaz uticaja promene interakcije komponenti K4 i K6 na prosečan simulacioni broj otkaza bloka B1

Ukoliko se podaci iz table 5.7. prikazu grafički i pronađe regresivna funkcija dobija se grafik prikazan na slici 5.26.



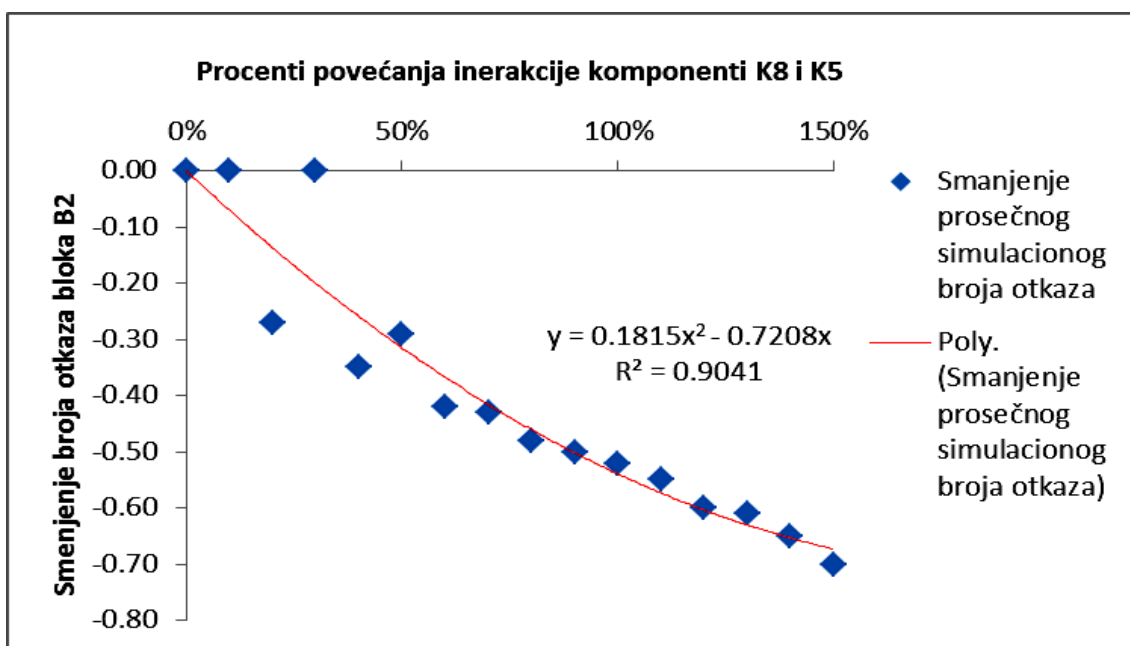
Slika 5.26. – Grafički prikaz smanjenja prosečnog simulacionog broja otkaza bloka B1 u zavisnosti od povećanja interakcije komponenti K4 i K6

Analogno tome je urađen i slučaj uticaja komponente K8 na K5 u okviru bloka B2. Rezultati su prezentovani u tabeli 5.8.

Procenti povećanja $\tau_{5,8}$	Smanjenje prosečnog simulacionog broja otkaza
0%	0,0000000000000000
10%	0,0000000000000000
20%	-0,269999999999781
30%	0,0000000000000000
40%	-0,349999999999898
50%	-0,289999999999960
60%	-0,420000000000124
70%	-0,430000000000117
80%	-0,4800000000000000
90%	-0,499999999999750
100%	-0,519999999999825
110%	-0,549999999999999
120%	-0,599999999999648
130%	-0,610000000000333
140%	-0,650000000000095

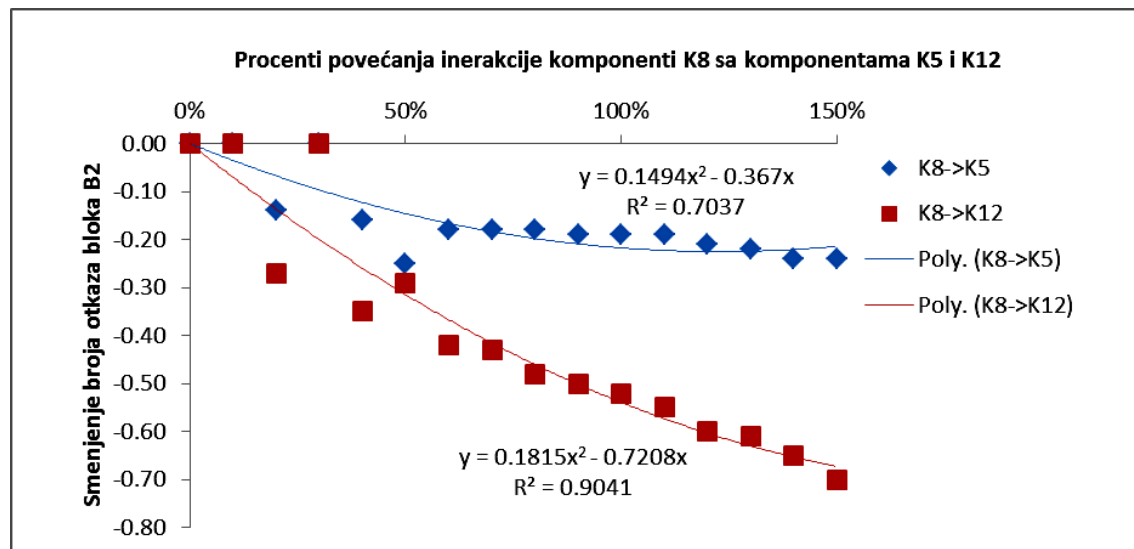
Tabela 5.8. – Tabela prikaz uticaja promene interakcije komponenti K8 i K5 na prosečan simulacioni broj otkaza bloka B2

Podaci iz tabele 5.8. su prikazani grafički sa regresivnom funkcijom. Kada se pronade regresivna funkcija dobija se grafik prikazan na slici 5.27.



Slika 5.27. – Grafički prikaz smanjenja prosečnog simulacionog broja otkaza bloka B2 u zavisnosti od povećanja interakcije komponenti K8 i K5

Zbog uticaja komponente K8 interesantno je prikazati smanjenje prosečnog broja otkaza celog sistema B2 i prema uticaju ove komponente i na K5 i K12 radi poređenja te eventualne alokacije resursa za preventivne akcije održavanja u skladu sa time gde se veći efekti na pouzdanost sistema ostvaruju. Uporedni prikaz je dat na slici 5.28.



Slika 5.28. – Uporedni prikaz zavisnosti smanjenja prosečnog simulacionog broja otkaza bloka B2 u zavisnosti od povećanja interakcije komponenti K8 sa K5 i K12

Ono što je interesantno jeste da je simulacija dala slične vrednosti uticaja upravo na povećanju interakcije obe komponente sa K8 na vrednosti od 50% koja je uzeta kao indikator za dalji rad, ali se ispostavilo da su razlike u smanjenju broja otkaza veoma velike. Ovo jasno pokazuju regresivne funkcije i upravo one mogu biti odličan pokazatelj toga šta planirati prilikom otkaza komponente K8 te kako alocirati resurse radi ostvarenja najboljih preventivnih akcija održavanja. Model omogućuje da se ovakve serije simulacija mogu uraditi za svaki od slučajeva interakcije komponenti.

Korišćenje modela omogućava da se i finansijskim izrazom troškova održavanja i zastoja dođe do finansijski optimalnih odluka o održavanju.

5.2. DOKAZIVANJE GLAVNE HIPOTEZE

Postupak dokazivanja glavne hipoteze je moguć preko dokazivanja radnih hipoteza redom kojim su nabrojane u poglavlju 2.4.

Radna hipoteza 1: *Moguće je definisati modele koji prezentuju kompleksne tehničke sisteme putem blok dijagrama pouzdanosti koji se može povezati analizom otkaza sa odgovarajućim zakonima raspodele za svaki dekomponovani blok te integralno prezentovati kretanje pouzdanosti celog sistema.*

U svakom od modela koji je primenjen na složene tehničke sisteme je primenjen blok dijagram pouzdanosti kao način prezentovanja sistema. Svaki od blokova u dijagramima je asociran sa zakonima Vejbulove dvoparametarske ili troparametarske raspodele a u skladu sa prethodnom analizom otkaza izvršenom na nivou otkaza komponente sistema koja je predstavljena pojedinačnim blokom. Sve prethodno navedeno je omogućilo da

se prikaže kretanje pouzdanosti svakog od dekomponovanih blokova a preko integralnih modela pouzdanosti sva tri slučaja složenih postrojenja (tračni transporter, bager, blok termoelektrane) i kretanje pouzdanosti čitavih sistema. Time je radna hipoteza 1 dokazana.

Radna hipoteza 2: *Moguće je u modele pouzdanosti uvrstiti popravke podsistema, te dalje uvažiti njihovu imperfektnost.*

Modeli su razvijani u teorijskom delu prvo samo simulacijom pouzdanosti bez uvažavanja popravki sistema ali je onda i to uvršćeno u modele tako da je svaki od modela pouzdanosti tri vrste složenih postrojenja imao simulaciju rada sistema sa korektivnim i preventivnim opravkama sistema. Model koji se odnosi na tračni transporter je bio sistem sa puno komponenata-podsistema ali koji se održava zamenom istih pa je imperfektnost popravki nepotrebna za predstavljanje. U druga dva slučaja gde su podsistemi-komponente bili složeniji imperfektnost opravki je bila nužna. Kod sistema bagera prezentovan je model koju uvažava i jednu i drugu vrstu komponenti, pa se paralelno odvijala simulacija komponenti sa imperfektnim akcijama održavanja kao i onih koje to nisu. Slučaj modela pouzdanosti blokova elektrana je uključivao i interakciju komponenti koja je podrazumevala složeniji način imperfektnih akcija održavanja od prethodnog modela. Ovaj model je uvažavao i perfektne i imperfektno održavanja na istim komponentama sistema. Sve navedeno pokazuje da je radna hipoteza dokazana.

Radna hipoteza 3: *Moguće je definisati i u modele implementirati uticaj otkaza jedne komponente na pouzdanost drugih komponenti.*

Uticaj otkaza jedne komponente na pouzdanost druge je razmatran u trećem modelu koji se odnosi na sistem blokova elektrane. Ovde je taj uticaj definisan preko podmlađivanja ili ostarivanja komponente sistema koja je afektovana pri čemu je ovaj uticaj posmatran preko regresivne funkcije predstavljene polinomom drugog reda. Na bazi stepena slobode i koeficijenta regresije definisani su slučajevi u kojima ima interakcije te su oni izolovani i kao takvi uvršćeni u integralni model pouzdanosti sistema. Ovime je radna hipoteza dokazana.

Radna hipoteza 4: *Moguće je sve modele softverski realizovati u vremenski prihvatljivim okvirima izvršenja softvera koji je primenljiv na konkretna složena postrojenja u termoelektranama.*

Svi modeli su modularno urađeni i softverski realizovani. Vremenski okvir izvršenja softvera je takav da je dozvolio na desetine i stotine simulacija u razumnom roku manjem od 24 sata po seriji simulacija. Vremenski okvir izvršenja softvera je kod modela pouzdanosti rotornog bagera postignut smanjenjem broja vremenskih tačaka u kojima se kalkulisala pouzdanost komponenti i sistema. Ovaj postupak je moguć u svakom modelu gde je potrebno brže izvršenje algoritma, ali ono nije bilo nužno u ostalim modelima. Time je postignuta mogućnost da se vremena izvršenja algoritama značajno ubrzaju na potrebnu meru u konkretnim slučajevima. Ovime je dokazana radna hipoteza.

Radna hipoteza 5: *Putem softverskih simulacija modela i izlaznih podataka moguće je proveriti validnost modela za date tehničke sistema upoređujući ih sa početnim podacima o otkazu.*

Za slučaj modela koji se odnose na sistem rotornog bagera i blokova elektrane moguće je bilo izvršiti i proveriti validnost modela upoređenjem simulacionih otkaza sa početnim prikupljenim podacima o ovim sistemima dok za slučaj tračnog transportera nije bilo slučajeva otkaza pa je ovo bilo nemoguće. Korak validacije modela se praktično sproveo u delu korekcije parametara kada se sa kontinualnih veličina prelazilo na diskretne i kada je u velikom broju iteracija svaka komponenta posebno dovedena na približno isti broj otkaza za period obzervacije sistema. Radna hipoteza je ovime dokazana.

Dokazivanjem radnih hipoteza dolazi se do zaključka o ispunjenju glavne hipoteze: **"Moguće je formirati modele za obezbeđenje povišenog eksploatacionog nivoa pouzdanosti složenih postrojenja u termoelektranama"**. Modeli dozvoljavaju da se prema određenim naknadno ustanovljenim kriterijumima ili različitim načinima održavanja sistema ustanove efekti kretanja pouzdanosti čime se dolazi do optimalnih akcija održavanja a time i maksimiziranja pouzdanosti celog sistema. **Jasno se može izvesti zaključak da je dat i odgovor na naslov disertacije.**

5.3. UPOREĐIVANJE REZULTATA ISTRAŽIVANJA SA SLIČNIMA U SVETU

U istraživanju Nikhil Dev i dr.³ elektrana je dekomponovana na 6 podsistema i grafičkom metodom prezentovana kako bi se ustanovile funkcionalne međuzavisnosti i iz toga kreirala matrica koja omogućuje dolaženje do indeksa pouzdanosti. Ipak matrica je ishoda empirijski a ne kao rezultat statističke analize otkaza i kao takva je nepouzdana te ne može da predvidi interakciju otkaza kakvu omogućuje model primenjen u ovoj disertaciji na blokovima termoelektrane. Jasno je takođe da grafički metod ima nedostatak prezentovanja složenih tehničkih sistema putem velikog broja komponenata te bi sprovođenje ovog metoda bilo praktično nemoguće. Na kraju interakcije su predviđene potom jednoparametarske matrice, pa je interakcija simplifikovana slika onoga što je modelom u ovoj disertaciji prezentovano. Model interakcije iz ove disertacije je predvideo interakciju koja ima promene pouzdanosti na nivou krive drugog reda i mogućnost da predvidi i pozitivan uticaj otkaza jedne komponente na pouzdanost druge usled preventivnih akcija održavanja tokom zastoja. Na kraju model iz Nikhil Dev i dr.³ istraživanja pruža samo dobijanje RTRI – indeksa pouzdanosti u realnom vremenu što bi odgovaralo jednoj vremenskoj tački kalkulacije ali dalji rad bi tek sledio i napori da se dođe do vrednosti koje imaju praktičnu vrednost poput broja hazarda, regresivnih krivi, broja otkaza u jedinici vremena itd., što modeli iz ove disertacije pružaju u svakom od pomenutih slučajeva na jednostavan način kao i deriviranje sličnih podataka potrebnih praktičnoj primeni rezultata modela te obezbeđenju pouzdanosti konkretnog tehničkog sistema.

³ Nikhil Dev, Samsheb, S.S. Kachhwaha, Rajesh Attri, Development of reliability index for combined cycle power plant using graph theoretic approach, Ain Shams Engineering Journal, Ain Shams University, 2014., 5, 193–203.

Velika grupa istraživanja poput Naess i dr.⁴ pokušava da putem prilagođavanja Monte Carlo simulacije slomi kompleksnost modelovanja pouzdanosti. Ovo i polazi za rukom u mnogim domenima, pa čak je i moguće da se značajni računarski naponi prevaziđu dobrim algoritamskim rešenjima. Ipak ovo istraživanje je apstrahovalo činjenice koje su realne i koje su uvršćene u istraživanja u ovoj disertaciji koja se odnose na vremensku dinamiku ili preventivne akcije održavanja. Ovim je primena na složene tehničke sisteme izostala a istraživanje ostalo na nivou teorijskog razmatranja kome nedostaje dalji razvoj da bi se primenilo na složene tehničke sisteme kao što je to slučaj sa modelima u ovom istraživanju.

Istraživanje poput Weber i Jouffe⁵ kombinuje takođe više metoda kao što je slučaj i u modelima pouzdanosti iz ove disertacije (blok dijagram, Monte Carlo, teorijske raspodele verovatnoće, itd.). U ovom istraživanju se kombinuju metode analize stabla otkaza, Bajesove mreže i Markovljeve lance. Ovo istraživanje se orijentisalo na proizvodne procese i modelovanje njihove pouzdanosti kod složenih tehničkih sistema čime je polje modelovanja prošireno i time zadatak otežan. Model je uvažio postojanje preventivnih akcija održavanja preko koeficijenta popravke kao i vremensku dinamiku. Ipak nema uvažavanja interakcije u otkazima kao ni mogućnosti da se model primeni na sisteme koji se dekomponuju na veliki broj komponenti. Sa povećanjem broja komponentata kao i njihovih mogućih stanja (jer se radi o multi-state pristupu) eksponencijalno raste broj kombinacija koje treba predstaviti a time i zahtevi koji se odnose na broj proračuna čime je model limitiran na nivou kompleksnih sistema sa velikim brojem komponentata. Ovo pitanje je gotovo nemoguće rešiti, jer sve tri metode koje su upotrebljene za modelovanje imaju ovaj nedostatak. U modelima koji su primenjeni u ovoj disertaciji takva ograničenja su na mnogo većem broju komponenti, jer ovi zahtevi ne rastu eksponencijalno ni po jednom pitanju rasta broja komponenti, a jedan od ovih modela koji je primenjen na transportne trake odnosio se i na sistem sa više hiljada komponenti čime je demonstrirana prednost ovog modela po pitanju broja komponenti.

Neka istraživanja pokušavaju da pruže odgovor na procenu pouzdanosti tehničkih sistema u termoelektranama koja su ključna za njihovo funkcionisanje. Ipak način modelovanja i procene pouzdanosti ne pruža dovoljno efikasan metod da se estimacija izvrši brzo ili na većem broju primera te dođe do značajnijih rezultata. Ipak oslanjajući se na Monte Carlo simulacije u radu Moazzami i dr.⁶ je izvedena na više primera procena pouzdanosti sabirnice u elektrani, ali je istraživanje pružilo parametarsku procenu karakteristika pouzdanosti bez vremenske dinamike ili uticaja preventivnih i korektivnih akcija održavanja na sistem. A takođe je i izostao integralni pregled pouzdanosti sistema. Ove karakteristike je model pouzdanosti blokova elektrana predvideo za razliku od ovakvog parcijalnog istraživanja koje čeka dalji razvoj.

⁴ Naess, A., Leira, B.J., Batsevych, O., System reliability analysis by enhanced Monte Carlo simulation, *Structural Safety*, 2009., 31, 349–355.

⁵ Weber, P., Jouffe, L., Complex system reliability modelling with Dynamic Object Oriented Bayesian Networks (DOOBN), *Reliability Engineering and System Safety*, 2006., 91, 149–162.

⁶ Moazzami, M., Hemmati, R., Haghghatdar Fesharaki, F., Rafiee Rad, S., Reliability evaluation for different power plant busbar layouts by using sequential Monte Carlo simulation, *Electrical Power and Energy Systems*, 2013., 53, 987–993.

U okviru doktorske disertacije Sun, Y.¹ razvijeno je nekoliko modela pouzdanosti složenih popravljivih sistema. Na osnovu SSA i AIMF modela razvijen je ESSA model koji uvažava i postojanje malog broja otkaza sistema, preventivne popravke sistema, imperfektne popravke sistema, interakciju otkaza kao i vremensku dinamiku. Takođe postoji mogućnost uvažavanja kaskadnih otkaza. Interaktivni koeficijent je pojam kojim je uvaženo postojanje interakcije otkaza komponenata sistema. Takođe model uvažava promene hazarda komponenata sistema nakon preventivnih akcija održavanja. Ovaj model je takođe primenljiv upotrebom različitih teorijskih distribucija otkaza.

U poređenju sa ESSA modelom možemo izvesti sledeća poređenja sa modelima u okviru istraživanja sprovedenom u ovom naučnom radu:

- ESSA kao i SSA¹⁰¹ model polazi kao i svi modeli primenjeni u ovom radu od formiranja blok dijagrama a to je slučaj i sa modelima u ovom istraživanju,
- ESSA je kao i SSA (Split System Approach) model je podesan radi modelovanja popravljivih tehničkih sistema složenih po pitanjima broja komponenata ali i po različitim karakteristikama komponenti¹⁰². To su osobine i modela u okviru ovog istraživanja.
- ESSA model daje rezultate i podatke o kretanju pouzdanosti i na bazi malog broja otkaza komponenti sistema kao i modeli u okviru ovog istraživanja,
- Monte Carlo simulacija je korišćena radi validacije podataka ali ne i radi simuliranja rada tehničkog sistema i predviđanja pouzdanosti akcija održavanja kao u sva tri modela istraživanja u ovoj disertaciji.
- Model ESSA je orijentisan na donošenje odluka o optimalnim preventivnim, ali ne i korektivnim akcijama održavanja ne uzimajući ih u obzir putem simulacija. Realna slika stanja govori o tome da je nepredviđeni otkaz sistema moguć, te da je potrebno i njih uzeti u obzir kao u modelovanju primenjenom na sva tri tehnička sistema u ovoj disertaciji.
- ESSA model je orijentacionom na promene hazarda komponenti na koje se deluje putem preventivnih akcija održavanja uveo mogućnosti da komponente budu dobre kao nove, lošije ili bolje, čime je obuhvaćen pojam imperfektnih akcija održavanja. U modelima u ovoj disertaciji je putem koeficijenta preventivnog održavanja C_{wpm} , koji je prezentovan u radu Milošević D. i Adamović Ž.⁹⁵, data mogućnost da se na jednostavan i brz način modeluju periodične preventivne akcije, pri čemu nije nužno da budu na nedeljnom nivou, dok je u modelu primenjenom na blokove elektrana urađen uticaj preventivnih akcija održavanja i povezan sa interakcijom otkaza komponenti. Ovim je model iz ovog istraživanja otišao korak dalje u odnosu na ESSA model. Oba modela poštuju mogućnost akcija održavanja na samo pojedine komponente sistema.

¹ Sun, Y., "Reliability Prediction Of Complex Repairable Systems: An Engineering Approach", Thesis submitted in total fulfilment of requirements of the degree of Doctor of Philosophy, Faculty of Built Environment and Engineering, University of Technology, Queensland, 2006.

¹⁰¹ Milošević, D., Adamović, Ž., Ašonja, A., System Reliability in Energetics, The Association of Intellectuals for the Development of Science in Serbia - "The Serbian Academic Center", Novi Sad, 2012.

¹⁰² Josimović, Lj., Petrov T, Savić, N., Milošević, D., Poremećajne sile mehaničkog karaktera, XXXVI konferencija „Majski skup održavalaca Srbije“, „Merenje performansi indikatora održavanja tehničkih sistema u kompanijama“, Vrnjačka Banja, 2013.

⁹⁵ Milošević D., Adamović Ž., Reliability Simulation Model for Bucket Wheel Excavator, Metalurgia International, 2013., 18(11), 13-20.

- U ESSA modelu uvođenjem interaktivnog koeficijenta se uvažavaju međusobni uticaji otkaza komponenti. Ipak oni su sjedinjeni u matricu međusobnih uticaja koja poput Markovljevih lanaca pruža mogućnost samo monotonih promena tokom vremena. Dakle, jedna komponenta svojim otkazima ostvaruje isključivo pozitivan ili negativan uticaj na drugu komponentu. U modelu primenjenom na blokove elektrana matrica interakcije je definisana funkcijama polinoma drugog stepena koje omogućuju postojanje i interakcije koje se vremenom menjaju usled različitih faktora, pa tako jedna komponenta ostvaruje ne jedan uticaj na drugu u zavisnosti od toga koji je međuotkaz u pitanju. Ovo omogućuje da jedna komponenta ima jednog trenutka pozitivan uticaj na pouzdanost druge komponente, a drugog negativan bez promena karakteristika afektovane komponente, što više odgovara realnom stanju stvari.
- ESSA se bazira na promenama hazarda komponenti sistema nakon preventivnih akcija održavanja. U ovoj disertaciji model koji se odnosi na rotorni bager nema promene teorijske raspodele otkaza kao ni onaj model koji se odnosi na blokove elektrane. Ipak, on se na drugi način odnosi prema ovom problemu uvažavajući mogućnost podmlađivanja ili ostarivanja komponente sistema čime se vremenskim pomeranjem upotrebljava druga vrednost hazarda za datu komponentu. Time model ne koristi hazard da opiše uticaj akcija održavanja na karakteristike pouzdanosti komponente, već vremenske pomake u vidu parametra τ_p . Takođe, analiza promene hazarda dodatno usložnjava problem modelovanja i ima veoma tešku implementaciju na sistemima sa velikim brojem komponenti što je u modelu ESSA slučaj. Ovaj problem je u modelu primenjenom na blokovima elektrana elegantno izbegnut.
- ESSA model nema jasno iskazane algoritme primene, te kao takav nije dovoljno razvijen za primenu na sistemima velike složenosti kakvi su oni koji su prezentovani u ovoj disertaciji. Zbog ovoga ESSA model čeka dalje istraživanje na implementaciji i problemima koji se tu ishode kada su u pitanju sistemi sa velikim brojem komponentata. Algoritamska rešenja koja su ponuđena u okviru ove disertacije prevazilaze ove probleme i daju mogućnost pune implementacije na velikom broju tehničkih sistema.
- Takođe ESSA model podrazumeva heuristička određivanja parametara interakcije što je u složenim tehničkim sistemima nekada nemoguće odrediti na ovakav način. Model primenjen na pouzdanost blokova elektrane je nezavistan od iskustva, i računarski primenljiv tako da broj komponentata ili nepoznavanje njihovog načina funkcionisanja i funkcionalnih međuzavisnosti ne predstavlja teškoću u modelovanju.
- ESSA model ima unapred određeno vreme preventivnih akcija održavanja što je kod mnogih tehničkih sistema realna činjenica. Ipak, videli smo u slučaju blokova elektrana da je preventivna akcija održavanja moguća i realna i tokom međuotkaza drugih komponentata te je kao takva nepredvidiva po pitanju vremena usled toga što je i otkaz komponenti slučajna promenljiva. S tim u vezi je i model primenjen u ovoj disertaciji i nenadoknadivo realniji u oslikavanju pouzdanosti složenih tehničkih sistema.
- Softverska rešenja za sve modele u ovoj disertaciji su algoritamski prezentovana, pa je poznavanje matematizama i programiranja neophodno samo u svrhe prilagođavanja i razvoja modela ali ne i njegove implementacije što nije

slučaj sa ESSA modelom. Ovime je postignuta visoka primenljivost svih izloženih modela na složene tehničke sisteme.

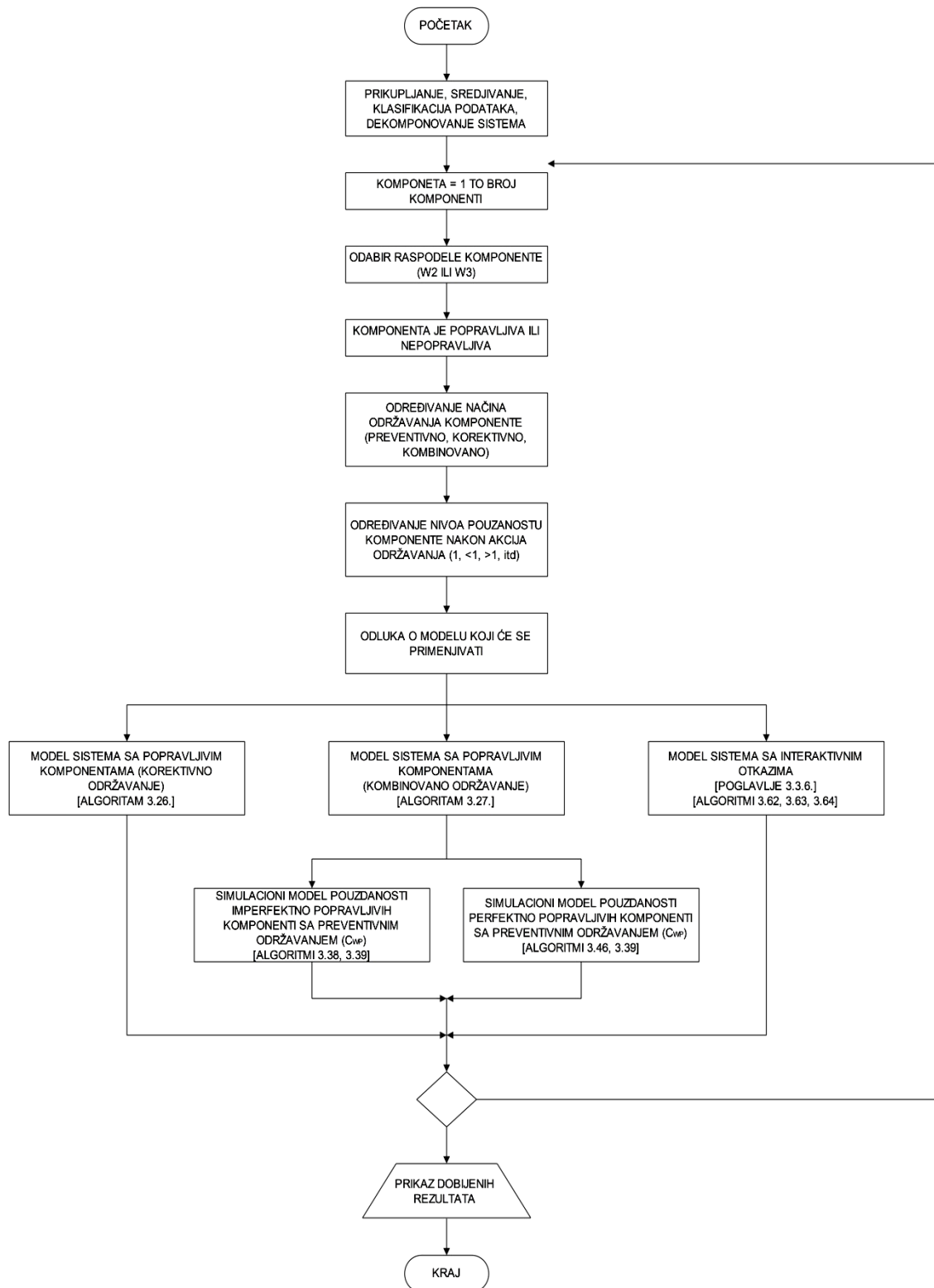
Od domaćih istraživanje Petrović G., i dr.⁷ je sprovedeno u cilju pronalaska optimalnog modela održavanja popravljivog tehničkog sistema. Upotrebom Markovljevog procesa je ustanovljeno optimalno preventivno vreme održavanja maksimizacijom raspoloživosti sistema. Model je stohastički, na principu slučajnog otkaza i razmatra akcije održavanja i njihove efekte. Model je primenjen na dvokomponentni transportni sistem. Model je multi-state i putem procene raspoloživosti i intenziteta otkaza za svaku komponentu daje odgovor o optimalnom vremenu održavanja. Veoma lako ovaj model može biti orijentisan i na pouzdanost i dati isti odgovor o akcijama održavanja na bazi drugih kriterijuma. Ipak ovaj model je nepodesan za kompleksne tehničke sisteme ponovo iz najčešćeg razloga eksponencijalnog rasta zahteva za proračunom sa povećanjem broja komponenti i stanja sistema. Slika o kretanju pouzdanosti sistema je simplifikovana i nepostojanjem imperfektnih opravki kao faktora pa ni postojanjem interakcije otkaza komponenti. U okviru ove disertacije modeli su pružali svaku od navedenih mogućnosti kod modelovanja pouzdanosti tehničkog sistema te odabira optimalnog vremena preventivnih popravki sistema. Time je integralni model iz ove disertacije daleko napredniji u pogledu mogućnosti odgovora na kretanje pouzdanosti sistema i njenog obezbeđenja putem simulacionih predviđanja uticaja akcija održavanja. Svaki od tri relevantna modela u ovoj disertaciji se bavio uticajem preventivnog održavanja na različite načine i dao mogućnosti da se donesu odluke o optimalnim preventivnim i korektivnim akcijama održavanja u realnim uslovima.

