

UNIVERZITET U BEOGRADU

SAOBRAĆAJNI FAKULTET

mr Aleksandar Z. Knežević

RAZVOJ METODE IZBORA MODELA  
ODRŽAVANJA U FUNKCIJI POVEĆANJA  
RASPOLOŽIVOSTI FLOTE VAZDUHOPLOVA

doktorska disertacija

Beograd, 2018

UNIVERSITY OF BELGRADE  
FACULTY OF TRANSPORT AND TRAFFIC ENGINEERING

MSc Aleksandar Z. Knežević

DEVELOPMENT OF MAINTENANCE MODEL  
CHOICE METHOD IN FUNCTION OF  
INCREASED AIRCRAFT FLEET  
AVAILABILITY

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2018

Mentor:

Prof. dr Ljubiša Vasov, dipl. inž.

Univerzitet u Beogradu/ Saobraćajni fakultet

Članovi komisije:

Doc. dr Branimir Stojiljković, dipl. inž.

Univerzitet u Beogradu/ Saobraćajni fakultet

Doc. dr Slaviša Vlačić

Univerzitet odbrane/ Vojna akademija

Datum odbrane: \_\_\_\_\_

*Ovim želim da zahvalim svojoj porodici  
i svima koji su me podržavali tokom ovih godina.*

## RAZVOJ METODE IZBORA MODELA ODRŽAVANJA U FUNKCIJI POVEĆANJA RASPOLOŽIVOSTI FLOTE VAZDUHOPLOVA

### Sažetak

Predmet istraživanja doktorske disertacije jeste izbor modela neperfektnog održavanja koji je moguće primeniti na održavanje flote vazduhoplova u okviru trenutne organizacije održavanja a na osnovu parametara koji se prate u toku eksploatacije. Pregled ponuđenih modela održavanja i klasifikacija prema politikama održavanja poslužio je za izbor modela koji za ulazne parametre raspoloživosti uzima norme koje se prate pri održavanju flote vazduhoplova. Na osnovu predloženog logičkog dijagrama odlučivanja problem je rešen odabirom konkretnog modela neperfektnog održavanja. Primenom izabrane metode neperfektnog održavanja na numeričkom modelu dobijene su vrednosti za intervale između preventivnih održavanja kao i maksimalni broj uzastopnih korektivnih popravki za svaki od podsistema. Primena preporučenih normi na numeričkom modelu dala je razliku u trenutnoj i ostvarenoj raspoloživosti za svaki od podsistema.

Razvijen je simulacioni model procesa eksploatacije flote aviona G-4 za karakterističan zadatak u školskoj nameni. Postavka rasporeda entiteta i logika rada simulacije u najvećoj mogućoj meri slede zadatu organizaciju izvršenja zadataka i održavanja flote vazduhoplova. Scenariji u simulaciji eksploatacije flote vazduhoplova formirani su oko primenjenog koncepta održavanja. Referentni scenario predstavlja aktuelni koncept održavanja prema dostignutim resursima. Eksperimentalni scenario predstavlja upotrebu koncepta baziranog na primeni izabrane metode neperfektnog održavanja. Varijacijom normi održavanja u aktuelnom konceptu registrovane su promene statističkih pokazatelja Dostignute raspoloživosti i Dnevne ispravnosti. Koncept neperfektnog održavanja u eksperimentalnom scenariju uz ograničenja broja uzastopnih popravki potvrdio je razlike u promeni vrednosti statističkih parametara u odnosu na referentni scenario.

Ključne reči: raspoloživost, pouzdanost, neperfektno održavanje, vazduhoplov, ispravnost, simulacioni model.

Naučna oblast: Saobraćajno inženjerstvo

Uža naučna oblast: Vazduhoplovna prevozna sredstva

# DEVELOPMENT OF MAINTENANCE MODEL CHOICE METHOD IN FUNCTION OF INCREASED AIRCRAFT FLEET AVAILABILITY

## Abstract

The subject of doctoral dissertation research is the choice of a of imperfect maintenance model that can be applied to maintaining the aircraft fleet within the current maintenance organization based on parameters that are being monitored during exploitation. An overview of the offered maintenance models and classifications according to maintenance policies was used to select models that for the input parameters of availability take the norms that accompany the maintenance of the aircraft fleet. Based on the proposed logical decision diagram, the problem is solved by selecting a concrete model of imperfect maintenance. Using the chosen method of imperfect maintenance on the numerical model, the values for the intervals between preventive maintenance and the maximum number of consecutive corrective corrections for each of the subsystems were obtained. The application of the recommended norms on the numerical model gave a difference in the current and realized availability for each of the subsystems.

A simulation model of the G-4 fleet exploitation process for a characteristic task in the training purpose was developed. The layout of the entities and the simulation work logic are as closely as possible to the assigned organization of tasks and maintenance of the fleet of aircraft. Scenarios in the simulations of the exploitation of the fleet of aircraft were formed around the applied maintenance concept. The reference scenario represents the current maintenance concept (hard time). The experimental scenario represents the use of a concept based on the application of the chosen method of imperfect maintenance. By varying the different parameters in the current concept, changes have been registered through the indicators of Availability and Daily correctness. The concept of imperfect maintenance in the experimental scenario with the limit of the number of consecutive corrections confirmed the differences in the movement of the values of the statistical parameters relative to the reference one.

Key words: availability, reliability, imperfect maintenance, aviation, correctness, simulation model.

Scientific field: Transportation engineering

Scientific subfield: Aircraft

## Sadržaj:

1. Uvodna razmatranja obrazloženje odabrane teme; definisanje ciljeva i značaja istraživanja; formulacija problema .....	9
1.1 Pouzdanost, kvalitet i bezbednost.....	9
1.2 Predmet i definisanje problema rada.....	13
1.3 Naučni cilj rada.....	16
2. Koncept tehničke efektivnosti sistema.....	18
2.1 Efektivnost sistema .....	18
2.2 Parametri efektivnosti .....	18
2.2.1 Glavni parametri .....	18
2.3 Ostali koncepti efektivnosti sistema i njihovi parametri.....	20
2.4 Parametri efektivnosti sistema i vremenske kategorije.....	21
2.4.1 Parametri efektivnosti sistema.....	21
2.4.2 Definicije vremena sistema .....	26
2.5 Primena koncepta efektivnosti u vojsci.....	29
3. Hronološki pregled razvoja modela neperfektnog održavanja i pokušaja praktične primene zabeležene u literaturi.....	30
3.1 Osnovni koncept neperfektnog održavanja .....	30
3.2 Metode modelovanja neperfektnog održavanja.....	34
3.2.1 Metoda modelovanja 1 (p,q) pravilo - (p,q) Rule.....	34
3.2.2 Metoda modelovanja 2 (p(t), q(t)) pravilo – (p(t), q(t)) Rule.....	38
3.2.3 Metoda modelovanja 3, Faktor poboljšanja - Improvement Factor Method.....	40
3.2.4 Metoda modelovanja 4 Metoda virtuelne starosti - Virtual Age Method .....	46
3.2.5 Metoda modelovanja 5 Šok Model- Shock Model.....	48
3.2.6 Metoda modelovanja 6 Proces Kvazi-obnove – Quasi-renewal Process.....	51
3.2.7 Metoda modelovanja 7 Višestruko (p,q) Pravilo - Multiple (p,q) Rule.....	62
3.2.8 Ostale metode .....	62
3.3 Klasifikacija modela neperfektnog održavanja prema konceptima (politikama) održavanja .....	63
3.3.1 Potreba za klasifikovanjem metoda neperfektnog održavanja .....	63
3.3.2 Vremenski zavisno preventivno održavanje (Age-dependant PM Policy) .....	64
3.3.3 Periodično preventivno održavanje - (Periodic PM Policy).....	66
3.3.4 Intenzitet otkaza (Failure Limit Policy) .....	67
3.3.5 Sekvencijalno PM (Sequential PM Policy).....	70
3.3.6 Politike ograničenja popravki (Repair Limit Policy).....	72

3.3.7	Politike brojanja popravki i referentnog vremena (Repair Number Counting and Reference Time Policy).....	73
3.4	Multikomponentni sistemi.....	75
3.4.1	Razvoj modela održavanja multikomponentnih sistema .....	75
3.4.2	Grupne politike održavanja .....	76
3.4.3	Oportunističke politike održavanja.....	77
3.5	Zavisnosti (dependence).....	77
4.	Razvoj metodologije za primenu modela neperfektnog održavanja.....	81
4.1	Produženje veka upotrebe vazduhoplova .....	81
4.2	Definisanje drugog stepena održavanja kroz kategorije neperfektnog održavanja ..	87
4.2.1	Analiza koncepta (politika) održavanja flote dozvučnih borbenih aviona.....	87
4.2.2	Nivoi održavanja vazduhoplova .....	94
4.2.3	Analiza postojećeg stanja .....	97
4.2.4	Predlog rešenja .....	100
5.	Studija slučaja utvrđivanja pouzdanosti i održavanja flote školskih aviona G-4 u periodu nakon produženja veka upotrebe .....	107
5.1	Potreba za utvrđivanjem pouzdanosti flote aviona.....	107
5.2	Metodologija.....	107
5.2.1	Osnovne postavke.....	108
5.2.2	Definisanje zadatka školskog aviona i radnog okruženja .....	108
5.2.3	Definisanje sistema i podsistema na vazduhoplovu .....	110
5.2.4	Identifikacija izvora podataka o otkazima .....	111
5.2.5	Osnovna pravila i pretpostavke .....	111
5.2.6	Analiza podataka .....	113
5.2.7	Pogodnost raspodele .....	116
5.2.8	Procene pouzdanosti .....	117
6.	Numerički primer primene modela neperfektnog održavanja i neperfektnog preventivnog održavanja.....	119
6.1	Polazne osnove .....	119
6.2	Numerički primer neperfektnog CM i neperfektnog PM.....	119
6.3	Diskusija.....	122
6.4	Validacija.....	123
7.	Razvoj simulacionog modela procesa eksploatacije flote aviona G-4 za karakteristični zadatak u školskoj nameni, sa primenjenim modelom neperfektnog održavanja .....	124
7.1	Koncept simulacionog modela .....	124
7.2	Raspored modula i logika funkcionisanja modela.....	130



8. Analiza i diskusija dobijenih rezultata i poređenje sa rezultatima u referentnoj literaturi	136
8.1 Određivanje potrebnog broja ponavljanja osnovnog modela.....	136
8.2 Definisane različite scenarije upotrebe u simulacionom modelu.....	141
8.2.1 Koncept održavanja kao osnovna scenarija u simulacionom modelu .....	141
8.2.2 Scenario koncepta održavanja prema dostignutim resursima- aktuelni koncept	141
8.2.3 Scenario koncepta neperfektnog održavanja (teoretski koncept).....	144
8.2.4 Poređenje dva scenarija.....	148
8.3 Analiza osetljivosti simulacionog modela.....	150
8.3.1 Programski dodatak za analizu osetljivosti .....	150
8.3.2 Analiza osetljivosti scenarija aktuelnog koncepta održavanja .....	151
8.3.3 Scenario koncepta neperfektnog održavanja.....	160
9. Zaključak .....	164
Literatura .....	168
Izjava o autorstvu .....	175
Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada .....	176
Izjava o korišćenju .....	177

## 1. Uvodna razmatranja obrazloženje odabrane teme; definisanje ciljeva i značaja istraživanja; formulacija problema

### 1.1 Pouzdanost, kvalitet i bezbednost

Iako je pouzdanost sastavna karakteristika i nerazdvojni deo svih sistema, odnosno uređaja koje čovek proizvodi, shvatanje ove osobine predmeta i njeno proučavanje započeto je tek u 20. veku. Najosnovnija definicija pouzdanosti glasi da je to sposobnost uređaja da izvršava svoju funkciju bez otkaza u toku nekog vremenskog perioda, ili u toku veka upotrebe.

Tek kada su počeli da se konstruišu složeni sistemi i proizvodi, tj. oni proizvodi koji u sebi sadrže veliki broj delova koji treba da obave svoju funkciju, shvatilo se da otkazi koji se javljaju u određenom sistemu imaju svoje određene zakonitosti i imaju veze sa pouzdanošću pojedinih delova, ali i sa načinom na koji su oni ukomponovani u celinu.

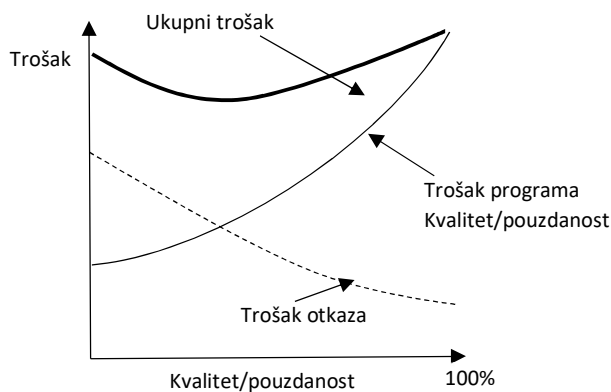
Ukoliko ljudi koji konstruišu uređaje ne bi pravili greške i ukoliko ne bi bilo nikakve varijacije u materijalima koji se koriste (dimenzije, osobine) ili ne bi bilo promena izazvanih uticajem okoline kojima je uređaj izložen, onda bi bilo relativno lako konstruisati uređaj koji je jednostavan za upotrebu i koji nije podložan otkazima.

Konstruisanje oružja je tokom istorije donosilo sa sobom određeni napredak u nauci i tehnologiji izrade pojedinih elemenata. Od njih se zahtevalo da sve duže rade izloženi jačem naprezanju pod uticajem različitih klimatskih faktora, a da pri tome budu jednostavni i da nemaju zastoja. Nije čudo što su proizvodi vojne industrije prvi dostigli takav stepen složenosti, da se na njih morala primeniti nova naučna disciplina, pouzdanost.

Kroz istoriju ratovanja najbolje se može se videti koliko je u vođenju oružane borbe bitno da naoružanje (kao i oprema) ima određeni stepen pouzdanosti i da nekad od relativno najprostijeg elementa zavisi uspeh čitave misije. Ovakvim sledom događaja došlo se do toga da se počeci pouzdanosti javljaju u vreme Drugog Svetskog Rata (Dr. Werhner von Braun i konstruisanje projektila V1). Nakon primene pouzdanosti u vojnoj industriji počela je primena i u civilnoj industriji, od najvećih sistema do kućnih aparata. Jedan od teoretičara praktičnog inženjerstva Patrik D.T O`Konor zastupa gledište da se kvalitetniji finalni proizvodi mogu dobiti samo uz veći napor uložen u obuku proizvodnog osoblja, ali i uz bolji nadzor i testiranje:

„U cilju stvaranja pouzdanih proizvoda je potrebno potrošiti trud i sredstva. Bolji finalni proizvodi su rezultat veće brige, većeg napora u obuci osoblja, upotreba boljih materijala i procesa, efikasnije testiranje, i korišćenje rezultata testiranja za poboljšanje dizajna (proizvoda i procesa).“ (O'Connor 2008)

U svakom slučaju i ovakav pristup, ima svoja ograničenja, tj. meru do koje je isplativo ulagati u kvalitet i pouzdanost tokom faze razvoja i proizvodnje da bi se kasnije smanjili troškovi tokom eksploatacije, nastali otkazima. Preko te granice svaki dodatni napor ne bi davao zadovoljavajuće efekte i proizvodio bi povećane ukupne troškove.



Sl. 1 Troškovi kvaliteta – tradicionalni pristup (O'Connor 2008)

Ako bi se pokušalo naći optimalno rešenje došlo bi se do situacije da za prevenciju otkaza postoji takozvana „cena kvaliteta“ to jest minimalni ukupni troškovi koji su zbir projektovanih (ili poznatih) troškova otkaza i troškova ulaganja u kvalitet. Posmatrajući problem na taj način, dostignuta optimalna pouzdanost bila bi ona krajnja granica preko koje se ne može ići (Sl. 1) praktično svaki dalji pokušaj unapređenja pouzdanosti bio bi obesmišljen.

Ovako posmatranje problema pouzdanosti naišlo je na osporavanja jer je optimalna tačka (optimalno rešenje) u suštini pojam koji uvek u sebi nosi određenu dozu neizvesnosti, a optimalni kvalitet koji je manji od perfektnog može predstavljati snažno sredstvo odvratanja protiv daljeg usavršavanja proizvoda.

Ako je u pitanju problematika konstrukcije naoružanja poznato je da je dugo godina na primer prihvaćena pouzdanost vođenih projektila bila 90% i ona se smatrala za optimalnu.

Napredak u oblasti prevencije otkaza i povećanja pouzdanosti nastao je posleratnom industrijskom revolucijom u Japanu. Upravo su japanske firme bile one koje su ulagale ogromna sredstva u testiranje tokom razvoja i u kontrolu same proizvodnje. Ulaganja u tom

segmentu dovela su do toga da su njihovi proizvodi u eksploataciji imali izuzetne i prepoznatljive karakteristike u odnosu na ostale. Reputacija (zaslužena) koji su njihovi proizvodi stekli svojom pouzdanošću, donela im je proboj na tržište i profit koji je višestruko bio veći od početnih ulaganja.

Moderan pristup problemu troškova kvaliteta nastao je tek kada je analiziran njihov koncept proizvodnje i kada su usvojena neka pravila koja se do tada nisu primenjivala. Prepoznato je da umesto posmatranja smanjenja troškova pojedinačnog otkaza treba posmatrati pouzdanost uređaja u toku celog veka eksploatacije ili da se u krajnjem slučaju posmatraju intenziteti otkaza tog uređaja. U slučaju tradicionalnog pristupa kvalitetu i troškovima pouzdanosti proizvoda smatrano je da ukupni troškovi otkaza imaju svoj minimum u određenoj tački za koje daju određenu pouzdanost. Nakon te tačke dalje ulaganje u program kvalitet/pouzdanost daje povećane ukupne troškove, i nije isplativo. U slučaju modernijeg pristupa prikazanom na slici Sl. 2 minimalni troškovi otkaza nisu u nekoj određenoj tački već u teoretskom minimumu gde se broj otkaza približava nuli.

Nedugo nakon uvođenja ovog modernog pristupa u praksi je potvrđena njegova vrednost upravo na primeru gorepomenute pouzdanosti projektila, koja je u izradi nakon toga povećana na 95%.<sup>1</sup>

Jedan od načina na koji se kvalitet ispoljava kod tehničkih sistema ogleda se kroz urođenu, inherentnu, pouzdanost. Inherentna pouzdanost (*Eng. Inherent Reliability*) zavisi od pouzdanosti samih elemenata od kojih je sistem sačinjen, ali i od strukture sistema i veze između elemenata, i

to je maksimalni nivo pouzdanosti koji jedan sistem može da ima. Osnovni preduslov za ispoljavanje urođene pouzdanosti je da se sistem koristi i održava samo pod tačno određenim uslovima, koje je propisao proizvođač tog sistema.

Pouzdanost koju sistem ispoljava u realnim uslovima eksploatacije je operativna pouzdanost (*Eng. Operational Reliability*), koja se registruje praćenjem stanja sistema ili njegovih komponenata. Ne računajući pojedinu opremu i sisteme za jednokratnu upotrebu, kao što su rakete i projektili, kod većine tehničkih sistema moguće je u toku eksploatacije uticati na operativnu pouzdanost koja samo u idealnom slučaju može biti jednaka urođenoj. Operativna

---

<sup>1</sup> Primer iz teorije Gađanja raketiranja i bombardovanja iz vazdušnog prostora: Prilikom proračuna verovatnoće pogađanja i uništenja cilja raketom vazduh-vazduh za koje se tvrdi da imaju pouzdanosti od 90 do 95%, razlika između potrebnog broja projektila za uništenja cilja sa pouzdanošću rakete 90 ili 95% je više nego očigledna.

pouzdanosti u sebi uključuje uticaje koje sredina ostvaruje na sistem tokom eksploatacije, koji često nisu potpuno isti kao oni koje je propisao proizvođač, ali i zavisi u mnogome od načina na koji se sistem održava. Operativna pouzdanost sistema se može zadržavati na visokom nivou tokom njihovog veka upotrebe, ako se na njima sprovodi potrebno održavanje.

Vazduhoplov je po svojoj konstrukciji sistem zahtevan i složen za upotrebu, obzirom na veliki broj različitih zasebnih sistema i delova unutar njega. Da bi jedan vazduhoplov izvršio svoj zadatak potrebno je da se izvrši mnogo radnji koje u sebi uključuju mnoštvo angažovanih komponenti. Neizvršenje neke od radnji ili otkaz neke komponente, može ali i ne mora ugroziti izvođenje zadatka vazduhoplova. Posebnu težinu imaju otkazi na vazduhoplovu koji se odnose na bezbednost i dovode do težih udesa ili nesreća jer izazivaju i velike troškove samog otkaza, ali i uklanjanja posledica otkaza (direktni i indirektni troškovi).