⁷ Petrović, G., Marinković, Z., Marinković, D., Optimal preventive maintenance model of complex degraded systems: A real life case study, Journal of Scientific & Industrial Research, 2011., 70, 412-420.

6. ZAKLJUČAK

6.1. OPŠTE

Kao zaključak primene svih modela razvijenih tokom ovog istraživanja nameće se da sva parcijalna modelovanja i kreirani modeli i simulacije mogu da se zbog svoje univerzalnosti primene i na sve slične složene sisteme u termoelektranama. Model se može načiniti i integralnim tako da se može primenjivati i na ostale složene tehničke sisteme van termoelektrana putem algoritamskog povezivanja modela i simulacija koji su navedeni u disertaciji. Ovaj univerzalni integralni model obezbeđenja pouzdanosti složenih tehničkih sistema bi se mogao prezentovati na sledeći uopšten način (slika 6.1.). Ovaj model polazi od pretpostavke da se dekomponovanjem sistema svaka komponenta može podvrgnuti zasebnom procesu simulacije, odnosno da se određena grupa komponenti kada je to nužno zajedno simulira prema pouzdanosti, što je slučaj sa interakcijom otkaza komponenti. Integralni model pouzdanosti složenih tehničkih sistema polazi od prikupljanja, sređivanja, klasifikacije podataka te dekomponovanja sistema na bazi podataka. Videli smo da su ovi postupci u modelovanju bili blisko povezani i čak uslovljeni jedno drugim. Baza podataka može (kao kada su blokovi elektrana u pitanju) predefinisati dekomponovanje sistema. Podaci o otkazima umeju biti i dati u različitim ili neodgovarajućim vremenskim jedinicama, itd. Nakon prvog procesa sledi bavljenje svakom komponentom sistema posebno prema blok dijagramu pouzdanosti koji se formira te svaku komponentu valja odrediti prema karakteristikama značajnim za određivanje simulacije koja će se primeniti nad njim. Najpre prema podacima o otkazima sistema valja odrediti raspodelu koja će se primenjivati. Navedeni modeli su davali mogućnosti W2 i W3 raspodele jer su odgovarale tehničkim sistemima u procesu eksploatacije ali i sve druge su jednako primenjive u slučaju potrebe. Takođe, popravljivost komponente utiče na dalji odabir modela. U nekima se komponenta cela menjala te je lako bilo zaključiti da pouzdanost nakon toga dotiže maksimalnu vrednost, ali je nekada bila reparirana ili su vršene složenije popravke, pa je pouzdanost podrazumevala i uvođenje modela sa imperfektnim akcijama održavanja. Razlog za ovu smanjenu pouzdanost nakon popravke mogu biti i mnogi drugi a modeli ovo svakako mogu uvažiti. Modeli se mogu i modifikovati za slučaj drugačijih pravilnosti nesavršenih popravki komponenti sistema putem promena obrazaca koji to definišu u algoritmima. Svakako ono što najviše utiče na odabir modela jeste i način održavanja komponente. Modeli su se bavili zasebno korektivnim, preventivnim ili kombinovanim održavanjem prema potrebama postrojenja koja su modelovana, ali je lako moguće algoritme prepraviti za svaku vrstu održavanja u slučaju nastale potrebe tokom modelovanja drugih složenih tehničkih sistema. Na kraju, nakon svih potrebnih podataka koji se prikupe donosi se odluka o tome koji će se model primeniti. U osnovi podeljeni su u tri grupe prema primenljivosti na složena postrojenja iz primera u disertaciji, tračni transporter, rotorni bager i blokovi elektrane. Koji od modela će se primenjivati zavisi od komponente čime se dobija univerzalna mogućnost da sistem svojim komponentama pripada svim navedenim simulacionim modelima ili nekim novim raspodelama koje se uvrste u modele, koeficijentima preventivnih popravki, itd. Ovo postaje moćno sredstvo prikazivanja pouzdanosti sistema čije su komponente raznorodne ili veoma različite. Ovakav model je nov i originalan te bi se njegova primena mogla očekivati na novim tehničkim sistemima (naročito onih u termoelektranama) i valorizovala njegova primenljivost u praksi.



Slika 6.1. – Integralni model pouzdanosti popravljivih složenih tehničkih sistema (u termoelektranama)

Na osnovu svih teorijskih, eksploatacionih i dobijenih i rezultata istraživanja mogu se doneti zaključci koji govore u prilog opravdanosti izbora proučavane problematike i potvrde hipoteze istraživanja.

Radi se o temi pouzdanosti složenih tehničkih sistema koja je aktuelna i koja sve više zadire u domen modelovanja sa uvažavanjem preventivnih akcija održavanja, imperfektnih opravki i interakcije otkaza komponenti sistema.

Teorijska istraživanja u poglavlju 3.0 su pokazala da parcijalna istraživanja modelovanja složenih tehničkih sistema obuhvataju neke od oblasti ove problematike ali ne sveobuhvatno i da im nedostaje primena na samim sistemima usled teške implementacije razvijenih modela. U poglavlju 3.3. *Razvoj novih modela pouzdanosti složenih tehničkih sistema u termoelektranama* je postupnim usložnjavanjem problematike u nove modele implementirana jedan po jedna otežavajuća okolnost za modelovanje koja uvažava realne pojave. Nakon dekomponovanja, modelovana je pouzdanost nepopravljivih komponenti sistema a onda su uvedene i korektivne akcije održavanja a zatim i preventivne pa je model obuhvatao pouzdanost komponenti koje se kombinovano održavaju. Uvođenjem pretpostavke perfektnih i imperfektnih akcija održavanja, kod kojih nakon akcija održavanja pouzdanost dolazi, tj. ne odlazi na nivo 1, razvijeno je dva modela pouzdanosti komponenti. Kod modela imperfektno održanih komponenti dalje se javio problem procene parametara pouzdanosti za teorijsku raspodelu kojoj podležu otkazi komponenti usled toga što postoje i uzastopne akcije održavanja. Kako je ovaj problem složen, on je rešen Monte Carlo simulacijom na konkretnim primerima, te je dalje razvijena simulacija na bazi dobijenih parametara. Najveći izazov je predstavljalo razvijanje modela pouzdanosti sa postojanjem interaktivnih otkaza. On je uključivao i preventivne akcije održavanja kakve su neretko mnogobrojne pre korektivnih, a potrebno je bilo razviti i metode za dijagnostiku i kvantifikaciju interakcije otkaza. I ovu svrhu se poslužilo softverskim rešenjima radi analize mnogobrojnih podataka o otkazima sistema. Uključene su i preventivne akcije održavanja tokom zastoja kao realnost u sam model. Primenom regresivne analize ustanovljena je međuzavisnost pojedinih otkaza komponenti sa međuotkazima drugih. Ovo je urađeno putem softvera koji je ustanovio potencijalnu interakciju otkaza svih komponenti međusobno. Na bazi ovoga stvorena je matrica interakcije koja je bila osnov daljeg modelovanja nakon što se kvantifikovalo koliko se posle pojedinačnog međuotkaza afektujuće komponente menja pouzdanost afektovane. Ovime su konačno stvoreni uslovi da se razvije novi model.

U okviru eksploatacionih istraživanja su dati modeli primenili uz korišćenje podataka o otkazima složenih tehničkih sistema koji su bili razmatrani. Time je primena izvršena na 3 složena tehnička sistema i na bazi toga su dobijeni i rezultati. Ključni rezultati istraživanja u okviru ove disertacije su:

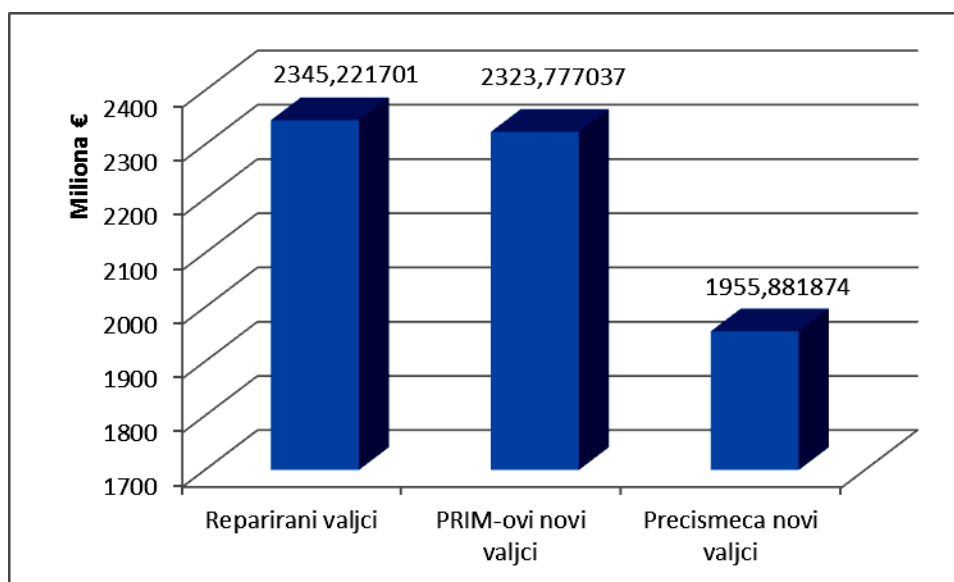
- Implementacijom modela koji se odnosi na tračni transporter BTO5 na površinskom kopu Drmno ostvarena su tri ciklusa simulacija za operativno vreme od 200.000 časova: prvi ciklus – sa korektivnim, drugi – sa kombinovanim i treći – sa preventivnim akcijama održavanja.

Za prvi ciklus simulacija u zavisnosti od toga kojom vrstom valjaka se vrše zamene valjaka u otkazu dolazi se do sledećih vrednosti troškova održavanja (tabela 6.1.).

Scenario	Reparirani valjci	PRIM-ovi novi valjci	Precismeca novi valjci
Troškovi zastoja	2.338.420.000 €	2.312.020.000 €	1.947.720.000 €
Troškovi zamene	6.801.701 €	11.757.037 €	8.161.874 €
Ukupni troškovi	2.345.221.701 €	2.323.777.037 €	1.955.881.874 €

Tabela 6.1.. – Tabelarni prikaz troškova korektivnog održavanja sistema tračnog transportera u zavisnosti od vrste valjaka kojima se vrši zamena

Grafički to izgleda kao na slici 6.2.



Slika 6.2. – Troškovi korektivnog održavanja sistema tračnog transportera u zavisnosti od vrste valjaka kojima se vrši zamena

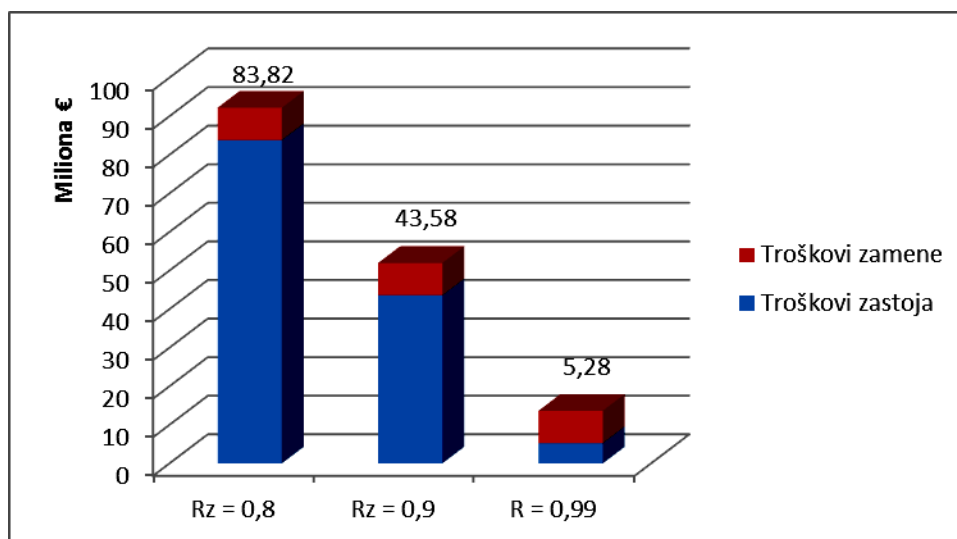
Prvi ciklus simulacija je omogućio pronalaženje najbolje vrste valjka (Precismeca novi valjci) kojom je potrebno vršiti zamenu sa aspekta najmanjih troškova održavanja.

Drugi ciklus simulacija se odnosio na različite nivoe preventivne zamene delova u zavisnosti od procenjene pouzdanosti pojedinačnog valjka kao i korektivne akcije održavanja kada se pojave otkazi (tabela 6.2).

Scenario	Rzamene = 0,8	Rzamene = 0,9	Rzamene = 0,99
Troškovi zastoja	83.820.000 €	43.580.000	5.280.000 €
Troškovi zamene	8.380.952 €	8.380.952 €	8.380.952 €
Ukupni troškovi	92.200.952 €	51.960.952 €	13.660.952 €

Tabela 6.2. – Troškovi kombinovanog održavanja sistema tračnog transportera u zavisnosti od nivoa pouzdanosti zamene valjaka

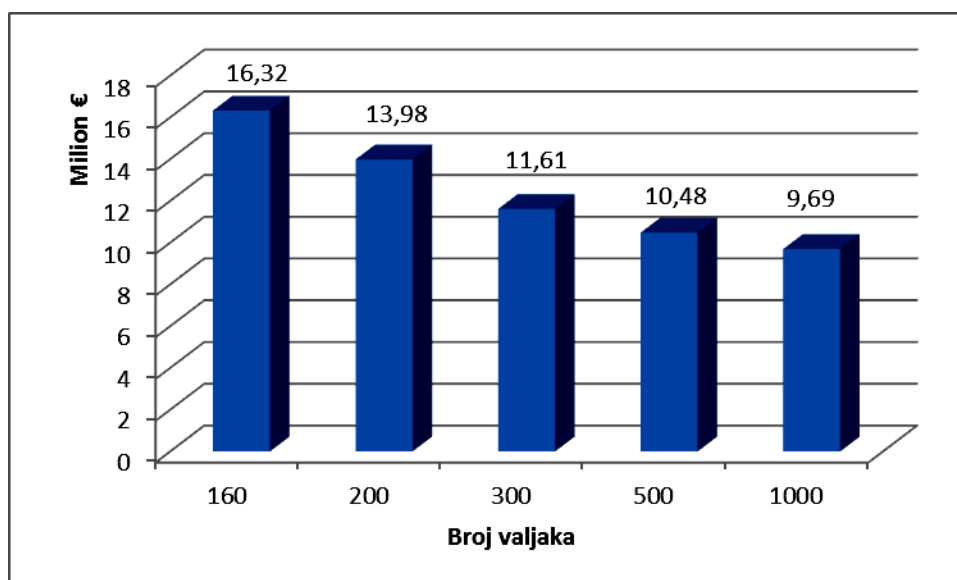
Grafički to izgleda kao na slici 6.3.



Slika 6.3. – Troškovi kombinovanog održavanja sistema tračnog transportera u zavisnosti od nivoa pouzdanosti zamene valjaka

Drugi ciklus simulacija je omogućio pronalaženje optimalnog nivoa pouzdanosti zamene valjaka. Ovo je orijentisalo dalji rad na preventivno održavanje.

Treći ciklus simulacija se odnosio na različit broj valjaka koji se može zameniti u jednoj smeni prema isključivo preventivnim akcijama održavanja tokom planskog zastoja (slika 6.4). Ovaj broj je limitiran raznim resursima koji stoje na raspolaganju održavaocima.



Slika 6.4. – Troškovi održavanja sistema tračnog transportera u zavisnosti od nivoa broja valjaka koji se mogu zameniti tokom planskog zastoja

Treći ciklus simulacija je omogućio pronalaženje optimalnog broja valjaka koji se menja tokom planskog zastoja. Veći broj zamenjenih valjaka omogućuje bolje iskorišćenje životnog veka pojedinačnog valjka, pa su tada i troškovi održavanja manji. Ipak, ovaj broj je limitiran raznim faktorima i resursima koji su na raspolaganju održavaocima pa model omogućuje planiranje zamena u zavisnosti od svih potencijalnih faktora.

Celokupan model pouzdanosti primenjen na tračni transporter BTO sistema omogućio je da se pronađu optimalne komponente kojima treba vršiti zamene i optimalne trenutke zamene za kriterijume očekivane pouzdanosti i troškova održavanja na novom sistemu.

- Implementacijom modela pouzdanosti koji se odnosi na sistem rotornog bagera koji radi na površinskom kopu uglja u Kolubari za operativni period od 278.278 minuta, tj. jedne godine rada dobio se uvid u kretanje pouzdanosti na realnim osnovama primene preventivnog i korektivnog održavanja uključujući i imperfektno održavanje za svih 6 komponenti sistema na koliko je dekomponovan i predstavljen blok dijagramom pouzdanosti. Komponente su analizom vremena otkaza razvrstane na one kod kojih preventivne akcije održavanja imaju uticaja na pouzdanost i one na koje nemaju pa su u skladu sa time različito i modelovane njihove pouzdanosti.

Jedna iteracija simulacije je primer mogućeg kretanja pouzdanosti dok povećavanjem broja iteracija pouzdanosti za celi sistem dobijena je prosečna vrednost pouzdanosti celog sistema koja je definisana jednačinom 5.1.

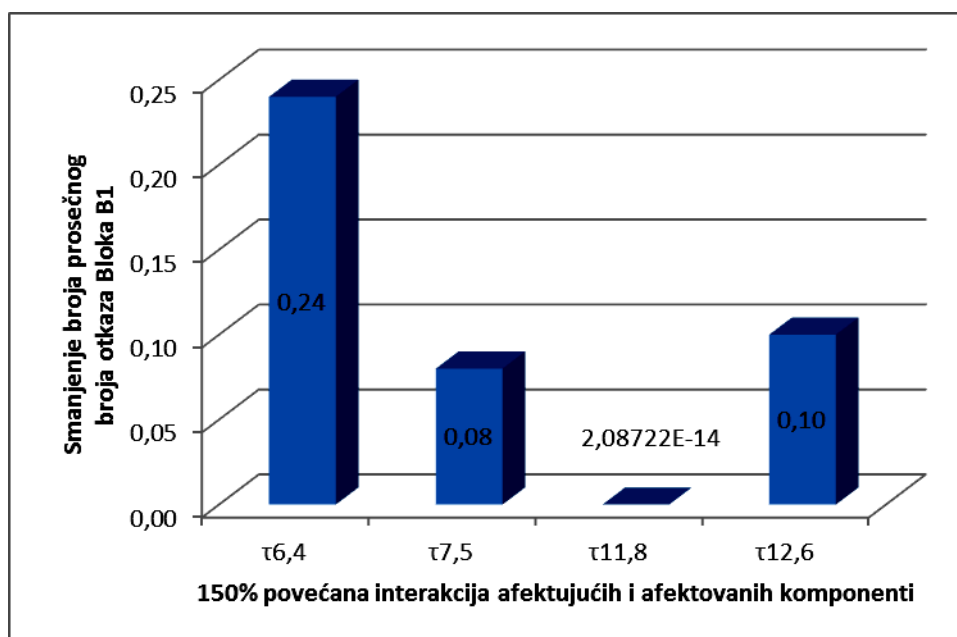
$$\gamma = -0,04 \ln x + 0,4296$$

Ovaj model je uveo pojam koeficijenta preventivnog održavanja C_{pm} koji definiše nivo imperfektnosti akcija održavanja tj. za koliko je određena akcija održavanja odstupila od dovođenja pojedinačne komponente sistema na nivo pouzdanosti 100%. C_{pm} predstavlja procenat „eliminacije“ nepouzdanosti komponente koji ona ima u trenutku početka akcije održavanja. Pretpostavka modela je da su ovakve akcije održavanja deo preventivnog održavanja, dok korektivne akcije održavanja gde se raspolaze većim vremenskim intervalima imaju perfektan karakter tj. dovode nivo pouzdanosti komponente na nivo 100%.

Simulacije pouzdanosti su izvedene u serijama koje su se odnosile na moguće smanjenje broja otkaza celog sistema rotornog bagera po osnovu pojedinačnih preventivnih akcija održavanja prema svakoj komponenti. Dobijene su regresivne funkcije smanjena broja otkaza sistema u zavisnosti od povećanja efikasnosti preventivnih akcija. Ovim je ustanovljen uticaj svih mogućih alokacija resursa u vezi sa preventivnim delovanjem na komponente sistema koji je ilustrovan slikom 5.21. Time su jasno definisano u kom smeru je potrebno uložiti napore po pitanju preventivnih akcija održavanja i na kojoj komponenti sistema konkretno kako bi se očekivali odgovarajući efekti na smanjenje broja otkaza i pouzdanost sistema u celini.

Model pouzdanosti primenjen na sistem rotornog bagera omogućio je da se ustanove funkcije zavisnosti broja otkaza, a time i pouzdanosti od različitih preventivnih akcija, te nađe optimalna u skladu sa datim mogućnostima na terenu. Ovime se direktno može planirati uticaj na pouzdanost sistema u celini u zavisnosti od odabranih akcija održavanja koje su na raspolaganju u datom periodu vremena.

- Implementacijom modela pouzdanosti koji se odnosi na sistem blokova elektrana je pružio informacije o tome koja komponenta sistema svojim otkazima utiče na pouzdanost sistema preko delovanja na otkaze drugih komponenti. Došlo se do podataka o kretanju pouzdanosti za svaku komponentu sistema za koju je sistem dekomponovan i postojali su klasifikovani podaci o otkazima u bazi podataka ali i prosečnoj pouzdanosti. Povećavanjem efekata međusobne interakcije otkaza komponenti ustanovljeno je koje komponente u kom bloku daju najveći uticaj na smanjenja prosečnog broja otkaza sistema. Za blok B1 smanjenje broja otkaza sistema za svako pojedinačno povećanje interakcije komponentata na 150% dato je na slici 6.5.



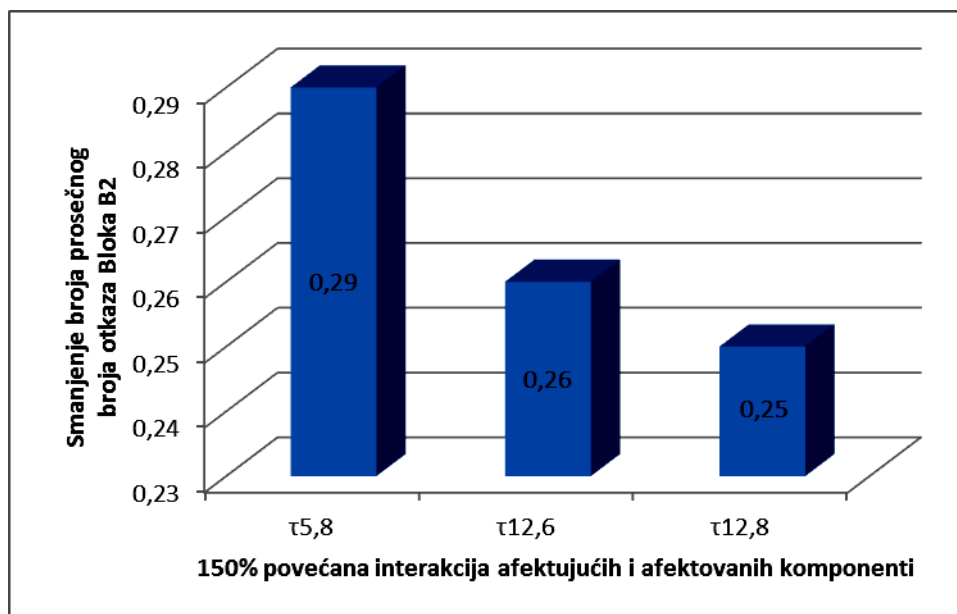
Slika 6.5. – Smanjenja prosečnog broja otkaza bloka B1 usled povećanja interakcije komponentata na 150%

Najveći uticaj se ostvaruje u slučaju uticaja otkaza komponente K4 na komponentu K6. Na bazi ovoga je regresionom analizom i oformljena funkcionalna zavisnost između smanjenja prosečnog broja otkaza bloka B1 i povećanja interakcije otkaza komponenti K4 i K6 koja glasi:

$$y = -0,2097 \cdot x^2 - 0,1847 \cdot x \quad (6.1.)$$

gde je x – broj međuotkaza afektujuće komponente K4 a y – prosečan broj otkaza bloka B1.

Za blok B2 smanjenje broja otkaza sistema za svako pojedinačno povećanje interakcije komponentata na 150% dato je na slici 6.6.



Slika 6.6. – Smanjenja prosečnog broja otkaza bloka B2 usled povećanja interakcije komponentata na 150%

Najveći uticaj se ostvaruje u slučaju uticaja otkaza komponente K8 na komponentu K5. Kako je komponenta K8 afektujuća i na komponentu K12, to je neophodno bilo izvršiti dve serije simulacija. Na bazi ovoga je regresionom analizom i oformljena funkcionalna zavisnost između smanjenja prosečnog broja otkaza bloka B1 i povećanja interakcije otkaza komponente K8 sa otkazima komponenti K5 i K12 koja glasi:

$$y = -0,3309 \cdot x^2 - 1,0878 \cdot x \quad (6.2.)$$

gde je x – broj međuotkaza afektujuće komponente K8, a y – prosečan broj otkaza bloka B2.

Model pouzdanosti primenjen na sistem blokova elektrana B1 i B2 je omogućio da se ustanove interakcije komponenti sistema putem matrica interakcije, te na toj osnovi modeluje pouzdanost. Polazište modela je baza podataka o otkazima. Formiranjem matrice interakcije su se stvorili uslovi da se na bazi simulacije pouzdanosti ustanove efekti veće interakcije među komponentama. Ona se zasniva na činjenici da je moguće pojačati uticaj putem preventivnih akcija održavanja za pobrojane slučajeve interakcije otkaza. Da je reč o interakciji na bazi preventivnih akcija održavanja tokom međuotkaza govore oblici kriva funkcija dobijenih regresionom analizom. Na bazi dobijenih funkcija moguće je definisati uticaj efikasnosti preventivnih akcija održavanja tokom međuotkaza afektujućih komponentata na smanjenje broja otkaza celog sistema.

6.2. UNIVERZALNI DOPRINOS

Univerzalni doprinos doktorske disertacije je sledeći:

- Model pouzdanosti primenjen na sistem tračnog transportera omogućuje primenu ne samo na bilo koji sistem tračnog transportera, već i na bilo koji sistem sa velikim brojem komponenti i može da jasno dovede do odgovora na pitanja koje su najbolje komponente za zamenu, koji je najpovoljniji vremenski trenutak zamene i koji je broj komponenti optimalan za zamenu u datim uslovima.
- Model pouzdanosti primenjen na sistem rotornog bagera je primenljiv na bilo koji sistem rotornog bagera, ali i na svaki drugi sistem koji ima definisane preventivne akcije održavanja kao periodične, te korektivne akcije održavanja kada dođe do otkaza sistema¹⁰⁰. Naročit kvalitet modela je što predviđa mogućnost imperfektnih opravki sistema putem koeficijenta preventivnog održavanja C_{wpm} i daje mogućnosti da se on kvantifikuje na bazi postojećih otkaza sistema. Model daje bolje rezultate sa postojanjem većeg broja otkaza sistema u bazi podataka kao i sa povećanjem broja iteracija simulacija u okviru modela.
- Model pouzdanosti primenjen na blokove elektrane je moguće primeniti na sve termoelektrane podjednako kako bi se ustanovila potencijalna interakcija otkaza komponenti. Ipak, model je moguće primeniti i na domen svih složenih sistema gde je interakcija otkaza neuhvatljiva inženjerskim iskustvom ili „nelogična“ jer se zasniva na objektivnom kriterijumu ustanovljenom regresionom analizom i ne zavisi od iskustva održavalaca.
- Integralni model pouzdanosti popravljivih složenih tehničkih sistema je univerzalni i fleksibilni model koji može da obuhvati i bilo koji drugi parcijalni model pouzdanosti bilo koje komponente sistema ili softversko rešenje u tom pravcu, ukoliko se ukaže potreba^{103,104,105,106}. Takođe on se može lako involvirati u globalnija razmatranja o pouzdanosti sistema u Energetici¹⁰¹ i za usmerenje imati konkretne proizvodne¹⁰⁷ i druge ciljeve^{108,109}. U krajnjoj instanci

¹⁰⁰ Milošević, D., Janić, N., Vulović, M., Adamović, Ž., Optimization of preventive maintenance of lubrication subsystem by reliability simulation model of V46-6 engine., Journal of the Balkan Tribological Association, 2016., 22(1).

¹⁰³ Savić, N., Milošević, D., Petrov T, Josimović, Lj., Pouzdanost turbogeneratora, XXXVI konferencija „Majski skup održavalaca Srbije“, „Merenje performansi indikatora održavanja tehničkih sistema u kompanijama“, Vrnjačka Banja, 2013.

¹⁰⁴ Savić, N., Milošević, D., Petrov T, Josimović, Lj., Pouzdanosti bloka B1 Termoelektrane Drmno, XXXVI konferencija „Majski skup održavalaca Srbije“, „Merenje performansi indikatora održavanja tehničkih sistema u kompanijama“, Vrnjačka Banja, 2013.

¹⁰⁵ Milošević, D., Adamović, Ž., Models Of Failure Of Hidraulic Systems, časopis „Menadžment znanja“, Smederevo, 2010., (1-3), 24-34.

¹⁰⁶ Veljković, D., Josimović, Lj., Milošević, D., Modeli otkaza hidrauličnih sistema, Zbornik radova, Naučno-stručni skup „Razvoj, korišćenje i održavanje hidrauličnih i pneumatskih komponenti i sistema“, Vršac, 2007.

¹⁰¹ Milošević, D., Adamović, Ž., Ašonja, A., System Reliability in Energetics, The Association of Intellectuals for the Development of Science in Serbia - "The Serbian Academic Center", Novi Sad, 2012.

¹⁰⁷ Petrov, T., Savić, N., Milošević, D., Veljković, D., Tehničko održavanje i povećavanje kapaciteta mlevenja mlinova u termoelektranama, XXXVII konferencija „Majski skup održavalaca Srbije“, „Nova koncepcija održavanja: vibrodijagnostičko održavanje tehničkih sistema u kompanijama“, Vrnjačka Banja, 2014.

implementacije ovakvih modela mogu rezultirati i pomeranjem saznanjih granica ako se integrišu sa postojećim ili novonastalim saznanjima iz domena teorije pouzdanosti¹¹⁰, dijagnostike^{111,112,113,114} ili neke drugo oblasti održavanja^{115,116} ili nauke^{117,118}.

- Implementacija ovih modela je moguća na veoma veliki broj različitih tehničkih sistema koji su van industrije. Modifikovani model primenjen na tehnički sistem rotornog bagera je primenjen i na tehnički sistem motora sa unutrašnjim sagorevanjem¹⁰⁰. Ovaj model je povezan i sa troškovima održavanja pri čemu su ukupni troškovi definisani kao zbir troškova korektivnog i preventivnog održavanja. Dakle, model ima veoma veliku fleksibilnost koja mu dozvoljava proširivanje u raznim pravcima kao i veoma laku implementaciju bez obzira o kom konkretnom tehničkom sistem u je reč.

6.3. DOPRINOS NAUCI

Doprinos nauci doktorske disertacije je sledeći:

- Naučni doprinos kada je u pitanju model primenjen na tračni transporter se ogleda u tome da je modularanom primenom manjih modela održavanja formirana metodologija da se ustanovi najoptimalniji način održavanja sa aspekta troškova održavanja za dati nivo pouzdanosti. Ovim se obezbeđuje pouzdanost sistema pod određenim troškovnim uslovima, a prema tačno utvrđenim akcijama održavanja kombinacijom naučnih metoda koje do sada nisu bile upotrebljene u ovu svrhu pa ovo predstavlja novi način rešavanja ove vrste problema.

¹⁰⁸ Milošević, D., Marković, N., Proračun pouzdanosti mehaničkog sistema rečne brane, Zbornik radova, XXX Majski skup održavalaca Srbije „Održavanje na bazi rizika“ Vrnjačka Banja, Vrnjačka Banja, 2007., 164-172.

¹⁰⁹ Vesić, Ž., Marković, N., Milošević, D., Implementacija održavanja prema stanju kontrolom pouzdanosti, Zbornik radova, XXIX Majski skup održavalaca Srbije, Vrnjačka Banja, 2006.

¹¹⁰ Adamović, Ž. Milošević, D., i dr., Teorija Pouzdanosti, Akademija inženjerstva održavanja, Beograd, 2008.

¹¹¹ Adamović, Ž., Milošević, D., i dr., Vibrodijagnostika i tribodijagnostika mašina, Društvo za tehničku dijagnostiku Srbije, TEHDIS, Beograd, 2009.

¹¹² Adamović, Ž., Ašonja, A., Milošević, D., Teledijagnostika mašina, Duga knjiga, Sremski Karlovci, 2011.

¹¹³ Milošević, D., Savanović, D., Onlajn praćenje vibracija i opterećenja na rotornim bagerima, časopis „Tehnička dijagnostika“, Banja Luka, 2010., (3-4), 19-21.

¹¹⁴ Milošević, D., Adamović, Ž., Teledijagnostika i pouzdanost mašina, časopis „Menadžment znanja“, Smederevo, 2011., (1-2), 23-31.

¹¹⁵ Adamović, Ž., Milošević, D., i dr., Konstrukcija i tehničko održavanje putničkog automobila, Društvo za tehničku dijagnostiku Srbije, TEHDIS, Beograd, 2008.

¹¹⁶ Josimović, LJ., Milošević, D., Savić, N., Petrov, T., Paunjorić, P., Mere za sprečavanje oštećenja nadzemnih delova gasovoda, XXXVIII Majski skup održavalaca Srbije "Tehnička dijagnostika termoelektrana, solarnih elektrana, toplana i hidrolelektrana", Vrnjačka Banja, 2015.

¹¹⁷ Adamović, Ž., Milošević, D., i dr., Statističke metode u naučno-istraživačkom radu, Društvo za tehničku dijagnostiku Srbije, Beograd, 2010.

¹¹⁸ Ilić, D., Milošević, D., Savić N., Sistem faznog razvoja novog proizvoda, časopis „Menadžment znanja“, Smederevo, 2009., (3-4), 57-60.

¹⁰⁰ Milošević, D., Janić, N., Vulović, M., Adamović, Ž., Optimization of preventive maintenance of lubrication subsystem by reliability simulation model of V46-6 engine., Journal of the Balkan Tribological Association, 2016., 22(1).

- Model pouzdanosti primenjen na sistem tračnog transportera pruža novu metodologiju za modelovanje pouzdanosti tehničkih sistema. On uvodi pojam koeficijenta nedeljnog preventivnog održavanja koji je mera uklanjanja nepouzdanosti u određenoj preventivnoj akciji održavanja kada se nakon nje nivo pouzdanosti složenog tehničkog sistema ne podiže na nivo 1. Ovo je logičan i najčešći slučaj u praksi kada je podsistem podvrgnut preventivnoj akciji održavanja složen i tada je praktično i nemoguće dovesti pouzdanost sistema na nivo kakav je imao kao nov. Time je dobijena mogućnost modelovanja široke lepeze kompleksnih tehničkih sistema u industriji ali i šire, tamo gde se za to nađe moguća primena¹⁰⁰.
- Model obezbeđenja pouzdanosti blokova termoelektrane je pružio novinu u pogledu formiranja matrice interakcije u vidu matrice funkcija zavisnosti međuotkaza afektujućih komponenti i otkaza afektovanih. Formiranje ove matrice predstavlja do sada nekorišćeni metod ustanovljenja potencijalnih interakcija otkaza komponenti. Ovakav metod je primenljiv na bilo koji tehnički sistem, ali je naročito podesan za kompleksne tehničke sisteme gde je funkcionalna zavisnost nejasna ili nepostojeća jer se interakcija postiže preventivnim akcijama održavanja na afektovanim komponentama tokom međuotkaza afektujućih komponenti.

Izloženi modeli daju praktične korake određivanja pouzdanosti putem potpuno novih i originalnih algoritama koji su vremenski prihvatljivi za izvršenje. S obzirom na mogućnost odabira više izloženih postupaka i parametre je moguće određivati primenom kompjuterske tehnologije, čime se mogu dobiti puno jednostavnija i brža rešenja nego li primenom samo jednog postupka¹¹⁹.

6.4. DRUŠTVENA KORIST

Društvena korist koja proističe iz doktorske disertacije je sledeća:

- Društvena korist od primene modela pouzdanosti na sistem tračnog transportera se ogleda u tome što se ostvaruje ogromna finansijska ušteda kao i mogućnosti neuporedivo preciznijeg planiranja nabavki valjaka za zamenu što iziskuje posledično još manje finansijskih sredstava. Model planiranim akcijama održavanja definiše i organizaciju službe održavanja i alokaciju raspoloživih ljudskih, tehničkih i drugih resursa na druge aktivnosti na optimalnom nivou. Ovaj model pouzdanosti takođe otvara mogućnosti unapređenja sistema za kontinuiranu dijagnostiku i kontrolu transportne trake BTO sistema¹²⁰.

¹⁰⁰ Milošević, D., Janić, N., Vulović, M., Adamović, Ž., Optimization of preventive maintenance of lubrication subsystem by reliability simulation model of V46-6 engine., Journal of the Balkan Tribological Association, 2016., 22(1).

¹¹⁹ Milošević, D., Veljković, D., Adamović, Ž., Proračun parametara Weibull-ove raspodele popravljivih komponenti složenih tehničkih sistema, XXXVII konferencija „Majski skup održavalaca Srbije“, „Nova koncepcija održavanja: vibrodijagnostičko održavanje tehničkih sistema u kompanijama“, Vrnjačka Banja, 2014.

¹²⁰ Milošević, D., Josimović, Lj., Petrov, T., Sistem za monitoring i kontrolu transportne trake bto sistema, XXXV konferencija „Poslovnih komunikacija i proizvodnog inženjerstva“, Društvo za tehničku dijagnostiku Srbije, Vrnjačka Banja, 2012.

- Primene modela pouzdanosti na sistem rotornog bagera se ogleda u tome što se ostvaruje ogromna finansijska ušteda, ali i direktna mogućnost planiranja resursa kojima se može delovati na nivo pouzdanosti sistema, te jasno planirati nivo ulaganja pojedinog resursa zarad smanjenja broja otkaza i benefita koje to konsekvantno donosi. Društvena korist leži i u tome da je model lako implementirati s obzirom da su jedini inputi otkazi sistema, te da nije zavistan od iskustva ili grešaka održavalaca sistema već jedino zahteva pedantnu i preciznu evidenciju stanja sistema¹⁰⁰.
- Model obezbeđenja pouzdanosti blokova termoelektrane pruža mogućnosti da se alociraju resursi koji se odnose na preventivne akcije održavanja na afektovanim komponentama tokom međuotkaza afektujućih komponenti sistema. Model pruža ustanovljenje interakcije na svakom pojedinom međuotkazu, čime se jasno mogu alocirati resursi za preventivno održavanje unapred za svaki sledeći međuotkaz. Ovo znači posebnu dinamiku u pogledu preventivnog delovanja po pitanju resursa i pripreme za nju kojoj se nije posvećivala pažnja na ovakav način do sada. Time se dobijaju mogućnosti boljeg i efikasnijeg planiranja, te finansijskih ušteda na optimalnom nivou. Sve navedeno otvara novo poglavlje operacionih istraživanja koja se odnose na resurse za preventivno delovanje. Naročito je velika korist i interesovanje društva je da se na složenim tehničkim sistemima na bazi dugogodišnjih empirijskih podataka o otkazima i stanju sistema izvede što bolja prognoza pouzdanosti^{121,122}.
- Svi primenjeni modeli pouzdanosti omogućuju integralnu sliku o pouzdanosti sistema i mogućnost da se na bazi toga ostvari najbolja kontrola pouzdanosti u skladu da potrebnim kriterijumima¹²³.
- Modeli pouzdanosti omogućuju i bolje izvođenje procesa razvoja i reinženjeringa tehničkih sistema koji su modelovani usled boljeg razumevanja veze pouzdanosti i razvoja¹²⁴. Ako se ovim putem dođe do fundamentalnih podataka o pouzdanosti sklopova tehničkih sistema može se iscrpnom analizom smanjiti zastoji, smanjiti nepredvidivi otkazi i povećati raspoloživost proizvodne funkcije tehnološkog sistema¹²⁵.

¹⁰⁰ Milošević, D., Janić, N., Vulović, M., Adamović, Ž., Optimization of preventive maintenance of lubrication subsystem by reliability simulation model of V46-6 engine., Journal of the Balkan Tribological Association, 2016., 22(1).

¹²¹ Savić, N., Josimović, Lj., Milošević, D., Prognoziranje pouzdanosti tehničkog sistema, Hidraulika i pneumatika, 2011., 6(1-2).

¹²² Milošević, D., Adamović, Ž., Ašonja, A., Dijagnostika i prognostika stanja mašina u elektranama i toplanama, XI konferencija „Tehnička dijagnostika termoelektrana, solarnih elektrana, toplana i hidroelektrana“, Vrnjačka Banja, 2014.

¹²³ Milošević, D., Veljković, D., Josimović, Lj., Savić, N., Planiranje preventivnog održavanja na bazi simulacionog modela, „Menadžment znanja“, Smederevo, 2012. (1-2), 23-31.

¹²⁴ Savić, N., Josimović, Lj., Milošević, D., Elementi razvoja i reinženjeringa parnog kotla tipa Sluzer, Tehnička dijagnostika, Banja Luka, 2012., (1-2).

¹²⁵ Savić, N., Josimović, Lj., Milošević, D., Analiza otkaza na turbogeneratorima, Hidraulika i pneumatika, 2011., 6(1-2).

6.5. HIPOTEZA DOKAZANA

Glavna hipoteza istraživanja "**Moguće je formirati modele za obezbeđenje povišenog eksploatacionog nivoa pouzdanosti složenih postrojenja u termoelektranama**" je dokazana putem dokazivanja radnih hipoteza:

1. U svakom od tri modela obezbeđenja pouzdanosti primenjen je blok dijagram pouzdanosti kao način prezentovanja sistema. Svaki od blokova u dijagramima je asociran sa zakonima Weibulove dvoparametarske ili troparametarske raspodele a u skladu sa prethodnom analizom otkaza izvršenom na nivou otkaza pojedinačne komponente sistema. To je dovelo do mogućnosti da se prati pouzdanost svake od komponenti sistema posebno.
2. Svaki od modela pouzdanosti je uvažavao mogućnost promena vrednosti pouzdanosti usled korektivnih ili preventivnih akcija održavanja u skladu sa realnim načinima njihove realizacije. U modelima pouzdanosti rotornog bagera i blokova elektrana je uvažena i imperfektnost opravki koja je u prvom slučaju realizovana pomoću koeficijenta nedeljnog preventivnog održavanja a u drugom pomoću matrice interakcije. Svaka od komponenti sistema je mogla biti podvrgnuta perfektnim ili imperfektnim akcijama održavanja u skladu sa ustanovljenim potrebama. Parametri teorijskih raspodela kao i koeficijent preventivnog održavanja su putem velikog broja iteracija simulacije pouzdanosti verifikovani.
3. Model pouzdanosti blokova elektrane je predvideo interakciju otkaza komponenti detektujući i kvantifikujući interakciju putem matrice interakcije. Svaka komponenta može biti afektujuća, te svojim otkazom uticati na pouzdanost afektovane komponente. Prema broju međuotkaza afektujuće komponente za vreme dok afektovana komponenta nije otkazala, razlikujemo i veličinu ovog uticaja koji je izražen funkcijom predstavljenom polinomom drugog reda.
4. Svi navedeni modeli su softverski, modularno realizovani a vremena izvršenja softvera dozvoljavala su da se (uz dekomponovanje sistema na maksimalni nivo određen podacima u bazama podataka klasifikovani) izvrši veliki broj iteracija kako bi se Monte Carlo metodom dobili validni rezultati i time izvršila validacija modela.
5. Svaki od modela je u toku izrade na nivou simulacije pojedinačnih komponenti iterativno ponavljan sve dok se nije ustanovilo da je prosečan broj otkaza u modelu odgovarajući realnosti tj. broju otkaza iz baze podataka. Za slučajeve gde je to bilo potrebno simulacija je vršena i za više komponenti istovremeno kao što je to slučaj u modelu pouzdanosti blokova elektrane.

Kao konačan zaključak može se izvesti da je odgovor na naslov same doktorske disertacije dat u potpunosti.

PREDLOG DALJIH ISTRAŽIVANJA

Predlog daljih istraživanja se zasniva na zaključcima i mogao bi da glasi na sledeći način:

Razvoj integralnog modela i na ostala polja. Integralni model može da uvrsti i druge pojedinačne modele koje se odnose na složene tehničke sisteme čija pouzdanost ne može biti obezbeđena ponuđenim integralnim modelom. To znači i druge kombinacije teorijskih raspodela, preventivnih načina održavanja kojih nema u datim modelima, drugačijim preventivnim akcijama održavanja, interakcijama otkaza i povezivanje sa drugim oblastima pouzdanosti i otkaza^{126,127,128,129}, itd.

Korišćenje simulacije u svrhu ukupne sigurnosti sistema. Simulacije pouzdanosti mogu poslužiti pronalasku nestabilnih stanja prema pouzdanosti usled interakcije otkaza i mogućih načina dolaska do katastrofalnih posledica kakve su se dešavale i na primeru totalne havarije turbine u TE KO Kostolac.

Prevazilaženje problema koji se odnose na vremensku dinamiku proračuna pouzdanosti. Potreba da se sistemi dekomponuju što je više moguće kada za to ima uslova stvara probleme velikog broja proračuna pouzdanosti koji se multiplikuju vremenskim brojem tačaka u kojima se za svaku komponentu sistema proračunava pouzdanost kako bi se stekla što bolja slika o kretanju pouzdanosti sistema. Dakle suština je naći balans između vremenskih mogućnosti izvođenja kalkulacije modela i potrebe preciznosti dobijenih podataka¹³⁰. Kvalitet rešavanja ovog problema definiše celokupan dalji rad na modelovanju putem simulacija. U perspektivi, bolje hardverske mogućnosti računara i optimalniji algoritmi mogu dati veći manipulativni prostor za rešavanje ove problematike.

Povezivanje integralnog modela pouzdanosti i praćenje stanja sistema u realnom vremenu. Poređenjem procenjene pouzdanosti praćenjem sistema prema stanju sa predviđenim nivoom pouzdanosti prema simulaciji modela dobili bi se podaci o ranim otkazima. Ovakvi podaci bi omogućili mnogo bolje planiranje akcija održavanja, resursa koji se njih tiču kao i druge bolje konsekvantne odluke. Primenom jednog modela na više sličnih tehničkih sistema bi se mogao postići još i veći efekat te bi najbolje primene mogli naći u teledijagnostičkim centrima gde je primer za to praćenje

¹²⁶ Savić, N., Petrov T., Veljković, D., Milošević, D., Oštećenja gasovoda uzrokovana lutajućim strujama, XXXVII konferencija „Majski skup održavalaca Srbije“, „Nova koncepcija održavanja: vibrodijagnostičko održavanje tehničkih sistema u kompanijama“, Vrnjačka Banja, 2014.

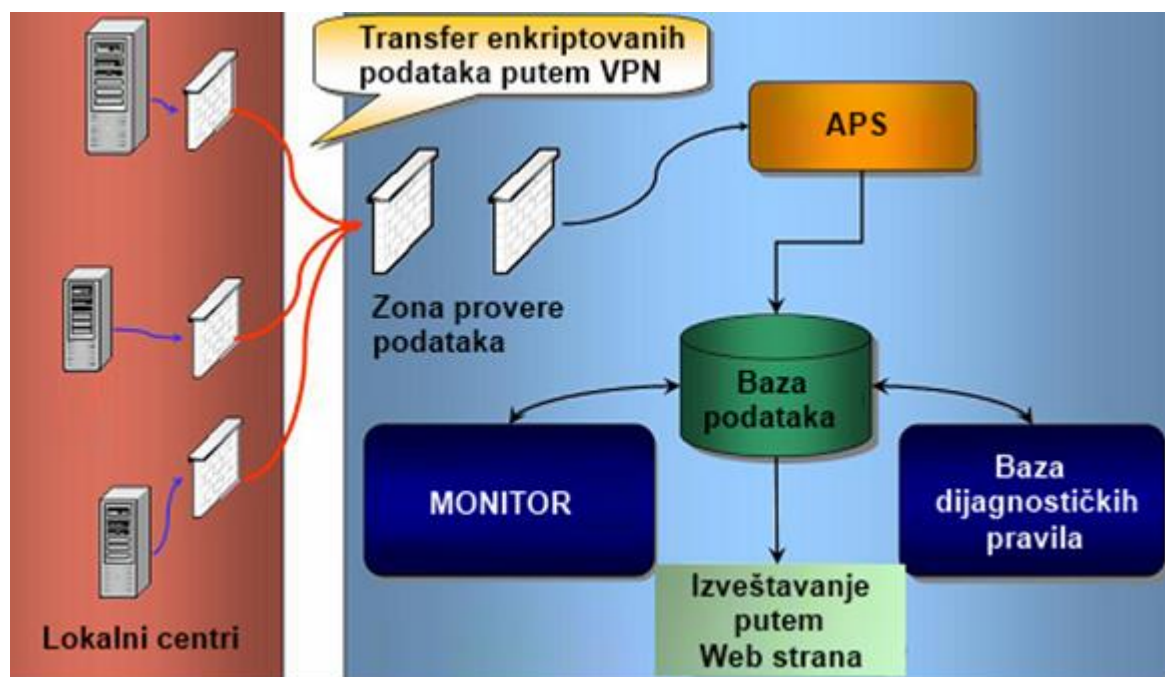
¹²⁷ Milošević, D., Veljković, D., Petrov, T., Savić, N., Paunjorić, P., Oštećenja gasovoda uzrokovana lutajućim strujama jednosmerne električne vuče, XXXVII konferencija „Majski skup održavalaca Srbije“, „Nova koncepcija održavanja: vibrodijagnostičko održavanje tehničkih sistema u kompanijama“, Vrnjačka Banja, 2014.

¹²⁸ Savić, N., Adamović, Ž., Petrov, T., Milošević, D., Modeli tehničke dijagnostike za određivanje optimalnog trenutka izvođenja dijagnostike stanja kliznih ležišta turbogeneratorskog sistema, XXXVIII Majski skup održavalaca Srbije "Tehnička dijagnostika termoelektrana, solarnih elektrana, toplana i hidrolelektrana", Vrnjačka Banja, 2015.

¹²⁹ Milošević, D., Spasić, D., Otić, G., Mogućnost rada elektrana u vanrednim uslovima, „Menadžment znanja“, Smederevo, 2015. (1-2), 38-43.

¹³⁰ Milošević, D., Janjić, Z., Blaženović, R., Model pouzdanosti složenog tehničkog sistema sa nepopravljivim komponentama, Održavanje mašina, 2013., 10(1-2), 28-33.

gasnih turbina iz Simensovog teledijagnostičkog centra. Modeli pouzdanosti se u perspektivi mogu povezati sa svim oblicima dijagnostike mašina i složenih tehničkih sistema o čemu kao potrebi govori i literatura iz oblasti dijagnostike tehničkih sistema^{131,132,133,134}, vibrodijagnostike^{135,136} i teledijagnostike^{137,138}. Modeli pouzdanosti su neophodni činilac u izgradnji teledijagnostičkog centra kako bi se stvorila baza dijagnostičkih pravila, čiji je primer ilustrovan na slici 6.7.



Slika 6.7. –Tok podataka i struktura teledijagnostičkog centra¹³⁹

Specificiranje modela za svaki sistem posebno. Modeli se mogu specificirati do mere da je svaki primenljiv kao najbolje rešenje za dati složeni tehnički sistem. Ovo se naročito odnosi na početne korake dekomponovanja sistema prema otkazima za dati

¹³¹ Adamović, Ž., Ašonja, A., Milošević, D., Paunjorić, P., Teledijagnostika mašina, Druga knjiga, Sremski Karlovci, 2011.

¹³² Adamović, Ž., Ašonja, A., Milošević, D., Tribodijagnostika i vibrodijagnostika mašina, Srpski akademski centar, Novi Sad, 2013.

¹³³ Milošević, D., Petrov, T., Teledijagnostika u službi pouzdanosti parnih turbogeneratorsa, Tehnička dijagnostika, Beograd, 2013., (2), 45-51.

¹³⁴ Milošević, D., Adamović, Ž., Teledijagnostika i pouzdanost mašina, časopis „Menadžment znanja“, Smederevo, 2011., (1-2), 23-31.

¹³⁵ Savanović, N., Alaković, J., Milošević, D., Onlajn praćenje vibracija i opterećenje na rotornim bagerima, Tehnička dijagnostika, Banja luka, 2011., (1-2).

¹³⁶ Josimović, Lj., Petrov T., Savić, N., Milošević, D., Analiza vibracija turbogeneratorsa, XXXVI konferencija „Majski skup održavalaca Srbije“, „Merenje performansi indikatora održavanja tehničkih sistema u kompanijama“, Vrnjačka Banja, 2013.

¹³⁷ Milošević, D., Adamović, Ž., Stanojević, M., Teledijagnostika i pouzdanost tehničkih sistema, Tehnička dijagnostika, Banja Luka, 2011., (3-4)

¹³⁸ Milošević, D., Veljković, D., Paunjorić, P., Daljinska dijagnostika i upravljanje u energetskim objektima zasnovani na primeni SCADA sistema, XXXVII konferencija „Majski skup održavalaca Srbije“, „Nova koncepcija održavanja: vibrodijagnostičko održavanje tehničkih sistema u kompanijama“, Vrnjačka Banja, 2014.

¹³⁹ Milošević, D., Veljković, D., Josimović, Lj., Savić, N., Teledijagnostika i pouzdanost turbogeneratorsa, Tehnička dijagnostika, Banja Luka, 2012., (1-2).

sistem, pa je dekomponovanje moguće na mestima gde je veći broj otkaza komponenti sistema, odnosno nepotrebno tamo gde ih nema. Takođe mehanizam otkazivanja može biti različit za svaki tehnički sistem ili njegove delove pa je prilagođavanje modela moguće i u tom pravcu kako bi se dobile bolje performanse modela. Na kraju i načini preventivnih akcija održavanja mogu biti veoma različiti, prema vremenu, prema pouzdanosti, itd. pa je model moguće specificirati i u ovim domenima.

Planiranje resursa, nabavki delova, planiranje ljudstva, spoj sa operacionim istraživanjima, planiranje kvalitetnijih delova ili češćih zamena na slabim mestima prema pouzdanosti, itd. Mnoge indirektno koristi mogu proizilaziti iz modela obezbeđenja pouzdanosti i u spoju sa operacionim istraživanjima moguće je dobiti puno benefita na raznim poljima. Svako od ovih polja bi moglo biti dalja tema istraživanja koja može da da i nova saznanja, finansijske koristi ili otvore domene novih istraživanja.

Povezivanje integralnog modela pouzdanosti sa otkazima. Stalnim ažuriranjem otkaza te automatskim izvršenjem modela dobila bi se besprekorna ažurnost i sve bolje modelovanje pouzdanosti. Ukoliko bi došlo do promena koje bi uticale na kretanje pouzdanosti mogla bi se odstranjivanjem ekstremnih vrednosti ili vremenskih najstarijih otkaza postići veća tačnost modela. Dalja istraživanja bi tako mogla da stvore ekspertske sistem a automatskim ažuriranjem baze podataka i veštačkom inteligencijom u koju je implementiran integralni model pouzdanosti.

LITERATURA

- ¹ Sun, Y., "Reliability Prediction Of Complex Repairable Systems: An Engineering Approach", Thesis submitted in total fulfilment of requirements of the degree of Doctor of Philosophy, Faculty of Built Environment and Engineering, University of Technology, Queensland, 2006.
- ² Wang, H.Z., A survey of maintenance policies of deteriorating systems, *European Journal of Operational Research*, 2002., 139(3), 469-489.
- ³ Nikhil Dev, Samsheb, S.S. Kachhwaha, Rajesh Attri, Development of reliability index for combined cycle power plant using graph theoretic approach, *Ain Shams Engineering Journal*, Ain Shams University, 2014., 5, 193–203..
- ⁴ Naess, A., Leira, B.J., Batsevych, O., System reliability analysis by enhanced Monte Carlo simulation, *Structural Safety*, 2009., 31, 349–355.
- ⁵ Weber, P., Jouffe, L., Complex system reliability modelling with Dynamic Object Oriented Bayesian Networks (DOOBN), *Reliability Engineering and System Safety*, 2006., 91, 149–162.
- ⁶ Moazzami, M., Hemmati, R., Haghghatdar Fesharaki, F., Rafiee Rad, S., Reliability evaluation for different power plant busbar layouts by using sequential Monte Carlo simulation, *Electrical Power and Energy Systems*, 2013., 53, 987–993.
- ⁷ Petrović, G., Marinković Z., Marinković, D., Optimal preventive maintenance model of complex degraded systems: A real life case study, *Journal of Scientific & Industrial Research*, 2011., 70, 412-420.
- ⁸ Artana, K.B., Ishida, K., Spreadsheet modelling of optimal maintenance schedule for components in wear-out phase, *Reliability Engineering & System Safety*, 2002., 77(1), 81-91.
- ⁹ Campbell, J.D., Jardine, A.K.S., *Maintenance Excellence: optimizing equipment life-cycle decisions*, New York: Marcel Dekker, 2001.
- ¹⁰ Jardine, A.K.S., *Maintenance Replacement and Reliability*, London: Pitman, 1973.
- ¹¹ Kelly, A., *Maintenance Strategy*, Oxford: Butterworth-Hernemann, 1997.
- ¹² Bicheno, J., Holweg, M., Niessmann, J., Constraint batch sizing in a lean environment, *International Journal of Production Economics*, 2001., 73(1), 41-49.
- ¹³ Christer, A.H., Innovatory decision making, the role and effectiveness of theories of decision in practice, in *The Role and Effectiveness of Theories of Decision in Practice*, London: Hodder and Stoughton, 1973., 369-377.
- ¹⁴ Wang, W., Christer, A.H., Solution algorithms for a nonhomogeneous multi-component inspection model, *Computers & Operations Research*, 2003., 30(1), 19-34.
- ¹⁵ Langseth, H., Lindqvist, H., B., Modelling imperfect maintenance and repair of components under competing risk, *Communications of the Third International Conference on Mathematical Methods in Reliability – Methodology and Practice*, 2002., 359, Trondheim, Norway.
- ¹⁶ Pham, H., Wang, H., Multivariate imperfect repair, *European Journal of Operations Research*, 1996., 94, 425–428.
- ¹⁷ Jiang, R., Ji, P., Age replacement policy: a multi-attribute value model, *Reliability Engineering & System Safety*, 2002., 76(3), 311-318.
- ¹⁸ Stewart, M.G., Reliability-based assessment of ageing bridges using risk ranking and life cycle cost decision analyses, *Reliability Engineering & System Safety*, 2001., 74(3), 263-273.