Za sisteme kao što su vazduhoplovi od izuzetne je važnosti da se otkazi ne dešavaju tokom izvođenja zadataka za koje su predviđeni, jer mogu izazvati katastrofalne posledice. Usled sve veće kompleksnosti samih vazduhoplova i rastućih troškova materijala i radne snage a da bi se odgovorilo na zahteve za povećanjem nivoa bezbednosti u vazdušnom saobraćaju razvijaju se tehnike održavanja koje su okrenute ka pouzdanosti (*Eng. reliability-centered maintenance*). Definicija ovakvog održavanja bila bi da je to održavanje bazirano na karakteristikama pouzdanosti posmatranog tehničkog sistema, uvažavajući ekonomski aspekt, uz uslov da bezbednost ne bude narušena.

Zanimljiva je teorija nazvana „Pravilo deset puta“ koja posebno može biti tačna u slučaju avijacije. Po toj teoriji cena nastanka otkaza se množi faktorom 10 (deset) za svaku narednu fazu životnog ciklusa jednog proizvoda u kojoj se otkaz desi. Naime, ako je cena otklanjanja uzroka otkaza koje se detektuje u fazi projektovanja 100 dolara.

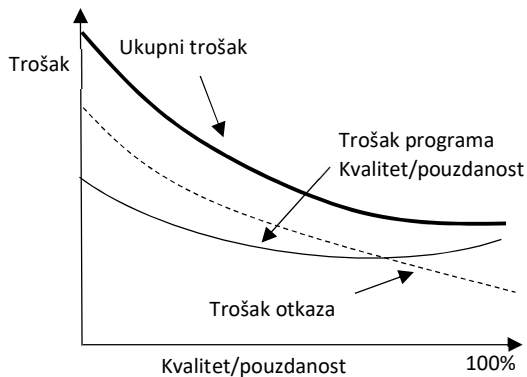
Isti taj otkaz ako se detektuje u fazi testiranja prototipa može koštati 1000 dolara, u fazi proizvodnje 10000 dolara, a u upotrebi i 100000 dolara.

*„Nekoliko slučajeva pokazuju da ovaj je ovaj faktor u stvari i mali, i da konkretni faktori prema nekim izveštajima mogu iznositi i od 40 do 100, a nekad i više. Posebno u slučajevima kada otkazi u upotrebi imaju ozbiljne posledice koje rezultuju povlačenjem proizvoda sa tržišta ili izazivanjem povreda ili smrti“ (O'Connor 2008)<sup>2</sup>*

---

<sup>2</sup> Ovo je posebno zadnjih godina izraženo na primeru auto industrije. Toyota je 2014. godine povukla 6,5 miliona automobila sa tržišta.

Ukoliko je vazduhoplov pouzdaniji to se manje otkaza javlja na njemu tokom veka upotrebe i manje vremena je neupotrebljiv, mada vreme koje vazduhoplov provede u neupotrebljivom stanju, nije u potpunosti vezano samo za pouzdanost, već je u pitanju i održavanje vazduhoplova, koje je opet vezano i za organizaciju tog posla i njegovo trajanje. Kada vazduhoplov ne bi imao otkaza, ne bi zahtevao ni održavanje i njegova dostupnost bi bila 100%, ali to u praksi nije moguće te je i dostupnost vazduhoplova između 100% i 0 %.



Sl. 2 Troškovi kvaliteta – moderan pristup (O'Connor 2008)

## 1.2 Predmet i definisanje problema rada

Predmet razmatranja ovog rada je funkcionisanje flote školskih vazduhoplova G-4 koji su u upotrebi već skoro tri decenije. Posebno je bitno napomenuti da je cela flota vazduhoplova prošla proces produženja veka upotrebe pri čemu ni jedan od sistema na vazduhoplovu nije podvrgnut modifikacijama. Uzimajući u obzir tu činjenicu jasno je da se inherentna pouzdanost njegovih komponenti ne može povećati. Operativna pouzdanost kao što se vidi iz prethodnog pasusa podrazumeva uticaje okoline, načine korišćenja ali i održavanje. Promena modela održavanja je jedino na čega je u ovom trenutku moguće direktno uticati i tu svrhu biće ispitana primena različitih modela. Biće ispitano da li je jedan ili više od njih moguće primeniti na ovaj konkretni tip vazduhoplova.

Ako se pogleda koje sve zadatke vazduhoplov može da izvršava bilo u civilnoj bilo u vojnoj upotrebi videće se da je za različite zadatke potrebno da pojedini delovi opreme funkcionišu u određenom trenutku da bi zadatak bio izvršen. Moguće je da pojedini vazduhoplovi i ne mogu da izvrše određeni zadatak za koji su projektovani. Upravo verovatnoća da će neki vazduhoplov izvršiti dati zadatak predstavlja pouzdanost zadataka vazduhoplova. Ukoliko vazduhoplov nije u mogućnosti da izvrši određeni zadatak ili to čini sa jako malom pouzdanošću postavlja se pitanje da li je dobro konstruisan ili je njegova namena pogrešno definisana.

Između karakteristika pouzdanosti i održavanja, postoji uzročno posledična veza koja se može prikazati na sledeći način: Održavanjem se može uticati na operativnu pouzdanost; Pouzdanost i pogodnost održavanja, utiču na planiranje održavanja, a sve zajedno utiče na raspoloživost posmatranog vazduhoplova. **Jedan od problema u navedenim odnosima koji se može javiti u praksi, vezan je za produženje veka upotrebe sistema koje je motivisano operativnim i/ili ekonomskim razlozima, a da pri tome nisu u dovoljnoj meri sagledani svi aspekti pouzdanosti sistema i procesa održavanja koji opravdavaju takvu odluku.**

*„Raspoloživost je možda čak i važniji parametar od pouzdanosti, za sisteme koji se održavaju, i definiše se kao verovatnoća da će sistem biti ispravan u bilo kom trenutku vremena ako se koristi pod odgovarajućim uslovima.“ (Misra 2008)*

Vreme je od velike važnosti tokom procesa eksploatacije sistema. Vreme za koje sistem nije raspoloživ ili vreme zastoja (*Eng. downtime*) je upravo vreme za koje se obavlja održavanje i to je ukupno vreme u kojem sistem nije u prihvatljivom operativnom stanju. Nasuprot njemu operativno vreme ili vreme *rada* (*Eng. operating time*) je vreme u toku kojeg sistem funkcioniše zadovoljavajuće. Slobodno vreme sistema (*Eng. free time*) je vreme u kojem se sistem ne koristi. Ono može, ali i ne mora biti vreme zastoja, i zavisi od toga u kakvom je stanju sistem bio pre toga.

Održavanje kompleksnih sistema, kao što su vazduhoplovi, nije uvek samo reagovanje na otkaz pojedinih delova koji se menjaju i rutinsko raspoređivanje preventivnih održavanja, i zato nije jednostavno. Umesto toga, operativni uslovi mogu zahtevati da se pojedini zadaci održavanja odlože ili ubrzaju, a korišćenje prognostičkih alata pouzdanosti omogućava praćenje i primenu opcionog zamenjivanja opreme.

Ocena i predviđanje pouzdanosti mogu da se zasnivaju na podacima o proteklim događajima, ali sve dotle dok postoji sigurnost da se određeni uslovi, koji bi mogli da budu od uticaja na buduće ponašanje sistema, nisu značajno promenili. Ipak, kako je inženjering usko povezan sa promenama kako u samoj konstrukciji, tako i u određenim procesima (npr. održavanja) i u načinu korišćenja, oslanjanje samo na podatke o proteklim događajima ne daje mogućnost da se promene uvedu u smislu poboljšanja pouzdanosti. Ocena pouzdanosti podrazumeva različite metode koje, moraju da se koriste uz razumevanje svih unapred uvedenih ograničenja, ali koje mogu da pomognu da se razume istorija otkaza i reše problemi pouzdanosti tehničkih sistema. Povrh toga, *„predviđanje pouzdanosti nosi u sebi veliku dozu nesigurnosti koja je povezana sa*

*pokušajima da se oceni i predvidi jedno svojstvo tehničkih sistema koje u svojoj suštini i nije determinističko“ (O' Connor i Kleyner 2012) . Zbog toga, primena matematičkog modelovanja u oceni pouzdanosti dobila je novu dimenziju uvođenjem računara i softvera u oblast analize podataka o pouzdanosti, i većina poznatih metoda dopunjena je ili zamenjena softverskim rešenjima.*

Uslovi korišćenja kao bitan činilac pouzdanosti navode se u definiciji raspoloživosti, a vezani su i za pojam efektivnosti sistema. Za sisteme koji nisu jednokratnog dejstva, odnosno za sisteme koji se održavaju, „*efektivnost je verovatnoća da će sistem zadovoljiti zahteve za korišćenjem u okviru određenog vremena kada se koristi pod odgovarajućim uslovima*“ (O' Connor 2008). Efektivnost je rezultat konstruktivnih karakteristika i održavanja, ali i načina na koji operator sistema postupa sa sistemom.

Uticao na efektivnost kroz održavanje imaju i logistički sistem i administracija koja kroz personalnu, zakonsku i fiskalnu regulativu doprinosi donošenju odluka. Kao rezultat potrebe za unapređenjem i realnijim praćenjem pouzdanosti i pojavili su se različiti modeli održavanja. Po tvrdnjama autora (Wang i Pham 2006) većina literature razmatra održavanje na taj način da se nakon korektivnog održavanja (*Eng. Corrective maintenance CM*) ili preventivnog održavanja (*Eng. preventive maintenance PM*) sistem vraća u stanje koje se definiše „kao nov“ (*Eng. „as good as new“*) to jest održavanje je perfektno ili u stanje „kao i prethodno“ (*Eng. „as bad as old“*) to jest održavanje je minimalno. U samoj praksi perfektno održavanje je zaista izvodljivo kod nekih sistema gde je samo jedna strukturalna komponenta u pitanju. Sa druge strane, minimalne popravke su moguće tamo gde je sistem sačinjen od mnogo nedominantnih komponenti koje se mogu zameniti novim komponentama istog tipa.

Umesto toga, dosadašnja praksa nalaže da rezultati održavanja nisu u ovim ekstremima već su često negde prikriveni u sredini. Zbog toga se perfektno i minimalno održavanje, kao takva, retko realizuju u praksi. Neperfektno održavanje (*Eng. imperfect maintenance*) pruža novu mogućnost za modelovanje održavanja na realniji način, i predstavlja korak dalje u teoriji pouzdanosti i održavanja. Metoda neperfektnog održavanja ima više modela koji su klasifikovani od strane autora (Wang i Pham 2006). Iz odgovarajućih tehničkih izveštaja i ostale literature izdvojili su sedam osnovnih modela. Neki od autora ovih metoda su (Nakagawa i Yasui 1987); (Wang i Pham 2006); (Brown i Proschan 1983); (Block, Borges i Savits 1985) i niz drugih autora. Da bi ovi modeli neprefektnog održavanja mogli da daju rezultate za konkretan tehnički sistem potrebno je poznavati:

- ✓ parametre datog sistema (veza elemenata unutar sistema, intenziteti otkaza, itd.) i,



- ✓ karakteristike sistema održavanja i
- ✓ odlučiti se koje zadatke održavanja treba optimizovati, korektivne ili preventivne ili oba.

Što se tiče samog modela potrebno doneti odluku:

- ✓ koji koncept održavanja će biti primenjen, i
- ✓ koji je kriterijum optimizacije (da li su to samo troškovi ili je to i raspoloživost, itd..).

Vidi se iz prethodno izloženog da je polazna osnova primene metoda neperfeknog održavanja istorija otkaza jednog sistema, koja je rezultat urođene pouzdanosti, ali i organizacije procesa održavanja. Nadogradnju koja omogućava uvođenje promena pružaju sami modeli neperfeknog održavanja sa svojim varijacijama u vidu primenjenih koncepata održavanja i izborom kriterijuma za optimizaciju. Dalju razradu dobijenih rezultata u smislu izrade prognostičkih proračuna pouzdanosti za naredni period upotrebe moguće je izvesti uz upotrebu računarskih simulacija. Praktična upotreba modela pouzdanosti na kojoj insistiraju pojedini autori (O' Connor i Kleyner 2012) ili veće korišćenje raspoloživosti kao kriterijuma umesto troškova ili barem u kombinaciji (Wang i Pham 2006) na primerima u literaturi nije demonstrirana u domenu vazduhoplovstva. Sa svojim pristupom ka održavanju zasnovanom na pouzdanosti (*Eng. reliability centered maintenance*), koje zastupaju od ranih 1960- ih i avio kompanije i proizvođači vazduhoplova ali i vojna avijacija, problemi iz domena vazduhoplovstva pružaju mogućnost primene pojedinih modela neperfeknog održavanja.

### 1.3 Naučni cilj rada

U održavanju flote školskih aviona G-4 nije došlo do promena što se tiče organizacije održavanja. Jedina promena koja je nastupila u tehnologiji preventivnog održavanja je 2011. godine kada je počela primena održavanja prema stanju diskretnim praćenjem stanja (*Eng. On Condition Maintenance*) i to za sisteme kao što su avionska oprema i instrumenti i radio-radarska oprema za razliku od ranije tehnologije koja se samo bazirala na održavanju prema fiksnom resursu (*Eng. Hard Time Maintenance*). Primena održavanja prema stanju praćenjem parametara, tj. kontinualno praćenje stanja (*Eng. Condition monitoring*), nije moguća, obzirom da na trenutnoj verziji aviona G-4 ne postoje senzori koji bi prikupljali parametre čije bi podatke bilo moguće analizirati i tako sprovesti održavanje. Još jedan bitan činilac je vezan za trenutno stanje održavanja, a to je učestala upotreba kanibalizacije (skidanje ispravnog dela sa jednog aviona i ugradnja na drugi avion) kao instrumenta održavanja. Pored toga što se ugrađuje deo koji nema ujednačeno trošenje resursa sa ostatkom sistema aviona na koji se

ugrađuje i može da poremeti ravnotežu trošenja ostatka resursa ostalih komponenti, kanibalizacija predstavlja i dodatni trošak prilikom održavanja.

Kanibalizacija zahteva angažovanje dodatnih radnih sati ljudstva na skidanju ispravnog dela sa jednog aviona pa zatim skidanje neispravnog dela sa drugog aviona, postavljanje ispravnog dela na taj avion i na kraju vraćanje neispravnog dela na prvi avion. Na osnovu svega prethodno navedenog javlja se potreba definisanja novih normi održavanja u vidu promene vremena između preventivnih pregleda, ali i broja uzastopnih korektivnih akcija održavanja u periodu između dva preventivna održavanja, odnosno treba odrediti koji je to broj korektivnih akcija održavanja nakon kojeg treba uraditi neki vid "perfektnije" popravke (bilo da je reč o zameni kompletnog sklopa ili preventivnog pregleda istog). Predmet istraživanja u ovom radu biće postupak izbora konkretnog modela neperfektnog održavanja koji je moguće primeniti na održavanje flote školskih aviona G4 u okviru trenutne organizacije održavanja a na osnovu parametara koji se prate u toku eksploatacije.

Sprovođenjem istraživanja ostvarilo bi se sledeće:

- ✓ Praćenje pouzdanosti vazduhoplova i njegovih sistema;
- ✓ Uvođenje metodologije za izbor modela neperfektnog održavanja i shodno tome primena izabranog modela u proračun normi održavanja u drugom stepenu;
- ✓ Predlog normi i postupaka za dostizanje zadate raspoloživosti flote vazduhoplova;
- ✓ Predlog za smanjenje troškova održavanja.

Cilj predloženog istraživanja jeste izrada metodologije za primenu metoda neperfektnog održavanja na konkretni tehnički sistem, kao što je flota školskih aviona G-4. Takođe, cilj predloženog istraživanja je definisanje novih normi održavanja za sisteme aviona G-4 primenom jednog od modela neperfektnog održavanja kao i utvrđivanje njihovog uticaja na promene parametara efektivnosti aviona G-4 pri izvršenju karakterističnog zadatka u školskoj nameni upotrebom računarske simulacije.

## 2. Koncept tehničke efektivnosti sistema

### 2.1 Efektivnost sistema

*„Efektivnost sistema se odnosi na sposobnost sistema da obavi funkciju za koju je namenjen, uključujući tu frekvenciju sa kojom se dešavaju otkazi, teškoće koje se javljaju u toku popravki i održavanja kao i podobnost sistema da obavi funkciju kada radi u skladu sa konstrukcijskom koncepcijom.“ (Vujanović 1987)*

Opšteprihvaćeni parametri efektivnosti sistema su pouzdanost, raspoloživost i učinak, što treba iskoristiti kao osnovu za opisivanje i upoređivanje koncepta efektivnosti sistema koji su danas u upotrebi.

Jedan od tri opšteprihvaćena koncepta efektivnosti sistema po kome se razmatra efektivnost definiše istu kao: “...verovatnoću da će sistem uspešno zadovoljiti operativni zahtev u toku datog vremena kada radi pod specificiranim uslovima“. (Blanchard and Lowery 1969)

Ako malo pažljivije pogledamo prvu definiciju možemo primetiti da ona označava sledeće:

- da se efektivnost sistema meri preko verovatnoće,
- da je efektivnost sistema povezana sa operativnim učinkom,
- da je efektivnost sistema funkcija vremena,
- da je efektivnost sistema funkcija spoljne sredine ili uslova pod kojima se sistem koristi,
- da efektivnost sistema može da se menja u zavisnosti od zadatka koji treba obaviti.

(Vujanović 1987)

Što se tiče propisanih uslova, oni su posebno naglašeni zato što efektivnost sistema mora da se posmatra u kontekstu zahteva koji se postavljaju pred sistem, jer su otkazi i uslovi korišćenja povezani. Povećanje naprežanja pri korišćenju uglavnom izaziva češće otkaze.

### 2.2 Parametri efektivnosti

#### 2.2.1 Glavni parametri

Po konceptu efektivnosti sistema koji će biti korišćen u ovom radu postoje tri parametra kojima je definisana efektivnost sistema:

- ✓ **Operativna gotovost (Operational Readiness)**
- ✓ **Pouzdanost zadatka (Mission Reliability)**
- ✓ **Funkcionalana podobnost (Design Adequacy)**

Na primeru leta jednog vazduhoplova ovi parametri bi se mogli ilustrovati na sledeći način:

- ✓ Operativna gotovost predstavlja verovatnoću da će vazduhoplov poleteti u datom trenutku. U literaturi se operativna gotovost preciznije definiše i kao: " broj neuspelih poletanja 15 min nakon predviđenog vremena poletanja na svakih 100 poletanja" (Huges, Chaerpentier i Cabarbaye 2002)
- ✓ Pouzdanost zadatka bi predstavljala verovatnoću da će avion stići na konačnu destinaciju (ako je u pitanju samo prelet vazduhoplova od tačke A do tačke B)
- ✓ Funkcionalna podobnost bi predstavljala verovatnoću da će vazduhoplov izvršiti misiju koja je pred njega postavljena.

Prema tome, efektivnost sistema je proizvod tri verovatnoće:

$$P_{Se} = P_{or} \times P_{mr} \times P_{da} \quad (1)$$

Gde je:

$P_{se}$ - efektivnost sistema (system effectiveness).

$P_{or}$ - verovatnoća operativne gotovosti (operational reliability).

$P_{mr}$ - verovatnoća pouzdanosti zadatka (mission reliability).

$P_{da}$ - verovatnoća funkcionalne podobnosti. (design adequacy)

Ova jednačina pokazuje da je efektivnost sistema jednaka proizvodu tri verovatnoće:

- 1) verovatnoće da sistem zadovoljavajuće radi ili da je spreman za rad kad je to potrebno
- 2) verovatnoće da će sistem nastaviti da zadovoljavajuće radi u specificiranom periodu trajanja zadatka
- 3) verovatnoće da će sistem uspešno ispuniti zadatak pod uslovom da radi unutar propisanih konstrukcijskih specifikacija;

iako ovo ne može u potpunosti biti uvaženo, obzirom da je množenje verovatnoća dozvoljeno samo u slučaju kada se one odnose na međusobno nezavisne događaje a ovde to nije u potpunosti zastupljeno.

### 2.3 Ostali koncepti efektivnosti sistema i njihovi parametri

U ovom radu oslonac će biti na prikaz efektivnosti sistema pomoću prethodno definisanih parametara i kriterijuma, ali valja napomenuti da postoje još najmanje dva koncepta efektivnosti sistema.

Po prvom od ova dva koncepta, efektivnost se definiše kao: "stepen do kojeg se od sistema može očekivati da ostvari skup specifičnih zahteva zadatka i ona je u funkciji od raspoloživosti, izdržljivosti i sposobnosti". (Vujanović 1987)

Može se napisati da je:

$$E = A \times D \times C \quad (2)$$

Gde je:

E- efektivnost sistema

A- raspoloživost, stepen operativnosti sistema na početku izvršenja zadatka, pri čemu se izvršenje zadatka može tražiti u bilo kom trenutku vremena.

D- izdržljivost, mera stanja operativnosti sistema u bilo kom trenutku vremena u toku izvršenja zadatka, pri čemu su uključeni efekti pouzdanosti i održavanja, pri datom stanju sistema na početku zadatka (raspoloživosti).

C- sposobnost, mera mogućnosti sistema da ostvari ciljeve zadatka, pri čemu je dato stanje sistema u toku izvršenja zadatka (izdržljivost).