- 19 Lowry, G., Factors affecting the success of building management system installations, *Building Services Engineering Research and Technology*, 2002., 23(1), 57-66.
- 20 Hoyland, A., Rausand, M., *System reliability Theory: Models and Statistical Methods*, New York: John Wiley & Sons, Inc. 1994.
- 21 Cox, D.R. Oakes, D., *Analysis of Survival Data*, London: Chapman & Hall. 1984., 91-113.
- 22 Crow, L.H., Reliability analysis for complex repairable systems, in *Reliability and Biometry*, Philadelphia, Pennsylvania: SIAM., 1974., 379-410.
- 23 Rao, B.K.N., *Handbook of Condition Monitoring*, UK: Elsevier Advanced Technology, 1996.
- 24 Shina, J., Junb, H., On condition based maintenance policy, *Journal of Computational Design and Engineering*, 2015., 2(2), 119-127.
- 25 Syed, I., Din, I., Kim, H., An Optimal Sensor Placement for Full Coverage in Road Monitoring Systems with Proper Shape of Sensing Range, *Life Science Journal*, 2013., 10(2), 2524-2527.
- 26 An integrated method for comprehensive sensor network development in complex power plant systems Original Research Article, *Reliability Engineering & System Safety*, 2000., 67(1), 17-27.
- 27 Ekanathan, M., Yeldose, B., Kallanickal, P., Mangalath, G., Root Cause Analysis to Identify the Problem Causing Turbine Failure, *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT)*, 2013., 2(2), 527-535.
- 28 Chandrakar, J., Kumar, R., Reduction of Breakdowns in Food Processing Plants Through Failure Analysis, *International Journal of Advanced Engineering Research and Studies*, 2015., 4(2), 212-214.
- 29 Marhavidas, P., Koulouriotis, D., Gemeni, V., Risk analysis and assessment methodologies in the work sites: On a review, classification and comparative study of the scientific literature of the period 2000-2009, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2011., 24, 477-523.
- 30 Lipol, S., L., Baig, A., A., Ruzli, R., Buang, B., A., Reliability Analysis Using Fault Tree Analysis: A Review, *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, 2013., 4(3), 169-173. Haq, J., Risk Analysis Method: FMEA/FMECA in the Organizations, *International Journal of Basic & Applied Sciences*, 2011., 11(5), 49-57.
- 31 Haq, J., Risk Analysis Method: FMEA/FMECA in the Organizations, *International Journal of Basic & Applied Sciences*, 2011., 11(5), 49-57.
- 32 Srivastava, K., N., Mondal, S., Predictive maintenance using modified FMECA method, *International Journal of Productivity and Quality Management.*, 2015., 16(3).
- 33 Gilchrist, W., Modelling failures modes and effects analysis, *International Journal of Quality & Reliability Management*, 1993., 10(5), 16-23.
- 34 Kelly, A., Harris, M.J., *Management of Industrial Maintenance*, Butterworth, 1987.
- 35 Villemeur, A., *Reliability, Availability, Maintainability and Safety Assessment*, Vol. 1. Chichester: John Wiley & Sons, 1992
- 36 Kalos, M. H. Whitlock, P. A., *Monte Carlo Methods*, New York: John Wiley & Sons, 1986.
- 37 Clausius, R., Ueber die mittlere lange der wege, *Ann. Phy. Lpzg*, 1858., 105, 239-258.

- ³⁸ Barlow, R. E., Hunter, L. C., Optimum preventive maintenance policies, *Operations Research*, 1960., 8, 90-100.
- ³⁹ Nguyen, D.G., Murthy, D.N.P., Optimal preventive maintenance policies for repairable systems, *Operations research*, 1981., 29, 1181-1194.
- ⁴⁰ Armstrong, M.J., Age repair policies for the machine repair problem, *European Journal of Operational Research*, 2002., 138(1), 127-141.
- ⁴¹ Mazzuchi, T.A., Soyer, R.A., Bayesian perspective on some replacement strategies, *Reliability Engineering & System Safety*, 1996., 51(3), 295-303.
- ⁴² Fontenot, R.A. Proschan, F., Some imperfect maintenance models, in *Reliability Theory and Models*, M.S, Abdel-Hameed, E. Cinlar, and J. Quinn, Editors, Academic Press, Inc: Orland, 1984., 83-101.
- ⁴³ Gurov, S.V. Utkin, L.V., Reliability of repairable systems with periodic modifications, *Microelectronics Reliability*, 1996., 36(1), 27-35.
- ⁴⁴ Noortwijk, J., M., Weide, J., A., M., Applications to continuous-time processes of computational techniques for discrete-time renewal processes, *Reliability Engineering & System Safety*, 2008., 93(12), 1853–1860.
- ⁴⁵ Narmada, S., Jacob, M., Reliability analysis of a complex system with a deterioration standby unit under common-cause failure and critical human error, *Microelectronics Reliability*, 1996., 36(9), 1287-1290.
- ⁴⁶ Dey, S., Sarmah, P., Estimation of parameters of a model of a complex repairable system, *Microelectronics Reliability*, 1997., 37(4), 673-676.
- ⁴⁷ Wang, K.H., Ke, J.C., Probabilistic analysis of a repairable system with warm standbys plus balking and renegeing, *Applied Mathematical Modelling*, 2003., 27(3), 327-336.
- ⁴⁸ Fiems, D., Steyaert, B., Bruneel, H., Analysis of a discrete-time GI-G-1 queuing model subjected to burst interruptions, *Computers & Operations Research*, 2003., 30(1), 139-153.
- ⁴⁹ IEC 61165, Application of Markov techniques
- ⁵⁰ Saldanha, P. L. C., Simone, E. A. D., Melo, P. F. F. E., An application of non-homogeneous Poisson point processes to the reliability analysis of service water pumps, *Nuclear Engineering and Design*, 2001., 210(1-3), 125-133.
- ⁵¹ Finkelstein, M., S., A point-process stochastic model for software reliability, *Reliability Engineering & System Safety*, 63(1), 67-71, 1999.
- ⁵² Ebeling, C.E., *An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering*, New York: The McGraw-Hill Company, 1997., 124-128.
- ⁵³ Roberts, J.W.T., Mann, Jr.L., Failure predictions in repairable multi-component systems, *International Journal of Production Economics*, 1993., 29(1), 103-110.
- ⁵⁴ Barbera, F., Schneider, H., Watson, E., A condition based maintenance model for a two-unit series system, *European Journal of Operational Research*, 1999., 116(2), 281-290.
- ⁵⁵ Al-Najjar, Prediction of the vibration level when monitoring rolling element bearings in paper mill machines, *International Journal of COMADEM*, 2001., 4(2), 19-26.
- ⁵⁶ Asadzadehd, S., M., Salehib, N., Firoozic, M., Condition-based maintenance effectiveness for series–parallel power generation system—A combined Markovian simulation model, *Reliability Engineering & System Safety*, 2015., 142, 357–368.
- ⁵⁷ Sheu, S.H., Yeh, R.H., Lin, Y.B., Yuang, M.G., et al., A Bayesian approach to an adaptive preventive maintenance model. *Reliability Engineering & System Safety*, 2001., 71(1), 33-44.

- ⁵⁸ Percy, D.F., Kobbacy, K.A.H., Fawzi, B.B., Setting preventive maintenance schedules when data are sparse. *International Journal of Production Economics*, 1997., 51(3), 223-234.
- ⁵⁹ Apeland, S., Scarf, P.A., A fully subjective approach to modeling inspection maintenance. *European Journal of Operational Research*, 2003., 148(2), 410-425.
- ⁶⁰ Liu, Z., Liu, Y., Cai, B., Zhang, D., Zheng, C., Dynamic Bayesian network modeling of reliability of subsea blowout preventer stack in presence of common cause failures, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2015., 38, 58–66.
- ⁶¹ Tian, Z., Liao, H., Condition based maintenance optimization for multi-component systems using proportional hazards model, *Reliability Engineering & System Safety*, 2011., 96(5), 581–589.
- ⁶² Ghapanchi, H., Wohlin, C., Aurum, A., Resources contributing to gaining competitive advantage for open source software projects: An application of resource-based theory *International Journal of Project Management*, 2014., 32(1), 139–152.
- ⁶³ Belitser, E. , Serra, P., Zanten, H., Rate-optimal Bayesian intensity smoothing for inhomogeneous Poisson processes, *Journal of Statistical Planning and Inference*, 2015., 166, 24–35.
- ⁶⁴ Lee, M., Sohn K., Inferring the route-use patterns of metro passengers based only on travel-time data within a Bayesian framework using a reversible-jump Markov chain Monte Carlo (MCMC) simulation, *Transportation Research Part B: Methodological*, 2015., 81(1), 1–17.
- ⁶⁵ Liu, Y., Li, C., Complex-valued Bayesian parameter estimation via Markov chain Monte Carlo, *Information Sciences*, 2016., 326(1), 334–349.
- ⁶⁶ He, Z., Gong, W., Xie, W., Zhang, J., Zhang, G., Hong, Z., NVH and reliability analyses of the engine with different interaction models between the crankshaft and bearing, *Applied Acoustics*, 2016., 101(1), 185–200.
- ⁶⁷ Yi, C., Bao, Y., Jiang, Y., Xue, Y., Modeling cascading failures with the crisis of trust in social networks, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2015., 436(15), 256–271.
- ⁶⁸ Henneaux, P., Probability of failure of overloaded lines in cascading failures, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2015., 73, 141–148.
- ⁶⁹ Duan, D., Ling, X., Wu, X., OuYang, D., Zhong, B., Critical thresholds for scale-free networks against cascading failures, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2014., 416, 252–258.
- ⁷⁰ Cupac, V., Lizier, J., T., Prokopenko, M., Comparing dynamics of cascading failures between network-centric and power flow models, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2013., 49, 369–379.
- ⁷¹ Wu, X., Wu, X., Extended object-oriented Petri net model for mission reliability simulation of repairable PMS with common cause failures, *Reliability Engineering & System Safety*, 2015., 136, 109–119.
- ⁷² Greig, G. L., Second moment reliability analysis of redundant systems with dependent failures, *Reliability Engineering & Sistem Safety*, 1993., 41(1), 57-70.
- ⁷³ Mosleh, A., Common cause failures: An analysis methodology and examples, *Reliability Engineering & System Safety*, 1991., 34(3), 249-292.
- ⁷⁴ Findlay, S., J., Harrison, N. D., Why aircraft fail. *Materials Today*, 2002., 5(11), 18-25.
- ⁷⁵ Sun, Y., Ma, L., Mathew, J., Zhang, S., An analytical model for interactive failures, *Reliability Engineering & System Safety*, 2006., 91(5), 495–504.

- ⁷⁶ Dekker, R., Applications of maintenance optimization model: a review and analysis, Reliability Engineering and System Safety, 1996., 51(3), 229-240.
- ⁷⁷ Božičković, R., Popović, M., "Eksploatacija i održavanje vozila", Saobraćajni fakultet Doboj, Doboj, 2009.
- ⁷⁸ Adamović, Ž., Milošević, D., i dr., "Teorija pouzdanosti", Akademija inženjerstva održavanja, Beograd, 2008.
- ⁷⁹ Adamović, Ž., "Pouzdanost mašina", Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin", Zrenjanin, 2006.
- ⁸⁰ Adamović, Ž., Šukalo, B., "Menadžment održavanja", Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin", Zrenjanin, 2005.
- ⁸¹ Adamović, Ž., Voskresenski V., Sigurnost funkcionisanja mašina, Društvo za tehničku dijagnostiku Srbije, Beograd, 2008.
- ⁸² Kołowrocki, K., Soszyńska, J., Reliability and Safety of Complex Technical Systems an Overall Approach, Journal of KONBiN 2010., 1(13).
- ⁸³ Aven, T., Jensen, U., Stochastic Models in Reliability, Springer-Verlag, New York, 1999.
- ⁸⁴ Dekker, R., Groenendijk, W., Availability assessment methods and their application in practice, Microelectron, 1995., Reliab. 35, 1257–1274.
- ⁸⁵ Josimović, Lj., Optimizacija postupka vibrodijagnostike turbogeneratora, Doktorska disertacija, Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin", Zrenjanin, 2012.
- ⁸⁶ Josimović, Lj., Đurić, Ž., Adamović, Ž., Radovanović, Lj., Jovanov, G., An evaluation of formed maintenance programme efficacy, Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering, Ljubljana, 2012., 58(5), 300-308.
- ⁸⁷ Milošević, D., Vujović, S., Janjić, N., Metode proračuna parametara vejbulove raspodele, XXXVI konferencija „Majski skup održavalaca Srbije“, „Merenje performansi indikatora održavanja tehničkih sistema u kompanijama“, Vrnjačka Banja, 2013.
- ⁸⁸ Čatić, D., Modeliranje pouzdanosti korišćenjem Vejbulove raspodele, Tehnika, Savez inženjera i tehničara Srbije, 2006., 55(5), 1-10.
- ⁸⁹ <http://www.tpub.com/content/USACETechnicalletters/ETL-1110-2-560/ETL-1110-2-5600030.htm> (V 2012.)
- ⁹⁰ Milošević, D., Josimović, Lj., Petrov, T., Adamović, Ž., Maintenance planning of btr system belt conveyors using a model based on reliability and maintenance costs, TTEM, 2013., 8(3), 1257-1265.
- ⁹¹ Al-Fawzan, A., M., Methods for Estimating the Parametars of the Weibull Distribution, King Abdulaziz City for Science and Technology, Riyadh, Saudi Arabia, 2000.
- ⁹² Mahdavi, M., Mahdavi, M., Optimization of age replacement policy using reliability based heuristic model, J SCI IND RES 2009., 68(8), 68-73.
- ⁹³ Milošević D., Adamović Ž., Reliability Simulation Model of Complex Technical System in Thermal Power Plants, Metalurgia International, 2013., 18(12), 55-63.
- ⁹⁴ Prvulović, S., Josimović, Lj., Savić, N., The Implementation of Remote Maintenance of Bucket Wheel Excavator, Metalurgia International, 2013., 18(1), 59-62.
- ⁹⁵ Milošević D., Adamović Ž., Reliability Simulation Model for Bucket Wheel Excavator, Metalurgia International, 2013., 18(11), 13-20.
- ⁹⁶ Milošević, D., Softver za praćenje pouzdanosti mašina u procesu eksploatacije, Magistarska teza, Tehnički fakultet "Mihajlo Punin", Zrenjanin, 2009.
- ⁹⁷ Milošević, D., Adamović, Ž., Ašonja, A., Dijagnostika i prognostika stanja mašina u elektranama i toplanama, Tehnička dijagnostika, Banja Luka, 2014. (1-2), 66-72.

- ⁹⁸ Milošević, D., Veljković, D., Josimović, Lj., "Softver za praćenje i predviđanje pouzdanosti tehničkih sistema", Rad u zborniku radova 10. Simpozijum hidrauličara i ekologa Srbije, Vršac, 2008.
- ⁹⁹ Milošević, D., Adamović, Ž., i dr., Proračun i analiza pouzdanosti univerzalne mašine za bušenje U3-365, časopis „Menadžment znanja“, Smederevo, 2009., (3-4), 51-56.
- ¹⁰⁰ Milošević, D., Janić, N., Vulović, M., Adamović, Ž., Optimization of preventive maintenance of lubrication subsystem by reliability simulation model of V46-6 engine., Journal of the Balkan Tribological Association, 2016., 22(1).
- ¹⁰¹ Milošević, D., Adamović, Ž., Ašonja, A., System Reliability in Energetics, The Association of Intellectuals for the Development of Science in Serbia - "The Serbian Academic Center", Novi Sad, 2012.
- ¹⁰² Josimović, Lj., Petrov T, Savić, N., Milošević, D., Poremećajne sile mehaničkog karaktera, XXXVI konferencija „Majski skup održavalaca Srbije“, „Merenje performansi indikatora održavanja tehničkih sistema u kompanijama“, Vrnjačka Banja, 2013.
- ¹⁰³ Savić, N., Milošević, D., Petrov T, Josimović, Lj., Pouzdanost turbogeneratora, XXXVI konferencija „Majski skup održavalaca Srbije“, „Merenje performansi indikatora održavanja tehničkih sistema u kompanijama“, Vrnjačka Banja, 2013.
- ¹⁰⁴ Savić, N., Milošević, D., Petrov T, Josimović, Lj., Pouzdanosti bloka B1 Termoelektrane Drmno, XXXVI konferencija „Majski skup održavalaca Srbije“, „Merenje performansi indikatora održavanja tehničkih sistema u kompanijama“, Vrnjačka Banja, 2013.
- ¹⁰⁵ Milošević, D., Adamović, Ž., Models Of Failure Of Hidraulic Systems, časopis „Menadžment znanja“, Smederevo, 2010., (1-3), 24-34.
- ¹⁰⁶ Veljković, D., Josimović, Lj., Milošević, D., Modeli otkaza hidrauličnih sistema, Zbornik radova, Naučno-stručni skup „Razvoj, korišćenje i održavanje hidrauličnih i pneumatskih komponenti i sistema“, Vršac, 2007.
- ¹⁰⁷ Petrov, T., Savić, N., Milošević, D., Veljković, D., Tehničko održavanje i povećavanje kapaciteta mlevenja mlinova u termoelektranama, XXXVII konferencija „Majski skup održavalaca Srbije“, „Nova koncepcija održavanja: vibrodijagnostičko održavanje tehničkih sistema u kompanijama“, Vrnjačka Banja, 2014.
- ¹⁰⁸ Milošević, D., Marković, N., Proračun pouzdanosti mehaničkog sistema rečne brane, Zbornik radova, XXX Majski skup održavalaca Srbije „Održavanje na bazi rizika“ Vrnjačka Banja, Vrnjačka Banja, 2007., 164-172.
- ¹⁰⁹ Vesić, Ž., Marković, N., Milošević, D., Implementacija održavanja prema stanju kontrolom pouzdanosti, Zbornik radova, XXIX Majski skup održavalaca Srbije, Vrnjačka Banja, 2006.
- ¹¹⁰ Adamović, Ž. Milošević, D., i dr., Teorija Pouzdanosti, Akademija inženjerstva održavanja, Beograd, 2008.
- ¹¹¹ Adamović, Ž., Milošević, D., i dr., Vibrodijagnostika i tribodijagnostika mašina, Društvo za tehničku dijagnostiku Srbije, TEHDIS, Beograd, 2009.
- ¹¹² Adamović, Ž., Ašonja, A., Milošević, D., Teledijagnostika mašina, Duga knjiga, Sremski Karlovci, 2011.
- ¹¹³ Milošević, D., Savanović, D., Onlajn praćenje vibracija i opterećenja na rotornim bagerima, časopis „Tehnička dijagnostika“, Banja Luka, 2010., (3-4), 19-21.
- ¹¹⁴ Milošević, D., Adamović, Ž., Teledijagnostika i pouzdanost mašina, časopis „Menadžment znanja“, Smederevo, 2011., (1-2), 23-31.

- ¹¹⁵ Adamović, Ž., Milošević, D., i dr., Konstrukcija i tehničko održavanje putničkog automobila, Društvo za tehničku dijagnostiku Srbije, TEHDIS, Beograd, 2008.
- ¹¹⁶ Josimović, Lj., Milošević, D., Savić, N., Petrov, T., Paunjorić, P., Mere za sprečavanje oštećenja nadzemnih delova gasovoda, XXXVIII Majski skup održavalaca Srbije "Tehnička dijagnostika termoelektrana, solarnih elektrana, toplana i hidrolelektrana", Vrnjačka Banja, 2015.
- ¹¹⁷ Adamović, Ž., Milošević, D., i dr., Statističke metode u naučno-istraživačkom radu, Društvo za tehničku dijagnostiku Srbije, Beograd, 2010.
- ¹¹⁸ Ilić, D., Milošević, D., Savić, N., Sistem faznog razvoja novog proizvoda, časopis „Menadžment znanja“, Smederevo, 2009., (3-4), 57-60.
- ¹¹⁹ Milošević, D., Veljković, D., Adamović, Ž., Proračun parametara Weibull-ove raspodele popravljivih komponenti složenih tehničkih sistema, XXXVII konferencija „Majski skup održavalaca Srbije“, „Nova koncepcija održavanja: vibrodijagnostičko održavanje tehničkih sistema u kompanijama“, Vrnjačka Banja, 2014.
- ¹²⁰ Milošević, D., Josimović, Lj., Petrov, T., Sistem za monitoring i kontrolu transportne trake bto sistema, XXXV konferencija „Poslovnih komunikacija i proizvodnog inženjerstva“, Društvo za tehničku dijagnostiku Srbije, Vrnjačka Banja, 2012.
- ¹²¹ Savić, N., Josimović, Lj., Milošević, D., Prognoziranje pouzdanosti tehničkog sistema, Hidraulika i pneumatika, 2011., 6(1-2).
- ¹²² Milošević, D., Adamović, Ž., Ašonja, A., Dijagnostika i prognostika stanja mašina u elektranama i toplinama, XI konferencija „Tehnička dijagnostika termoelektrana, solarnih elektrana, toplana i hidroelektrana“, Vrnjačka Banja, 2014.
- ¹²³ Milošević, D., Veljković, D., Josimović, Lj., Savić, N., Planiranje preventivnog održavanja na bazi simulacionog modela, „Menadžment znanja“, Smederevo, 2012. (1-2), 23-31.
- ¹²⁴ Savić, N., Josimović, Lj., Milošević, D., Elementi razvoja i reinženjeringa parnog kotla tipa Sluzer, Tehnička dijagnostika, Banja Luka, 2012., (1-2).
- ¹²⁵ Savić, N., Josimović, Lj., Milošević, D., Analiza otkaza na turbogeneratorima, Hidraulika i pneumatika, 2011., 6(1-2).
- ¹²⁶ Savić, N., Petrov, T., Veljković, D., Milošević, D., Oštećenja gasovoda uzrokovana lutajućim strujama, XXXVII konferencija „Majski skup održavalaca Srbije“, „Nova koncepcija održavanja: vibrodijagnostičko održavanje tehničkih sistema u kompanijama“, Vrnjačka Banja, 2014.
- ¹²⁷ Milošević, D., Veljković, D., Petrov, T., Savić, N., Paunjorić, P., Oštećenja gasovoda uzrokovana lutajućim strujama jednosmerne električne vuče, XXXVII konferencija „Majski skup održavalaca Srbije“, „Nova koncepcija održavanja: vibrodijagnostičko održavanje tehničkih sistema u kompanijama“, Vrnjačka Banja, 2014.
- ¹²⁸ Savić, N., Adamović, Ž., Petrov, T., Milošević, D., Modeli tehničke dijagnostike za određivanje optimalnog trenutka izvođenja dijagnostike stanja kliznih ležišta turbogeneratora, XXXVIII Majski skup održavalaca Srbije "Tehnička dijagnostika termoelektrana, solarnih elektrana, toplana i hidroelektrana", Vrnjačka Banja, 2015.
- ¹²⁹ Milošević, D., Spasić, D., Otić, G., Mogućnost rada elektrana u vanrednim uslovima, „Menadžment znanja“, Smederevo, 2015. (1-2), 38-43.
- ¹³⁰ Milošević, D., Janjić, Z., Blaženović, R., Model pouzdanosti složenog tehničkog sistema sa nepopravljivim komponentama, Održavanje mašina, 2013., 10(1-2), 28-33.
- ¹³¹ Adamović, Ž., Ašonja, A., Milošević, D., Paunjorić, P., Teledijagnostika mašina, Druga knjiga, Sremski Karlovci, 2011.

- ¹³² Adamović, Ž., Ašonja, A., Milošević, D., Tribodijagnostika i vibrodijagnostika mašina, Srpski akademski centar, Novi Sad, 2013.
- ¹³³ Milošević, D., Petrov, T., Teledijagnostika u službi pouzdanosti parnih turbogeneratorsa, Tehnička dijagnostika, Beograd, 2013., (2), 45-51.
- ¹³⁴ Milošević, D., Adamović, Ž., Teledijagnostika i pouzdanost mašina, časopis „Menadžment znanja“, Smederevo, 2011., (1-2), 23-31.
- ¹³⁵ Savanović, N., Alaković, J., Milošević, D., Onlajn praćenje vibracija i opterećenje na rotornim bagerima, Tehnička dijagnostika, Banja luka, 2011., (1-2).
- ¹³⁶ Josimović, Lj., Petrov T, Savić, N., Milošević, D., Analiza vibracija turbogeneratorsa, XXXVI konferencija „Majski skup održavalaca Srbije“, „Merenje performansi indikatora održavanja tehničkih sistema u kompanijama“, Vrnjačka Banja, 2013.
- ¹³⁷ Milošević, D., Adamović, Ž., Stanojević, M., Teledijagnostika i pouzdanost tehničkih sistema, Tehnička dijagnostika, Banja Luka, 2011., (3-4).
- ¹³⁸ Milošević, D., Veljković, D., Paunjorić, P., Daljinska dijagnostika i upravljanje u energetskim objektima zasnovani na primeni SCADA sistema, XXXVII konferencija „Majski skup održavalaca Srbije“, „Nova koncepcija održavanja: vibrodijagnostičko održavanje tehničkih sistema u kompanijama“, Vrnjačka Banja, 2014.
- ¹³⁹ Milošević, D., Veljković, D., Josimović, Lj., Savić, N., Teledijagnostika i pouzdanost turbogeneratorsa, Tehnička dijagnostika, Banja Luka, 2012., (1-2).
- ¹⁴⁰ Adamović, Ž., Lambić, M., "Hidropneumatske mašine", Društvo za tehničku dijagnostiku Srbije, Beograd, 2000.
- ¹⁴¹ Adamović, Ž., "Hidraulika i pneumatika", Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin", Zrenjanin 2002.
- ¹⁴² Adamović, Ž., "Pouzdanost mašina", Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin", Zrenjanin, 2006.
- ¹⁴³ Adamović, Ž., Milošević, Ž., Milišić, P., Vidović, S., Blaženović R., Radić, R., "Uvod u totalno održavanje", Društvo za tehničku dijagnostiku, Banja Luka – Beograd, 2005.
- ¹⁴⁴ Adamović, Ž., Voskresenski, V., Tul, R., "Održavanje na bazi rizika", Tehdis, Beograd, 2007.
- ¹⁴⁵ Adamović, Ž., Nadrljanski, Đ., Tomašević, M., "Metodologija naučno-istraživačkog rada i statističke metode u istraživanju", Pedagoški fakultet u Somboru, Sombor, 2007.
- ¹⁴⁶ Adamović, Ž., Malić, M., Malić, D., "Računar u funkciji upravljanja procesima održavanja", Tehdis, Beograd, 2005.
- ¹⁴⁷ Adamović, Ž., Ristić, S., Radovanović, D., "Kompjuterski integrisano održavanje", Društvo za tehničku dijagnostiku Srbije, Beograd, 2005.
- ¹⁴⁸ "Zakoni raspodela u Teoriji Pouzdanosti", <http://www.iis.ns.ac.yu/srpski/pouzdanost/>
- ¹⁴⁹ Ramović, R., "Pouzdanost sistema (elektronskih, telekomunikacionih i informacionih)", Katedra za Mikroelektroniku i tehničku fiziku, ETF, Beograd 2005.
- ¹⁵⁰ Zuo, M. J., "Optimal Reliability Modeling: Principles and Applications", John Wiley and Sons, 2003.
- ¹⁵¹ Turner, S., Understanding Reliability Assurance Method in Mature Operations, www.ReliabilityAssurance.com
- ¹⁵² Turner, S., "PM Optimisation (Maintenance Analysis of the Future)", www.pmoptimisation.com
- ¹⁵³ Kennedy, R., "Examining the Process of RCM and TPM", Plant maintenance Resource Centre, 2002.

- ¹⁵⁴ Willis, R., "Survey Of Support Software For Reliability Engineering", Washington Chapter, Society of Reliability Engineers, 2006.
- ¹⁵⁵ Jarrell, G., "Supplier Reliability Program Guide", The Cessna Aircraft Company, 2003.
- ¹⁵⁶ John, B., "Higher Engineering Mathematics", Elsevier, 2006.
- ¹⁵⁷ Bertolini, D., "Maximum CMMS", www.reliabilityweb.com
- ¹⁵⁸ Cheng, D., "Integrated System Model Reliability Evaluation and Prediction for Electrical Power Systems: Graph Trace Analysis Based Solutions", Dissertation submitted to the Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of DOCTOR OF PHILOSOPHY in Electrical Engineering, Blacksburg, Virginia, 2009.
- ¹⁵⁹ Speaks, S., "Reliability and MTBF Overview", Vicor Reliability Engineering, www.vicr.com/documents/quality/Rel_MTBF.pdf
- ¹⁶⁰ "Reliability Engineering Reports And Services", Copyright © 2002 by Probabilistic Software, www.e-reliability.com/PSI/PSIBrochure.pdf
- ¹⁶¹ Bertling, L., Eriksson, R., Allan, R., "Impact Of Maintenance Strategy On Cost And Reliability Of Distribution Systems", 17th International Conference on Electricity Distribution, Barcelona, 2003.
- ¹⁶² Thomas, G., "Weibull Parameter Estimation Using Genetic Algorithms And A Heuristic Approach To Cut-Set Analysis", Thesis Presented to The Faculty of the Russ College of Engineering and Technology, 1995.
- ¹⁶³ "National Aeronautics And Space Administration Reliability Centered Maintenance", www.barringer1.com/mil_files/NASA-RCM.pdf
- ¹⁶⁴ Benšić, M., Jankov, D., "Parameter estimation for a three-parameter Weibull distribution - a comparative study", Department of Mathematics, University of Osijek, 2008.
- ¹⁶⁵ Sultan, A., "A Data Driven Parameter Estimation For The Threeparameter Weibull Population From Censored Samples", Mathematical and Computational Applications, 2008., 13(2), 129-136.
- ¹⁶⁶ Hsyland, A., Rausand, M., "System Reliability Theory (Models, Statistical Methods, and Applications) ", A John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2004.
- ¹⁶⁷ Tomas, V., Šegulja, I., Čišić, D., "Mogućnosti I Problemi Primjene Suvremenih Strategija Održavanja U Pomorstvu", Pomorstvo, 2005., 19., 29-41.
- ¹⁶⁸ "Reliability Assurance Programme Guidebook For Advanced Light Water Reactors", International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, 2001.
- ¹⁶⁹ Evans, W., J., Evans, Y., J., Ghaffarian, R., Mawer, A., Lee, K., Shin, C., "Monte Carlo Simulation of BGA Failure Distributions for Virtual Qualification", nepp.nasa.gov/docuploads/15E43FD7.../JEVAN-ASME-Hawaii991.pdf
- ¹⁷⁰ "Reliability-Centered Maintenance (Rcm) For Command, Control, Communications, Computer, Intelligence, Surveillance, And Reconnaissance Facilities", Tm 5-698-2 Technical Manual, Headquarters, Department Of The Army, 2006.
- ¹⁷¹ Svetlitsky, V., A., "Statistical Dynamics And Reliability Theory For Mechanical Structures", Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2003.
- ¹⁷² Рябинин, И., А., "Надежность и безопасность структурно-сложных систем", Политехника, Санкт-Петербург, 2000.
- ¹⁷³ Левин, В., И., "Логическая теория надежности сложных систем", Энергоатомиздат, Москва, 1985.
- ¹⁷⁴ <http://www.weibull.com/knowledge/milhdbk.htm>
- ¹⁷⁵ www.isograph-software.com

- ¹⁷⁶ http://en.wikipedia.org/wiki/Waterfall_model
- ¹⁷⁷ http://en.wikipedia.org/wiki/Object-oriented_design
- ¹⁷⁸ <http://en.wikipedia.org>
- ¹⁷⁹ <http://laris.fesb.hr/java/inheritance.htm>
- ¹⁸⁰ <http://www.reliabilityweb.com/>
- ¹⁸¹ <http://www.weibull.com/>
- ¹⁸² www.reliasoft.com
- ¹⁸³ Janković, Z., Milošević, D., i dr., Lobiranje, časopis „Menadžment znanja“, Smederevo, 2009., (3-4), 29-31.
- ¹⁸⁴ Cvejić, R., Milošević, D., i dr., Informatika i menadžment u preduzeću, časopis „Menadžment znanja“, Smederevo, 2009., (3-4), 61-66.
- ¹⁸⁵ Milošević, D., Josimović, Lj., Savić, N., Industrijska primena termovizije, časopis „Održavanje mašina“, Smederevo, 2010., (1-2), 71-75.
- ¹⁸⁶ Vesić, Ž., Marković, N., Milošević, D., Praktičan primer analize dinamičkog ponašanja, Zbornik radova, XXIX Majski skup održavalaca Srbije, Vrnjačka Banja, 2006.
- ¹⁸⁷ Milošević, D., Josimović, Lj., Veljković, D., Primena termovizije u industriji, Zbornik radova, Naučno-stručni skup „Razvoj, korišćenje i održavanje hidrauličnih i pneumatskih komponenti i sistema“, Vršac, 2007.
- ¹⁸⁸ Savić, V., Josimović, Lj., Milošević, D., Benčmarking – mudrost opstanka, Zbornik radova, Naučno-stručni skup „Razvoj, korišćenje i održavanje hidrauličnih i pneumatskih komponenti i sistema“, Vršac 2007.
- ¹⁸⁹ Josimović, Lj., Nestorović, G., Milošević, D., Uređaji za dijagnostiku kotrljajnih ležajeva, Zbornik radova, XXXI skup održavalaca Srbije, „Proaktivno održavanje mašina“, Vrnjačka Banja, 2008.
- ¹⁹⁰ Nestorović, G., Josimović, Lj., Milošević, D., Modeli pouzdanosti softvera, Zbornik radova, XXXI skup održavalaca Srbije, „Proaktivno održavanje mašina“, Vrnjačka Banja, 2008.
- ¹⁹¹ Avramović, D., Veljković, D., Milošević, D., Održavanje zupčastih parova menjača automobila, Zbornik radova, XXXI skup održavalaca Srbije, „Proaktivno održavanje mašina“, Vrnjačka Banja, 2008.
- ¹⁹² Josimović, Lj., Nestorović, G., Milošević, D., Pouzdanost softvera, Zbornik radova, XXXI skup održavalaca Srbije, „Proaktivno održavanje mašina“, Vrnjačka Banja, 2008.
- ¹⁹³ Nestorović, G., Savić, N., Milošević, D., Model proračuna mašinskih elemenata u MS Excel-u, Zbornik radova, XXXI skup održavalaca Srbije, „Proaktivno održavanje mašina“, Vrnjačka Banja, 2008.
- ¹⁹⁴ Milošević, D., Josimović, Lj., Veljković, D., Softver za praćenje i predviđanje pouzdanosti tehničkih sistema, Zbornik radova, X simpozijum hidrauličara i ekologa Srbije, Vršac, 2008.
- ¹⁹⁵ Veljković, D., Avramović, D., Milošević, D., Buka u saobraćaju kao specifični oblik zagađenja okoline, Zbornik radova, X simpozijum hidrauličara i ekologa Srbije, Vršac, 2008.
- ¹⁹⁶ Milošević, D., Josimović, Lj., Paunjorić, P., Softver za generisanje dokumenata o identifikaciji i sledljivosti proizvoda za potrebe sistema kvaliteta, Zbornik radova, XXXII skup održavalaca Srbije, Vrnjačka Banja, 2009.
- ¹⁹⁷ Milošević, D., Primena termovizije u industriji, Zbornik radova, XII Novembarski naučno-stručni simpozijum, Banja Vrujci, 2009.

- ¹⁹⁸ Josimović, Lj., Savić, N., Milošević, D., Analiza vibracija cilindričnog omotača i ravnih ploča ojačanih pljosnatim trakama, Zbornik radova, XII Novembarški naučno-stručni simpozijum, Banja Vrujci, 2009.
- ¹⁹⁹ Savić, N., Nestorović, G., Milošević, D., Elementi razvoja i reinženjeringa parnog kotla tipa SULZER, Zbornik radova, XII Novembarški naučno-stručni simpozijum, Banja Vrujci, 2009.
- ²⁰⁰ Josimović, Lj., Savić, N., Milošević, D., Formulisanje graničnih zadataka viskoznosti tečnosti, Zbornik radova, XII Novembarški naučno-stručni simpozijum, Banja Vrujci, 2009.
- ²⁰¹ Josimović, Lj., Savić, N., Milošević, D., Ojačani cilindar, Zbornik radova, XII Novembarški naučno-stručni simpozijum, Banja Vrujci, 2009.
- ²⁰² Josimović, Lj., Savić, N., Milošević, D., Janković, Z., Opšte jednačine preturbacionog kretanja, Zbornik radova, XII Novembarški naučno-stručni simpozijum, Banja Vrujci, 2009.
- ²⁰³ Milošević, D., Josimović, Lj., Savić, N., Pregled R&M softverskih alata, Zbornik radova, XII Novembarški naučno-stručni simpozijum, Banja Vrujci, 2009.
- ²⁰⁴ Savić, N., Nestorović, G., Milošević, D., Prognoziranje pouzdanosti tehničkog sistema, Zbornik radova, XII Novembarški naučno-stručni simpozijum, Banja Vrujci, 2009.
- ²⁰⁵ Josimović, Lj., Savić, N., Milošević, D., Vibracije elemenata sa šupljinama koje sadrže tečnost, Zbornik radova, XII Novembarški naučno-stručni simpozijum Banja, Vrujci, 2009.
- ²⁰⁶ Ilić, D., Milošević, D., Determinante novog proizvoda u savremenom okruženju, Zbornik radova, XII Novembarški naučno-stručni simpozijum, Banja Vrujci, 2009.
- ²⁰⁷ Veljković, D., Milošević, D., Avramović, D., Model informacionog sistema za upravljanje održavanja vozničkih parkova, Zbornik radova, XXXIII majski skup održavalaca sredstava za rad Srbije, Vrnjačka Banja, 2010.
- ²⁰⁸ Milošević, D., Josimović, Lj., Savić, N., Modeli razvoja softvera od strane malih timova, Zbornik radova, XXXIII majski skup održavalaca sredstava za rad Srbije, Vrnjačka Banja, 2010.

PRILOZI**PRILOG 1 - VREMENA OTKAZA VALJAKA TRAČNOG
TRANSPORTERA BTO 5 PO VRSTAMA**

Vremena otkaza novih valjaka proizvođača PRIM (u satima operativnog vremena)

37644	37644	39380	37982	38048	35747	38322	38001	37654	35003	38617	39818	37992	35944	35621
39833	39833	37113	38748	37165	38578	39662	36240	37207	39614	37139	39321	37892	39302	36047
35140	35140	39748	39589	36240	35875	35433	36198	37173	37517	37011	38232	35319	38097	36380
37589	37589	36460	38459	39578	35191	37830	35285	37841	37814	36548	35246	38781	37748	39457
36931	36931	36584	35525	39351	38776	35102	39120	35094	38017	35196	39892	39969	36682	35738
37376	37376	38845	38502	37555	37237	35122	37033	36368	38737	39714	35258	35971	37855	35690
39683	39683	36970	39883	35778	35573	36599	38288	35041	39156	35660	37879	35096	38703	37543
39279	39279	39149	38776	37650	36774	38124	39836	36520	37140	35454	36824	36818	39537	38023
38214	38214	39581	38985	35946	35201	38910	38960	37830	38562	39635	36174	38581	37907	36485
36410	36410	36441	35558	39519	39426	38783	35804	35622	36046	39611	38344	39538	35627	36510
36638	36638	38781	36736	35255	35225	35309	35071	36539	38301	35380	37464	36174	39194	35426
35858	35858	39839	35481	39196	35014	35718	38987	35178	38281	38069	38631	36503	37727	36319
36396	36396	36617	38684	36451	39584	39402	39726	36897	36655	39321	36448	37071	38045	37381
39487	39487	38437	39018	39452	37751	38201	39269	38042	39660	35169	35482	38077	36461	38646
35592	35592	38186	37503	37833	35620	39318	38202	35198	37559	39778	35303	39356	36137	37661
36271	36271	38727	35545	35225	37246	39782	37100	35905	35155	35959	39152	38791	35101	39758
38812	38812	37761	39363	39480	37364	37575	39441	35462	36998	36832	37079	38783	36613	36410
38385	38385	35887	39232	37207	35072	39556	35429	36588	37291	36675	37348	36022	38225	37290
39026	39026	35554	38586	36448	35508	35777	38650	39789	38246	39413	38907	38050	38455	37160
37414	37414	38158	39175	35721	38327	38484	37287							

Vremena otkaza novih valjaka proizvođača PRIM (u satima operativnog vremena)

32789	25542	32274	25606	32410	32521	26662	25120	30189	34685	33266	30914	27027	32109	27919
28519	28928	33984	30238	27835	32321	31144	30507	34207	33632	33514	27650	31404	29834	32290
34395	28516	29417	33220	27001	30334	27955	28152	32046	27366	26753	27849	27845	27531	28977
26079	33955	25101	31728	30056	29026	25717	31103	27766	32980	26607	29415	31775	29886	30895
29385	28157	25599	28008	25561	34092	34601	27481	29039	32104	34529	31759	32162	29463	25823
30873	32063	27146	25416	30510	25853	30926	28052	34596	26957	30899	25153	25648	25763	27686
31102	33815	26642	31310	30538	33891	26854	33643	30564	27859	27582	25421	25305	28410	33438
26888	28770	30090	33317	29796	28864	31480	30062	34114	26326	26908	29282	26636	31910	25312
34209	27873	27983	26025	32171	28377	32965	33785	28711	34559	25097	29303	31163	28977	33128
29396	30712	33868	34857	30986	34735	29351	34857	33755	29485	25783	27364	25176	25968	30885
30180	28838	31939	31302	33024	26019	26354	27006	27506	33270	33801	27422	30529	28757	30337
31024	25748	31624	29896	33490	33882	33314	26853	30885	33040	28546	29784	25270	25329	29738
34701	34924	32591	33993	32753	27017	32073	34477	32898	31609	33972	28809	29797	25204	31672
25283	26451	25188	27126	31620	31659	33458	25407	33887	33959	28756	28494	30680	31252	30474
29505	31330	31372	29061	33763	31808	25361	28825	31714	30490	30025	29204	25754	34264	34332
26037	33180	33081	34064	32241	28425	34169	30678	30956	32638	33650	25621	32045	32621	27930
31905	30503	34989	33247	28145	34713	34115	34535	28316	31245	31559	28423	34465	33653	27402

28599	33775	30683	34821	33463	25846	31928	28760	32599	27019	31330	33986	32660	29554	33434
30479	27965	34101	34384	33276	34997	28016	28462	30857	32065	30739	27418	32842	33851	32425
34339	32537	31730	34326	32899	29321	28552	31572	30080	27982	28730	26054	25041	26721	30385
25085	31144	25813	27565	32072	31944	33678	30095	31471	26430	29154	25341	33456	25954	27259
29711	33099	34420	25297	32011	32010	25752	25383	28448	34795	28017	34084	29181	26643	26403
28038	29728	30407	25988	34499	34601	27634	32041	31648	26005	29211	31591	28462	26855	34274
27687	29789	29747	32849	26861	34077	31332	33639	31494	29985	29878	25710	27029	30298	25076
27445	31050	31932	26899	34924	26112	32001	28051	31596	27295	31377	31222	25486	26091	29581
34230	31306	33608	29069	27707	31047	31265	33397	31364	27574	29910	31401	25221	27241	34409
33039	25315	32482	30684	26775	28283	32488	26735	25285	31731	28019	29721	29007	33232	25442
30858	25668	30854	32949	28100	31737	32190	25539	25702	27373	25454	31287	32079	32639	26456
26832	31476	34831	34511	29740	29395	25410	25086	30849	34296	27707	26424	26920	33290	33607
30775	28251	33108	30211	32399	30168	34920	33619	28584	29503	29520	27365	30465	32029	33439
29415	27198	32451	26900	27658	25816	31360	33723	28494	33765	33175	31537	34064	26080	33748
32314	33711	26884	31045	26533	33505	34036	27908	28125	30043	25676	25763	25904	29870	30803
27357	29114	28442	30402	33719	29847	26130	33971	31206	32357	31951	28382	28444	32271	30123
31312	31183	25754	34066	34631	25804	29971	30624	32903	31793	31347	31695	28840	31346	30243
26023	25628	33544	34980	25738	33546	27238	27007	26656	30469	33055	27763	25024	33238	30027
31391	25469	33707	33000	31460	33254	27412	32763	31548	34836	32039	25820	32445	25610	31470
27137	25378	27200	33720	25643	26004	30636	30823	25811	34566	32955	34215	31012	29499	31937
29308	27572	26884	28394	29588	28191	33226	28055	30697	27905	27454	29558	28867	26352	27546
28944	25475	25665	27292	29404	32730	29325	30594	33994	29142	27131	29842	32122	29197	26114
33052	30702	27674	34933	26052	28782	27104	33527	29902	28789	27941	25442	26869	32061	31901
34368	30291	26163	25085	34793	31498	29600	31077	26530	28342	30560	29688	31343	25522	26534
26286	33454	25971	28805	31753	30033	26974	28399	26389	29763	27614	28527	28456	26018	27696
34449	31913	28818	27369	33085	30580	28856	33977	26598	31171	25986	26607	31183	34629	31099
27528	34922	28480	29830	33376	26740	27012	26115	31919	28534	34401	33964	25518	30539	34031
25177	28482	29432	30519	25433	25443	26469	28466	26750	29487	30870	25749	29186	31033	32774
28246	32378	26909	33742	34763	34361	31389	33542	30780	30133	26637	33219	34315	33681	28752
34953	32929	33766	31475	34635	34842	29840	26014	34982	25006	29941	25249	25758	27047	27089
32692	29438	29242	28823	34275	33828	25943	27594	32108	28426	33369	25175	26211	25167	31017
30400	31542	25471	32844	25001	29336	33099	30993	32493	27020	25799	27575	28566	30486	32956
26620	26240	30087	27979	26443	28931	31299	32264	28123	33632	25398	26920	34147	27203	33236
25677	32087	31889	28803	32703	31332	32430	33124	30443	27978	26640	30613	34287	32705	32968
25482	26681	33367	29469	25605	28263	30390	32845	32646	25005	33608	29332	34357	32107	33248
29592	34490	25686	29803	25822	32076	26748	28282	32192	32012	32509	34264	27584	31054	28970
27591	28075	28195	34022	28435	34369	34176	33779	29196	30960	31719	31419	29820	25200	26145
25789	33444	25929	33642	30031	29476	28255	25118	30028	34046	29154	33971	31715	33088	28103
25853	29355	34840	31144	32329	28335	28903	29929	30575	29407	27572	28751	30713	25903	33967
26026	26963	27311	28845	29531	32757	30366	32293	31237	31212	28376	30942	34477	30567	26836
28308	32383	26316	29639	30474	32349	33492	32046	34502	30096	25526	25913	34231	25883	33354
30074	26618	33460	32931	31412	28864	26528	30051	32150	29011	25078	29497	34915	30899	30040
30184	32163	26203	34771	30042	30127	33516	27024	25234	31735	28752	26754	28417	34247	29320
28525	34798	28185	27129	33096	29279	33010	29995	30674	25142	30418	27097	33588	32050	33236
25593	30429	27145	31686	31037	26681	33174	28087	29850	30909	29015	33346	33111	32015	30898
33502	34189	26544	25458	31491	33888	30640	34493	28669	27010	33582	33242	26157	28994	31806
25883	25846	30630	28903	28817	29766	26415	26388	27449	29645	32721	29674	33307	25631	31578
28696	29191	31224	31217	27419	26912	30996	32059	26219	28300	27387	27335	29648	28315	25674
29409	32959	26669	32104	30578	32881	29831	33207	30110	27098	30840	27631	33898	29648	30886
28338	28238	33155	25749	31192	33931	27691	27457	32939	30571	32096	27560	34865	28288	32279
27130	25027	27638	33951	25631	32510	26284	30140	34289	26137	31257	34129	28456	34523	26835

31237	27480	33797	31472	32018	27713	32950	32479	30094	31388	28827	34980	25019	29467	29009
26675	32912	28846	26531	27565	26636	33105	26947	31455	28874	26268	33836	26520	25119	25127
31695	27574	27039	34024	34183	30174	28483	30713	30188	28211	25472	25105	33281	30971	27939
31177	32832	34510	28947	31169	25507	28138	34194	26713	33531	30979	31982	29000	34413	30060
33173	27589	26069	33687	32214	28603	25416	34292	25650	31443	32061	28208	30211	32319	29371
26275	33298	28234	26108	34978	32273	34711	29249	29797	25496	27897	28879	28948	28713	29601
25129	34480	30823	30482	32207	30030	30111	34679	30674	31517	29472	25737	27705	27253	33676
33971	32061	28048	29643	25439	29371	34313	34811	29547	31990	33842	26237	27904	34953	27951
26058	31449	28057	34168	29145	27939	25311	25992	32723	27491	27353	29056	28254	28830	26240
29444	34877	30935	31989	31977	31662	32878	32461	30117	34266	25735	27983	34375	30543	33154
33648	27490	30557	29302	32703	29899	32002	31953	33263	30908	27712	33457	26456	30481	27869
32578	34508	26026	34613	31802	27442	26325	26323	25409	32056	27931	28725	25707	32599	34813
29071	25823	27904	34424	27439	32249	27226	25832	29786	34786	26020	26712	34838	31389	30808
28586	32213	25754	26323	34175	30379	31151	34947	33534	25399	29787	30018	32213	33067	27705
31512	30946	25591	25721	25390	26581	29660	33877	27018	31774	26127	32778	28101	34026	32912
32229	32113	34059	33838	29954	31621	25418	30998	25015	30463	30693	33456	27269	30873	34665
32450	34683	28339	32098	26752	27502	32524	33311	27467	28553	31836	34079	33208	34250	28260
29819	26886	33313	30289	34955	32577	26131	25088	27794	28143	29474	34272	25206	29668	31371
30888	28988	31387	27118	29525	25840	27692	30683	25021	26686	34716	25897	32483	31295	32903
27031	30312	31485	28688	32842	34390	33298	29647	25722	31765	31139	28217	26877	29542	31386
30419	31885	30897	25419	27334	32024	30571	28383	25026	33085	31480	31043	27976	28276	34773
29311	25664	31337	34789	31761	26342	28434	34340	27146	27940	33228	31825	28333	30522	26760
25006	31372	29340	31225	32363	28519	31172	26479	27020	30387	30214	32379	25425	29532	33574
26616	31678	29314	32124	34372	31065	32891	31105	31848	31590	30407	28280	33791	25807	29497
26880	30627	30431	29642	28415	33730	31597	34188	26101	31147	31861	34695	29773	30627	33074
31253	34669	33673	25605	33305	29820	29627	26436	28520	27548					

Vremena otkaza novih valjaka proizvođača PRECISMECA (u satima operativnog vremena)

45045	46242	48658	48403	47857	47071	46104	46454	46060	48180	47472	47712	48857	46422	46138
46819	46379	48341	45875	48348	45142	47218	46729	45775	46492	48203	46149	45491	48425	48788
49304	45715	45648	46024	47415	49770	47492	46831	49897	49317	45389	45903	49158	45688	48376
45779	46463	45457	49184	46477	46778	47963	45993	45543	45834	46228	47175	45896	49243	47931
49731	46276	47183	47623	45197	46271	46549	46570	45427	48476	47760	46283	48100	48558	48485
45184	46787	49998	45691	46291	48355	49347	45775	49541	45402	45019	49670	48228	46092	45903
49731	47821	48106	48121	48502	48888	45608	45487	48138	46107	46765	48121	47358	47069	46005
46800	46169	46266	47156	49040	45977	46955	49107	47233	45067	46132				

Vremena otkaza repariranih valjaka proizvođača PRECISMECA (u satima operativnog vremena)

40083	37561	37857	38048	42393	43060	43276	38037	43422	35168	43599	42615	36594	37589	44520
39504	44599	40309	43389	44962	40596	36267	37962	37296	42888	37010	37212	42512	41840	41440
44129	36397	35613	44497	36508	41872	42085	43684	35613	43269	43668	36406	35163	41893	44489
43739	35470	39055	41431	43289	38218	41396	40496	36165	42603	44264	37126	39796	38917	40270
35133	35061	40294	43454	36090	40680	36655	38811	40643	40825	41954	44381	41785	42206	43069
40899	39731	44151	39297	39563	43583	37142	43227	41738	39382	44490	36883	41719	44264	37282
39852	43623	38871	38035	40960	44164	36755	37093	36950	39780	42904	37495	42245	40291	38693
36043	44518	39914	38714	37665	41200	35088	43807	37110	37252	38123	39207	38267	43809	38664
37218	39097	37117	36447	39971	41740	42366	36502	41342	38854	36657	36744	39774	39520	36107
43777	42420	42417	37328	40166	39397	35509	39177	44325	41978	37699	36963	37067	42212	43492
39937	35641	43004	43400	41448	37404	39617	39949	43439	40796	35475	40356	36171	44286	35877
44107	36764	41969	36089	40544	43207	35267	39075	41178	43970	40250	38235	37740	38700	41675
41814	36779	40843	39085	39099	35665	37034	38976	38773	41440	35094	42937	40659	43658	44240
43059	35849	44875	44762	40999	37727	36648	39344	44650	37417	35771	39362	42741	35464	39654
40374	43032	37473	37723	41222	42492	40147	37345	39224	42049	44565	41212	43206	41162	40023
36659	39219	36244	42134	38509	43529	42539	38268	40619	41676	42131	44782	35549	41422	43498
43574	36704	41281	40216	42944	40206	41154	38752	44782	40043	40542	37052	44441	40951	36882
40120	38090	35942	44827	43659	42156	44578	37757	39260	37199	40729	40129	38704	44242	39273
38035	36384	43866	44626	39568	42859	44442	37613	35492	38827	43144	43450	37608	36730	35131
36774	44129	35846	37521	38022	37894	39172	44119	42559	41369	44233	41467	40358	39733	43909
43853	41803	37814	41899	36747	36976	39692	40009	41254	42917	42555	43394	40991	38429	41853
39535	37411	35285	40497	42419	40826	37546	38384	43436	40069	35747	43313	36321	43343	42465
40121	39144	39695	41598	37711	43243	40534	41271	41402	38460	43446	43760	35023	44252	35573
39435	41761	42097	39854	38914	39165	39281	42498	35377	44534	40269	38130	38332	44760	39004
35478	42917	37272	40434	44366	41465	35794	35455	37096	41294	35946	40081	38458	39555	38105
35043	37145	39225	41340	37852	35799	44826	42355	41451	36257	44969	36034	42523	44237	39652
44136	35855	44606	36346	39574	37200	35149	36338	35272	36567	44397	41155	43384	38097	35954
44686	36214	38222	41113	42575	39643	35817	35375	38206	37209	42753	41926	43446	44030	40862
42579	42699	36981	35759	35867	44224	37255	39364	39235	43294	36016	36963	38143	35150	43975
38307	42158	36023	42061	39194	38502	38165	38778	38289	44523	38279	38077	35337	44900	44950
39842	35120	42957	38990	42602	35321	42915	39670	37952	42283	39935	38797	39610	41242	44152
39818	36901	35724	40131	39426	42692	37602	40327	37646	40848	40187	41824	43570	37345	39224
41214	42538	39776	35600	44247	44283	36326	39921	35407	41482	41027	37791	41954	42873	37437
42785	36833	43083	37077	41840	44030	41959	40149	38118	39283	37668	43919	35670	38901	42654
43215	38136	39187	39611	36759	37933	39072	42734	42484	38673	35980	43339	38910	36196	40733
35555	43108	44490	41155	39683	43437	35210	38219	38038	44166	37752	40262	43362	40006	38843
40346	44944	44719	36481	35156	44079	42647	38976	35315	39238	38302	37377	40391	42685	36263
38000	41798	44503	39328	41886	37296	43030	38363	37552	36236	38213	38598	36798	40191	36766
39809	44516	42204	38618	40374	39301	35604	35319	41059	39725	35410	38810	38459	43367	40873
41484	35807	43712	35230	35379	35414	42818	36665	43704	35361	37573	43906	43483	44995	44751
35652	40185	42681	37042	38392	41345	39232	35248	40826	43242	39204	39229	38321	43133	40804
40673	35525	42781	35665	40970	36781	43205	40294	36066	41992	44192	35721	37308	42130	42918
41097	37893	38826	36864	40166	43393	37747	44705	35055	37674	38950	38831	36641	43376	41971
37176	41215	40279	42793	36844	40524	43164	42531	35950	42653	37984	35280	43291	42146	41387
41041	35601	41643	35321	35321	42400	41315	38574	35695	39054	42489	37692	41344	37953	42054
39641														

**PRILOG 2 - VREMENA OTKAZA ZA PODSISTEME ROTORNOG
BAGERA SRs 1200x24/4x0 (400kW) + VR**

Vremena podsistema MKM (u satima operativnog vremena)

10	120	235	15	15	0	45	565	315	1230
1160	1460	0	935	10	70	3225	1220	210	1150
400	875	1295	0	1930	1000	765	1220	2485	220
755	1215	1530	515	375	120	1535	110	310	3585
650	220	155	135	910	20	120	75	55	60
265	80	160	1085	1465	2720	3400	0	405	465
835	1110	85	215	15	10	10	10	10	135
2925	3080	1220	225	1385	265	0	0	2445	795
135	1640	3175	300	375	2620	0	850	1780	1670
5960	5	1105	200	3115	2895	2865	90	5480	430
5830	1085	70	1315	4290	230	1360	5080	2310	2540
3180	725	1570	3410	1285	455	1885	1745	155	0
270	1210	105	0	75	390	550	20	300	440
125	50	4720	990	0	2570	1010	515	205	350
315	550	275	625	1110	3285	840	640	925	1005
855	240	1335	285	0	5055	255	15	380	4780
4125	1930	2885	695	3155	175				

Vremena otkaza podsistema MKK (u satima operativnog vremena)

6120	18525	11470	10000	6995	11355	515			
------	-------	-------	-------	------	-------	-----	--	--	--

Vremena otkaza podsistema MDS (u satima operativnog vremena)

52860	59380	6860	50330	91215	21000	37370			
-------	-------	------	-------	-------	-------	-------	--	--	--

Vremena otkaza podsistema MTB (u satima operativnog vremena)

2090	715	9885	9020	1315	1355	9040	1420	12325	5790
4680	6870	3005	2350	375	3775	230	6505	11620	1305
1435	3380	530	2105	12985	630	305	2025	9405	200
3190	3980	1650	9505	310	4990	1825	9210	6720	105
155	11600	2502	725	2980	2655	2665			

Vremena otkaza podsistema MTM (u satima operativnog vremena)

65	475	135	15	5	4465	3225	2350	815	155
6175	0	415	870	7750	955	2120	3070	4405	35
100	735	7890	1720	2225	25	4180	30	10	5595
10465	0	2940	1085	0	0	6465	14100	10060	3870
325	2215	1705	11300	20	6640	4745	6605	1480	6425
645	645	90	4180	1560	2220	2690	225	770	3465
2160	5435	665	30	2225	2015	890	8025	1840	2040
1525	180	215	50	40	5	5455	2375	9345	345
2735	145	1615	3445	1240	14120	1080	5835	2695	3450
2015	2080	5285	11640	10	15	15	30	5	635
150	355	1320	4910	8770	1580	40	1710	2010	6015
1605	3545	1130	1700	65	120	2355	1915		

Vremena otkaza podsistema NČK (u satima operativnog vremena)

54765	148520	685	96840						
-------	--------	-----	-------	--	--	--	--	--	--

**PRILOG 3 - MTTF AFEKTOVANIH KOMPONENTI U
ZAVISNOSTI OD BROJA MEĐUOTKAZA AFEKTUJUĆIH
KOMPONENTI**

BLOK B1

MTTF (u min. operativnog vremena) komponente 4 u zavisnosti od broja međuohtkaza
afektujućih komponenti (B1)

br. m-otk.	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0	17355	18105	23012	20800	27776	26009	25905	23588	25438
1	35390	34288	47971	33924	7272	135303	60616	48414	55732
2	54689	60874	52220	61746	71706	139407	41596	93722	44232
3	58403	114322	123412	140196				19782	
4	99549	19336		120027				93027	248894
5	71030	131139							
6	31328	101635		53101					
7				248894					
8	79044								
9			110256						
11	93027								
12				19782				53101	

MTTF (u min. operativnog vremena) komponente 5 u zavisnosti od broja međuohtkaza
afektujućih komponenti (B1)

br. m-otk.	4	6	7	8	9	10	11	12	13
0	10168	19922	30916	28217	41569	39296	39107	32538	38498
1	40676	56478	53424	61750	66450	153688	59856	74324	73091
2	39539	74107	87332	88075	17279	98857	121558	119930	63979
3	84263	35751	191023	70815				7337	
4	65569	240020	171443	66455				112657	
5	58216	21135	46419	132679					
6	110223	177052							
7	166638	112657							
8	99384								
10	482527								
11	308363	178393						54723	
12	92355								