Drugi koncept efektivnost sistema definiše kao: "stepen do kojeg se može očekivati da će sistem obaviti dodeljeni zadatak unutar specificiranog vremenskog okvira pod formulisanim uslovima okoline". (Vujanović 1987) Ovako definisana efektivnost sistema obuhvata tri parametra- učinak, raspoloživost i korišćenje, može se izraziti kao:

$$E_s = P \times A \times U \quad (3)$$

Es- indeks efektivnosti sistema;

P- indeks učinka sistema, numerički indeks koji pokazuje sposobnost sistema, pod pretpostavkom 100% raspoloživosti i korišćenja sposobnosti učinka u stvarnom radu;

A- indeks raspoloživosti sistema do kojeg je sistem spreman i sposoban da potpuno izvrši dodeljeni zadatak;

U- indeks korišćenja sistema, numerički indeks stepena do kojeg se sposobnost učinka datog sistema koristi u toku zadatka.

Nije bitno koji je koncept efektivnosti sistema u pitanju, u sva tri je jedno zajedničko, da je potrebno dati odgovor na tri pitanja:

- 1) Da li je sistem spreman za izvršenje svoje funkcije, kada se to od njega zahteva?
- 2) Da li će sistem nastaviti da funkcioniše u toku specificiranog vremena trajanja zadatka, ukoliko je odgovor na prvo pitanje pozitivan?
- 3) Da li će sistem ispuniti željena ciljeve zadatka, pod uslovom da je odgovor na prva dva pitanja pozitivan?

U konceptu efektivnosti o kojem će biti reči u ovome radu i koji je definisan na početku ovog poglavlja, odgovor na prvo pitanje daje *operativna gotovost*, na drugo *pouzdanost zadatka* a na treće *funkcionalna podobnost*.

Svaki od tri parametra zavisi od zahteva u pogledu korišćenja, od stanja sistema i od njegovih performansi.

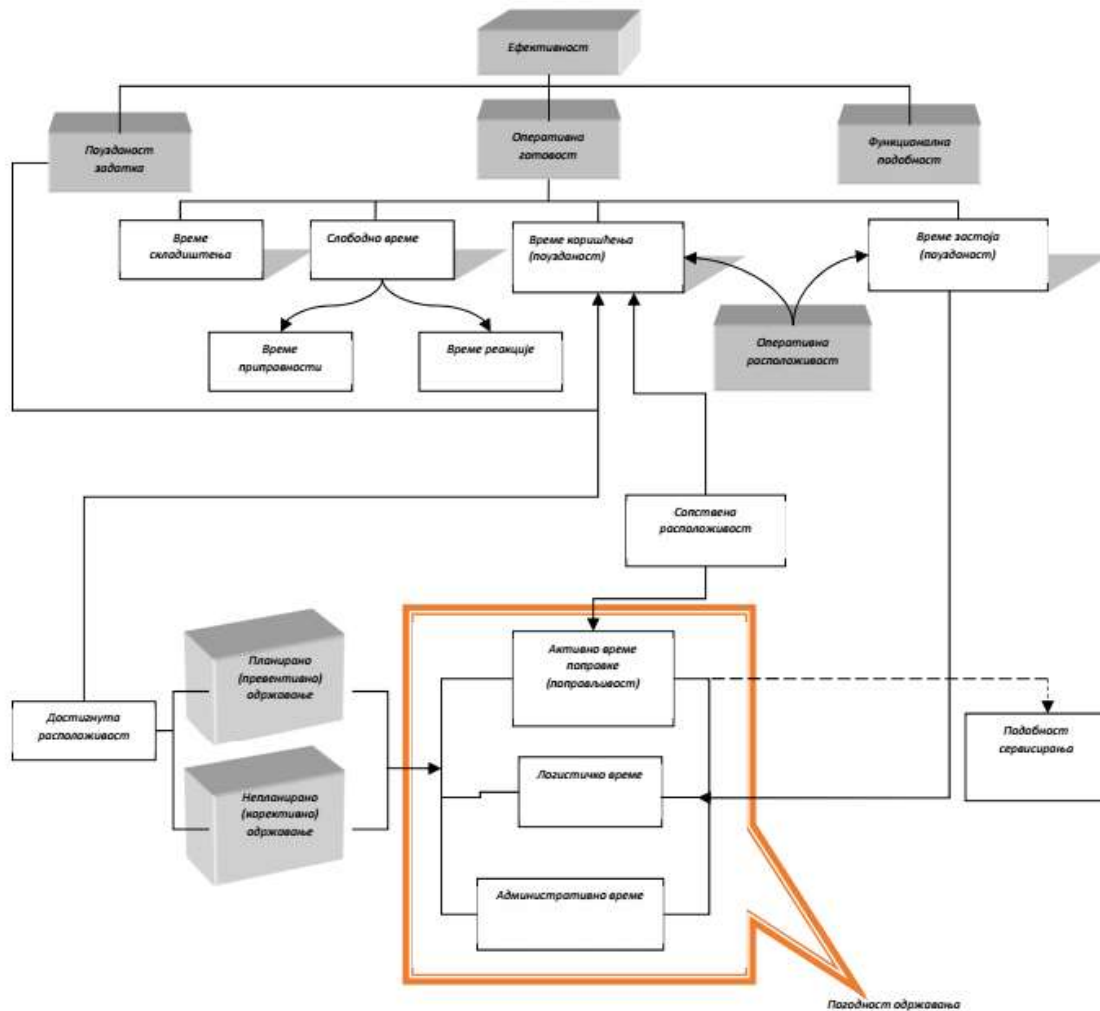
## 2.4 Parametri efektivnosti sistema i vremenske kategorije

### 2.4.1 Parametri efektivnosti sistema

„Efektivnost sistema je verovatnoća da će sistem zadovoljiti operativni zahtev u toku određenog vremena kada radi pod specificiranim uslovima.“ (Misra 2008) Pojam efektivnosti obuhvata različite parametre i vremenske kategorije i njihovi međusobni odnosi su predstavljeni na slici Sl. 3.

Druga definicija je: „Efektivnost sistema je verovatnoća da će sistem uspešno izvršiti svoju namenu kada se to od njega zahteva i to pod određenim uslovima“ (Misra 2008)

Glavna razlika između prethodne dve definicije je ta što je druga definicija uglavnom za sisteme jednokratnog dejstva, odnosno, za sisteme koji se ne održavaju (kao što su projektili, itd.).



Sl. 3 Parametri sistema i vremenske kategorije

Takođe, bitno je uočiti da se u prvom konceptu efektivnosti sistema vreme razmatra sa dva aspekta. Jedno vreme predstavlja trenutak vremena u kojem želimo da koristimo sistem i da li je u tom trenutku sistem operativan (spreman za upotrebu) ili nije. Drugo vreme je kontinualni period vremena, koji počinje prethodno navedenim trenutkom vremena, u kojem želimo da sistem kontinualno radi (vreme rada). Na prvi pogled uočava se razlika kod ova dva sistema. Za sisteme jednokratnog dejstva vreme je od sekundarnog značaja, dok je za ostale sisteme od prvorazrednog značaja. Ako malo bolje pogledamo ove dve definicije vidimo da je u prvoj definiciji (višekratnog dejstva) dozvoljena mogućnost popravki u slučaju otkaza, kako na početku vremenskog perioda (ako je sistem bio neispravan) tako i u toku perioda korišćenja

(ako se dogodi posle uspešnog starta). U slučaju druge definicije, održavanje se ne podrazumeva.

Iz prethodnih definicija može se definisati i otkaz sistema:

- 1) **Ako je sistem neupotrebljiv u momentu kada se zahteva njegovo korišćenje.**
- 2) **Ako je upotrebljiv kada se zahteva njegovo korišćenje, ali ne ispuni uspešno planirani zadatak.**

Izraz specificirani uslovi ukazuje na to da se mora obratiti pažnja na zahteve pred koje se stavlja sistem, zato što su ti uslovi u korelaciji sa otkazima. Ovo dalje implicira da je moguće da se sa povećanjem opterećenja sistema javi povećanje frekvencije otkaza.

Preciznije definisani, parametri efektivnosti sistema sada su:

Prvi od njih je **Pouzdanost zadataka** i predstavlja verovatnoću da će sistem kada se koristi pod specificiranim uslovima, funkcionisati u režimu rada za koji je konstruisan, u toku trajanja zadatka, pod uslovom da je funkcionisao u tom režimu na početku zadataka. Prema tome, pouzdanost zadatka određuje verovatnoću da sistem neće otkazati u toku vremena trajanja zadatka, pod uslovom da je funkcionisao na početku. (Misra 2008)

**Operativna gotovost** sistema je verovatnoća da sistem, kada se koristi pod specificiranim uslovima, zadovoljavajuće funkcioniše u bilo kom trenutku vremena ili je spreman za upotrebu kada se to zahteva. Znači, osnova za određivanje operativne gotovosti je ukupno vreme koje obuhvata vreme skladištenja, slobodno vreme, vreme korišćenja i vreme zastoja. Za razliku od efektivnosti sistema koji razmatra verovatnoću u toku vremenskog intervala, operativna gotovost razmatra verovatnoću u trenutku vremena. Osim toga dok efektivnost sistema uzima u obzir i ugrađenu sposobnost sistema (preciznost snagu, itd), operativna gotovost razmatra samo spremnost sistema za određeni zadatak u datom trenutku vremena. (Misra 2008) Prema tome može se napisati da je:

$$\text{Operativna gotovost} = \frac{t_k + t_{nk}}{t_k + t_{nk} + t_z} \quad (4)$$

Gde su:

$t_k$  –vreme korišćenja

$t_{nk}$ -vreme kada se sistem ne koristi

$t_z$ -vreme zastoja



**Funkcionalna podobnost** sistema je verovatnoća da će sistem uspešno da izvrši svoj zadatak pod uslovom da radi unutar svojih konstrukcijskih mogućnosti. Koliko je ovaj parametar važan za efektivnost sistema u celini možemo sagledati na konkretnom primeru jednog ne tako davnog događaja upotrebe specijalnih jedinica u akcijama oslobađanja talaca. Nakon zarobljavanja američkih građana u Iranu sedamdesetih godina, oružane snage SAD su isplanirale akciju oslobađanja talaca pod nazivom „Čarlijevi Anđeli“ gde je predviđeno da se pripadnici američkih specijalnih snaga spuste avionima tipa C-130 „Herkules“ u pustinju i nakon toga helikopterima prebace do mesta gde bi izveli akciju. Međutim, helikopteri koji su bili predviđeni za prevoz specijalaca nisu bili opremljeni filterima za pesak tako da su doživeli otkaze, sama akcija je dakle propala i pre samog početka. Iz ovoga možemo da vidimo zašto je važno da se pre puštanja u eksploataciju ispitaju svi predviđeni režimi rada određenog sistema, jer ukoliko sistem ne radi zadovoljavajuće u većini svojih režima potrebno je da mu se promeni namena ili sama konstrukcija. U nekom od narednih poglavlja ćemo za potrebe ovog rada definisati jedan zadatak karakterističan zadatak za školsku avijaciju da bi smo ispitali da li je avion G-4 sposoban da izvrši sve radnje koje se od njega zahtevaju uspešno i u preciziranom vremenskom roku.

**Operativna raspoloživost** sistema je verovatnoća da sistem, kada se koristi pod specificiranim uslovima, zadovoljavajuće funkcioniše u bilo kom trenutku vremena, pri čemu vreme koje se ovde razmatra obuhvata vreme korišćenja i vreme zastoja. Vreme zastoja obuhvata aktivno vreme popravke, administrativno vreme i logističko vreme. Kao što se može videti razlika između operativne raspoloživosti i operativne gotovosti jeste u tome što operativna raspoloživost sistema ne uzima u obzir vreme skladištenja i vreme kada se ne planira korišćenje sistema. Isto tako, operativna raspoloživost ne razmatra sposobnost sistema da uradi posao za koji je namenjen, već je samo izraz spremnosti da ga uradi. Može se napisati da je:

$$\text{Operativna raspoloživost} = \frac{t_k}{t_k + t_z} \quad (5)$$

Gde je uz uslovna obeležavanja:

$t_k$ -vreme korišćenja

$t_z$ -vreme zastoja

**Pogodnost održavanja** se definiše kao verovatnoća da će sistem koji je otkazao biti vraćen u operativno stanje u toku specificiranog vremena zastoja. (Misra 2008) Ova definicija je u direktnoj analogiji sa **popravljivošću**, pod kojom se podrazumeva verovatnoća da će sistem koji je otkazao biti vraćen u operativno stanje u toku specificiranog aktivnog vremena popravke.

Pogodnost održavanja uzima u obzir aktivno vreme, logističko vreme i administrativno vreme, dok popravljivost uzima u obzir samo aktivno vreme popravke. U stvarnosti na vreme zastoja se pored vremena koja spadaju u pogodnost održavanja dodaju i vreme pripreme, vreme za detekciju neispravnog dela, vreme za nabavku rezervnog dela, stvarno vreme popravke kao i vreme testiranja nakon popravke (Misra 2008)

**Podobnost servisiranja** definiše lakoću (ili napor) sa kojom sistem može biti popravljen. Podobnost servisiranja ima snažan uticaj na popravljivost, ali su to ipak dva različita pojma. Podobnost servisiranja je pre svega konstrukcijska karakteristika, a popravljivost je izražena preko verovatnoće, uzimajući u obzir određene vremenske kategorije. (Misra 2008)

**Sopstvena raspoloživost** sistema je „verovatnoća da sistem, kada se koristi pod specificiranim uslovima, zadovoljavajuće funkcioniše u bilo kom trenutku vremena, pri čemu vreme koje se razmatra obuhvata vreme korišćenja i aktivno vreme popravke. Ova raspoloživost se odnosi na ugrađenu sposobnost sistema da uspešno funkcioniše pod specificiranim uslovima.“ (Misra 2008)

$$\text{Sopstvena raspoloživost} = \frac{t_k}{t_k + t_{ap}} \quad (6)$$

Gde je:

$t_k$ -vreme korišćenja

$t_{ap}$ -aktivno vreme popravke

Sopstvena raspoloživost je uvek veća ili najmanje jednaka raspoloživosti sistema, jer ne uzima u obzir logističko i administrativno vreme. Na primer nedostatak rezervnih delova će povećati logističko vreme što će rezultirati u smanjenoj raspoloživosti sistema, dok će sopstvena raspoloživost ostati nepromenjena. (Vujanović 1987)

**Dostignuta raspoloživost** uzima u obzir vrste održavanja koje se vrše na sistemu tj. planirano (preventivno) i neplanirano (korektivno) održavanje. (Vujanović 1987)

### 2.4.2 Definicije vremena sistema

Postoje dva kriterijuma na osnovu kojih je moguće izvršiti podelu vremena:

- 1) stanje sistema,
- 2) zahtev za korišćenjem sistema.

Što se tiče stanja sistema, on može biti operativan ili neoperativan (kada obuhvata administrativno vreme, logističko vreme i aktivno vreme popravke).

U pogledu zahteva za korišćenjem sistema postoje dve mogućnosti-ili se zahteva korišćenje sistema ili se ne zahteva korišćenje (pri čemu se obuhvata vreme skladištenja i slobodno vreme).

**Vreme korišćenja (aktivno vreme korišćenja sistema)** predstavlja vreme u toku kojeg sistem funkcioniše na zadovoljavajući način. Ovo vreme je osnova za izračunavanje pouzdanosti.

**Vreme zastoja** predstavlja period vremena u kojem je sistem neoperativan. Ovo vreme obuhvata aktivno vreme popravke, logističko vreme i administrativno vreme.

**Aktivno vreme popravke** je vremenski interval u toku kojeg se sprovode aktivnosti u vezi sa popravkom sistema. Ono uključuje pripremno vreme, vreme potrebno za dijagnozu otkaza, vreme otklanjanja kvara i vreme potrebno za funkcionalnu proveru sistema posle popravke.

**Logističko vreme** predstavlja onaj deo vremena u toku kojeg se ne vrši popravka zbog čekanja na rezervne delove.

**Administrativno vreme** je vremenski interval koji se odnosi kako na neophodne administrativne aktivnosti (izdavanje naloga za izvršenje popravke i slično), tako i na administrativne propuste pre i u toku izvršenja popravke. Vreme zastoja je osnova za izračunavanje pogodnosti održavanja.

**Slobodno vreme** je ono vreme u toku kojeg se ne zahteva korišćenje sistema. Ovo vreme može i ne mora da bude deo vremena zastoja sistema, što zavisi od toga da li je sistem u operativnom ili neoperativnom stanju. (Misra 2008) Sl. 4

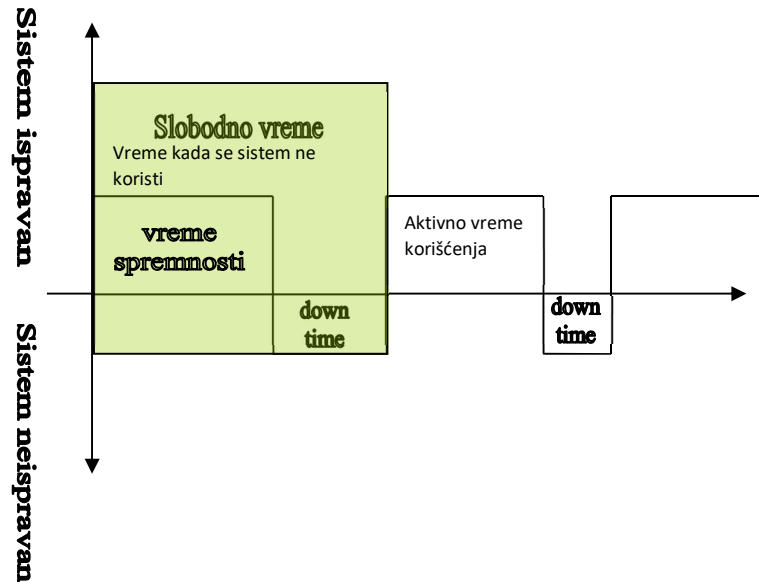
**Srednje vreme između otkaza MTBF (Eng. mean time between failures)** koje predstavlja količnik aktivnog vremena rada i ukupnog broja otkaza.

**Srednje vreme između održavanja MTBM (Eng. mean time between maintenance)** koje predstavlja količnik aktivnog vremena rada sistema i broja radnji održavanja sistema

**Vreme skladištenja** je vreme u toku kojeg se sistem nalazi u skladištu kao rezervni deo, pri čemu se pretpostavlja da je u operativnom stanju. (Vujanović 1987)

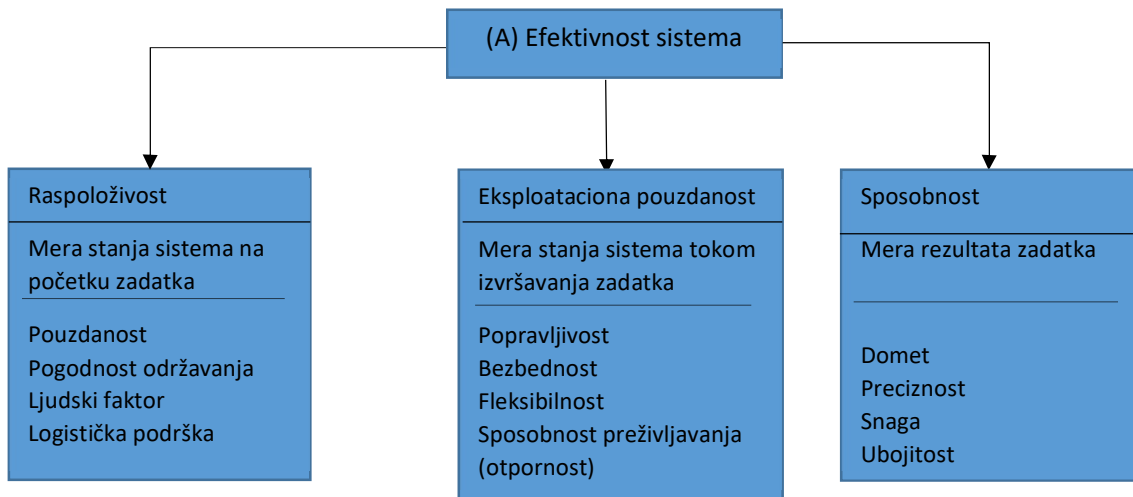
**Vreme pripravnosti (Vreme spremnosti  $RT^3$ -readiness time)** je deo vremena spremnosti za rad u kojem je sistem ispravan i čeka komandu da započne zadatak.

**Vreme reakcije** je deo vremena spremnosti za rad potreban za započinjanje zadatka, mereno od trenutka kada je primljena komanda.