MTTF (u min. operativnog vremena) komponente 6 u zavisnosti od broja međutokaza
afektujućih komponenti (B1)

br. m-otk.	4	5	7	8	9	10	11	12	13
0	16068	20303	32768	30631	49322	49007	49590	40724	46733
1	39900	57170	95465	59667	116189	85364	46580	84209	71579
2	60062	95471	105332	129525	53896		116837	103975	77368
3	61878	75309	173024	89044				36823	
4	63646	114663		173619					213554
5	150545	121935	143989	6491				11596	
6	71239	160414	49518	139937					
7	164331							66319	
8	154390	75681							
10	316554								
12	398070								

MTTF (u min. operativnog vremena) komponente 7 u zavisnosti od broja međutokaza
afektujućih komponenti (B1)

br. m-otk.	4	5	6	8	9	10	11	12	13
0	12220	21226	17358	25274	102996	97513	66873	45651	77837
1	41467	46779	76961	121801	80816		573821	158133	177327
2	85064	159028	163555	170850		312877	349047	605663	557146
3	66078	111382	181236	353940	551535	632015	312877		
4	119369	247148		312877			293322	591775	
5		271480	288445						
6	80816	303318	271480	293322					632015
7	632015	210190		898448					
8	260171	312877	632015						
9	325747							293322	
10	361541								
12	215844	632015	312877	551535					
13				632015					
14	271480								
16			551535						
19			293322						
24			898448						
26		724992							
28	551535								
30	293322								
53	898448								

MTTF (u min. operativnog vremena) komponente 8 u zavisnosti od broja međutokaza
afektujućih komponenti (B1)

br. m-otk.	4	5	6	7	9	10	11	12	13
0	12355	16225	16855	39959	66317	65427	55677	49986	56076
1	48940	53912	62810	140405	141615	119791	160148	139029	119909
2	46603	86866	118431	119370	102973		159766	101876	252679
3	119570	63411	177347	182096			209755	41348	51918
4	112821	221803	180081	224967				197420	
5	115976	302653	169891	122947				76366	
6	248317	297948	294223	294223					
7	180789	152355							
8	297948	85026	185746						
9		351890	117708						
11		100617	301172						
12		301172							
14	295213								
16	286465								
17		294223							
18	247036								
22	301172								

MTTF (u min. operativnog vremena) komponente 9 u zavisnosti od broja međutokaza
afektujućih komponenti (B1)

br. m-otk.	4	5	6	7	8	10	11	12	13
0	1207	1207	1207	41362	1207	41362	41362	1207	41362
1			81517					81517	
2	81517					1228720			
3		81517							1228720
4					81517				
9							1228720		
14					1228720				
16								1228720	
19				1228720					
35		1228720							
40			1228720						
62	1228720								

MTTF (u min. operativnog vremena) komponente 10 u zavisnosti od broja međutokaza
afektujućih komponenti (B1)

br. m-otk.	4	5	6	7	8	9	11	12	13
0	83101	83101		131337		131337	153534	223967	85022
1			83101		86942	582820		86942	223967
2		223967	155455				334881	83101	
3	223967	86942			83101				582820
4	86942							582820	
5					223967				
9			582820		582820				
10				582820					
13		582820							
17	582820								

MTTF (u min. operativnog vremena) komponente 11 u zavisnosti od broja međutokaza
afektujućih komponenti (B1)

br. m-otk.	4	5	6	7	8	9	10	12	13
0	6	62831	49804	75179	43378	175127	177380	147088	131873
1	30740	111006	30740	163338	159842	474509	319892	130560	266836
2	99602	59280	50691	611044	203845			236069	333678
3	165275	99602		464896	222342	611044	596113	474509	
4	50691		88882					346953	
5	318808								
6	596113	304831	222342						596113
7			596113	318808					
8			474509						
9			275984		474509				
10		474509	242042	474509					
11									
12	88882	596113			611044				
13	111006				596113				
16	333678								
17	375247		611044						
18		318808							
24		611044							
30	611044								

MTTF (u min. operativnog vremena) komponente 12 u zavisnosti od broja međutokaza
afektujućih komponenti (B1)

br. m-otk.	4	5	6	7	8	9	10	11	13
0	8548	14886	15821	25905	23805	130272	120140	97434	99140
1	27880	46745	38394	214294	73395	184093	158407	182699	77183
2	97867	145145	154246	432294	148410	50369	570092	431027	351690
3	116311	123380	105721	271758	192601				954501
4	95423	140248	209893	170327	271852				
5	570092	111348	375148						570092
6	164681		311605	512721	522333				
7		244169							
8	209406	512721			1069701				
9	113069								
10	403093	67862	624751	736397					
11	87797	635726			571366				
12	467556				16692				
15	512721								
17	267384								
19			572640						
20		572640							
23		954501							
28	1069701		954501						
29	572640								
52	954501								

MTTF (u min. operativnog vremena) komponente 13 u zavisnosti od broja međuočeka
afektujućih komponenti (B1)

br. m-otk.	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	32094	844	27619	65559	24421	135503	194940	70627	126829
1	61480	65680	69376	286300	210819	277295	129950	225704	117377
2	100990	203760			221816		326741	449721	178509
3	148915	185683	178543	199213		1321627			295632
4		67480			166855				25813
5		152954	25813		236805				
6		135058	280095		277295				
7								1321627	
8	277295	54472							
9		295632		449721					
11				1321627					61480
12									
13	449721				25813				
14		516906	449721						
16									1321627
18			516906						
19	280095								
22					1321627				
32	516906								
44			1321627						
46		1321627							
71	1321627								

BLOK B2

MTTF (u min. operativnog vremena) komponente 4 u zavisnosti od broja međuotkaza
afektujućih komponenti (B2)

br. m-otk.	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0	15496	18137	21302	20712	24522	24735	24740	23092	24325
1	34807	31397	36265	39622	81351	24757	31799	35532	35306
2	41542	46307	64656	62709	53882	61661	11083	39876	81351
3	52994	29688	60175	37470				64339	
4	48602	70894	61661	65656				37193	33015
5	71587	79639		26084					
6	66731	61661	69617						
7			65656						
8	53953								
9	88304								
10	81351								

MTTF (u min. operativnog vremena) komponente 5 u zavisnosti od broja međuotkaza
afektujućih komponenti (B2)

br. m-otk.	4	6	7	8	9	10	11	12	13
0	10338	14229	21942	23413	30143	29158	28789	25353	29204
1	29799	48996	46940	48501	23583	68579	49591	48453	49516
2	47245	52676	99198	68689	79231		131467	81910	54748
3	70411	106063		59587				80824	
4	74262	126467	121940					87149	83855
5	52063	107270	103886					238752	
6	153804	94393							
7	141838		205180	171805					
8		58750							
9	153769								
10	150268								
11	137391								
13	238752								

MTTF (u min. operativnog vremena) komponente 6 u zavisnosti od broja međutokaza
afektujućih komponenti (B2)

br. m-otk.	4	5	7	8	9	10	11	12	13
0	8823	16241	30297	27047	42785	40826	42839	34145	41599
1	34047	48182	66364	83204	76407	133779	55992	78406	59005
2	53895	67335	81089	129223	175700	100019	109955	123115	135322
3	87416	26601	223792	83875				89766	105853
4	68227	133966	218961					280718	
5	119765	129828	23692						
6	131930		99154					100019	
7	280718			92845					
8	127918	194553							
9		90258							
10	100019								
12		218961							
14	198268								
15		85841							
18		135322							

MTTF (u min. operativnog vremena) komponente 7 u zavisnosti od broja međutokaza
afektujućih komponenti (B2)

br. m-otk.	4	5	6	8	9	10	11	12	13
0	9284	14106	17382	35880	93033	79749	83659	66927	84391
1	43541	66782	61478	123467	86529	250075	158137	174041	186475
2	33659	156134	144988	172063	324464		332289	152080	159520
3	136426	68993	169333	311948			324464	137802	
4	186419	137802	144571	324464					269269
5	177005	210804	235953	264241					
6	170192	341184	269456	97707					
7	230738	92500							
8	111991	250479	123603	332289					
9	160355		327422						
10			405599					328377	
11	324464	154706							
12	154706	182123							
13	253437								
14		405599							
15	329298		252996						
16		136917							
19	336196	336196							
20	351987								
22	332289	252996							

MTTF (u min. operativnog vremena) komponente 8 u zavisnosti od broja međutokaza afektujućih komponenti (B2)

br. m-otk.	4	5	6	7	9	10	11	12	13
0	23829	20835	29039	45592	91507	85030	91380	62594	85241
1	43760	50838	67000	105685	283507	189810	115274	212145	173733
2	72504	75764	120279	170016	139557		171812	147972	151535
3	49913	117341	145181	281041				195524	59911
4	62670	84783	144267	205618				105357	
5		242995	126308						
6	55630	327579	175471	375533					
7	112622	177153	60104						
8	249696		171812	126308					
9	176401		173354						
10		58624	381371						
11	219465								
12	640919	205367	191268						
13	410236	172583	640919						
14	268145	352506							
15		462213							
25	321857								

MTTF (u min. operativnog vremena) komponente 9 u zavisnosti od broja međutokaza afektujućih komponenti (B2)

br. m-otk.	4	5	6	7	8	10	11	12	13
0	4714	4714	4714	4714	4714	4714	4714	4714	4714
1						368111			
2				368111			368111		368111
4					368111				
9								368111	
10	368111		368111						
24		368111							

MTTF (u min. operativnog vremena) komponente 10 u zavisnosti od broja međuočkaza
afektujućih komponenti (B2)

br. m-otk.	4	5	6	7	8	9	11	12	13
0	7976		7976			595196	7976	7976	225338
1		7976		7976	7976	533954	435915		
2				442700		442700	1341696		484935
3				533954	435915		488327	1341696	
4		442700			533954			435915	
5				435915					
6									1341696
8			442700						
10								533954	
11					442700				
12			533954						
13	533954							442700	
14				1341696					
19			435915		1341696				
20	435915								
22		435915							
26	442700								
34		533954							
43			1341696						
57		1341696							
68	1341696								

MTTF (u min. operativnog vremena) komponente 11 u zavisnosti od broja međuočkaza
afektujućih komponenti (B2)

br. m-otk.	4	5	6	7	8	9	10	12	13
0	50	37342	93609	106027	50	284144	177819	199521	102922
1		93609	50	398991	243397	321811	495745	411363	394239
2			74633	93609		243397	389486	93609	321811
3	84121			321811	271470			321811	
4					74633				
5			321811	389486					748092
6	321811				748092				
7		243397			389486				
8	243397		243397					243397	
9				748092					
12								389486	
13		389486							
15			389486						
17			748092						
23	748092		398991						
24	398991								
25		748092							
26	389486								
28		321811							
32		398991							

MTTF (u min. operativnog vremena) komponente 12 u zavisnosti od broja međuotkaza
afektujućih komponenti (B2)

br. m-otk.	4	5	6	7	8	9	10	11	13
0	10984	12042	20019	25899	31304	149208	94764	112032	108920
1	26667	57037	29947	144616	120454	23625	617401	108942	133466
2	64041	77959	85374	145073	121320	86612	48255	787787	
3	54989	19641	115963	84323	301889				162620
4	119183		179429						
5	224405	162620			432228				
6	113070	84323		539152					1396145
7	113842		432228						
8									
9		432228	261002	762440					
10	159530	539152							
11	539152				1026411				
12				1396145					
13		191968							
15			762440						
16		762440		1026411					
17	597334	179429	1026411						
19					1396145				
26		1026411							
39			1396145						
54	1026411								
58		1396145							
68	1396145								

MTTF (u min. operativnog vremena) komponente 13 u zavisnosti od broja međuohtkaza
afektujućih komponenti (B2)

br. m-otk.	4	5	7	8	9	10	11	12	13
0	15775	15775	35301	24854	26612	167599	117362	114386	134585
1			16063		105929	195795	432880	281073	225374
2	70247	70247		145899	96002	793729			195795
3	195795		52556	387223	412008		793729		
4	96002		195795	793729	414869				
5		96002		154051				793729	
6			359576	669964					
9	154051								
11			154051		359576				
12		154051							
14			669964						
15		277686			793729				
16			793729						
18	669964								
20		669964							
22									793729
24	359576								
25		793729	414869						
27	414869								
30		414869							
36	793729								

**PRILOG 4 - KVADRATNA REGRESIONA FUNKCIJA ZA MTTF
AFEKTOVANIH KOMPONENTI U ZAVISNOSTI OD BROJA
MEĐUOTKAZA AFEKTUJUĆIH KOMPONENTI ($y = ax^2 + bx + c$),
KOEFIČIJENT DETERMINACIJE (R^2) I BROJ STEPENI
SLOBODE ($n - 2$)**

(za svaku komponentu oba bloka elektrane)

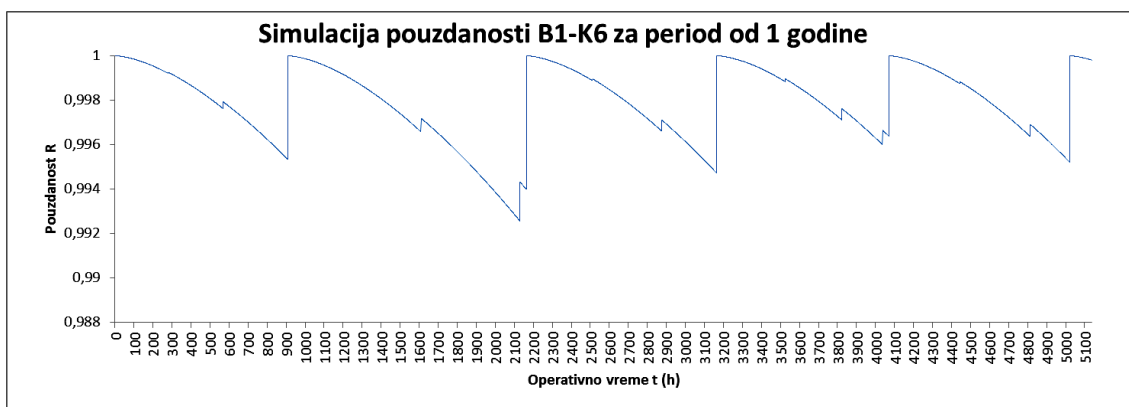
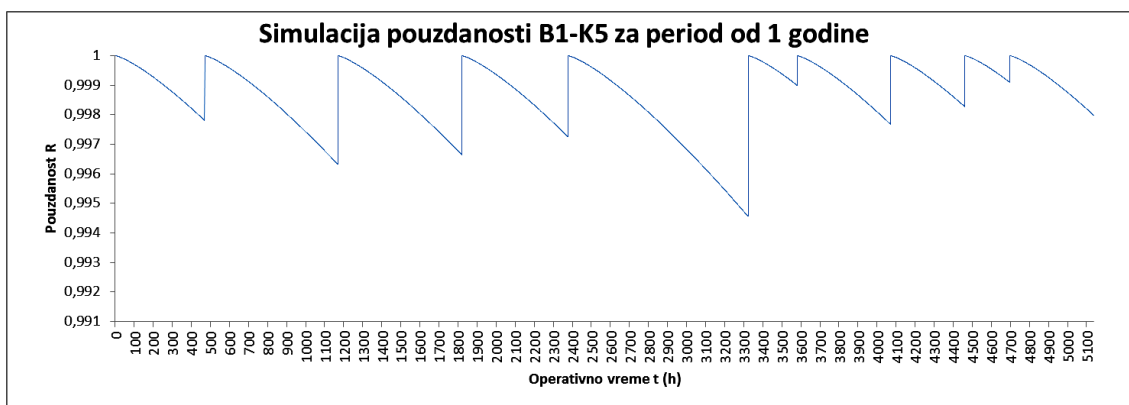
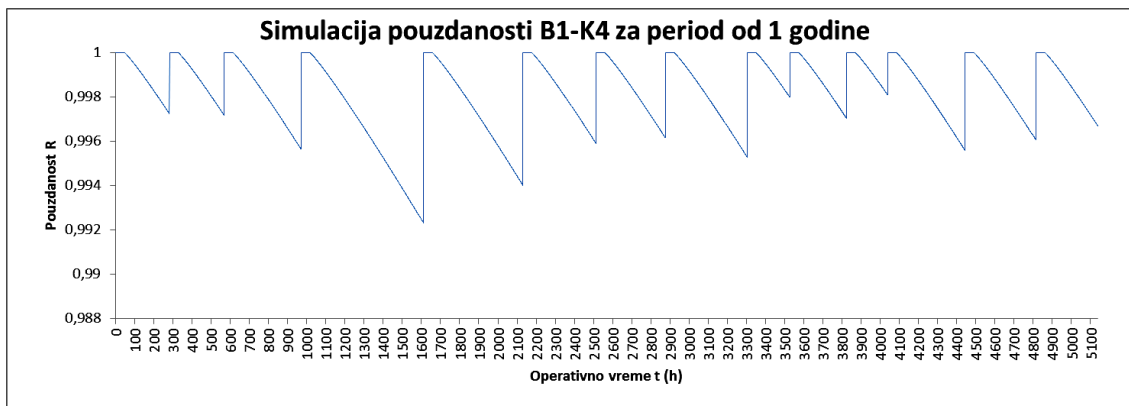
Blok-afektovana-afektujuća K	$y = ax^2 + bx + c$	R^2	Stepeni slobode ($n - 2$)
B1-4-5	$y = -460,23x^2 + 10226x + 28646$	0,4639	7
B1-4-6	$y = -1181,2x^2 + 21471x + 19470$	0,4442	5
B1-4-7	$y = -3040,2x^2 + 38073x + 14919$	0,8326	3
B1-4-8	$y = -3706,4x^2 + 46733x + 2844,7$	0,5082	6
B1-4-9	$y = 42469x^2 - 62973x + 27776$	1	1
B1-4-10	$y = -52595x^2 + 161890x + 26009$	1	1
B1-4-11	$y = -26865x^2 + 61576x + 25905$	1	1
B1-4-12	$y = -1158,8x^2 + 15723x + 31226$	0,2403	4
B1-4-13	$y = 19222x^2 - 24232x + 35067$	0,9653	2
B1-5-4	$y = -211,1x^2 + 25289x - 5575,3$	0,441	10
B1-5-6	$y = -911,54x^2 + 23051x + 28272$	0,3381	7
B1-5-7	$y = -16993x^2 + 100258x + 1883,4$	0,6384	4
B1-5-8	$y = 727,05x^2 + 11198x + 40006$	0,6502	4
B1-5-9	$y = -37026x^2 + 61908x + 41569$	1	1
B1-5-10	$y = -84612x^2 + 199004x + 39296$	1	1
B1-5-11	$y = 20476x^2 + 272,35x + 39107$	1	1
B1-5-12	$y = -1267,5x^2 + 14548x + 47901$	0,1122	4
B1-5-13	$y = -21853x^2 + 56446x + 38498$	1	1
B1-6-4	$y = 2640x^2 - 1200,3x + 34869$	0,9382	9
B1-6-5	$y = -4146,3x^2 + 42478x + 16470$	0,78	6
B1-6-7	$y = -12530x^2 + 82105x + 24009$	0,8494	4
B1-6-8	$y = -4914x^2 + 38972x + 36811$	0,2025	5
B1-6-9	$y = -64579x^2 + 131446x + 49322$	1	1
B1-6-10	$y = 36357x + 49007$	1	0
B1-6-11	$y = 36633x^2 - 39642x + 49590$	1	1
B1-6-12	$y = 573,4x^2 - 7168x + 70369$	0,0653	4
B1-6-13	$y = 11128x^2 - 4460,1x + 51691$	0,9824	2
B1-7-4	$y = -877,84x^2 + 38791x + 15102$	0,4862	12
B1-7-5	$y = -1016,4x^2 + 54650x + 3377,1$	0,916	9
B1-7-6	$y = -117,91x^2 + 28709x + 100469$	0,6349	9
B1-7-8	$y = -6147x^2 + 127247x - 12986$	0,7072	7
B1-7-9	$y = 85847x^2 - 108027x + 102996$	1	1
B1-7-10	$y = 70485x^2 - 33289x + 97513$	1	1
B1-7-11	$y = -61743x^2 + 266167x + 157311$	0,4385	3
B1-7-12	$y = -25592x^2 + 258372x + 34188$	0,8393	3
B1-7-13	$y = -31721x^2 + 291324x + 30745$	0,9114	2
B1-8-4	$y = -1117,2x^2 + 36291x + 7845,4$	0,872	11
B1-8-5	$y = -1152,8x^2 + 32556x + 4062$	0,4023	11
B1-8-6	$y = -2231,1x^2 + 41793x + 37291$	0,5814	8

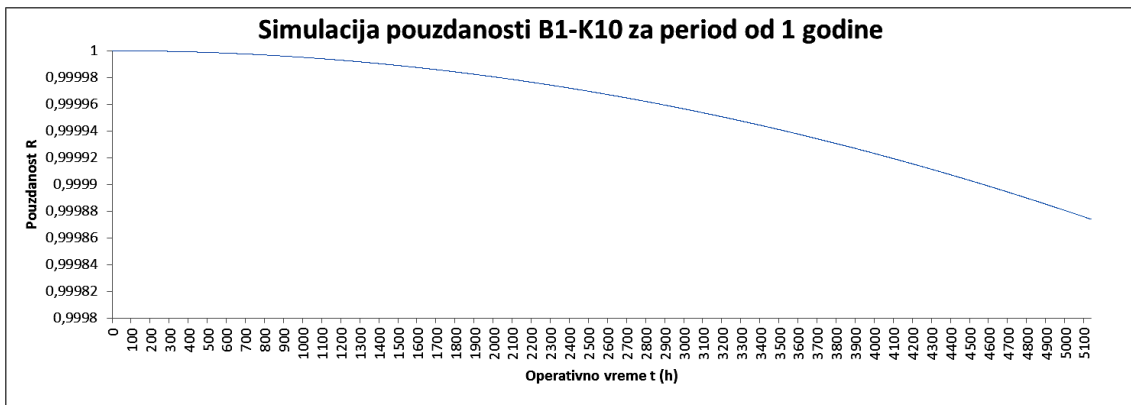
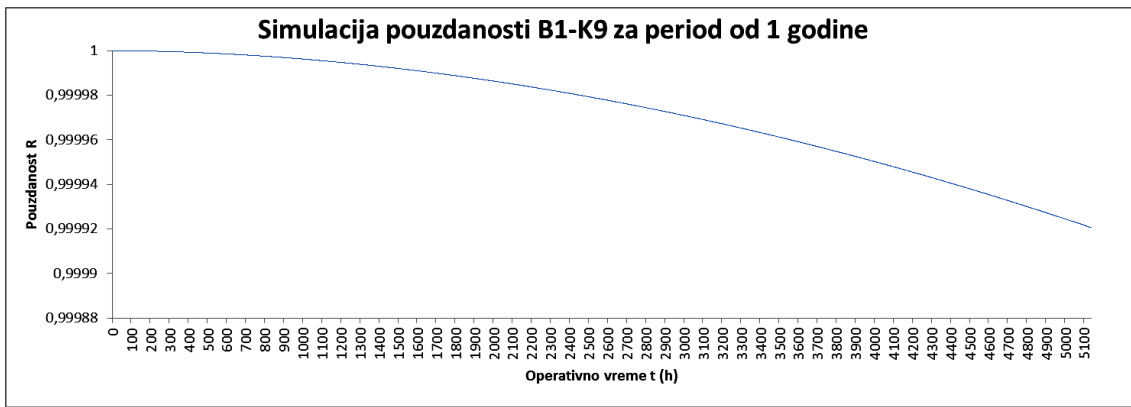
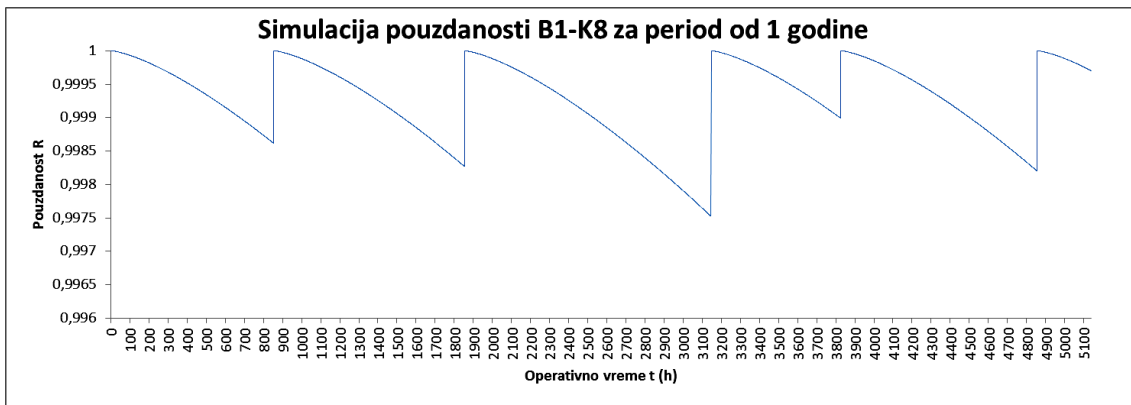
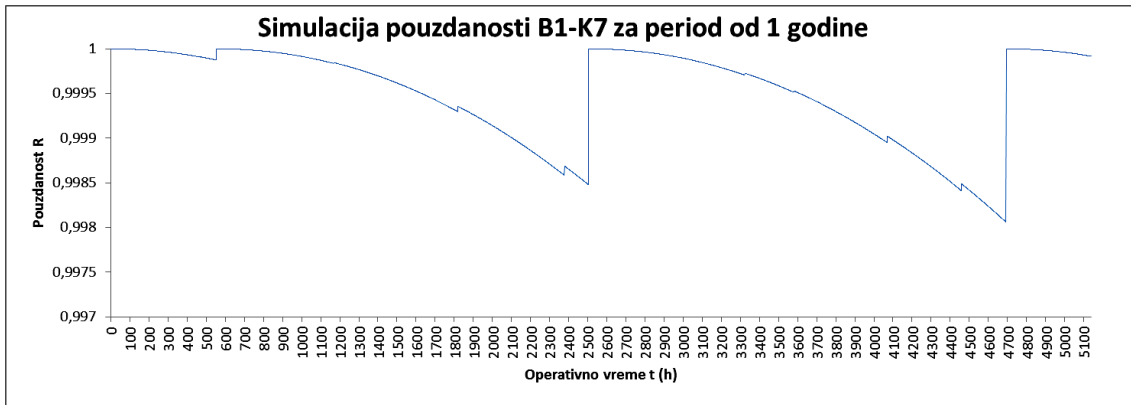
Blok-afektovana-afektujuća K	$y = ax^2 + bx + c$	R^2	Stepeni slobode ($n - 2$)
B1-8-7	$y = -1077,2x^2 + 36230x + 65880$	0,6144	5
B1-8-9	$y = -56970x^2 + 132267x + 66317$	1	1
B1-8-10	$y = 54364x + 65427$	1	0
B1-8-11	$y = -13620x^2 + 87047x + 63438$	0,9045	2
B1-8-12	$y = -4957x^2 + 31829x + 66870$	0,102	4
B1-8-13	$y = -66149x^2 + 210476x + 35952$	0,6923	2
B1-9-4	$y = -339,27x^2 + 40834x + 1207$	1	1
B1-9-5	$y = 259,43x^2 + 25992x + 1207$	1	1
B1-9-6	$y = -1272,4x^2 + 81582x + 1207$	1	1
B1-9-7	$y = 62493x + 41362$	1	0
B1-9-8	$y = 6760,2x^2 - 6963,3x + 1207$	1	1
B1-9-10	$y = 593679x + 41362$	1	0
B1-9-11	$y = 131929x + 41362$	1	0
B1-9-12	$y = -239,36x^2 + 80549x + 1207$	1	1
B1-9-13	$y = 395786x + 41362$	1	0
B1-10-4	$y = 1115,6x^2 + 9328,6x + 100659$	0,9256	2
B1-10-5	$y = 2154,5x^2 + 8369,8x + 108513$	0,9208	2
B1-10-6	$y = -1412,7x^2 + 76591x + 7922,2$	0,9996	1
B1-10-7	$y = 45148x + 131337$	1	0
B1-10-8	$y = 7946,3x^2 - 15856x + 85115$	0,993	2
B1-10-9	$y = 451483x + 131337$	1	0
B1-10-11	$y = 90674x + 153534$	1	0
B1-10-12	$y = 78848x^2 - 226657x + 226908$	0,9994	2
B1-10-13	$y = 13494x^2 + 125452x + 85021$	1	1
B1-11-4	$y = 143,19x^2 + 11666x + 103726$	0,422	10
B1-11-5	$y = -1222,7x^2 + 50218x + 31259$	0,7785	7
B1-11-6	$y = -939,62x^2 + 50521x + 1016,9$	0,6545	8
B1-11-7	$y = -9138,3x^2 + 114506x + 160613$	0,3692	4
B1-11-8	$y = -1348x^2 + 58856x + 72405$	0,9886	5
B1-11-9	$y = -77038x^2 + 376420x + 175127$	1	1
B1-11-10	$y = -1467,1x^2 + 143979x + 177380$	1	1
B1-11-12	$y = -6366,1x^2 + 99832x + 105568$	0,6699	3
B1-11-13	$y = -6694,5x^2 + 116166x + 139370$	0,9956	2
B1-12-4	$y = -253,34x^2 + 31666x + 23798$	0,6997	15
B1-12-5	$y = 171,27x^2 + 31777x + 29715$	0,7569	10
B1-12-6	$y = -773,9x^2 + 52530x + 29931$	0,9081	8
B1-12-7	$y = 722,05x^2 + 53743x + 120932$	0,7539	5
B1-12-8	$y = -15456x^2 + 222753x - 163803$	0,5678	7
B1-12-9	$y = -93772x^2 + 147593x + 130272$	1	1
B1-12-10	$y = 186708x^2 - 148441x + 120140$	1	1
B1-12-11	$y = 81531x^2 + 3735,1x + 97434$	1	1
B1-12-13	$y = -47353x^2 + 374306x - 43600$	0,6509	3
B1-13-4	$y = 49,952x^2 + 13599x + 92177$	0,9586	7
B1-13-5	$y = 53,922x^2 + 25680x + 31459$	0,9451	9
B1-13-6	$y = 55,36x^2 + 26748x + 36971$	0,9748	6
B1-13-7	$y = 17287x^2 - 105191x + 236424$	0,8558	3
B1-13-8	$y = 4339,4x^2 - 50253x + 244926$	0,8365	6
B1-13-9	$y = 126791x^2 + 15001x + 135503$	1	1