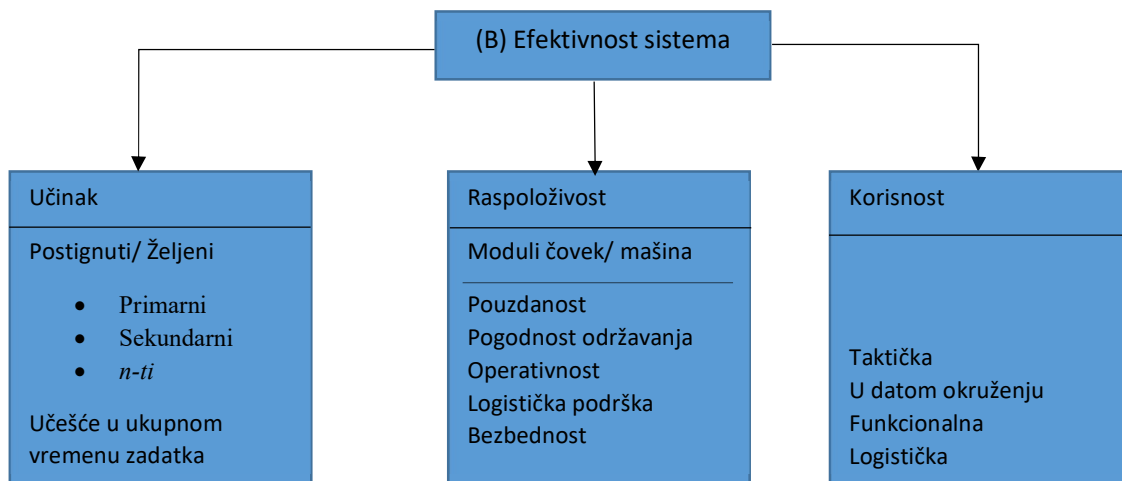


Sl. 4 Grafički prikaz vremena sistema (Šimšić i Kokanović 1998)

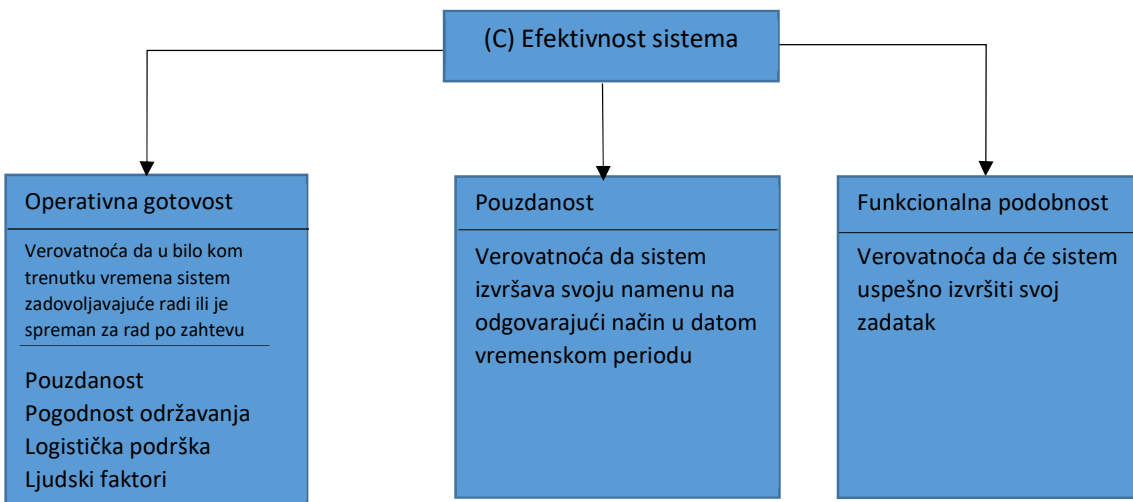
<sup>3</sup> RT označava **vreme pripravnosti** (*Eng. Readiness time*) koje predstavlja razliku slobodnog vremena i srednjeg vremena zastoja. Prethodno data definicija **slobodnog vremena** izaziva nedoumice u ovom slučaju. Autori literature (Šimšić i Kokanović 1998) definišu slobodno vreme kao što je gore navedeno, što znači da ne razdvajaju pojam vremena u kojem se sistem ne koristi a ispravan je i vreme u kojem je neispravan (downtime) već im je to sve slobodno vreme. I u knjizi literatura (Vujanović 1987) se kaže " Slobodno vreme je ono vreme u toku kojeg se ne zahteva korišćenje sistema. Ovo vreme može i ne mora da bude deo vremena zastoja sistema, što zavisi od toga da li je sistem u operativnom ili neoperativnom stanju. Na slici Sl. 4 koju su dali autori (Šimšić i Kokanović 1998) shodno definiciji vremena pripravnosti to nije tako i predstavljeno. Tek kasnije kada su izračunali srednje vreme zastoja MDT (mean downtime) autori literature (Šimšić i Kokanović 1998) uvode pojam *Vreme spremnosti*



Sl. 5 Koncept efektivnosti ratnog vazduhoplovstva USAF (Air force System Effectiveness Concept)



Sl. 6 Koncept efektivnosti mornarice (Navy System Effectiveness Concept)



Sl. 7 Koncept efektivnosti kopnene vojske (Army System Effectiveness Concept)

## 2.5 Primena koncepta efektivnosti u vojsci

Jedan od niza koncepata efektivnosti koji postoje a koji je naveden u literaturi (Blanchard i Lowery 1969) je i koncept efektivnosti ratnog vazduhoplovstva SAD (Air Force System Effectiveness Concept) gde se kaže da se efektivnost sistema sastoji od Raspoloživosti, Eksploatacione pouzdanosti i Sposobnosti i prikazan je na slici Sl. 5.

Raspoloživost je u datom konceptu je verovatnoća spremnosti sistema za korišćenja i zavisi od pouzdanosti, pogodnosti održavanja, ljudskog faktora i logističke podrške. U ovom konceptu efektivnosti, raspoloživost se samo koncentriše na trenutak u kojem se traži od sistema da reaguje. Pouzdanost u vremenu u kojem sistem radi bitna je više za eksploatacionu pouzdanost.

Sposobnost, odnosno treći faktor A koncepta efektivnosti je tipičan za namenu borbene avijacije, obzirom da su njegovi parametri, u stvari parametri ocene efekata vatrenih dejstava. Kada se pogleda slika Sl. 7 na kojoj je prikazan koncept C- efektivnosti kopnene vojske SAD, koncept koji je označen kao koncept A može preslikati u koncept C (Sl. 7) i sadrže iste ili slične stvari samo pod drugim imenom. Vreme u raspoloživosti koncepta A se tumači kao vremenski trenutak, dok je kod koncepta C to i vreme trajanja. U eksploatacionoj pouzdanosti koncepta A se insistira više na pouzdanosti tokom trajanja zadatka, dok se u konceptu C pojavljuje i namena sistema. Funkcionalna podobnost kao treći parametar kod koncepta C insistira na verovatnoći izvršenja zadatka, dok se kod koncepta A više polaže pažnja na meru izvršenja zadatka, jer su efekti dejstva avijacije ipak lakše merljivi nego efekti sredstava kopnene vojske gde se sigurno ima u vidu angažovanje borbene i neborbene tehnike. Prednost koncepta C je što se lakše može primeniti na ostale tehničke sisteme a ne samo vojne.

Kao što se može videti sa gornjih slika, svaki od vidova vojske SAD je razvio koncept efektivnosti koji odgovara načinu na koji se angažuje i na koji može da meri svoje učinke. Obzirom da je Vazduhoplovstvo i protiv-vazduhoplovna odbrana Vojske Srbije, vid koji je po svojoj tehničkoj opremljenosti kud i kamo manje organizaciono i tehnički složeno, a po svojoj doktrini prvenstveno okrenuto ka odbrani teritorije a ne ka ekspedicionom načinu ratovanja kao Vazduhoplovstvo SAD, onda je koncept efektivnosti C daleko primenljiviji na flotu školskih aviona.

U (Vasov 2002) se kaže da je „*Tehnička efektivnost integralna karakteristika rezultata funkcionisanja i kvaliteta eksploatacije tehničkog sistema, koja uključuje parametre pouzdanosti i pogodnosti održavanja*“.

### 3. Hronološki pregled razvoja modela neperfektnog održavanja i pokušaja praktične primene zabeležene u literaturi

#### 3.1 Osnovni koncept neperfektnog održavanja

Poznato je da pogodnost održavanja koja se već spominje kao sastavni deo i parametar efektivnosti sistema u sebi sadrži tri vremenske kategorije:

- ✓ Aktivno vreme popravke (popravljenost za koje je već rečeno da predstavlja vezu sa podobnošću servisiranja ili pogodnošću opravke)
- ✓ Logističko vreme
- ✓ Administrativno vreme.

Iz ovoga se može zaključiti da pogodnost održavanja u sebi uključuje i karakteristike samog sistema koji se popravljaju ali i organizaciju i planiranje samog procesa održavanja.

Održavanje kao takvo se može podeliti po jednom od principa u dve glavne kategorije: korektivno održavanje i preventivno održavanje. Korektivno održavanje (CM -Corrective maintenance) je održavanje koje se odvija kada sistem otkaze. Prema nekim autorima CM se definiše kao popravka (repair). Prema MIL-STD-721B, CM predstavlja sve aktivnosti koje se odvijaju, kao rezultat otkaza, da bi se sistem vratio u prethodno definisano stanje. Očigledno je da se CM obavlja u nepredviđenim vremenskim intervalima obzirom da je vreme otkaza pojedine komponente nepoznato. CM se tipično odvija u tri koraka: (1) Dijagnostifikovanje problema, (2) Popravka i/ili zamena pokvarene komponente (i) i (3) Verifikacija popravke. Preventivno održavanje (PM - Preventive maintenance) je održavanje koje se odvija kada je sistem u funkciji tj. kad je ispravan. Prema MIL-STD-721B PM označava sve aktivnosti koje se izvode kao pokušaj da se sistem povrati u pređašnje stanje sprovođenjem sistematskih inspekcija, detekcijom i prevencijom otkaza koji su tek u razvoju.

Po drugom principu održavanje se može klasifikovati i prema stepenu do kojeg se operativno stanje sistema vraća u pređašnje primenom radnji održavanja i to na sledeći način:

- *Perfect repair or perfect maintenance.* (Perfektna popravka ili održavanje) Potpuna popravka, sistem radi kao nov (*Eng. as good as new*) i ima zakon raspodele vremena između otkaza i intenzitet otkaza kao nov sistem. Generalna popravka motora je primer perfektnog održavanja. Najčešće se i zamena otkazale komponente smatra za perfektnu popravku

- *Minimal repair or minimal maintenance.* (minimalna popravka ili održavanje) Sistem se dovodi u ispravno stanje, ali intenzitet otkaza mu je kao i pre samog otkaza koji je otklonjen. Sistem je u stanju „kao i prethodno“ (*Eng. as bad as old*) Promena probušene gume na autu je primer minimalne popravke. Guma je zamenjena ali auto kao sistem ima istu distribuciju vremena između otkaza kao i pre toga.
- *Imperfect maintenance or Imperfect repair.* (Neperfektno održavanje ili popravka). Opravka sistema po ovom principu ga dovodi u stanje ne baš novog sistema (*as good as new*) ali ipak malo novijeg. Uobičajeno se smatra da se neperfektnim održavanjem sistem dovodi u operativno stanje negde između „*as good as new*“ i „*as bad as old*“. Očito je da je neperfektno održavanje u suštini generalna opravka koja u sebi može da uključi dva krajnje ekstremna slučaja: minimalno i perfektno održavanje.
- *Worse repair or worse maintenance* (Lošije održavanje ili popravka) predstavlja Nenamerno pogoršanje intenziteta otkaza sistema, ili drugačije rečeno sistem se dovodi u stanje veće vremenske starosti od one koja je aktuelna ali ipak se sistem ne dovodi momentalno u stanje otkaza. To znači da se nakon lošijeg održavanja sistem dovodi u gore stanje nego ono u kojem je bio pre održavanja.
- *Worst repair or worst maintenance* (Najlošije održavanje ili popravka). Sistem se nenamerno dovodi do otkaza primenom neke od akcija održavanja. (Wang i Pham 2006)

Shodno ovome može se tvrditi da i korektivno održavanje i preventivno održavanje mogu da budu u sva četiri prethodno izložena stepena (Perfektno, Minimalno, Lošije, Najlošije).

Po tvrdnjama autora (Wang i Pham 2006) većina literature razmatra održavanje na taj način da nakon korektivnog održavanja CM ili preventivnog održavanja PM sistem biva vraćen u stanje „kao nov“ (perfektno održavanje) ili u stanje „kao i prethodno“ (minimalno održavanje).

U prilog ovoj tvrdnji ide metodologija ocene verovatnoće bezotkaznog rada gde se kao treća pretpostavka uzima da: „posle obnavljanja, vazduhoplov poseduje ista svojstva kao i pre otkaza, odnosno zakon raspodele verovatnoće naleta do otkaza ne zavisi od broja otkaza“.<sup>4</sup> (Vasov 2002) Što u praksi znači minimalno održavanje.

<sup>4</sup> U istom radu prva pretpostavka bila je da je vreme obnavljanja trenutno. Ona se dovodi se u pitanje kod sistema koji se koriste duži vremenski period i koji prolaze kroz niz ciklusa obnavljanja. Da bi se što više



U nekim slučajevima Perfektno održavanje je zaista izvodljivo kod nekih sistema gde je samo jedna strukturalna komponenta u pitanju. A opet sa druge strane minimalne popravke su moguće tamo gde je sistem sačinjen od mnogo ne dominantnih komponenti koje se mogu zameniti novim komponentama istog tipa. (Kijima 1989)

Umesto toga rezultati održavanja su često negde u sredini. Neperfektno održavanje pruža novu mogućnost za modelovanje takvog održavanja koje će više odgovarati rezultatima koje je moguće ostvariti u praksi.

U radu koji se bavi problemima neperfektnog održavanja ovaj autor razrađuje dva zasebna slučaja neperfektnog održavanja zasnovana na modelu „virtualne starosti“ o kojem će biti detaljnije reči u narednim pasusima. U osnovi oba slučaja je indeks obnove sistema  $A_n$  koji je slučajna promenljiva iz skupa vrednosti od 0 do 1. Za slučaj perfektnog održavanja vrednost ovog indeksa je 0 a za slučaj minimalnog održavanja vrednost je 1.

Autori kao što su (Helvic 1980), (Brown i Proschan 1982) i (Nakagawa i Yasui 1987) daju razne pretpostavke sa kojim je to propustima u održavanju vezano neperfektno održavanje.

U radu (Helvic 1980) ovaj autor tvrdi da je neperfektnost održavanja povezana sa osposobljenošću ljudstva koje se bavi održavanjem, samim kvalitetom procedure održavanja, i popravljivošću sistema (aktivno vreme popravke a ne pogodnost održavanja). Iz ovoga bi bilo očigledno zaključiti da izdaci za održavanje i zahtevi za pouzdanošću imaju veliki uticaj na neperfektnost održavanja. Gorepomenuti rad predstavlja jedan od prvih u kojem se razmatra tematika neperfektnosti održavanja.

Sa druge strane (Brown i Proschan 1982) tvrde da su u svim prethodnim pokušajima da se matematički opiše održavanje namerno ignorisane pojedine činjenice ili se nenamerno olako prešlo preko njih a sve zbog toga da bi se promene koje se opisuju mogle matematički prikazati i izvesti dokazi pomoću kojih bi se one lakše pratile. Naime, većina autora je smatrala da su im dostupne sve potrebne informacije vezane za način održavanja koji su opisivali i da su te informacije tačne. Isto tako smatrali su da se svo održavanje odvija upravo onako kako je to propisano tehnologijom održavanja koja se primenjuje. Nasuprot tome Brown i Proschan izlažu svoje tvrdnje o uzrocima za neperfektno, lošije i loše održavanje a koji imaju veze sa izvođačima radnji održavanja (nasuprot većini matematičkih modela), a to su:

- Popravka pogrešnog uređaja,

---

približili realnom održavanju modelovane su metode održavanja koje ne zanemaruju vreme obnavljanja a koje se oslanjaju na pretpostavku neperfektnog održavanja.

- Delimična popravka uređaja koji je otkazao,
- Popravka (kompletna ili delimična) uređaja koji je otkazao, ali i izazivanje oštećenje susednog uređaja,
- Pogrešna procena stanja određenog uređaja,
- Sprovođenje održavanja, ne u planirano vreme, već po sopstvenom nahodjenju (tajming održavanja je van rasporeda)

Ovo nije konačna lista svih mogućih destruktivnih radnji koje se mogu dogoditi prilikom održavanja. Uzimajući u obzir gore navedeno autori zaključuju da postoji potreba da se naprave matematički modeli koji eksplicitno uzimaju u obzir neperfektno ili destruktivno održavanje ili pogrešnu detekciju otkaza.

Ovi autori su u svom radu napravili pregled i predlog niza realističnih modela kroz različite politike održavanja i inspekcije, odnosno preneli su prvi put u javnost svoja razmišljanja na ovu temu. Jedinu referencu koji su imali u svom redu je knjiga autora (Barlow i Proschan 1965) (začetnici matematičke teorije pouzdanosti koji održavanje tretiraju samo u perfektnom smislu) gde su objasnili razliku svog pristupa nasuprot ovom klasičnom pristupu .

Zanimljivo je da u tom radu ovi autori nisu dali rešenja za modele koje su predložili niti su pokušali da izvedu optimizaciju. Oni su samo postavili postulate za druge autore. Kasnije je ovaj njihov rad doživeo ekspanziju i citiran je u nekoliko drugih radova pojedinih istaknutih autora koji se bave tematikom neperfektnosti u održavanju, kao što je (Kijima 1989) (Nakagawa 1979a) ili (Nakagawa i Yasui 1987), koji opisuju neperfektno održavanje računarskih sistema.

(Nakagawa i Yasui 1987) navode kao ključne za razvoj strategije za neperfektno održavanje računarskih sistema tri razloga koji izazivaju loše ili lošije održavanje:

- Skrivenne greške i otkazi koji nisu detektovani tokom održavanja,
- Ljudske greške, kao što su pogrešna podešavanja i dodatna oštećenja tokom održavanja
- Zamene u uređajima sa delovima koji nisu ispravni

Ovaj rad se odnosi na sistem koji se održava periodično u vremenu  $kT$  ( $k= 1,2,..$ ). Usled neperfektnosti održavanja dobijaju se tri različite opcije rezultati održavanja:

- *Sistem se nakon održavanja ne menja,*
- *Sistem se nakon održavanja obnavlja,*
- *Sistem se nakon održavanja nalazi u stanju otkaza i zahteva opravku.*

Pre nego što se pređe na detaljnije objašnjenje metoda neperfektnog održavanja kojih po mišljenju autora (Wang i Pham 2006) ima 7 spadaju i spadaju u opšte metode (u suštini ima ih više) bitno je spomenuti da po njihovim tvrdnjama većina literature koja se bavi stohastičkim osobinama sistema koji se popravljaju ni ne obrađuje neperfektno održavanje, (to isto tvrde i (Brown i Proschan 1982)) a i literatura koja se bavi neperfektnim održavanjem proučava samo jednokomponentne sisteme.

### 3.2 Metode modelovanja neperfektnog održavanja

#### 3.2.1 Metoda modelovanja 1 (p,q) pravilo - (p,q) Rule

(Nakagawa 1979a) je u svom radu modelovao neperfektno preventivno održavanje za redundantne sisteme. Za sve te modele se ranije podrazumevalo da je održavanje perfektno na taj način da je nakon PM sistem vraćen u stanje „kao nov“. Kada se analiziraju rezultati održavanja može se primetiti da se ponekad dogodi da je sistem nakon PM u gorem stanju nego pre njega i to zbog loših procedura održavanja, loših rezervnih delova, pogrešnog podešavanja ili oštećenja koja pretrpi prilikom održavanja.

Neprefektnost održavanja koju je uveo Nakagawa podrazumeva da:

- ✓ Sistem se popravlja kad otkáže,
- ✓ Sistem se podvrgava minimalnom održavanju pri otkazima,
- ✓ Jedinica koja je otkazala se detektuje tek pri perfektnom PM.

I u tu svrhu je u svom radu razvio tri modela, Model A Model B i Model C koji objašnjavaju prethodno definisana tri slučaja da bi izračunao očekivane troškove i da bi iznašao optimalne politike PM.

---

*Model „A“ pretpostavlja da:*

---

1. Sistem se popravlja pri svakom otkazu ili se preventivno održava nakon isteka vremenskog perioda  $T$ , šta god se pre dogodi, nakon puštanja u rad ili nakon prethodnog PM,
2. Sistem je nakon popravke ispravan „kao nov“,
3. Sistem nakon PM ima isti intenzitet otkaza kao i pre PM sa verovatnoćom  $p(0 \leq p \leq 1)$  i ispravan je „kao nov“ sa verovatnoćom  $\bar{p} \equiv 1 - p$ ,
4. Vremena popravke i PM su zanemariva

5.  $c_2\bar{p} > c_1$  troškovi svake popravke su sa verovatnoćom  $\bar{p}$  veći od troškova PM  
 Ako se definiše vreme  $T$  za posmatrani sistem , očekivani intenzitet troškova po jedinici vremena bi bio:

za model A,

$$C_A(T) = \frac{\{c_1 \sum_j p^{j-1} R(jT) + c_2 [1 - \bar{p} \sum_j p^{j-1} R(jT)]\}}{[\sum_j p^{j-1} \int_{(j-1)T}^{jT} R(t) dt]} \quad (7)$$

Gde su  $c_1$  i  $c_2$  troškovi preventivnog održavanja (PM) i troškovi popravke.