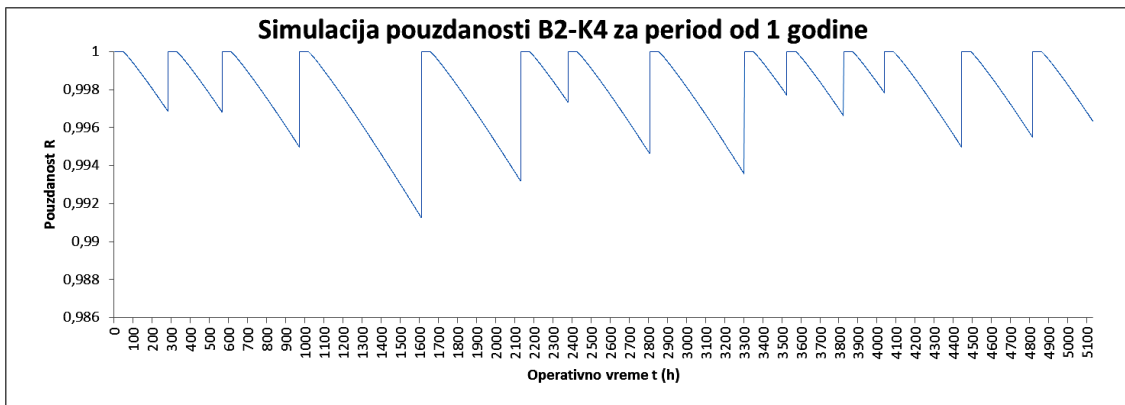
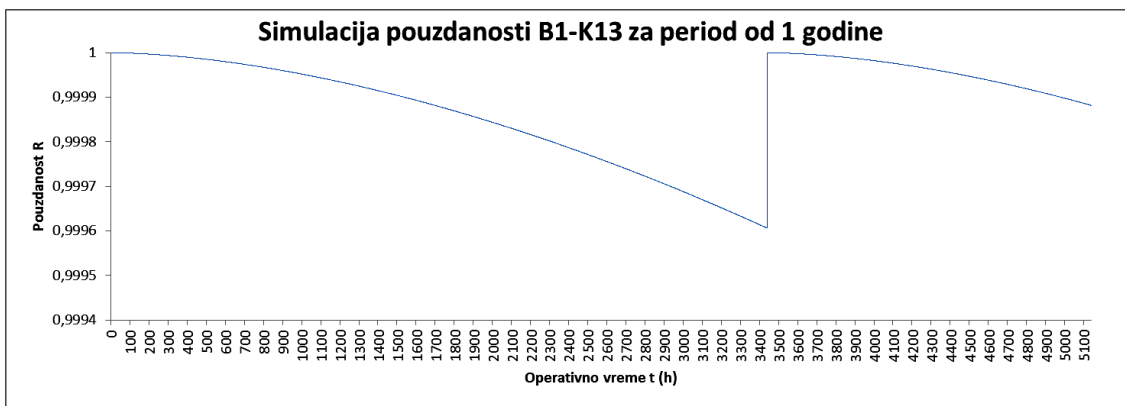
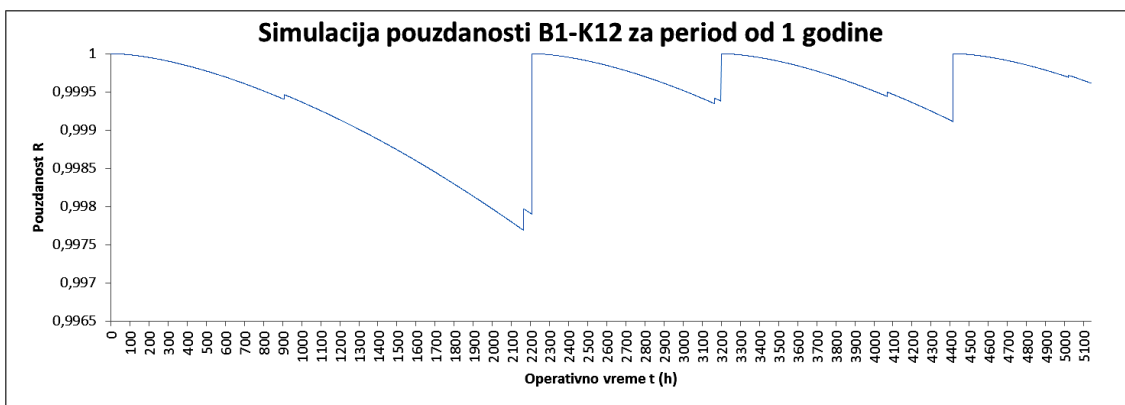
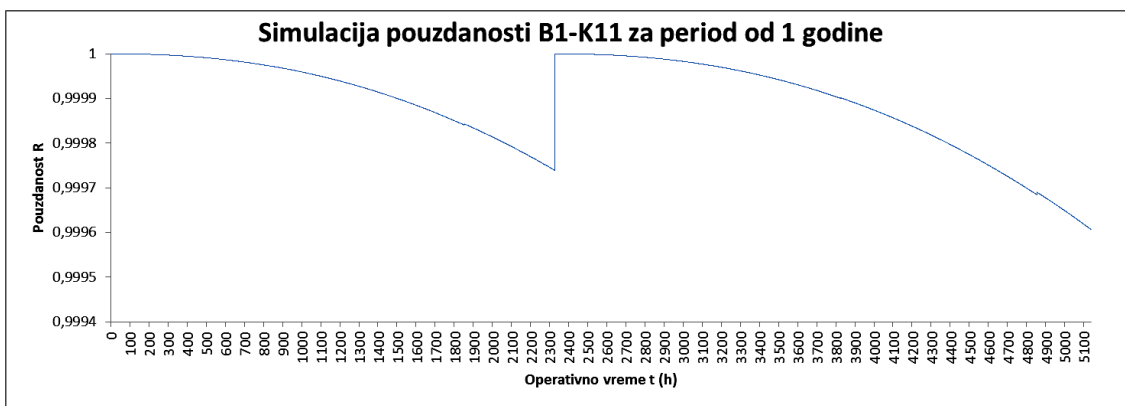
Blok-afektovana-afektujuća K	$y = ax^2 + bx + c$	R^2	Stepeni slobode ($n - 2$)
B1-13-10	$y = 130890x^2 - 195880x + 194940$	1	1
B1-13-11	$y = -1450x^2 + 190414x + 60461$	0,9991	2
B1-13-12	$y = 11355x^2 - 124338x + 300897$	0,8525	5
B2-4-5	$y = -470,95x^2 + 10485x + 21031$	0,8239	8
B2-4-6	$y = -849,57x^2 + 14085x + 17037$	0,7218	5
B2-4-7	$y = -1784,9x^2 + 18400x + 23057$	0,8964	5
B2-4-8	$y = -4857,3x^2 + 26564x + 20157$	0,5645	4
B2-4-9	$y = -42149x^2 + 98978x + 24522$	1	1
B2-4-10	$y = 18441x^2 - 18419x + 24735$	1	1
B2-4-11	$y = -13888x^2 + 20947x + 24740$	1	1
B2-4-12	$y = -4218,1x^2 + 22573x + 20169$	0,6336	3
B2-4-13	$y = -10379x^2 + 45922x + 17627$	0,7227	2
B2-5-4	$y = -60,909x^2 + 15731x + 15020$	0,8544	10
B2-5-6	$y = -4712,8x^2 + 43857x + 8435,4$	0,8914	6
B2-5-7	$y = 732,54x^2 + 17677x + 32272$	0,8827	4
B2-5-8	$y = 1411,7x^2 + 10147x + 30229$	0,9662	3
B2-5-9	$y = 31104x^2 - 37664x + 30143$	1	1
B2-5-10	$y = 39420x + 29158$	1	0
B2-5-11	$y = 30537x^2 - 9734x + 28789$	1	1
B2-5-12	$y = 9535,5x^2 - 13906x + 41097$	0,8309	4
B2-5-13	$y = -280,6x^2 + 14205x + 30946$	0,9757	2
B2-6-4	$y = -1195,4x^2 + 28893x + 6828,4$	0,5676	9
B2-6-5	$y = -1142,4x^2 + 25886x + 15824$	0,5671	9
B2-6-7	$y = -13667x^2 + 91258x + 10095$	0,4371	5
B2-6-8	$y = -4419,7x^2 + 38089x + 39895$	0,5997	3
B2-6-9	$y = 32835x^2 + 786,64x + 42785$	1	1
B2-6-10	$y = -63357x^2 + 156310x + 40826$	1	1
B2-6-11	$y = 20405x^2 - 7252x + 42839$	1	1
B2-6-12	$y = -10711x^2 + 82859x + 14561$	0,4887	4
B2-6-13	$y = -11719x^2 + 62064x + 33364$	0,7546	2
B2-7-4	$y = -437,77x^2 + 23869x + 32518$	0,7941	15
B2-7-5	$y = -704,67x^2 + 24572x + 57159$	0,415	13
B2-7-6	$y = -2254,9x^2 + 50476x + 21622$	0,6872	9
B2-7-8	$y = -5795,6x^2 + 70353x + 65015$	0,4402	6
B2-7-9	$y = 122220x^2 - 128723x + 93033$	1	1
B2-7-10	$y = 170326x + 79749$	1	0
B2-7-11	$y = -20576x^2 + 151384x + 69577$	0,9135	2
B2-7-12	$y = 93,989x^2 + 21700x + 100262$	0,8735	3
B2-7-13	$y = -1931,4x^2 + 48938x + 99412$	0,8421	2
B2-8-4	$y = -1087,9x^2 + 42998x - 42064$	0,5903	12
B2-8-5	$y = 335,84x^2 + 13001x + 63489$	0,493	11
B2-8-6	$y = 3315x^2 - 14249x + 96337$	0,6396	11
B2-8-7	$y = -11908x^2 + 113938x + 17615$	0,7238	5
B2-8-9	$y = -167975x^2 + 359975x + 91507$	1	1
B2-8-10	$y = 104780x + 85030$	1	0
B2-8-11	$y = 16322x^2 + 7572,7x + 91380$	1	1
B2-8-12	$y = -26265x^2 + 111950x + 78408$	0,6566	3
B2-8-13	$y = -45029x^2 + 125267x + 87305$	0,9902	2

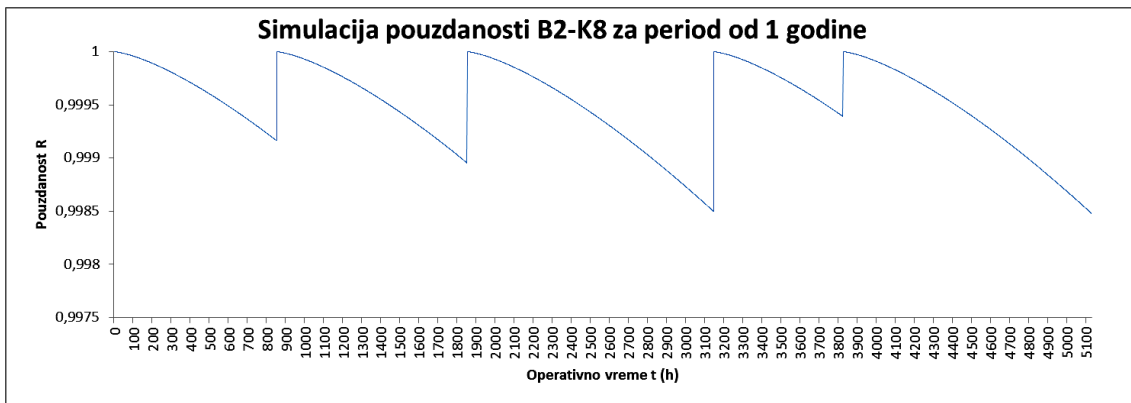
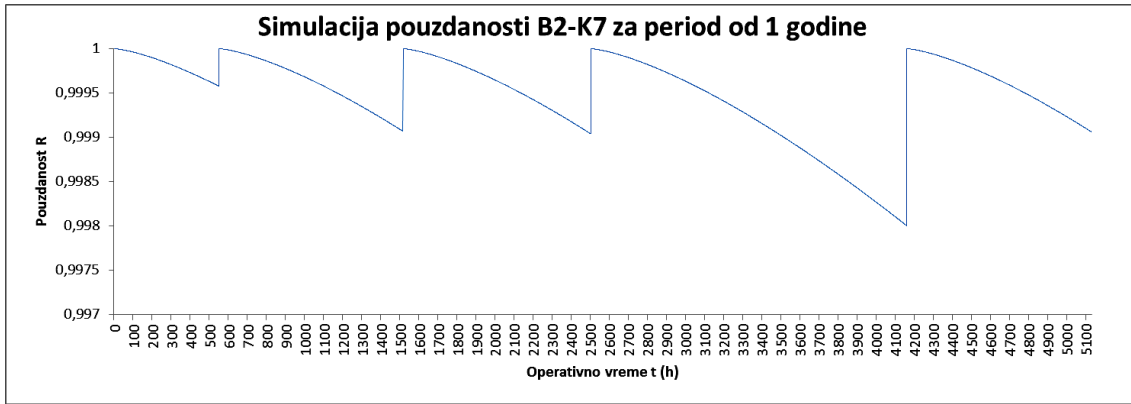
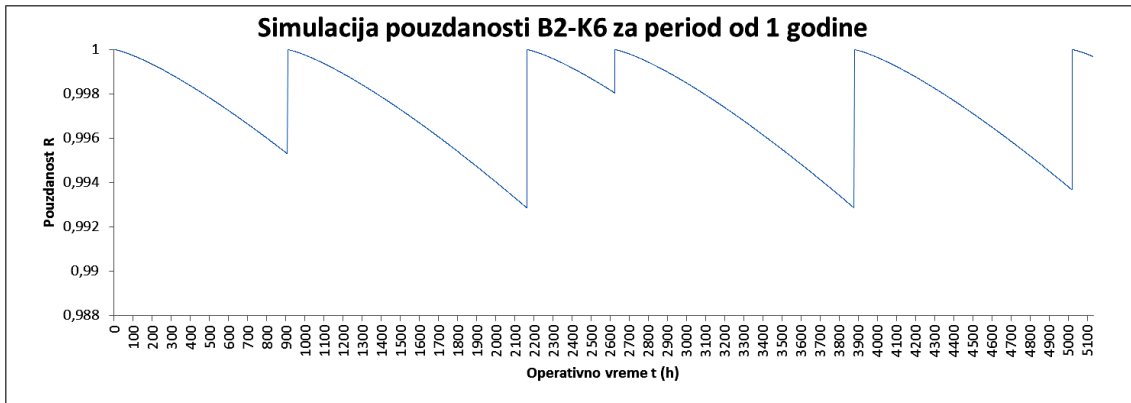
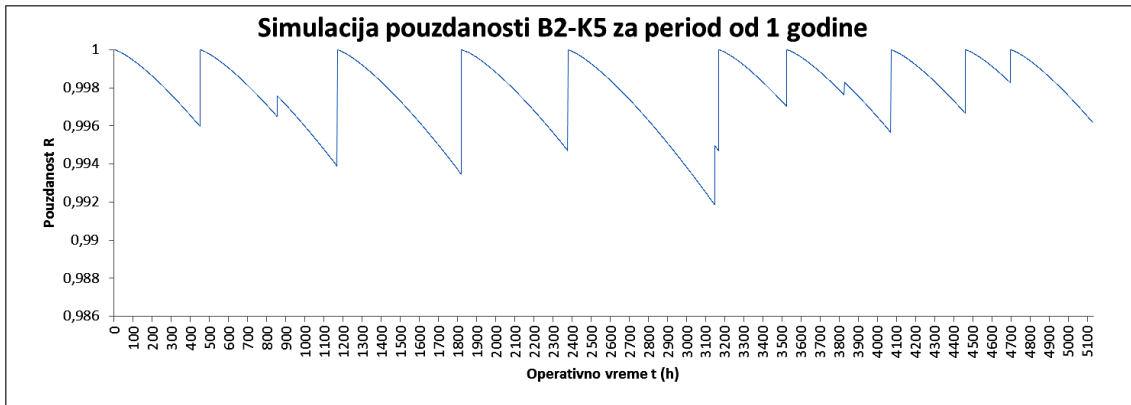
Blok-afektovana-afektujuća K	$y = ax^2 + bx + c$	R^2	Stepeni slobode ($n - 2$)
B2-9-4	$y = 36340x + 4714$	1	0
B2-9-5	$y = 15142x + 4714$	1	0
B2-9-6	$y = 36340x + 4714$	1	0
B2-9-7	$y = 181699x + 4714$	1	0
B2-9-8	$y = 90849x + 4714$	1	0
B2-9-10	$y = 363397x + 4714$	1	0
B2-9-11	$y = 181699x + 4714$	1	0
B2-9-12	$y = 40377x + 4714$	1	0
B2-9-13	$y = 181699x + 4714$	1	0
B2-10-4	$y = -1577,8x^2 + 56205x + 17204$	0,944	2
B2-10-5	$y = 316,52x^2 + 1419,1x + 208392$	0,893	3
B2-10-6	$y = 62,605x^2 + 25679x + 101032$	0,9251	3
B2-10-7	$y = -1238,6x^2 + 107184x + 74746$	0,8965	3
B2-10-8	$y = 2474,1x^2 + 8585,1x + 235831$	0,8224	3
B2-10-9	$y = -15006x^2 - 46236x + 595196$	1	1
B2-10-11	$y = -320327x^2 + 1E+06x - 103874$	0,7327	2
B2-10-12	$y = -15383x^2 + 208195x + 207822$	0,3105	3
B2-10-13	$y = 14065x^2 + 101668x + 225338$	1	1
B2-11-4	$y = -1599,1x^2 + 61337x - 44582$	0,7577	5
B2-11-5	$y = -1099,7x^2 + 47305x + 19258$	0,7358	5
B2-11-6	$y = -1622,9x^2 + 57536x + 3781$	0,7411	6
B2-11-7	$y = 4875,8x^2 + 18426x + 184067$	0,7712	4
B2-11-8	$y = 1809,7x^2 + 54701x + 62921$	0,4839	4
B2-11-9	$y = -58041x^2 + 95708x + 284144$	1	1
B2-11-10	$y = -212092x^2 + 530018x + 177819$	1	1
B2-11-12	$y = 2159x^2 - 16845x + 269642$	0,1819	4
B2-11-13	$y = -2317,7x^2 + 129693x + 149762$	0,8975	2
B2-12-4	$y = 952,96x^2 + 19691x + 9471,3$	0,8043	9
B2-12-5	$y = 581,9x^2 + 20836x + 28097$	0,7025	10
B2-12-6	$y = -745,07x^2 + 66630x - 51873$	0,9571	8
B2-12-7	$y = -3485,9x^2 + 134641x - 77791$	0,8714	6
B2-12-8	$y = -1761,1x^2 + 108566x - 14845$	0,9908	5
B2-12-9	$y = 94285x^2 - 219869x + 149208$	1	1
B2-12-10	$y = -545891x^2 + 1E+06x + 94764$	1	1
B2-12-11	$y = 340967x^2 - 344057x + 112032$	1	1
B2-12-13	$y = 62415x^2 - 169346x + 155876$	0,9903	2
B2-13-4	$y = -31,547x^2 + 19599x + 50565$	0,7707	7
B2-13-5	$y = -505,09x^2 + 36513x - 39284$	0,7079	6
B2-13-6	$y = -1971,2x^2 + 70630x - 52755$	0,6931	7
B2-13-7	$y = -10639x^2 + 156664x - 7,3869$	0,4338	4
B2-13-8	$y = -691,69x^2 + 50730x + 91786$	0,7319	5
B2-13-9	$y = 284869x^2 - 256673x + 167599$	1	1
B2-13-10	$y = -45031x^2 + 360548x + 117362$	1	1
B2-13-11	$y = -7704,5x^2 + 174391x + 114386$	1	1
B2-13-12	$y = -123,55x^2 + 31807x + 153680$	0,9915	2

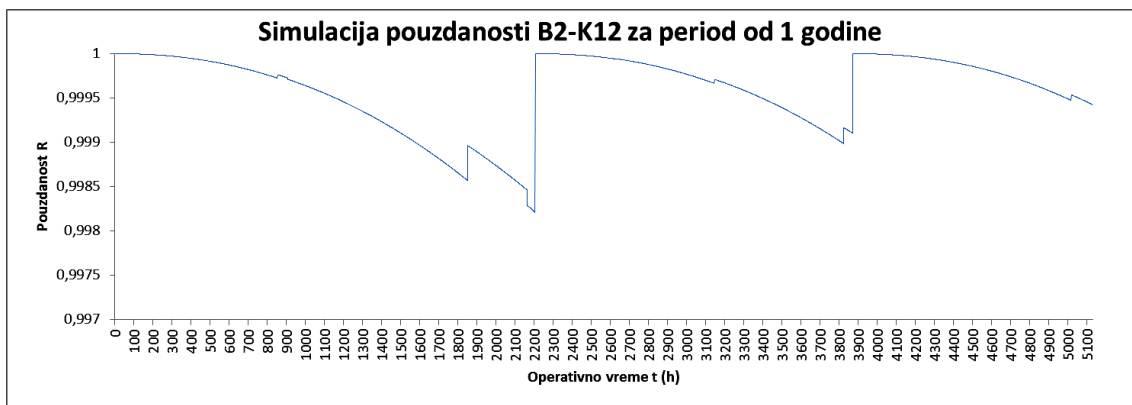
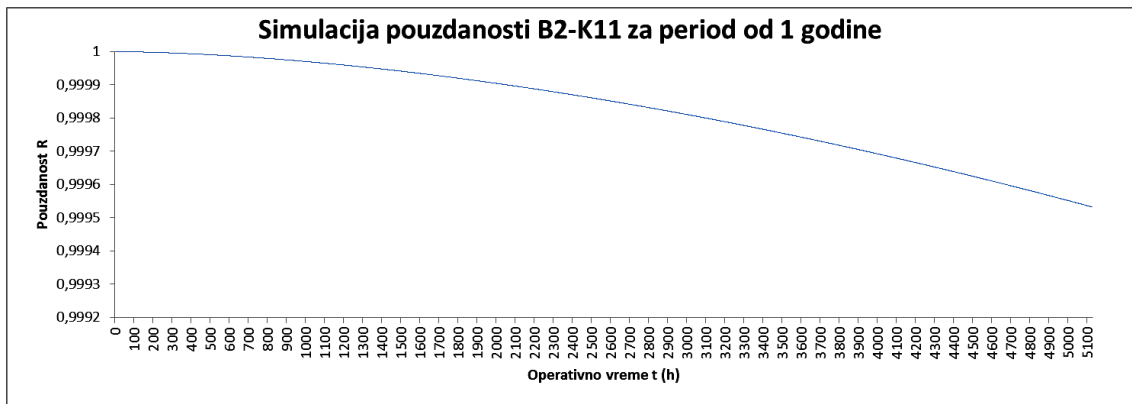
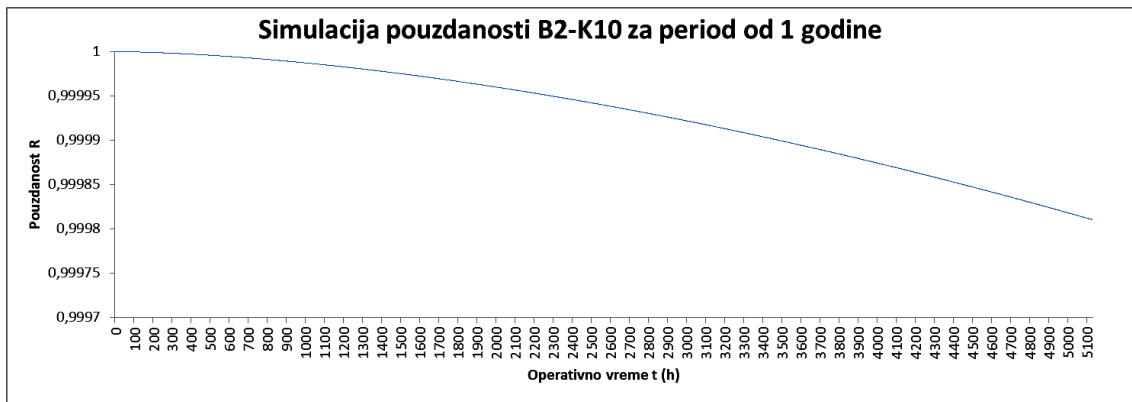
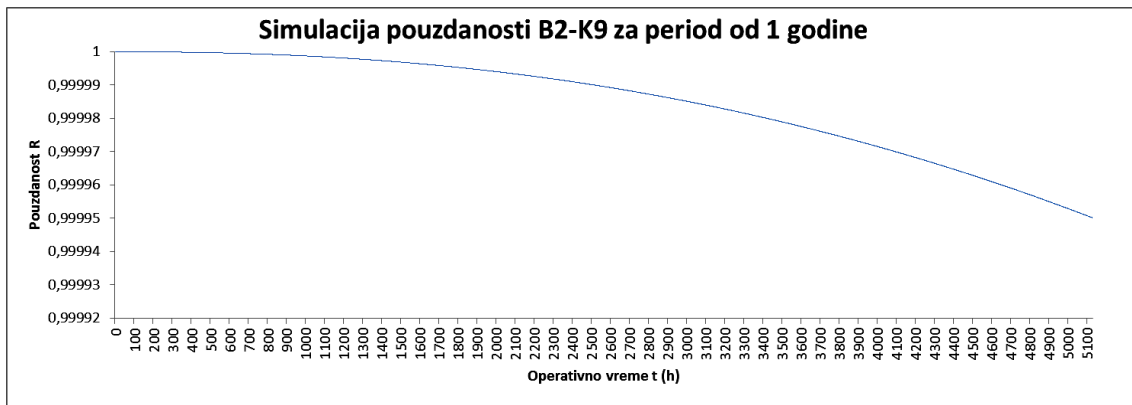
PRILOG 5 - KRETANJE POUZDANOSTI KOMPONENTI BLOKOVA B1 i B2 ZA PERIOD OD GODINU DANA – JEDAN ITERACIJA

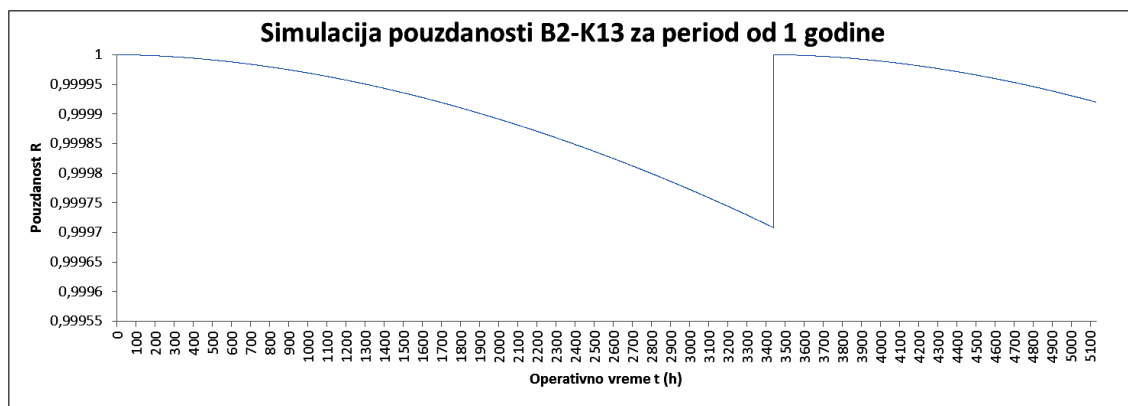




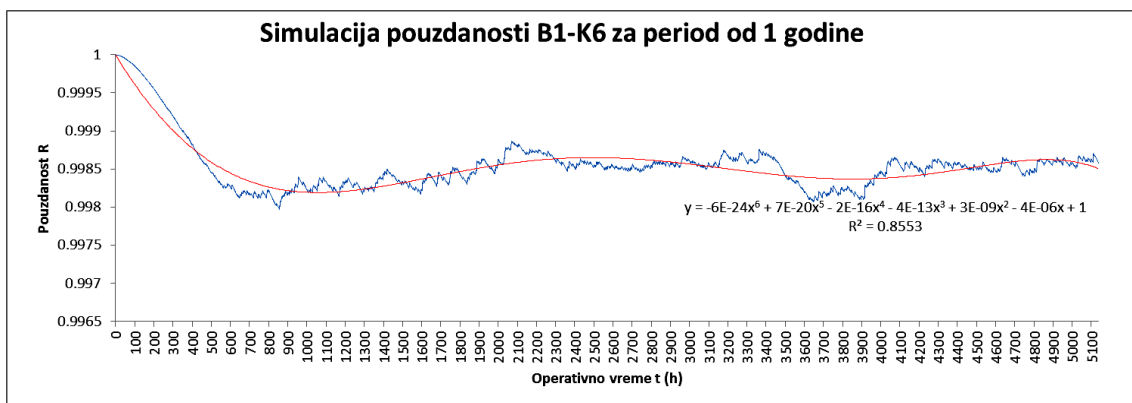
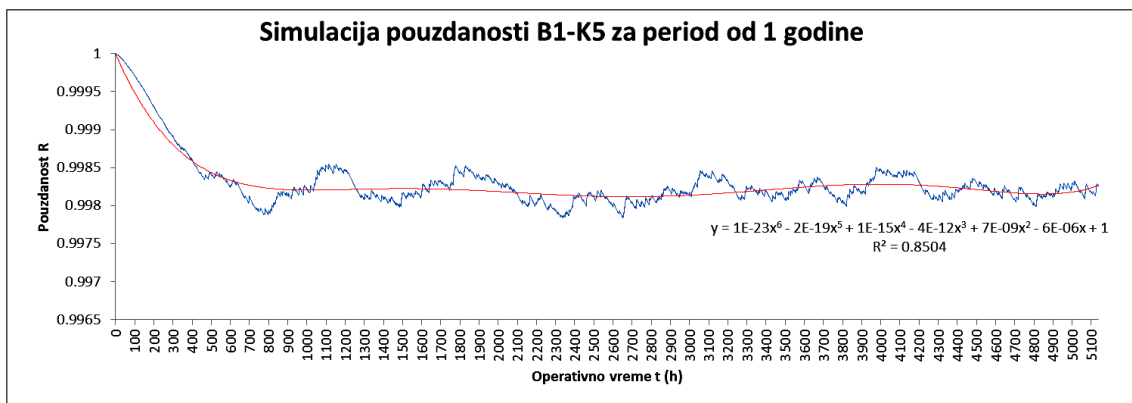
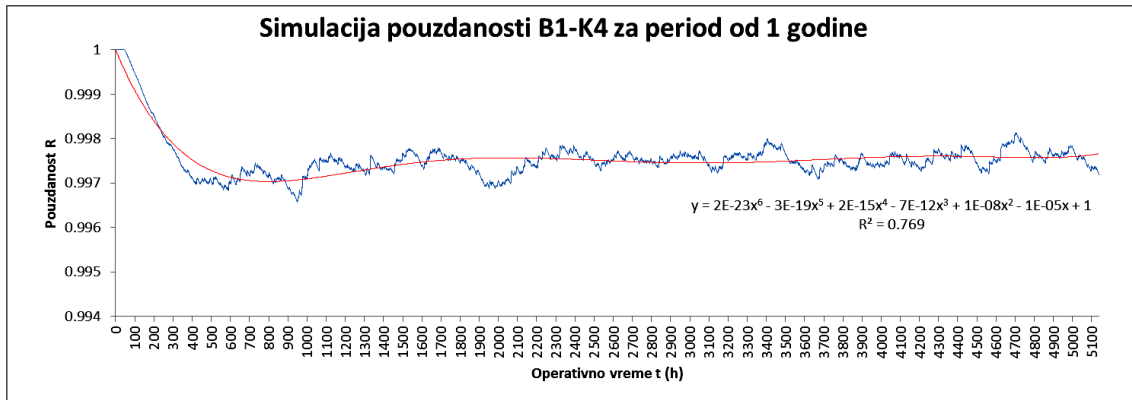


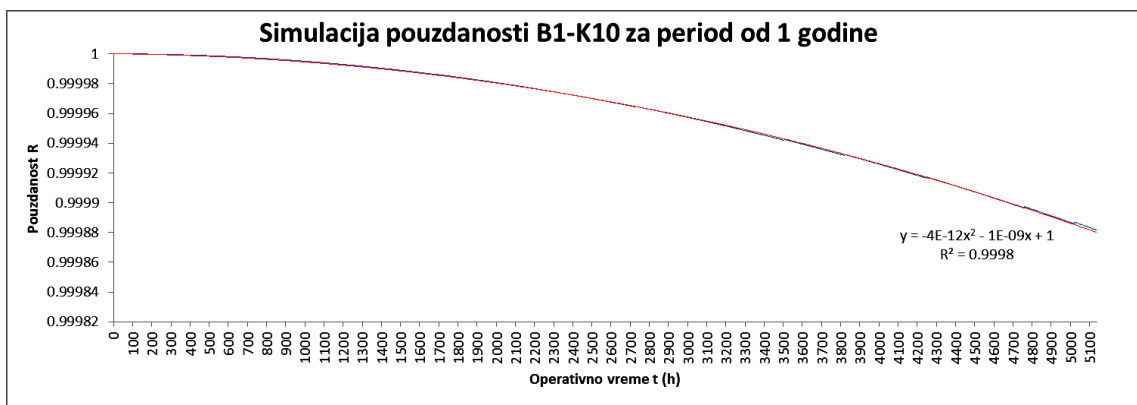
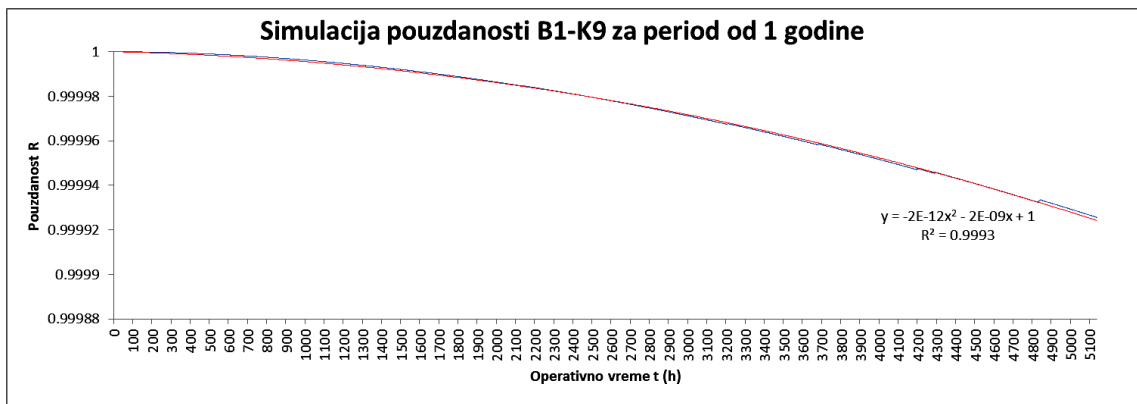
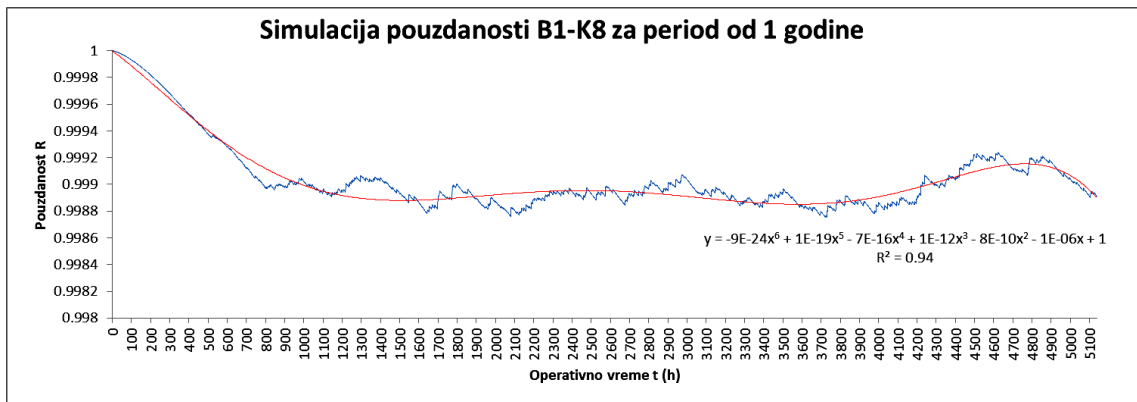
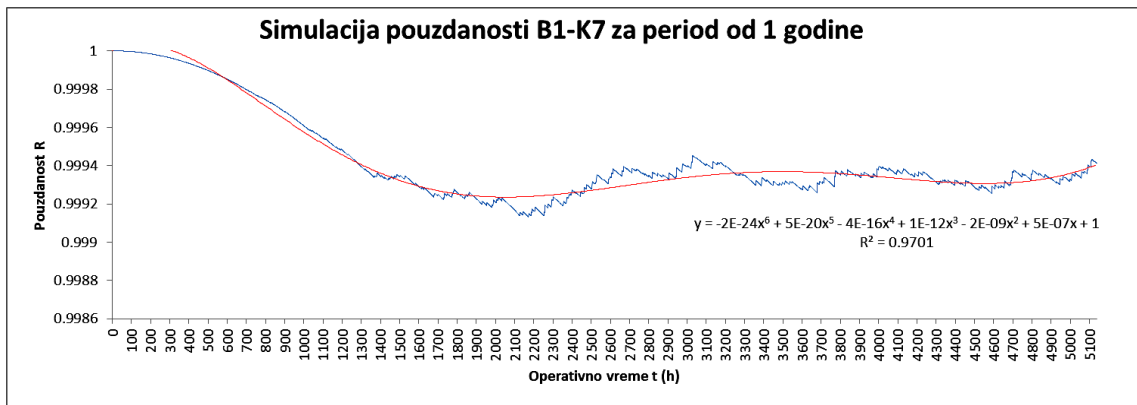


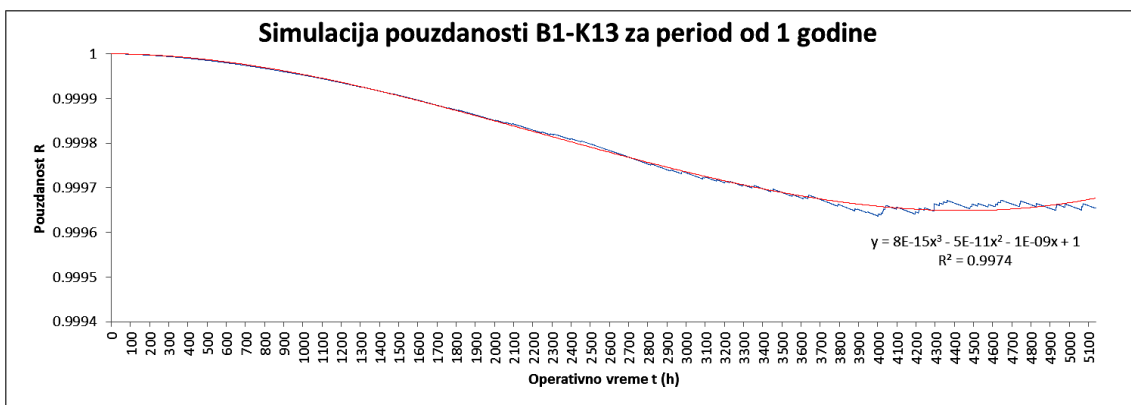
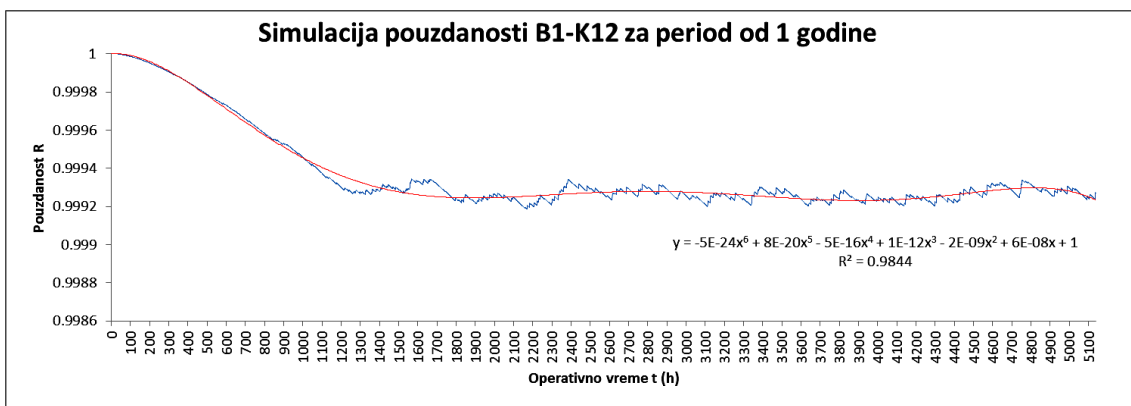
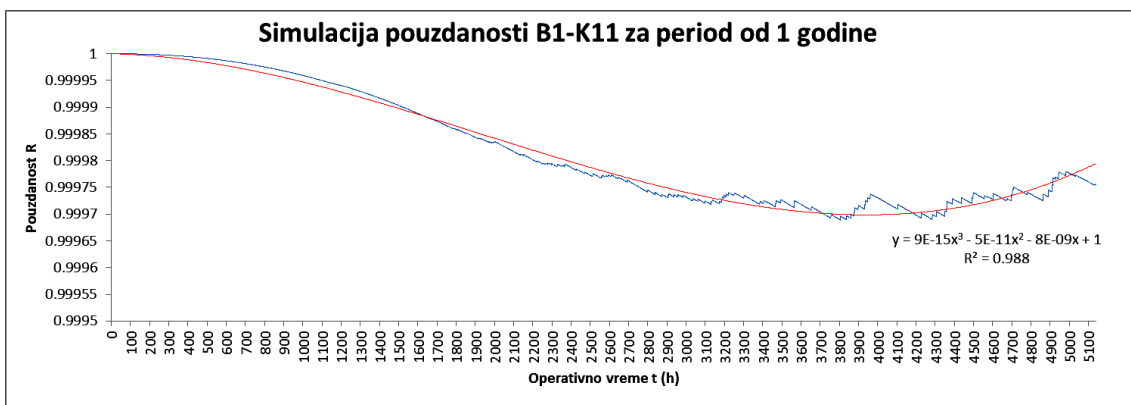
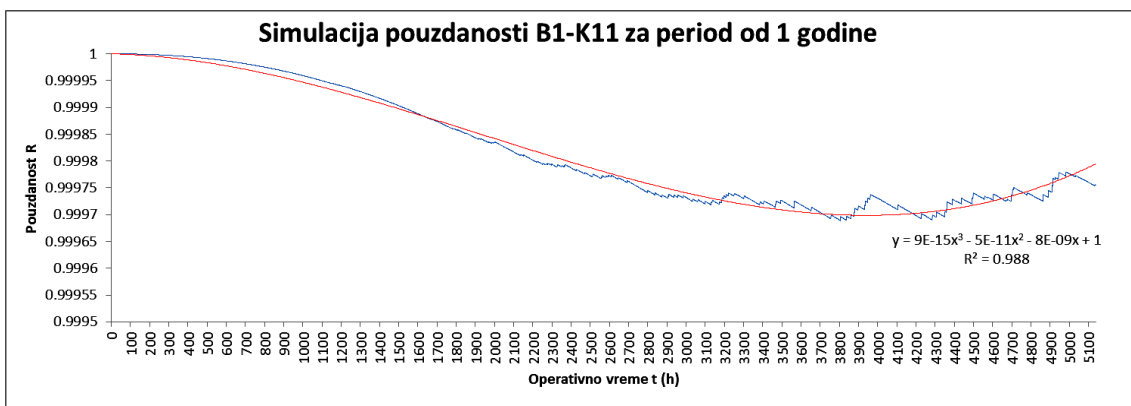


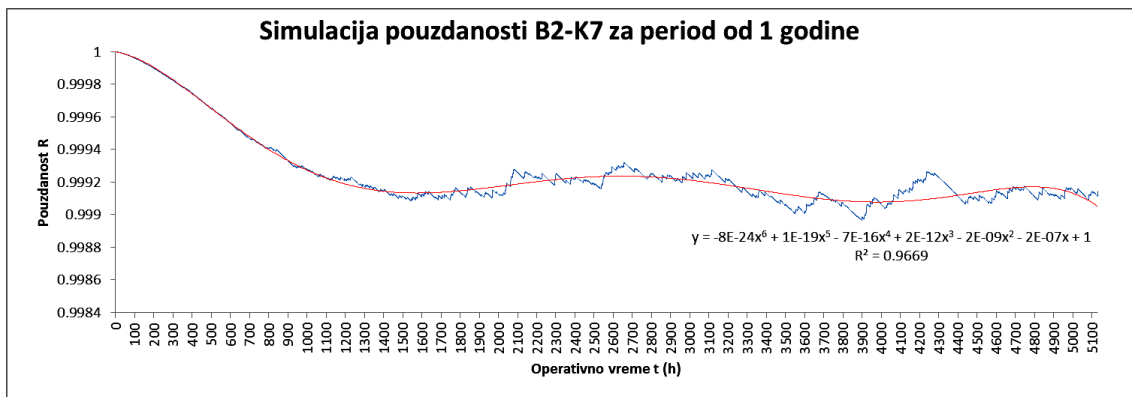
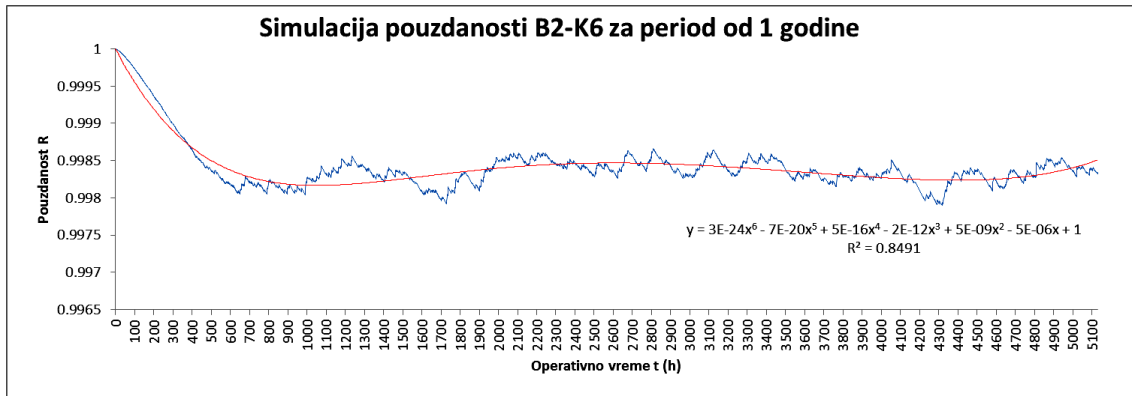
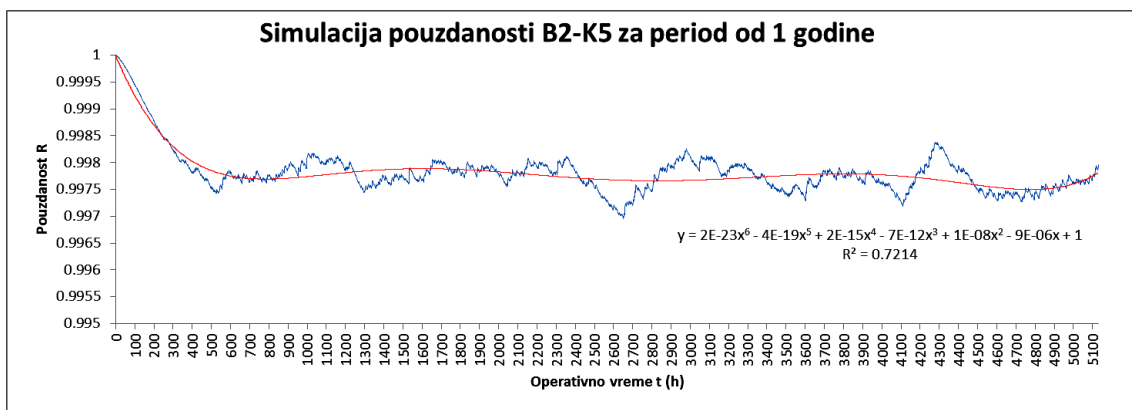
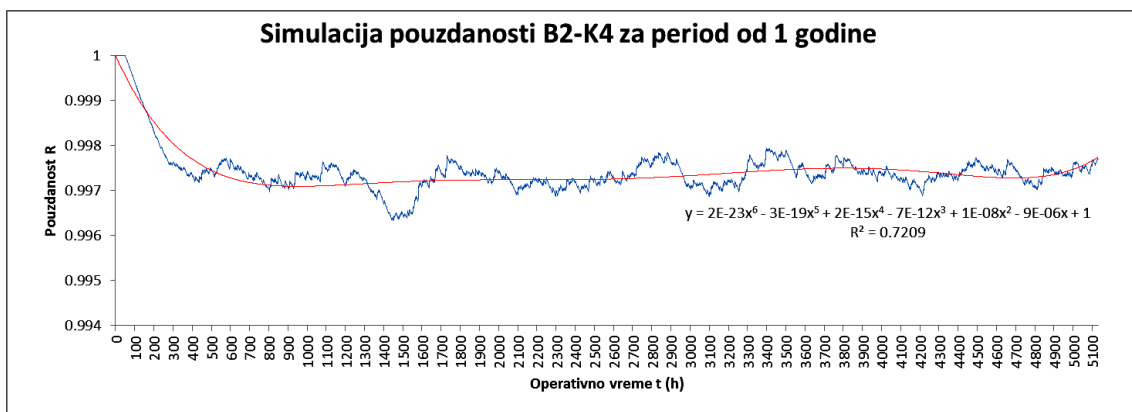


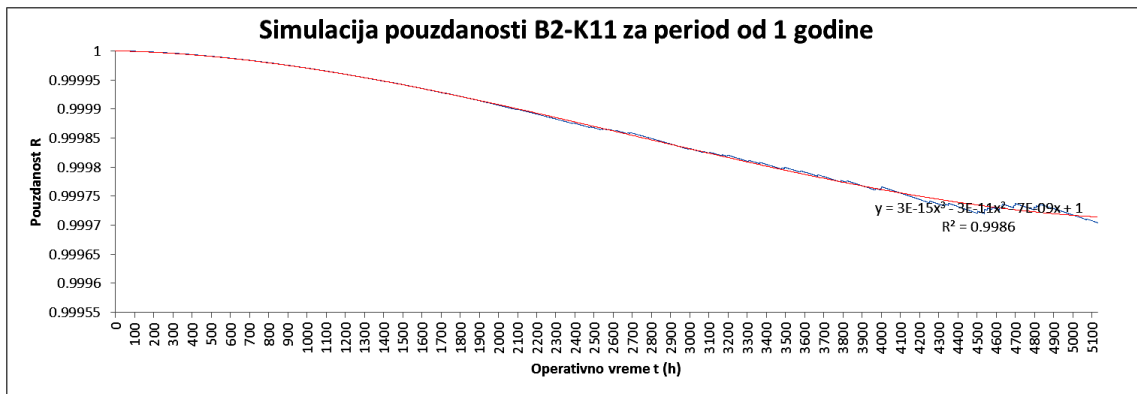
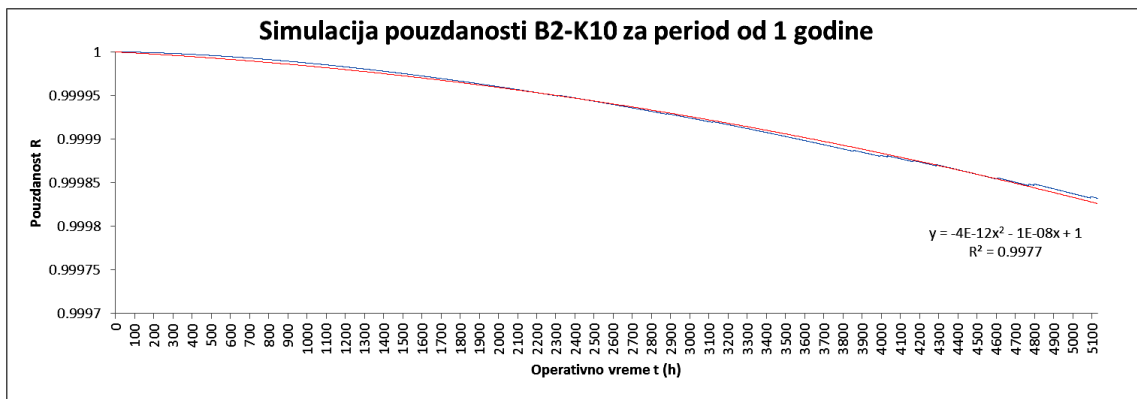
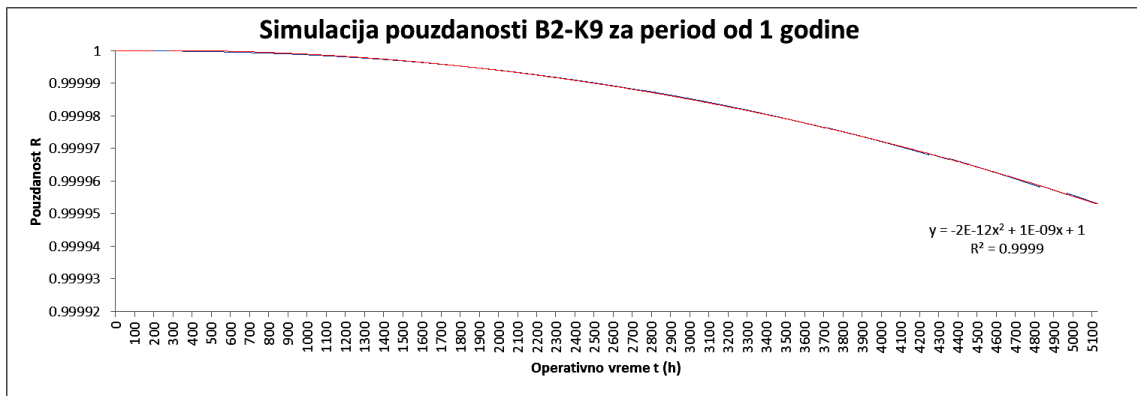
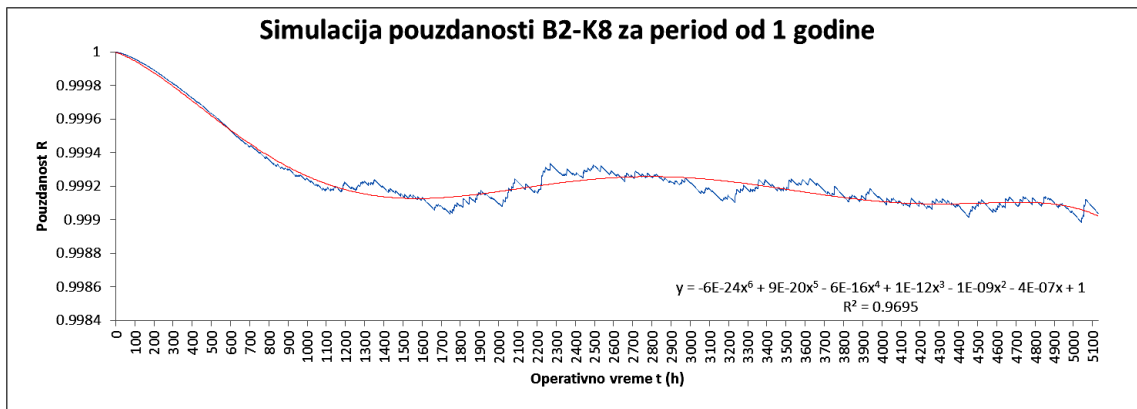
PRILOG 6 - KRETANJE POUZDANOSTI KOMPONENTI BLOKOVA B1 i B2 ZA PERIOD OD GODINU DANA – 100 ITERACIJA SIMULACIJE

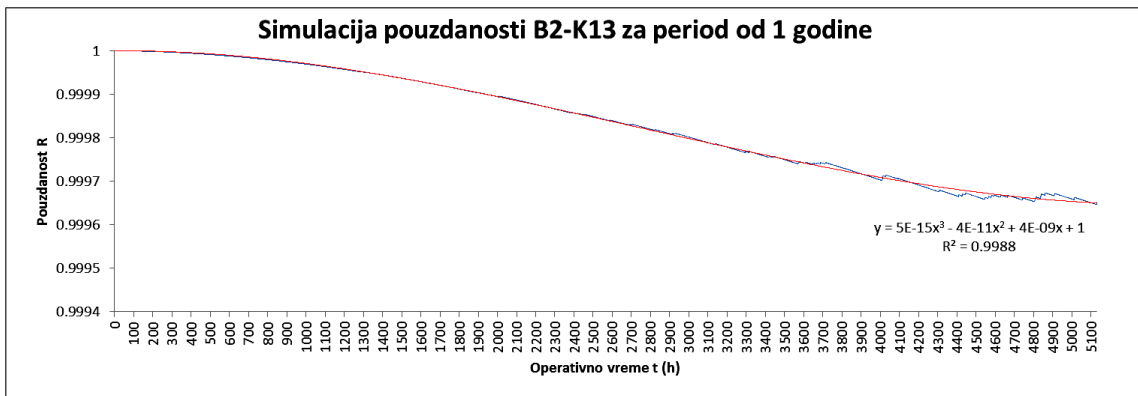
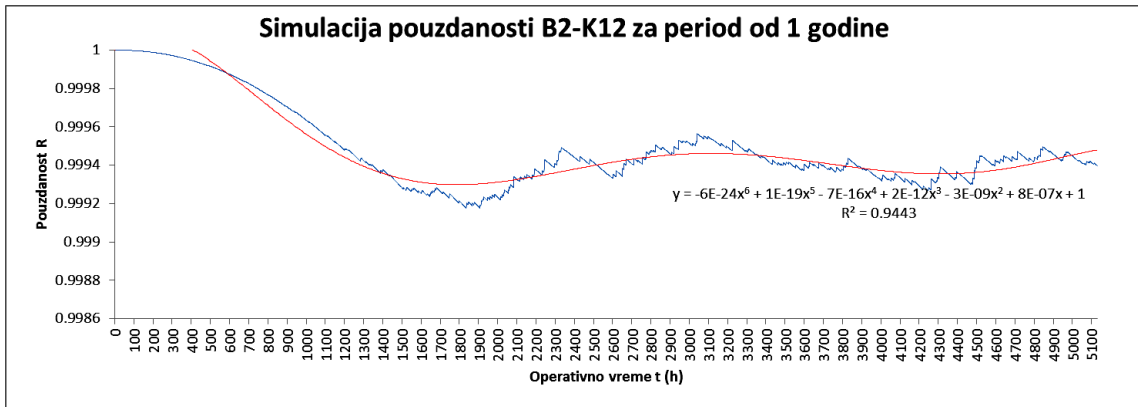












BIOGRAFSKI PODACI

Rođen u Požarevcu.

Magistrirao na Tehničkom fakultetu „Mihajlo Pupin“ u Zrenjaninu odbranom magistarske teze „Softver za praćenje pouzdanosti mašina u procesu eksploatacije“.

Objavio 8 monografija.

Objavio 1 rad u časopisu na SCI listi (M23),

3 rada u časopisima M24, 20 radova u časopisima nacionalnog značaja.

Od ukupnog broja radova 10 je objavljeno u inostranstvu.

Autor 37 radova saopštenih na skupu nacionalnog značaja, štampanih u celini.

Autor je originalnog softverskog rešenja za praćenje sistema kvaliteta i automatsko kreiranje dokumentacije u okviru fabrike DOO EURO MLIN, Petrovac.

Kreator brojnih poslovnih softvera i računarskih rešenja.

Direktor Instituta za pouzdanost i održavanje pri Društvu za tehničku dijagnostiku od 30.11.2007.

Član Upravnog odbora Udruženja intelektualaca za razvoj nauke u Srbiji „Srpski akademski centar“ u Novom Sadu.

Član uređivačkog odbora časopisa „Održavanje mašina“ i „Menadžment znanja“

Član organizacionog odbora više naučno-stručnih simpozijuma i skupova u zemlji

Član izvršnog odbora Srpskog akademskog centra.

Učesnik brojnih nacionalnih skupova iz oblasti održavanja tehničkih sistema, gde je prezentovao svoje radove.

Radio kao profesor računarstva i informatike u Medicinskoj školi u Požarevcu od 2010-2015.

Vodi Sektor IT, plana, analize i razvoja u PD „RIO“ doo, Kostolac.

Bavi se alpinizmom od 2007. godine. Načelnik je alpinističkog odseka Požarevac od 2011.