Za slučaj perfektnog održavanja ( $p=0$ ) rezultati (7) su isti kao i kod (Barlow i Proschan 1965, str.87)

Ako se pretpostavi da je kumulativna raspodela funkcije intenziteta otkaza (raspodela intenziteta otkaza)  $\Lambda(t) = [\sum_j p^{j-1} j f(jt)] / [\sum_j p^{j-1} j \bar{F}(jt)]$  količnik [sume normalizovanih funkcija gustine otkaza  $f(jt)$ ] i [sume normalizovanih funkcija pouzdanosti sistema  $R(jt)$  ].

I  $K$  je  $\{T_{sr} [1 - (c_1 / (c_2 \bar{p}))]\}^{-1}$  gde je  $T_{sr}$  matematičko očekivanje funkcije pouzdanosti odnosno srednje vreme do otkaza sistema,  $T_{sr} = \int_0^\infty \bar{F}(t) dt$

$$q(t) = \Lambda(t) [\sum_j p^{j-1} \int_{(j-1)t}^{jt} R(u) du] - \bar{p} \sum_j p^{j-1} F(jt)$$

1. Ukoliko je  $\Lambda(t)$  monotono rastuća funkcija i  $\Lambda(\infty) > K$ , onda postoji konačno  $T^*$  koje zadovoljava uslov (8):

$$q(T) = c_1 / [c_2 \bar{p} - c_1] \quad (8)$$

$$C_A(T) = \left[ c_2 - \left( \frac{c_1}{\bar{p}} \right) \right] \Lambda(T^*) \quad (9)$$

2. Ako je  $\Lambda(t)$  monotono rastuća funkcija i  $\Lambda(\infty) \leq K$  ili je  $\Lambda(t)$  ne rastuća funkcija, onda je optimalna politika PM da vreme nakon kojeg treba izvršiti preventivno održavanje  $T^* \rightarrow \infty$  to jest PM ne postoji a intenzitet troškova održavanja jednak je količniku troškova popravke i srednjeg vremena do otkaza sistema  $C_A(\infty) = c_2 / T_{sr}$ ,
3. Ako je  $\Lambda(\infty) > K$  onda postoji konačno  $T$  takvo da  $C_A(\infty) > C_A(T)$  i na kraju
4. Ako je  $c_2 \bar{p} \leq c_1$  onda  $T^* \rightarrow \infty$ , to jest ako su troškovi popravki manji od troškova preventivnog održavanja interval preventivnog održavanja se produžava u beskonačnost

---

*Model B pretpostavlja da:*

---

1. Sistem se preventivno održava u vremenima  $kT(k=1,2,\dots)$
  2. Sistem se podvrgava samo minimalnim popravkama pri otkazima između PM, što znači da se intenzitet otkaza sistema ne menja pod uticajem minimalnog održavanja,
  3. Sistem nakon PM ima isti intenzitet otkaza kao i pre PM sa verovatnoćom  $p(0 \leq p \leq 1)$  i ispravan je „kao nov“ sa verovatnoćom  $\bar{p}$ ,
  4. Vremena popravke i PM su zanemariva.
- Očekivani intenzitet troškova održavanja je:

$$C_B(T) = \frac{[c_1 + c_3 \bar{p}^2 \sum_j p^{j-1} \int_0^{jT} \lambda(t) dt]}{T} \quad (10)$$

Gde  $c_3$  predstavlja troškove minimalne popravke otkazale komponente a  $\lambda(t)$  funkciju intenziteta otkaza

Kada je  $p=0$ , rezultati (10) slažu se sa rezultatima (Barlow i Proschan 1965, str. 97, Brown i Proschan 1982) koji tvrde u svojoj knjizi da ovakav način održavanja odgovara kompleksnim sistemima kao što su vazduhoplovi ili računarski sistemi.

Diferenciranjem  $C_B(T)$  po  $T$  i izjednačavajući taj izraz sa nulom dobija se:

$$\sum_j p^{j-1} \int_0^{jT} t d\lambda(t) = c_1 / (c_3 \bar{p}^2) \quad (11)$$

Ako se pretpostavi da je intenzitet otkaza  $\lambda(t)$  monotonno rastuća funkcija i ako je

$\int_0^\infty t d\lambda(t) > c_1 / (c_3 \bar{p}^2)$  onda postoji i konačno i jedinstveno vreme  $T^*$  koje minimizuje  $C_B(T)$  i na osnovu toga intenzitet troškova je:

$$C_B(T^*) = c_3 \bar{p}^2 \sum_j p^{j-1} j \lambda(jT^*) \quad (12)$$

---

*Model C pretpostavlja da:*

---

1. Sistem se preventivno održava u vremenima  $kT(k=1,2,\dots)$ ,
2. Otkazala komponenta sistema se detektuje samo pri perfektnom PM, i shodno tome ostaje u stanju otkaza od momenta njegovog nastanka do sledećeg perfektnog PM,

3. Sistem nakon PM ima isti intenzitet otkaza kao i pre PM sa verovatnoćom  $p(0 \leq p \leq 1)$  i ispravan je „kao nov“ sa verovatnoćom  $\bar{p}$ ,
4. Vremena popravke i PM su zanemariva.

Intenzitet troškova održavanja je:

$$C_C(T) = [c_1 + c_4 \bar{p}^2 \sum_j p^{j-1} \int_0^{jT} F(t) dt] / T \quad (13)$$

Gde je  $c_4$  intenzitet troškova za vreme proteklo između otkaza komponente i detektovanja istog.

Diferenciranjem  $C_C(T)$  po  $T$  i izjednačavajući taj izraz sa nulom, imamo da je:

$$\sum_j p^{j-1} \int_0^{jT} t dF(t) = c_1 / (c_4 \bar{p}^2) \quad (14)$$

Tako da ako je  $\mu > c_1 / (c_4 \bar{p}^2)$ , onda postoji jedinstveno i konačno vreme  $T^*$  koje minimizira  $C_C(T)$  i indeks troškova održavanja je:

$$C_C(T^*) = c_4 \bar{p}^2 \sum_j p^{j-1} j F(jT^*) \quad (15)$$

Iz prethodnih pasusa jasno je da je:

- ✓ sistem vraćen u stanje „kao pređašnje“ sa verovatnoćom  $p$  i
- ✓ u stanje „kao nov“ sa verovatnoćom  $\bar{p} = 1 - p$ .

Jasno je da ako je  $p = 1$ , održavanje je neperfektno, odnosno ako je  $p = 0$  održavanje je perfektno. U tom smislu minimalno i perfektno održavanje je samo specijalni slučaj neperfektnog održavanja.

(Brown i Proschan 1983) prezentuju rezultate za stohastički slučaj neperfektnog održavanja koristeći oznake  $p$  i  $q$  umesto  $p$  i  $\bar{p}$ . Suština je ista, samo je način zapisa drugačiji. Ovaj drugi način je postao prihvaćeniji i u suštini, na drugi način, ali po istoj logici može se zapisati i da je:

- ✓ sistem vraćen u stanje „kao nov“ sa verovatnoćom  $p$  i
- ✓ u stanje „kao prethodno“ sa verovatnoćom  $q = 1 - p$ .

Na osnovu toga je i cela metoda modelovanja i sve ostale slične njoj dobila ime  $p, q$  metoda.

Slično kao u (Nakagawa 1979b), (Helvic 1980) tvrdi da se sistemi sa dobrim karakteristikama pouzdanosti obnavljaju nakon PM sa verovatnoćom  $p_2$ , ali njegovo operativno stanje ponekad ostaje nepromenjeno (kao pređašnje) sa verovatnoćom  $p_1$  gde je  $p_2 + p_1 = 1$

Kao što je već rečeno u pomenutom radu autori (Brown i Proschan 1983) proučavali su  $(p, q)$  Model i pod pretpostavkom da sve radnje održavanja oduzimaju zanemarivo vreme, došli su

do karakteristika očuvanja „starosti“ sistema za ovaj model neperfektnog održavanja i monotonosti različitih parametara (svojstvo porasta ili smanjenja vrednosti parametara sa porastom vrednosti argumenata funkcije) i slučajnih promenljivih povezanih sa procesima otkaza.

Definisali su verovatnoću dešavanja perfektne popravke koja je označena sa  $p$  i nalazi se u intervalu  $0 < p < 1$  kao tačku u vremenu u kojoj dolazi do regeneracije sistema.

Proces nastanka otkaza okarakterisan je kao nehomogeni Puasonov proces sa funkcijom intenziteta otkaza  $\lambda(t)$ . Ovaj slučaj je moguć ako se pretpostavi da je funkcija gustine obnavljanja  $h(t)$  istovetna sa funkcijom intenziteta otkaza i može se naći u literaturi iz ove oblasti (Knežević 1995) (T. Nakagawa 2005)

Došli su do zaključka da ako je raspodela vremena otkaza  $F$  i njen intenzitet otkaza  $\lambda$  onda je funkcija raspodele vremena između dva uzastopna perfektna održavanja  $H_p = 1 - (1 - F)^p$  a odgovarajući intenzitet ove funkcije odnosno gustina obnavljanja je  $h_p = p\lambda$ .

Pored toga što pomaže da se problemi neperfektnog održavanja lakše razumeju ovaj primer je praktičan pokazatelj rasprostranjenog modela proporcionalnih intenziteta otkaza.

Pretpostavka proporcionalnih intenziteta otkaza se često koristi da bi se ukazalo na uticaj verovatnoće pojave jednog događaja na druge događaje.

Obzirom da se originalna funkcija intenziteta otkaza množi sa faktorom  $p$  onda i funkcija raspodele vremena između dva perfektna održavanja  $H_p$  zavisi od faktora  $p$ , to jest od načina na koji sistem stari.

Ova metoda je postala poznata kao (p,q) Metoda modelovanja neperfektnog održavanja (korektivnog ili preventivnog)

### 3.2.2 Metoda modelovanja 2 (p(t), q(t)) pravilo – (p(t), q(t)) Rule

(Block, Borges i Savits 1985) su proširili model Brown-Proschan neperfektnog održavanja (p,q) pravilo na vremenski zavisno neperfektno održavanje (age-dependent) za jednokomponentni sistem; komponenta se popravljiva pri svakom otkazu (korektivno održavanje). Verovatnoća  $p(t)$  je da je održavanje perfektno, a verovatnoća  $q(t) = 1 - p(t)$  je da je održavanje minimalno., gde  $t$  predstavlja starost sistema koji se koristi (vreme proteklo od poslednjeg perfektnog održavanja). (Block, Borges i Savits 1985) su dokazali da ako je raspodela vremena do otkaza  $F$  neprekidna funkcija a njen intenzitet otkaza je  $\lambda$ , uzastopna vremena perfektnog održavanja formiraju proces obnove sa raspodelom:

$$H_p = \mathbf{1} - \exp \left\{ - \int_0^t \mathbf{p}(x) \mathbf{R}(x)^{-1} \mathbf{F}(dx) \right\} \quad (16)$$

A odgovarajuća gustina obnavljanja je  $h_p(t) = p(t)\lambda(t)$ . Ovaj model neperfektnog održavanja je zato dobio ime  $(p(t), q(t))$  pravilo.

Obzirom da raspoloživost nije bila predmet razmatranja u ovom radu i samo se razmatralo aktivno vreme, time je praktično bilo definisano da je vreme potrebno za popravke zanemarljivo.

Takođe se pretpostavljalo da se sistem pri perfektnim popravkama vraća u stanje „kao nov“ do te mere da svako sledeće vreme do perfektne popravke ima nezavisnu i jednaku raspodelu.

Ako se stanje sistema „kao nov“ predstavi funkcijom pouzdanosti  $R$  koja je neprekidna funkcija takva da je  $R(t) > 0$  za svako  $t > 0$  onda imamo da:

1. Ako sistem sa funkcijom pouzdanosti  $R$  otkáže u vremenu  $t \geq 0$  i bude podvrgnut minimalnom održavanju nakon toga funkcija pouzdanosti je:

$$R(x / t) = \frac{R(x+t)}{R(t)} \quad (17)$$

2. Popravke zahtevaju minimalno vreme.

Ako se samo minimalne popravke odvijaju proces nastanka otkaza će postati proces tačaka u vremenu  $\{S_n; n \geq 1\}$  nad  $\mathbf{R}_+$  čiji je odgovarajući proces brojanja  $\{N(t); t \geq 0\}$  ne homogeni Puasonov proces sa matematičkim očekivanjem  $M(t) = EN(t) = -\log R(t)$  za  $t \geq 0$  gde  $S_n$  predstavlja vreme trajanja  $n$ -te popravke

Ako imamo da  $p$  uzima prebrojiv broj vrednosti iz  $p: \mathbf{R}_+ \rightarrow [0, 1]$  i ako definišemo da je  $q = 1 - p$  onda imamo da je niz uzastopnih (uslovno) nezavisnih Bernulijevih pokušaja takav da:

$P\{Z_n = 1\} = p(S_{n-1})$  za  $n \geq 1$  uz to da je  $S_0 = 0$  gde je  $Z_n = 0$  ili  $1$  i predstavlja minimalnu ili perfektu popravku

Dok god se dešavaju otkazi sprovode se minimalna održavanja, međutim kada se nakon nekog vremena sprovede perfektno održavanje nakon toga se sistem „osvežava“ i započinje nov ciklus funkcionisanja „kao nov“

Iz ovoga su autori zaključili da se proces nastanka otkaza regeneriše svaki put kada se uradi perfektna popravka, a shodno tome na osnovu niza vremena između uzastopnih perfektnih popravki formira se proces obnavljanja.



Na osnovu ovoga autori su istražili karakteristike raspodele vremena između pojave perfektnih popravki unutar procesa obnavljanja pod pretpostavkom da su na početku vremena komponente sistema bile nov.

Koristeći ovo  $(p(t), q(t))$  pravilo u svom sledećem radu na temu neperfektnog održavanja (Block, Borges i Savits 1988) su istraživali opštu politiku vremenski zavisnog preventivnog održavanja, gde se komponenta menja kada dostigne određeno vreme  $T$ ; ako otkáže u vremenu  $y < T$  ili se zamenjuje novom komponentom sa verovatnoćom  $p(t)$  ili se podvrgava minimalnoj popravci sa verovatnoćom  $q(t) = 1 - p(t)$ . Trošak  $i$ -te minimalne popravke je funkcija  $c_i(y)$ , starosti  $y$  i broja opravki.

Još jedna verzija ovog pravila je nastala od strane autora (Makis i Jardine 1992). Oni su posmatrali generalni model neperfektno zamene/popravke kod kojeg je moguća zamena sistema u bilo kojem trenutku vremena uz trošak  $c_0$  isto tako pri  $n$ -tom otkazu sistem se može ili zameniti uz trošak  $c_0$  ili se može podvrgnuti popravci uz troškove  $c(n, x)$  gde je  $x$  starost sistema u tom trenutku.

Održavanje je modelovano na taj način da u slučaju otkaza popravka vraća sistem u stanje „kao nov“ sa verovatnoćom  $p(n, t)$  ili u stanje „kao prethodno“ sa verovatnoćom  $q(n, t)$ , odnosno izraz  $s(n, t) = 1 - p(n, t) - q(n, t)$  daje verovatnoću da je popravka neuspela i da sistem treba da se odstrani i da se zameni novim uz dodatni trošak  $c_0$ .

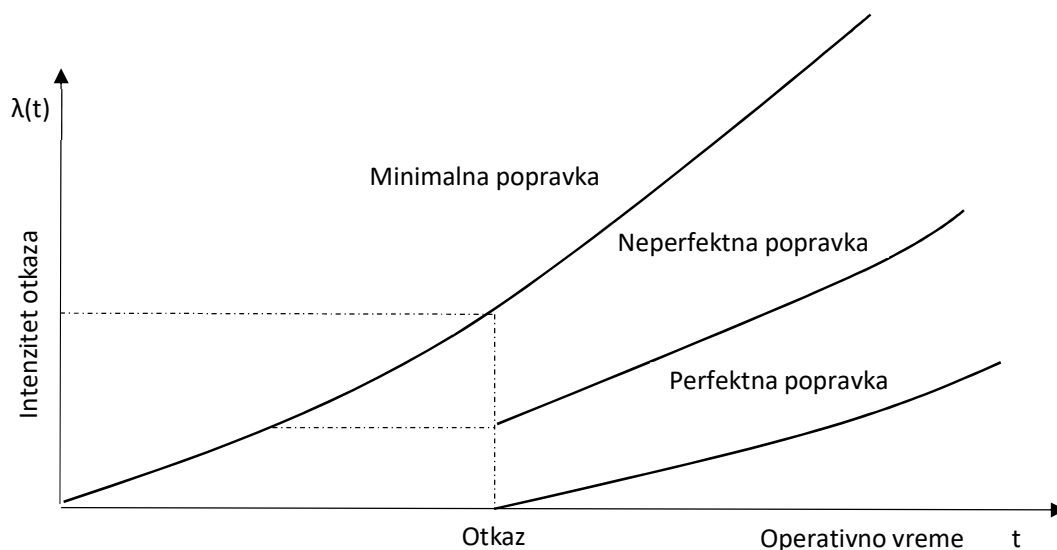
Ovo pravilo je poznato kao  $(p(n, t), q(n, t), s(n, t))$  pravilo.

### 3.2.3 Metoda modelovanja 3, Faktor poboljšanja - Improvement Factor Method

(Malik 1979) je uveo koncept faktora poboljšanja u problem organizovanja održavanja. On veruje da održavanje menja karakteristike krive otkaza sistema ka nekom novijem vremenu, ali ne uvek ka vremenu 0 (sistem nov) Sl. 8

Kao konkretne razloge za svoje istraživanje koje je sproveo i razvoj gore pomenute metode je taj de se u problemima održavanja uočava veliki jaz između inženjera koji se bave praksom i naučnika i istraživača koji se bave teoretskom stranom ovog problema.

Naime, dok se praktičari oslanjaju na svoj zdrav razum i „logiku“, da bi razvili svoje planove održavanja sa druge strane istraživači razvijaju svoje pretpostavke na koji način održavanje treba da se odvija, koje ne postoje u realnom svetu i samim tim su ne primenljive u praksi.



Sl. 8 Promena karakteristika sistema nakon održavanja

Napominje da se često mešaju pojmovi održavanja i zamene komponenti, isto tako se pojam sistema meša sa pojmom komponente. Postoje velike zabune u vezi u shvatanja habanja opreme, povremenog održavanja, slučajnih otkaza i praktičnih efekata radnji održavanja na pouzdanost opreme<sup>5</sup>

Da bi objasnio na koje se sisteme odnosi planiranje preventivnog održavanja okrenuto ka pouzdanosti ovaj autor deli održavanje na:

- ✓ Održavanje sistema koji proizvode dobra,
- ✓ Održavanje sistema koji pružaju usluge.

Kod prvog tipa sistema, po opšteprihvaćenom konceptu održavanje je zasnovano na principu minimizovanja troškova održavanja. Prilikom sprovođenja održavanja ukupni troškovi su zbir troškova održavanja plus troškovi gubitka proizvodnje.

Kod drugog tipa sistema održavanja problem je što ni dok su u radu ti sistemi ne mogu da jasno iskažu svoju dobit. Prilikom otkaza još je teže proceniti gubitke, a posebno ako su to sistemi gde prilikom otkaza može da dođe do ugrožavanja ljudskih života. U svakom slučaju za ove sisteme treba da postoji unapred planirano održavanje koje sa zadovoljavajućim stepenom pouzdanosti a nezavisno od troškova.<sup>6</sup>

<sup>5</sup> Često se misli da se na pouzdanost opreme može uticati samo održavanjem, što kada je reč o urođenoj pouzdanosti nije tačno. Da bi se na to uticalo, sistem mora da se podvrgne modifikacijama.

<sup>6</sup> O ovome je već bilo reči u poglavlju 2. Pouzdanost, kvalitet i bezbednost (tradicionalni i moderni pristup)

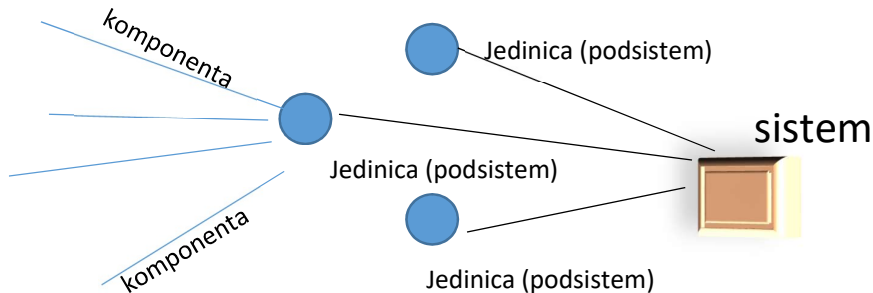
Dalje, ovaj autor navodi da se sistemi koji pružaju usluge mogu podeliti na dve podgrupe:

- ✓ Sistemi koji deluju iz pripravnosti,
- ✓ Sistemi koji rade neprekidno.

Sistemi koji deluju iz pripravnosti su podložni samo slučajnim otkazima, dok su sistemi koji rade neprekidno podložni otkazima usled habanja.

Da bi objasnio faktor poboljšanja (Malik 1979) definiše da je: „sistem logički niz mnoštva podsistema ili „jedinica“ gde su jedinice logička kombinacija komponenti“ Sl. 9

Razvoj svoje metode faktora poboljšanja započinje na primeru podsistema koji su povremeno u radu, i za koje kaže da su sistemi opšteg tipa a da sistemi koji rade neprekidno predstavljaju samo posebne slučajeve ovog tipa.



Sl. 9 Logika sastava sistema

Ako se uzme da je funkcija intenziteta otkaza jedinice koja je povremeno u radu data izrazom:

$$\lambda(t) = a + bt$$

gde je „ $a$ “ konstantni faktor (uticaj sredine u kojoj jedinca radi), odnosno konstantni deo intenziteta otkaza a „ $b$ “ je faktor habanja, odnosno varijabilni deo intenziteta otkaza

Da bi se uvela nelinearnost u ovaj izraz može se zapisati da je:

$$\lambda(t) = a + bt^c \quad (18)$$

Gde je „ $c$ “ intenzitet habanja i  $c > 1$

Ako se pretpostavi da se oprema haba samo kada je u radu onda je:

$$\lambda(t) = a + b(t_{ur}t)^c \quad (19)$$

Gde je  $t_{ur}$  deo vremena kada jedinica radi. Na osnovu svega ovoga dobija se da je:

$$R(t) = \exp[-\kappa t - \hat{\Theta}(t_{ur}t)^n] \quad (20)$$

Gde je  $a=\kappa$ ,  $\eta=c+1$ ,  $\hat{\Theta}=b/(c+1)t_{ur}$  i  $R(t)=f(t)/\lambda(t)$ ,

$\kappa$  je intenzitet otkaza eksponencijalne raspodele,  $\eta$  parametar izduženosti Weibulove raspodele,  $\hat{\Theta}$  svedeni parametar oblika Weibulove raspodele i

$R(t)$  - Funkcija pouzdanosti -verovatnoća( da je jedinica ispravna u trenutku  $t$ )

U jednačini (20) može se videti ovo dvojako svojstvo sistema koji su povremeno u radu kada su u pitanju tipovi otkaza (slučajni ili usled habanja). Ukupni otkazi su nazvani kompozitni<sup>7</sup> to jest oni su kombinacija slučajnosti i habanja. Sistem se haba samo kad radi, ali je podložan i slučajnim otkazima u bilo kojem vremenu.

Ako se razmatra slučaj da je sistem u pripravnosti i  $t_{ur}$  je jednako 0 sistem se vraća u jednostavno stanje slučajnih otkaza koje je definisano eksponencijalnom raspodelom i imamo da je:

$$R(t) = \exp(-\lambda^{\eta}t)$$

Sa druge strane ako sistem radi non-stop i  $t_{ur}$  je jednako 1 onda je:

$$R(t) = \exp[-\kappa t - \hat{\Theta}t^{\eta}]$$

Sušтина kompozitnih otkaza sistema koji su definisani za sisteme koji su povremeno u radu, kako ih definiše autor (Malik 1979) ,je ta da su sistemi u pripravnosti i sistemi koji rade neprekidno samo poseban slučaj sistema koji su povremeno u radu.

Na sličan način može se zapisati da:

$$R_j(t_j) = \exp[-\kappa_j t_i - \hat{\Theta}_j(t_{ur_j} t_i)^{\eta_j}] \quad (21)$$

Gde je  $R_j(t_i)$  pouzdanost  $j$ -tog podsistema na kraju  $i$ -tog održavanja;  $j=1$  do  $m$  a  $i=1$  do  $n$

Ako je zahtevano da:

$$\bar{F}_j(t_i) \geq A_2$$

Gde je  $A_2$  unapred određena konstanta pouzdanosti dobija se da je potrebno preduzeti radnju održavanja nad jedinicom „ $j$ “ svaki put kada njena pouzdanost dostigne vrednost  $A_2$

<sup>7</sup> Autor je koristio englesku reč „compound“ koja je sinonim za kompozit, ali kompozit je reč koja je kasnije korišćena za otkaze sistema koji su neprestano u radu. Ovaj tip otkaza je zato bolje zvati kombinovani.

<sup>8</sup> Ili u ovom slučaju  $\kappa$

Na osnovu prethodnog, pouzdanost sistema bi bila:

$$R(t_i) = \prod_{j=1}^m R_j(t_i) \quad (22)$$

Sa tim što bi i pouzdanost  $R(t_i)$  morala da ima unapred utvrđeni nivo npr.  $A_1$

Kada je definisao kompozitne otkaze i unapred definisani stepen pouzdanosti  $R_j(t_i) \geq A_2$

Autor ovog rada objašnjava da nakon održavanja podsistem može da bude unapređen, odnosno njegova pouzdanost može da bude poboljšana.

Jedan način tumačenja ovog unapređenja mogao bi i biti da je podsistem starosti  $t$  nakon održavanja postao mlađi od  $t$  ka  $t/B$ , gde  $B$  predstavlja faktor poboljšanja i varira između jedinice i beskonačnosti tako da pouzdanost koja je bila pre održavanja  $R_j(t)$  postaje  $R_j(t/B)$  nakon održavanja.

Ovaj način tretiranja metoda neperfektnog održavanja takođe prikazuje da nakon PM intenzitet otkaza leži između stanja „kao nov“ i „kao prethodno“. Stepem poboljšanja intenziteta otkaza naziva se „faktor poboljšanja. (Malik 1979) smatra da kako sistem postaje stariji i zahteva sve češće održavanje tako i intervali između uzastopnih PM intervala formiraju opadajući niz da bi održali intenzitet otkaza sistema ispod ili na početnom nivou i predlaže algoritam da bi se ustanovila uzastopna vremena PM.

Pored toga u ovom radu data je pregled međuzavisnosti različitih tipova sistema i njihovih otkaza, gde je spisak još proširen i predstavljen je u tabeli T. 1

**T. 1 Međuzavisnost različitih tipova otkaza**

Način Rada	Međuzavisnost Različitih Tipova Otkaza		
	Slučajni otkazi	Otkazi usled habanja	Slučajni plus otkazi usled habanja
Sistemi koji rade neprekidno	Eksponencijalna <sup>9</sup>	Weibull <sup>9</sup>	Kombinovani
Sistemi koji povremeno rade	Eksponencijalna	Weibull	Kompozitni
Sistemi koji dejstvuju iz pripravnosti	Eksponencijalna	Generalna <sup>9</sup> (Kada radi haba se, kad ne radi stari)	

<sup>9</sup> Tip matematičke raspodele otkaza

U (Chan i Shaw 1993) stoji da se intenzitet otkaza smanjuje nakon svakog PM i da ovo smanjenje zavisi od starosti sistema i broja PM.

Isto tako tvrdi se da se problemima PM nije dovoljno posvećivalo pažnje u prethodnim radovima ostalih istraživača. Tako navode da mnogi od njih tretiraju otkaze i popravke kao niz *S nezavisnih* slučajnih promenljivih od kojih ni jedna ne zavisi od PM. Dalje navode da se u mnogim radovima PM ne tretira kao nešto što utiče na raspoloživost, tj PM ne utiče na intenzitet otkaza. U suštini PM služi da smanji mogućnost budućih otkaza, isto tako prilikom izvođenja PM moguće je izazvanje nenamernih oštećenja.

Da bi razvili svoj model održavanja ovi autori predlažu tri tipa održavanja:

- ✓ Popravka – opšti termin koji označava popravku sistema bez obzira na stepen degradacije samog sistema ili njegovih komponenti,
- ✓ Preventivno održavanje – popravka sistema kada se on nalazi u stanju koje se definiše kao „nije u otkazu“,
- ✓ Obnova – popravka sistema do stanja „kao nov“ ili zamena sistema novim, obe ove definicije su prihvatljive.

Intenzitet otkaza zavisi od starosti sistema i od broja PM a raspoloživost sistema je slučajna promenljiva.

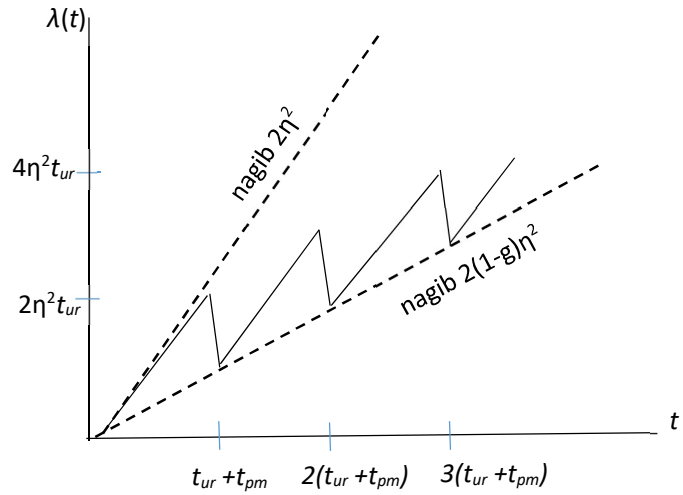
Na primeru dve vrste raspodele otkaza koje su najbližije Weibulovoj raspodeli Chan i Shaw razrađuju planiranje PM u kojem svako PM smanjuje intenzitet otkaza i predlažu dva tipa smanjenja intenziteta otkaza:

(1) intenzitet otkaza sa fiksnim smanjenjem- intenzitet otkaza je smanjen na taj način da su svi skokovi intenziteta otkaza isti; Sl. 10

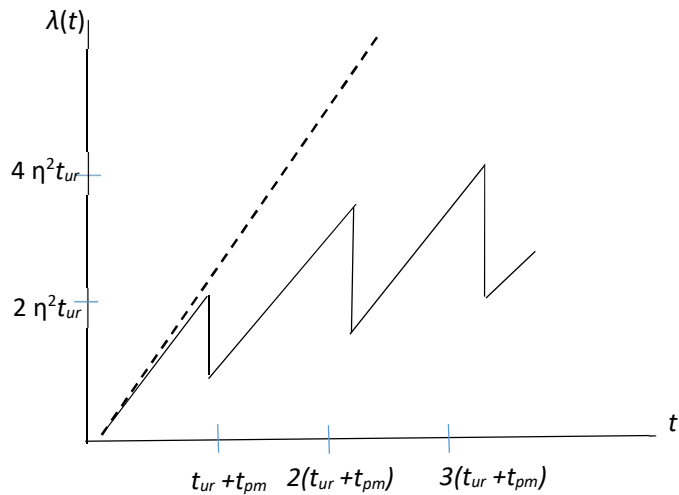
(2) intenzitet otkaza sa proporcionalnim smanjenjem, tj. nakon PM intenzitet otkaza je smanjen na taj način da su svi skokovi intenziteta proporcionalni trenutnom intenzitetu otkaza. Sl. 11

Radi pojednostavljenja objašnjenja može da se pretpostavi da je parametar oblika Weibulove raspodele  $\Theta = 2$  a parametar izduženosti Weibulove raspodele  $\eta$  konstantan za sve vrednosti  $n$  i  $g$ .

Gde je  $g$  faktora smanjenja intenziteta otkaza nakon PM



Sl. 10 Smanjenje intenziteta otkaza sa fiksnim stepenom



Sl. 11 Smanjenje intenziteta otkaza proporcionalnim stepenom

### 3.2.4 Metoda modelovanja 4 Metoda virtuelne starosti - Virtual Age Method

(Kijima, Morimura i Suzuki 1988) razvili su model neperfektnog održavanja koristeći ideju procesa virtualne starosti popravljivog sistema. Ako je sistem stavljen u upotrebu u vreme  $t=0$  Svakog puta kada sistem otkáže podvrgava se održavanju koje traje zanemarljivo vreme.

Ako sistem ima virtualnu starost  $\Psi_{n-1}=y$  neposredno nakon  $(n-1)$ -ve popravke,  $n$ -to vreme otkaza  $X_n$  ima funkciju raspodele.

$$\Pr \left\{ X_n \leq \frac{x}{v_{n-1}} = y \right\} = \frac{F(x+y) - F(y)}{1 - F(y)} \quad (23)$$

Gde je  $F(x)$  funkcija raspodele vremena do otkaza novog sistema (za nov sistem se podrazumeva da ima virtualnu starost  $\Psi_0=0$ ).

U svom radu ovi autori su predložili dve vrste modela neperfektnog održavanja za metodu virtuelne starosti.

Neka  $a_n$  bude stepen  $n$ -te popravke gde je  $0 \leq a_n \leq 1$ . Na osnovu konstruisanog modela  $n$ -ta popravka ne može da otkloni štetu koja je nastala pre  $(n-1)$ -ve popravke. Ona samo smanjuje dodatne godine  $X_n$  na godine  $a_n X_n$ . Shodno tome, virtualna starost nakon  $n$ -te popravke postaje:

$$\Psi_n = \Psi_{n-1} + a_n X_n$$

Očigledno, ako je  $a=0$  odgovara perfektnoj popravki, dok  $a=1$  odgovara minimalnoj popravki. Kasnije (Kijima 1989) proširuje model na slučajnu promenljivu koja uzima vrednosti između 0 i 1 i predlažu još jedan model neperfektnog održavanja:

$$\Psi_n = a_n (\Psi_{n-1} + X_n)$$

Gde je  $a_n$  slučajna promenljiva koja uzima vrednosti između 0 i 1 za  $n=1, 2, 3, \dots$ . Za ekstremne vrednosti 0 i 1  $a_n=1$  što znači minimalnu popravku i  $a_n=0$  što znači perfektnu popravku. Ako se to uporedi sa metodom Brown and Proschan-a (Brown i Proschan 1983) može se primeti da ako je  $a_n$  nezavisna slučajna promenljiva sa identičnom raspedelom koja uzima dve ekstremne vrednosti 0 i 1 onda su te dve metode iste. U tom smislu drugi metod Kijime predstavlja generalni metod i naziva se metod Virtuelne starosti.

(Uematsu i Nishida 1987) su razmotrili metod koji je još opštiji od metoda Kijime i uključuje oba njegova metoda kao specijalni slučaj. Neka  $T_n$  označava vremenski interval između  $(n-1)$ -vog otkaza i  $n$ -tog otkaza a  $X_n$  neka označava stepen popravke.

Nakon izvođenja  $n$ -te popravke starost sistema postaje  $q(t_1, \dots, t_n; x_1, \dots, x_n)$  ako je  $T_i = t_i$  i  $X_i = x_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) i gde su  $T_i$  i  $X_i$  slučajne promenljive. Sa druge strane  $q(t_1, \dots, t_n; x_1, \dots, x_n)$  predstavlja starost sistema neposredno pre  $n$ -tog otkaza. Početna epoha intervala je subjekt uticaja svih prethodnih istorija otkaza, npr.  $n$ -ti interval je statistički zavisna od  $T_1 = t_1, \dots, T_{n-1} = t_{n-1}, X_1 = x_1, \dots,$

$X_{n-1} = x_{n-1}$ . Na primer ako  $q(t_1, \dots, t_n; x_1, \dots, x_n) = \sum_{j=1}^n \sum_{i=j}^n x_i t_j$  onda  $X_i=0 (X_i=1)$  predstavlja da je perfektna (minimalna) popravka izvršena na  $i$ -tom otkazu.



### 3.2.5 Metoda modelovanja 5 Šok Model- Shock Model

„Dobro je poznato da vreme do otkaza određene komponente može biti predstavljeno kao prvo vreme koje protekne do praga za određeni stohastički proces koji opisuje nivo oštećenja.“ (Kijima i Nakagawa 1991) Razmatranjem stanja komponente koja je podvrgnuta šokovima koji se dešavaju nasumično u toku vremena dolazi se do toga da je se u vreme  $t=0$ , nivo oštećenja komponente podrazumeva da je 0. Nakon pojave šoka komponenta doživljava ne-negativno nasumično oštećenje. Svako oštećenje u vreme dešavanja, dodaje se trenutnom nivou oštećenja, a između šokova nivo oštećenja ostaje konstantan. Komponenta otkazuje kada akumulirana oštećenja prvi put pređu određeni nivo  $\xi$ . Da bi održali komponentu u prihvatljivom operativnom stanju potrebno je sprovesti određeno PM. Kada do takvog održavanja dođe vrlo je verovatno da će određeni nivo akumuliranih oštećenja biti smanjen, inače bi samo održavanje bilo obesmišljeno i proizvodilo bi samo troškove.

(Kijima i Nakagawa 1991) predlažu model kumulativnih šok oštećenja sa neperfektnim periodičnim PM. PM je neperfektno u smislu da svako PM smanjuje nivo oštećenja za  $100(1-b)\%$ ,  $0 \leq b \leq 1$  totalnog oštećenja. Treba zapaziti da ako je  $b=1$  PM je minimalno a ako je  $b=0$  PM je perfektno. Ovaj metod je sličan kao i prvi metod u „faktor poboljšanja modelu“. Izveden je i dovoljan uslov za vreme otkaza da bi imalo IFR (increasing failure rate- rastući intenzitet otkaza)- povećavajući intenzitet otkaza i razmatran je problem pronalaženja broja PM koji minimizuje očekivani intenzitet troškova održavanja.

---

#### *Model kumulativnih šok oštećenja podrazumeva:*

---

Ako imamo da je  $\{N(t), t \geq 0\}$  nehomogeni Puasonov proces sa funkcijom intenziteta  $\lambda(t)$  i neka  $\{A_n\}_{n=1}^{\infty}$  bude niz identičnih i nezavisno raspoređenih slučajnih oštećenja sa gustinom raspodele  $A(x)$ .

Smatra se da su  $\{A_n\}_{n=1}^{\infty}$  i  $\{N(t), t \geq 0\}$  uzajamno nezavisni.

Definisani je parcijalni proces sumiranja  $\{S_n, n \geq 0\}$  takav da je  $S_0 = 0$  i  $S_n = \sum_{k=1}^n A_k$ .

Proces  $\{S_n, n \geq 0\}$  se naziva proces oštećenja.

Pretpostavlja se da se PM planiraju u vremenima  $kx$ ,  $k=1,2,\dots$ . Interval vremena  $(k-1, k)$  se naziva  $k$ -ti period, a PM na početku svakog perioda ne zahtevaju značajno vreme da bi se sprovela.

Ako se sa  $D_k$  označi količina oštećenja nakupljenog tokom  $k$ -tog perioda onda je:

$$D_k = S_{N(k)} - S_{N(k-1)}, \quad k = 1, 2, \dots \quad (24)$$

a  $\{D_k\}_{k=1}^{\infty}$  je niz nezavisnih slučajnih promenljivih. Treba obratiti pažnju da  $D_k$  nisu identični obzirom da  $N(t)$  nisu vremenski homogeni.

Ako se sa  $y_k$  označi kumulativno oštećenje nakon  $k$ -tog perioda, na osnovu mehanizma PM prethodno definisanog dobija se da:

$$y_k = by_{k-1} + D_k \quad (25)$$

obzirom da je nivo oštećenja na početku  $k$ -tog perioda redukovan provođenjem PM na  $by_{k-1}$  koje je dodato totalnim oštećenjem  $D_k$  pretrpljenim tokom tog perioda.

Dalja pretpostavka je da se otkazi detektuju samo pri PM. Shodno tome vreme do otkaza je broj PM dok taj otkaz nije detektovan

Planirane zamena sistema, se po pretpostavci obavljaju u  $N$ -tom PM. Sistem se zamenjuje novim identičnim, ako se ustanovi otkaz ili pri  $N$ -tom PM, šta god se pre dogodi. Vremenski interval između instalacije novog sistema i njegove zamene zove se *ciklus*.

Da bi se shvatio stohastički model koji su izložili ova dvojica autora potrebno je razmatrati problem kao apsorbujući proces Markovljeva<sup>10</sup> gde on opisuje ponašanje ukupnog oštećenja nakon što je nov sistem instaliran. Ako se sa  $\infty$  označi apsorbujuće stanje koje predstavlja stanje sistema u otkazu i neka  $\{X_k, k \geq 0\}$  predstavlja takav proces sa skupom događaja  $[0, \xi] \cup \{\infty\}$  definisan sa  $x_0 \equiv 0$  i

$$x_k = \begin{cases} bx_{k-1} + D_k, & \text{ako je } bx_{k-1} + D_k \leq \xi \\ \infty, & \text{u svakom drugom slučaju} \end{cases}$$

Neka vreme  $T = \min\{k: x_k = \infty\}$  za slučaj da je  $\{x_k = \infty\}$ , odnosno da je to apsorbujuće stanje procesa Markovljeva, u suprotnom je  $T = \infty$ . Iz prethodnog se može zaključiti da  $T$  predstavlja vreme do otkaza sistema. Verovatnoća nastanka otkaza se definiše pomoću promenjive  $q_k$

$$q_k = Pr[T = k], k = 1, 2, \dots, i Q_k = \sum_{n \geq k+1} q_n$$

<sup>10</sup> Apsorbjujući proces Markovljeva predstavlja proces u kojem je moguće ući u apsorbujuće stanje iz bilo kog drugog stanja. Apsorbjujuće stanje je stanje iz kojeg je nemoguće izaći kada se jednom uđe.

$k=0,1,\dots,$

gde se podrazumeva da suma uključuje „ $\infty$ “

Prema definiciji  $c_0$  je trošak zamene otkazalog sistema,  $c_1$  trošak PM i  $c_2$  trošak planirane zamene. Obzirom da se otkaz detektuje samo pri PM, vreme proteklo između otkaza i njegovog detektovanja proizvodi troškove i prirodno je smatrati da je  $c_0 > c_2$  isto tako imamo da je  $c_2 > c_1$  inače ne bi bilo koristi od sprovođenja PM. Neka  $C_N$  budu totalni troškovi koji se stvore tokom ciklusa i neka  $T_N = \min\{T, N\}$ . Iz ovoga se lako može videti da:

$$E[T_N] = \sum_{k=1}^N k q_k + N \sum_{k \geq N+1} q_k = \sum_{k=0}^{N-1} Q_k \quad (26)$$

i

$$E[C_N] = \sum_{k=1}^N [c_1(k * 1) + c_0] q_k + \sum_{k \geq N+1} [c_1(N - 1) + c_2] q_k \quad (27)$$

$$= c_1 \sum_{k=0}^{N-1} Q_k - (c_0 - c_2) Q_n + (c_0 - c_1) \quad (28)$$

Očekivani intenzitet troškova  $C(N)$  se onda dobija iz (27) i (28)

$$C(N) = c_3 + \frac{c_0 - c_1 - (c_0 - c_2) Q_N}{\sum_{k=0}^{N-1} Q_k} \quad (29)$$

Ako je  $N=1$  sistem se zamenjuje svaki put, i onda se PM nikad ne sprovedi, shodno tome imamo da:

$$C(1) = c_0(1 - Q_1) + c_2 Q_1 = c_0 Pr[D_1 > \xi] + c_2 Pr[D_1 \leq \xi] \quad (30)$$

obzirom da je  $Q_1 = Pr[T \geq 2] = Pr[D_1 \leq \xi]$

(Kijima i Nakagawa 1992) su ustanovili model kumulativnog šok oštećenja sa sekvencijalnim PM održavanjem pretpostavljajući da je PM neperfektno.

Oni su modelovali neperfektno PM na taj način da je suma oštećenja nakon  $k$ -tog PM jednaka  $b_k y_k$  ako je bila jednaka  $y_k$  pre PM npr.  $k$ -to PM redukuje sumu  $y_k$  oštećenja na  $b_k y_k$  dok  $b_k$  predstavlja faktor poboljšanja. Oni podrazumevaju da je sistem podvrgnut šokovima koji se pojavljuju prema Puasonovom procesu, a nakon pojavljivanja šoka, trpi ne-negativnu nasumičnu štetu koja je aditivna. Svaki šok prouzrokuje otkaz sistema sa verovatnoćom  $p(z)$  gde je  $z$  ukupna šteta od šoka. U ovom modelu, PM se sprovedi prema fiksnim intervalima  $x_k$  za  $k=1, 2, 3, \dots, N$  zato što je potrebnije češće održavanja kako sistem stari, a  $N$ -to održavanje je perfektno. Ako sistem otkáže između PM podvrgava se samo minimalnim opravkama. Oni su izveli očekivani stepen troškova održavanja do zamene pretpostavljajući da je verovatnoća otkaza sistema  $p(z)$  eksponencijalna funkcija i da je oštećenje nezavisno i identično raspoređeno. Diskutuju o optimalnim politikama zamene koje minimizuju očekivani intenzitet

troškova pretpostavljajući da je  $x_k=x$  i  $b_k=b$ . U suštini, tražili su optimalni broj  $N^*(x)$  zamena sa fiksnim intervalom  $x$ , optimalni interval  $x^*(N)$  između PM sa fiksiranim brojem  $N$ , odnosno optimalni par  $(N^*, x^*)$

Sekvencijalno preventivno održavanje gde se PM provodi u fiksnim vremenskim intervalima  $x_k$  za  $k=1,2,3, \dots, N$  gde  $N$  predstavlja zamenu je politika održavanja koja se može primeniti na realne sisteme zato što je za njih potrebno češće održavanje kako im se starost povećava. U mnogim realnim situacijama PM je neperfektno u tom smislu da nakon održavanja ne čini sistem „kao nov“ već samo mladim za određeni stepen. Iako po su po tvrdnjama samih autora tražili samo teoretsko rešenje za ovaj model, mišljenja su da on ima i praktičnu primenu.

Ovakav pristup neperfektnom održavanju naziva se Šok model

### 3.2.6 Metoda modelovanja 6 Proces Kvazi-obnove – Quasi-renewal Process

(Wang and Pham 1996b) tretiraju neperfektnu popravku na način da se nakon svake popravke, vreme između otkaza sistema redukuje za vremenski interval  $\alpha$  njegove neposredne prethodne vrednosti gde je  $0 < \alpha < 1$  i sva vremena između otkaza su nezavisna, npr. vremena između održavanja se smanjuju sa svakim narednim održavanjem ( neperfektnom popravkom). U (Wang and Pham 1996b), uzastopna vremena između otkaza definišu opadajući proces kvazi-obnove.

Kao što se moglo videti iz prethodnih pasusa, gotovo svi prethodni modeli neperfektnog održavanja su u svojim pretpostavkama definisali da je vreme koje je potrebno za izvođenje održavanja zanemarivo. Prvi put modeli neperfektnog održavanja koje predlažu ova dva autora smatraju da vreme potrebno za popravke i PM nije zanemarivo. U svom radu (Wang i Pham 1996b) predstavili su tri modela neperfektnog održavanja. Dva koja se odnose na neperfektno PM i jedan model sa ograničenjem troškova.

Pod pretpostavkom da je jedinica stavljena u pogon u vreme 0 i da je period posmatranja neograničen, da je vremena između otkaza imaj gustinu raspodele  $f(t)$  i da je intenzitet otkaza  $\lambda(t) = F(t)[1 - f(t)]^{-1}$  gde  $F(t)$  predstavlja funkciju raspodele verovatnoće, otkaza onda

$\Lambda(t) = \int_0^t \lambda(s) ds$  predstavlja kumulativnu funkciju intenziteta otkaza sistema.

---

 Modeli sa neperfektnim PM
 

---

Pretpostavka je da se jedinica popravlja pri otkazu  $i$  po trošku  $c_f + (i-1)c_v$  ako i samo ako je  $i \leq k$ , gde je  $k$  ceo broj i  $i=1,2,\dots,k$  i da je popravka neperfektna u smislu da je nakon nje vreme između otkaza jedinice smanjeno za vremenski interval  $\alpha$  u odnosu na najbližu prethodnu vrednost. Definisano je da se promenljivi deo troška neperfektne popravke  $c_v$  povećava sa svakom neperfektnom popravkom dok fiksni deo  $c_f$  ostaje isti.

Sledeća pretpostavka je da je vreme do otkaza nove jedinice  $X_I$  i da je prvo vreme trajanja neperfektne popravke  $Y_I$  i da su ta dva vremena slučajne promenljive sa matematičkim očekivanjem  $\mu$  i  $\delta$ . Vreme između otkaza nakon prve popravke i drugo vremena trajanja neperfektne popravke bi bili  $\alpha X_I$  i  $\beta Y_I$  za matematičkim očekivanjima  $\alpha\mu$  i  $\beta\delta$ . Gde je  $\beta$  vremenski interval povećanja vremena trajanja popravke. Shodno tome vreme između otkaza jedinice nakon  $(k-1)$ -ve popravke i nakon  $k$ -tog vremena trajanja popravke bio bi  $\alpha^{k-1} X_I$  i  $\beta^{k-1} Y_I$  sa matematičkim očekivanjem  $\alpha^{k-1}\mu$  i  $\beta^{k-1}\delta$ . Konstantno  $\beta \geq 1$  znači da je vreme trajanja popravke rastuće kako se broj neperfektnih popravki povećava a vremenski interval  $\alpha \leq 1$  koji uvek ostaje pozitivan (nikad nije manji od nule) znači da se vreme do otkaza skraćuje.

Nakon  $k$ -te popravke pri otkazu, jedinica se podvrgava PM nakon vremena  $kT$  gde je  $k=1,2,\dots$ , sa troškovima preventivnog održavanja  $c_I$  nezavisno od prethodne istorije otkaza gde je konstantno  $T > 0$  i PM je neperfektno. Jedinica se podvrgava minimalnim popravkama pri otkazima između PM po trošku  $c_3$  u tom smislu da nakon minimalne popravke intenzitet otkaza ostaje isti i da je vreme trajanja minimalne popravke zanemarljivo i pretpostavka je da su troškovi ovih minimalnih popravki  $c_3 > c_I$  veći od troškova preventivnog održavanja.

Što se tiče poslednje pretpostavke i sami autori su primetili slabosti, zato što je ipak u stvarnosti ipak malo verovatno da je trošak minimalne popravke manji od troška PM i zato nude dodatno objašnjenje novom pretpostavkom.

Autori tvrde da kada se nova jedinica stavi u upotrebu prvih  $k$  popravki pri otkazima (dok je jedinica nova) se odvijaju sa troškovima  $c_f + (i-1)c_v$   $i=1,2,\dots,k$  što rezultuje da popravke budu neperfektne. Nakon  $k$ -te popravke pri otkazu jedinica će biti u lošem stanju i trebaće joj PM. Iako bi trebalo da PM bude perfektna i da jedinica nakon toga bude u stanju „kao nova“ ipak to nije slučaj jer su unapred pretpostavljeni manji troškovi tog tipa održavanja. Na taj način definisano je da je PM generalno neperfektno.

Model 1

Može se pretpostaviti da je PM neperfektno u smislu da je nakon PM jedinica „kao nova sa verovatnoćom  $p$  i „loša kao prethodno“ (minimalna popravka) sa verovatnoćom<sup>11</sup>  $q=1-p$ . Ako se pretpostavi da je vreme trajanja perfektne popravke  $W$  sa matematičkim očekivanjem  $w$  i da je  $W$  nezavisno od prethodne istorije otkaza i da je vreme minimalne popravke zanemarljivo zato što je uobičajeno da one kraće traju.

Dugoročni očekivani troškovi održavanja po jedinici vremena bili bi:

$$L(T, k; \alpha, \beta, p) = \frac{kc_f + \frac{k(k-1)}{2}c_v + c_1p^{-1} + pc_3 \sum_{i=1}^{\infty} q^{i-1} \int_0^T \lambda(\alpha^{-k}t) dt}{\frac{\mu(1-\alpha^k)}{1-\alpha} + \frac{\delta(1-\beta^k)}{1-\beta} + \frac{T}{p} + w} \quad (31)$$

Asimptotska prosečna raspoloživost bila bi:

$$A(T, k; \alpha, \beta, p) = \frac{\frac{\mu(1-\alpha^k)}{1-\alpha} + \frac{T}{p}}{\frac{\mu(1-\alpha^k)}{1-\alpha} + \frac{\delta(1-\beta^k)}{1-\beta} + \frac{T}{p} + w} \quad (32)$$

Model 2

Ako se pretpostavi da je PM neperfektno u smislu da nakon PM starost jedinice postaje manja za vrednost  $x$  gde je  $x(0 \leq x \leq T)$  i ima konstantnu vrednost, jasno je da kada je  $x=T$  jedinica će biti „ista kao nova“ a ako je  $x=0$  jedinica će biti u stanju „ista kao prethodno“.

Ako se pretpostavi da se jedinica zamenjuje novom nakon je što je bila u radu  $NT$  vremena, gde je  $N$  pozitivan ceo broj. Trošak  $c_0$  i nezavisno vreme trajanja perfektne popravke  $W$  sa svojim matematičkim očekivanjem  $w$  se generišu i pretpostavka je da su troškovi zamene veći od troškova preventivnog održavanja.  $c_0 > c_1$  i da su vremena trajanja drugih PM nezavisne slučajne promenljive  $V$  sa matematičkim očekivanjem  $v$ . Isto tako  $W$  i  $V$  su nezavisne od istorije prethodnih otkaza.

Dugoročni očekivani troškovi održavanja po jedinici vremena u ovom slučaju su:

$$L(T, k, N; \alpha, \beta, p) = \frac{kc_f + \frac{k(k-1)}{2}c_1 + c_0 + c_1(N-1) + c_0 + \sum_{i=0}^{N-1} \int_{i(T-x)}^{T+i(T-x)} \lambda(\alpha^{-k}t) dt}{\frac{\mu(1-\alpha^k)}{1-\alpha} + \frac{\mu(1-\beta^k)}{1-\beta} + NT + w + (N-1)v} \quad (33)$$

<sup>11</sup> Ovdje se autori još uvek koriste metodom neperfektnog održavanja pravilo  $(p, q)$  koje su koristili drugi autori kao što su (Brown i Proschan 1983) i Nakagawa. Tek u sledećem radu (Wang i Pham 1996c) su sumirali rezultate i predstavili svoj model održavanja kao jednu od opštih metoda neperfektnog održavanja zvanu „model kvazi obnove“

Asimptotska prosečna raspoloživost je:

$$A(T, k, N; \alpha, \beta, p) = \frac{\frac{\mu(1-\alpha^k)}{1-\alpha} + NT}{\frac{\mu(1-\alpha^k)}{1-\alpha} + \frac{\mu(1-\beta^k)}{1-\beta} + NT + w + (N-1)v} \quad (34)$$

Iz jednačina (33) i (34) može se dobiti optimalna politika održavanja sa parametrima  $(T^*, k^*, N^*)$  koja minimizuje  $L(T, k, N; \alpha, \beta, p)$  i analitičkim i numeričkim metodama.

---

*Model sa ograničenjem troškova održavanja*

---

Ovaj model je u suštini isti kao i modeli 1 i 2 sa tom razlikom što se nakon  $k$ -te neperfektne popravke prilikom prvog narednog otkaza vrši procena troškova održavanja putem perfektne inspekcije i inspekcija treba da odluči da li da se jedinica zamenjuje ili popravlja.

Ako se pretpostavi da troškovi popravke imaju gustinu raspodele  $C(x)$  koja je nezavisna od starosti sistema i ako procenjeni troškovi ne prelaze utvrđeni limit  $L$  jedinca se onda popravlja po očekivanom trošku koji ne prelazi vrednost  $L$ . U suprotnom zamenjuje se novom po višem trošku  $c_2$  i vreme zamene je  $W$  sa svojim matematičkim očekivanjem  $w$ . Ako se jedinica popravlja onda je „ista kao nova“ sa verovatnoćom  $p$  i loša „ista kao prethodno“ sa verovatnoćom  $q=1-p$ . Ako se pretpostavi da je vreme perfektne popravke  $V$  sa svojim matematičkim očekivanjem  $v$  i da su vremena  $W$  i  $V$  nezavisna od istorije prethodnih otkaza onda su:

Dugoročni očekivani troškovi održavanja po jedinici vremena

$$L(k, L; \alpha, \beta, p) = \frac{kc_f + \frac{k(k-1)}{2}c_v + \frac{c_2[1-C(L)] + \bar{e}_1 C(L)}{1-pC(L)}}{\frac{\mu(1-\alpha^k)}{1-\alpha} + \frac{\mu(1-\beta^k)}{1-\beta} + \frac{[1-C(L)]w + pC(L)v}{1-qC(L)} + \int_0^\infty \exp\{-\Lambda(\alpha^{-k}t)[1-qC(L)]\}dt} \quad (35)$$

Asimptotska prosečna raspoloživost je

$$A(k, L; \alpha, \beta, p) = \frac{\frac{\mu(1-\alpha^k)}{1-\alpha} + \int_0^\infty \exp\{-\Lambda(\alpha^{-k}t)[1-qC(L)]\}dt}{\frac{(1-\alpha^k)}{1-\alpha} + \frac{\mu(1-\beta^k)}{1-\beta} + \frac{[1-C(L)]w + pC(L)v}{1-qC(L)} + \int_0^\infty \exp\{-\Lambda(\alpha^{-k}t)[1-qC(L)]\}dt} \quad (36)$$

Gde je

$$\Lambda(\alpha^{-k}t) = \int_0^t \alpha^{-k} \lambda(\alpha^{-k}x) dx \quad (37)$$

Kumulativna funkcija raspodele intenziteta otkaza podsistema nakon  $k$ -te neperfektne popravke i

$$\bar{c}_1 = C^{-1}(L) \int_0^L t dC(t)$$

Srednji trošak popravke koji je manji od dugoročnih očekivanih troškova  $L$

*Ograničenja za predložene modele*

Dostizanje određenog stepena raspoloživosti može se postaviti kao zahtev za optimalnu politiku održavanja, isto tako kada se ispune određeni zahtevi u vezi sa troškovima održavanja može se dostići određeni stepen pouzdanosti.

Ako se celokupni napor usmere samo na postizanje što manjih troškova onda se može desiti da dostignuta raspoloživost ne bude na zadovoljavajućem nivou, pre svega zbog toga što uvek postoji pretpostavka neperfektnosti održavanja.

Za predložene modele broj 1 i 2 problem optimizacije se može formulisati na sledeći način:

Minimizovati troškove

$$L(T, k; \alpha, \beta, p) = \frac{kc_f + \frac{k(k-1)}{2}c_v + c_1p^{-1} + pc_{fp} \sum_{i=1}^{\infty} q^{i-1} \int_0^{iT} \Lambda(\alpha^{-k}t) dt}{\frac{\mu(1-\alpha^k)}{1-\alpha} + \frac{\mu(1-\beta^k)}{1-\beta} + \frac{T}{p} + w} \quad (38)$$

U funkciji raspoloživosti

$$A(T, k; \alpha, \beta, p) = \frac{\frac{\mu(1-\alpha^k)}{1-\alpha} + \frac{T}{p}}{\frac{\mu(1-\alpha^k)}{1-\alpha} + \frac{\mu(1-\beta^k)}{1-\beta} + \frac{T}{p} + w} \geq A_0 \quad (39)$$

za svako  $k=1,2,3,\dots,T>0$ ,

gde je konstanta  $A_0$  zahtevana raspoloživost.

Za predloženi model 3 problem optimizacije može se formulisati kao:

Maksimizovati raspoloživost

$$A(k, L) = \frac{\frac{\mu(1-\alpha^k)}{1-\alpha} + \int_0^{\infty} \exp\{-\Lambda(\alpha^{-k}t)[1-pC(L)]\} dt}{\frac{\mu(1-\alpha^k)}{1-\alpha} + \frac{\mu(1-\beta^k)}{1-\beta} + \int_0^{\infty} \exp\{-\Lambda(\alpha^{-k}t)[1-qC(L)]\} dt + \frac{[1-C(L)]w + pC(L)v}{1-qC(L)}} \quad (40)$$

U funkciji troškova održavanja



$$L(k, L; \alpha, \beta, p) = \frac{kc_f + \frac{k(k-1)}{2}c_v + \frac{c_2[1-C(L)] + \bar{c}_1 C(L)}{1-pC(L)}}{\frac{\mu(1-\alpha^k)}{1-\alpha} + \frac{\mu(1-\beta^k)}{1-\beta} + \int_0^\infty \exp\{-\Lambda(\alpha^{-k}t)[1-pC(L)]\}dt + \frac{[1-C(L)]w+pC(L)v}{1-qC(L)}} \leq c_0 \quad (41)$$

Za  $T > 0$ , i za  $k=1, 2, 3, \dots$ , gde je  $c_0$  konstanta zahtevanog intenziteta troškova održavanja

---

*Nastanak procesa kvazi obnove*

---

Teorija obnavljanja predstavlja matematičku teoriju obnavljanja i poseban je deo teorije verovatnoće i zajedno sa teorijom pouzdanosti predstavlja osnovu na kojoj se zasniva teorija održavanja. „Pod pojmom „obnavljanja“ u teoriji održavanja podrazumeva se proces koji se vrši u cilju obnavljanja radne sposobnosti elemenata ili sistema.“ (Knežević 1995) Teorija obnavljanja je zasnovana na pretpostavkama da su vremena između otkaza komponenti kao i između obnove nezavisne i slučajno promenljive, i da imaju iste zakone raspodele verovatnoće<sup>12</sup> dok većina modela koji su zasnovani na njoj podrazumevaju obnovu nakon popravki do nivoa „kao nov“. Upravo to je ono što kompletna filozofija neperfektnog održavanja pokušava da promeni i predloži svoje modele održavanja.

U svom radu (Wang i Pham 1996c) ova dvojica autora predstavljaju novu opštu teoriju obnavljanja pod nazivom „Teorija kvazi obnove“

U (Wang i Pham 1996c) dat je dokaz ove teorije pretpostavljajući da je:

$\{N(t), t > 0\}$  proces brojanja i da  $X_n$  označava vreme između  $(n-1)$ -vog i  $n$ -tog događaja ovog procesa i da je  $n \geq 1$

i da je niz ne-negativnih slučajnih promenljivih koje su nezavisne  $\{X_1, X_2, X_3, \dots\}$  i da je  $X_i = \alpha X_{i-1}$  za svako  $i \geq 2$  gde je  $\alpha > 0$  i konstantno onda je proces brojanja  $\{N(t), t > 0\}$  **proces kvazi obnove** sa parametrom  $\alpha$  i prvim vremenom do otkaza  $X_1$  što ujedno predstavlja i definiciju samog ovog procesa.

Pod pretpostavkom da su veličine:

funkcija gustine raspodele  $f_1(x)$ , funkcija raspodele verovatnoće  $F_1(x)$ , funkcija pouzdanosti  $R_1(x)$ , intenzitet otkaza  $\lambda_1(x)$ ,

---

<sup>12</sup> U ovom slučaju reč je o prostom procesu obnavljanja (Knežević 1995)

definisane za slučajnu promenljivu  $X_1$ , onda

$$f_n(X) = \frac{1}{\alpha^{n-1}} f_1\left(\frac{1}{\alpha^{n-1}} X\right) \text{ gustina raspodele}$$

$$F_n(X) = F_1\left(\frac{1}{\alpha^{n-1}} X\right) \text{ raspodela verovatnoće}$$

$$R_n(X) = R_1\left(\frac{1}{\alpha^{n-1}} X\right) \text{ funkcija pouzdanosti}$$

$$\lambda_n(x) = \frac{1}{\alpha^{n-1}} \lambda_1\left(\frac{1}{\alpha^{n-1}} X\right) \text{ intenzitet otkaza}$$

$$E(X_n) = \alpha^{n-1} E(X_1) \text{ matematičko očekivanje}$$

$$Var(X_n) = \alpha^{2n-2} Var(X_1) \text{ varijansa}$$

Predstavlja parametre vremena između otkaza za  $n=1,2,3,\dots$ , za sistem koji je bio podvrgnut  $(n-1)$  broju popravki sa vremenima između popravki  $X_n$ ;

Shodno tome u (Wang i Pham 1996c) date su dve teoreme koje su dokazane:

- ✓ Teorema broj jedan je da: „Ako  $f_1(X)$  pripada IFR, DFR, IFRA, DFRA i NBU<sup>13</sup> onda je i  $f_n(x)$  u istoj kategoriji,  $\forall n, n=2,3,\dots$ .“
- ✓ Teorema broj dva je da: „Parametri oblika za vremena između popravki  $X_n$  su isti za  $n=1,2,3,\dots$  za proces kvazi-obnove ako  $X_1$  sledi Gama, Weibulovu ili Lognormalnu raspodelu.“ (Wang and Pham 2006)

Druga teorema znači da nakon „obnavljanja“ parametar oblika vremena između otkaza neće biti promenjen. U teoriji pouzdanosti, parametar oblika vremena bezotkaznog rada komponente teži da sledi mehanizam otkaza, bilo da je to u pitanju fizička degradacija ili tehnička greška. Uobičajeno je da ako neki proizvod ima isti mehanizam otkaza onda i njegova vremena bezotkaznog rada imaju iste parametre oblika pod drugim uslovima primene. Obzirom da većina održavanja ne menja mehanizam otkaza može se očekivati da će i životni ciklusi imati isti parametar oblika. Ovo znači da će i proces kvazi-obnove biti primenljiv na modele kojima se neperfektno održavanje bavi. Vredi napomenuti da ako  $f_1(x)$  pripada NBUE ili NWUE onda  $f_n(x)$  ne mora biti u istoj kategoriji za  $n=2,3,\dots$ <sup>14</sup>

<sup>13</sup>IFR- increasing failure rate

DFR- decreasing failure rate

IFRA- increasing failure rate in average

DFRA- decreasing failure rate in average

NBU- new better than used

<sup>14</sup>NBUE- new better than used in expectation

NWUE – new worse than used in expectation

(Wang and Pham 1996c) dalje smatraju da vreme popravke nije zanemarivo, za razliku od većine modela neperfektnog održavanja. Oni tvrde da nakon svakog ciklusa održavanja vreme sledećeg ciklusa održavanja postaje duže za vremenski interval  $\beta$  od svoje prethodne vrednosti, gde je  $\beta > 1$  i sva vremena popravke su nezavisna i sa identičnom raspodelom. Ovo znači da se vremena popravke produžavaju sa brojem ciklusa održavanja. U (Wang and Pham 1996c) uzastopna vremena popravke formiraju rastući proces kvazi-obnove. Ovaj model neperfektnog održavanja naziva se  **$(\alpha, \beta)$  pravilo ili proces kvazi-obnove**.

Na osnovu dokaza svojih teorema dvojica autora su razvili predlog za tri modela održavanja.

Početne pretpostavke za sva tri modela održavanja su:

- a) Vreme planiranja održavanja je neograničeno,
- b) Intenzitet otkaza  $\lambda_I(t)$  je neprekidan i monotono rastući i diferencijabilan,
- c)  $F_I(t)$  je apsolutno neprekidan i  $F(0)=0$ ,
- d) Jedinica počinje da funkcioniše u trenutku  $t=0$ ,
- e) Popravke i otkazi i preventivna održavanja su zanemarljivog vremenskog trajanja za Model 1 i Model 2, ali ne i za Model 3

*Model 1 (periodično preventivno održavanje)*

Ako se pretpostavi da se jedinica preventivno održava u vremenima  $kT$ ,  $k=1,2,\dots$ , po trošku  $c_1$ , nezavisno od istorije prethodnih otkaza gde je konstantno  $T > 0$  i gde je PM perfektno. Jedinica se podvrgava neperfektnom održavanju prilikom otkaza između PM po trošku  $c_f$  u tom smislu da se nakon popravke vreme između otkaza smanjuje za vremenski interval  $\alpha$  u odnosu na neposredno prethodni. Shodno tome na ovaj slučaj se može primeniti teorija kvazi obnove odakle sledi da je dugoročni očekivani intenzitet troškova održavanja po jedinici vremena:

$$L(T) = \frac{c_1 + c_f M(T)}{T} \quad (42)$$

Gde je  $M(T)$  funkcija obnavljanja iz procesa kvazi obnove sa parametrom  $\alpha$ .

*Model 2 (periodično preventivno održavanje)*

Ovaj model je identičan Modelu 1 sa tom razlikom što se jedinica preventivno održava u vremenima  $kT$  ( $k=1,2,\dots$ ) po troškovima  $c_1$  gde je konstantno  $T > 0$  i PM je neperfektno u tom

smislu da je nakon PM jedinica „kao nova“ sa verovatnoćom  $p$  i u stanju „kao prethodno“ sa verovatnoćom  $q=1-p$

Odatle bi dugoročni troškovi održavanja po jedinici vremena ili intenzitet troškova bili:

$$L(T) = \frac{c_1 + c_f p^2 [M(T) + \sum_{i=2}^{\infty} q^{i-1} M(iT)]}{T} \quad (43)$$

Gde je  $M(iT)$  funkcija obnavljanja iz procesa kvazi obnove sa parametrom  $\alpha$ .

### Model 3 (periodično održavanje)

Ako se pretpostavi da jedinica održava prilikom  $i$ -tog otkaza po troškovima  $c_f + (i-1)c_v$  ako i samo ako je  $i \leq k-1$  gde je  $i=1,2,\dots$ , i popravke su neperfektne u tom smislu da se vremena između otkaza smanjuju za vremenski interval  $\alpha$  u odnosu na neposredno prethodni. Treba obratiti pažnju da se troškovi popravke povećavaju za  $c_v$  za svaku narednu neperfektnu popravku.

Ako se pretpostavi da je vreme trajanja prve neperfektne popravke slučajna promenljiva  $Y_1$  sa matematičkim očekivanjem  $\delta_1$ , onda je drugo vreme trajanja neperfektne popravke  $\beta Y_1$  sa matematičkim očekivanjem  $\beta \delta_1$  a  $(k-1)$ -vo vreme popravke je  $\beta^{k-2} Y_1$  sa matematičkim očekivanjem  $\beta^{k-2} \delta_1$  gde je konstantno  $\beta \geq 1$  i znači da vremena popravke rastu kako broj neperfektnih popravki raste.

Nakon  $(k-1)$ -ve neperfektne popravke prilikom otkaza jedinica se preventivno održava u vremenima  $kT$  ( $k=1,2,\dots$ ) po trošku  $c_1$  gde je konstantno  $T > 0$  i PM je neperfektno u tom smislu da je nakon PM jedinica „kao nova“ sa verovatnoćom  $p$  i u stanju „kao prethodno“ sa verovatnoćom  $q=1-p$ . ovde se pretpostavlja da je vreme trajanja PM slučajna promenljiva  $W$  sa matematičkim očekivanjem  $w$ . Ako se dogodi otkaz između  $kT$  sprovodi se neperfektno održavanje po trošku  $c_2$  sa neznatnim trajanjem u tom smislu da je nakon popravke vreme između otkaza ove jedinice smanjeno za vremenski interval  $\sigma$  u odnosu na neposredno prethodni i gde je  $0 < \sigma < 1$ .

Moguća interpretacija pretpostavki u ovom modelu održavanja bila bi da kada se nova jedinica pusti u rad prvih  $(k-1)$  puta se prilikom otkaza popravke sprovode po nižim troškovima  $c_f + (i-1)c_v$  za svako  $i=0,1,2,\dots,k-2$ , što rezultuje da popravke budu neperfektne i to zato što je jedinica nova u tom vremenskom periodu svog perioda eksploatacije. Nakon  $(k-1)$ -ve neperfektne popravke prilikom otkaza jedinica će biti u lošem stanju i zato je potrebno bolje ili perfektno održavanje po višem trošku  $c_1$  ili  $c_2$ .

Dugoročni očekivani trošak održavanja po jedinici vremena ili intenzitet troškova bi bio:

$$L(T, k) = \frac{(k-1)c_f + \frac{(k-1)(k-2)}{2}c_v + c_1p^{-1} + pc_2 \sum_{i=1}^{\infty} q^{i-1}M(iT)}{\frac{\mu_1(1-\alpha^{k-1})}{1-\alpha} + \frac{\delta_1(1-\beta^{k-1})}{1-\beta} + \frac{T}{p} + w} \quad (44)$$

Gde je  $M(t)$  funkcija obnavljanja iz procesa kvazi obnove sa parametrom  $\sigma$  i prvom raspodelom vremena između otkaza  $F_1(\alpha^{1-k}t)$

A raspoloživost jedinice bi bila:

Po klasičnoj teoriji obnavljanja;

$$A(T, k) = \frac{\frac{\mu_1(1-\alpha^{k-1})}{1-\alpha} + \frac{T}{p}}{\frac{\mu_1(1-\alpha^{k-1})}{1-\alpha} + \frac{\delta_1(1-\beta^{k-1})}{1-\beta} + \frac{T}{p} + w} \quad (45)$$

Kao i kod modela iz (Wang i Pham 1996b) koji su navedeni u prethodnim pasusima i dati jednačinama (31) do (41) može se i za ove modele definisati problem optimizacije na isti način.

Ako je zadovoljena potrebna raspoloživost data jednačinom (47) optimalna politika održavanja bi u smislu upravljačkih promenljivih  $T$  i  $k$  za Model 3 bila definisana kao:

Minimizovati troškove

$$L(T, k) = \frac{(k-1)c_f + \frac{(k-1)(k-2)}{2}c_v + c_p p^{-1} + pc_{fr} \sum_{i=1}^{\infty} q^{i-1}M(iT)}{\frac{\mu_1(1-\alpha^{k-1})}{1-\alpha} + \frac{\delta_1(1-\beta^{k-1})}{1-\beta} + \frac{T}{p} + w}$$

U funkciji

$$\begin{cases} A(T, k) = \frac{\frac{\mu_1(1-\alpha^{k-1})}{1-\alpha} + \frac{T}{p}}{\frac{\mu_1(1-\alpha^{k-1})}{1-\alpha} + \frac{\delta_1(1-\beta^{k-1})}{1-\beta} + \frac{T}{p} + w} \geq A_0 \\ k = 2, 3, \dots \\ T > 0 \end{cases}$$

Gde je  $A_0$  konstanta i zadata zahtevana raspoloživost

Pri istraživanju problema optimalne zamene, (Lam 1988) je iskoristio ideju fiksnog smanjenja vremena između otkaza nakon održavanja (koju su prvi put predložili autori Wang i Pham) i definisao ju je kao geometrijski proces (množenjem istih činilaca u nizu dobija se nešto nalik geometrijskoj raspodeli) Naziv „geometrijska raspodela” potiče otuda što je verovatnoća realizacije događaja  $A$  (po prvi put u  $k$  opita) srazmerna geometrijskom nizu  $q$ ;  $q^2$

U svom radu (Lam 1988) je definisao dve različite politike održavanja

Ako je  $X_n$  vreme između otkaza nakon  $(n-1)$ -ve popravke, onda  $\{X_n, n=1,2,\dots\}$  sa svojim matematičkim očekivanjem, odnosno srednjim vremenom bezotkaznog rada  $E(X_i)=\mu>0$  i parametrom  $\alpha\geq 1$  formira ne rastući geometrijski proces.

Ako je  $Y_n$  vreme održavanja nakon  $n$ -tog otkaza, onda  $\{Y_n, n=1,2,\dots\}$  sa svojim matematičkim očekivanjem  $E(Y_i)=\delta\geq 0$  i parametrom  $0<\beta\leq 1$  formira ne opadajući geometrijski proces. Ako je  $\delta=0$  to znači da je vreme popravke zanemarljivo.

Procesi  $\{X_n, n=1,2,\dots\}$  i  $\{Y_n, n=1,2,\dots\}$  su nezavisni.

Na osnovu prethodnih pretpostavki razrađena su dva modela održavanja (politike zamene):

- i. Politika zamene  $T$  je politika u kojoj se sistem zamenjuje svaki put kada dostigne vreme  $T$ . Vreme rada  $T$  sistema u trenutku vremena  $t$  je kumulativno vreme vremena rada (vremena između otkaza) po vremenu  $t$ .

$$T = \begin{cases} t - V_n, & U_n + V_n \leq t < U_{n+1} + V_n \\ U_{n+1}, & U_{n+1} + V_n \leq t < U_{n+1} + V_{n+1} \end{cases}$$

Gde su  $U_n = \sum_{i=1}^n X_i$ ,  $V_n = \sum_{i=1}^n Y_i$  i  $U_0 = 0$ ,  $V_0 = 0$

- ii. Politika zamene  $N$  je politika održavanja gde se sistem zamenjuje u vreme  $N$ -tog otkaza nakon poslednje zamene.

Bilo da je u pitanju politika zamene  $T$  ili politika zamena  $N$ , problem koji treba rešiti je da nađe optimalno  $T^*$  ili optimalno  $N^*$  takvo da se dugoročni prosečni trošak po jedinici vremena minimalizuje

Kod **politike zamene  $T$**  imamo da je dugoročni prosečni trošak održavanja po jedinici vremena jednak:

$$C_1(T) = \frac{C\delta \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{\beta^{k-1}} F_k(T-0) + C_1 - T}{T + \delta \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{\beta^{k-1}} F_k(T-0)} \quad (46)$$

gde je  $F_k$  funkcija raspodele  $U_k$  (sume vremena između otkaza)

Slično tome kod **politike zamene  $N$**  imamo da je dugoročni prosečni trošak održavanja po jedinici vremena jednak:

$$C_2(N) = \frac{C\delta \sum_{k=1}^{N-1} \frac{1}{\beta^{k-1}} + C_2 - \mu \sum_{k=1}^N \frac{1}{\alpha^{k-1}}}{\mu \sum_{k=1}^N \frac{1}{\alpha^{k-1}} + \delta \sum_{k=1}^{N-1} \frac{1}{\beta^{k-1}}} \quad (47)$$

### 3.2.7 Metoda modelovanja 7 Višestruko (p,q) Pravilo - Multiple (p,q) Rule

(Shaked i Shantikumar 1986) su uveli koncept multi-varijansnog neperfektnog održavanja. Oni su razmatrali primere sistema čije komponente imaju zavisna vremena između otkaza i koje se podvrgavaju neperfektnom održavanju prilikom otkaza tokom celog perioda eksploatacije sve dok ne budu odbačene u otpad i zamenjene novima. Za svaku komponentu popravka je neperfektna prema  $(p, q)$  pravilu, npr. popravka je perfektna sa verovatnoćom  $p$  ili je minimalna sa verovatnoćom  $q$ . I zamenjuje se novom komponentom svaki put kad je izvedeno neuspešno minimalno održavanje.

Pod pretpostavkom da  $n$  komponenti sistema počinje da funkcioniše u isto vreme 0 i da u određenom vremenskom trenutku ne može da otkáže više od 1 komponente, oni su ustanovili združenu raspodelu vremena do sledećeg otkaza preostalih komponenti koje su u radu nakon minimalne ili perfektne opravke, i izveli združenu gustinu raspodele rezultujućih vremena do otkaza komponenti i ostale kvantitativne norme verovatnoće iz kojih raspodela vremena do otkaza može da se dobije.

Tamo gde postoji više od jednog uređaja u sistemu i uređaji su stohastički zavisni, to jest otkaz jednog je povezan sa otkazom drugog, uspeh ili neuspeh minimalne popravke jednog uređaja može stohastički uticati na preostalo vreme do otkaza uređaja koji još uvek funkcionišu. Sa te strane posmatrano neperfektno održavanje može biti zaista kompleksno. Jedan od načina da se ova situacija prevaziđe je da se napravi model održavanja u kojem, kad jedan uređaj otkáže i uspešno se nakon toga (minimalno) popravi drugi uređaji koji funkcionišu „ne znaju za to“.

Ovaj metod tretiranja neperfektnog održavanja nazvan je višestruko  $(p, q)$  pravilo.

### 3.2.8 Ostale metode

(Jack 1991) je istraživao politiku održavanja koja uključuje neperfektne popravke pri otkazu sa zamenom nakon  $N$ -tog otkaza. (Dagpunar i Jack 1992) utvrdili su optimalan broj neperfektnih PM u toku konačnog perioda vremena sa tim da su minimalne popravke izvođene pri otkazima između preventivnih održavanja PM, i s tim da  $i$ -to PM doprinosi da starost uređaja  $x_i$  za određenu vrednost bude manja, mlađa, ( $x$  pravilo). (Chun 1992) proučava

određivanje optimalnog broja periodičnih PM u okviru konačnog vremena planiranja koristeći *X* pravilo.

(Makis i Jardine 1992) su uradili rad na temu politike održavanja koja u sebi ne sadrži PM i u kojoj uređaj može biti zamenjen u bilo koje vreme sa troškom  $C_0$ , a onda pri *n*-tom otkazu uređaj se ili menja sa troškom  $C_0$  ili se podvrgava neperfektnoj popravci sa troškom  $c(n, t)$  gde je *t* starost uređaja. Oni su koristili  $(p(n, t), q(n, t), s(n, t))$  pravilo da bi modelovali neperfektno održavanje. (Makis i Jardine 1991) (Makis i Jardine 1993) su proučavali politiku optimalnog održavanja sa neperfektnim popravkama pri otkazima: uređaj se menja u bilo koje vreme pri prvom otkazu nakon nekog perioda koristeći  $(p(n, t), q(n, t), s(n, t))$  pravilo i metodu virtuelne starosti naznačenim redosledom.

(Srivastava i Wu 1993) su izradili model neperfektne inspekcije u kojem se otkazi mogu detektovati sa verovatnoćom *p*, i oni razmatraju ocenu tog parametra *p*. (Guo and Love 1992) i (Love and Guo 1993) razmišljaju na temu statističke analize za modele neperfektnog održavanja.

(Fontenot i Proschan 1984) istražuju četiri modela održavanja koristeći  $(p, q)$  pravilo za različite politike održavanja. (B. E. Helvic 1980) istražuje održavanje sistema otpornih na otkaze koristeći  $(p, q)$  pravilo.

### 3.3 Klasifikacija modela neperfektnog održavanja prema konceptima (politikama) održavanja

#### 3.3.1 Potreba za klasifikovanjem metoda neperfektnog održavanja

Kao što se može videti iz prethodnih pasusa tokom godina su problemi održavanja, zamene i inspekcija proučavani od strane mnogih autora. Kao rezultat toga nastale su hiljade radova koji obrađuju ova pitanja na razne načine. Sve predložene metode neperfektnog održavanja i modeli održavanja koji su razvijeni pomoću njih i kroz njih imaju svoje dobre i loše strane, prednosti i nedostatke. Neki se mogu primeniti na jednu vrstu tehničkih sistema dok za drugu ne odgovaraju. Sve zavisi od toga da li su istraživači i teoretičari prilikom stvaranja istih imali na umu neki konkretan tehnički sistem i održavanje koje je vezano sa njim, ili su čisto teoretski i sa puno aproksimacija i pretpostavki pokušavali da naprave matematički dokaz svoje zamisli a nekome drugom ostavili da mu nađe primenu. Ipak kada se malo bolje pogleda u suštinu, postoje zajedničke karakteristike koje mogu da vežu određeni broj modela u istu grupu. Zajedničke karakteristike su koncepti, odnosno politike održavanja odnosno koncepti prema kojima se izvršava proces održavanja, a koje su sporadično bile pominjane prilikom



objašnjavanja matematičkih metoda modelovanja održavanja u prethodnom poglavlju, ali im nije bila poklanjana prevelika pažnja.

Da bi pregled metoda modelovanja neperfektnog održavanja koji je dat u prethodnim pasusima bio jasniji svi modeli održavanja koji su proistekli iz njih u ovom poglavlju biće klasifikovani po svojim pripadajućim „politikama“ održavanja.

Cilj klasifikacije nije samo grupisanje sličnih metoda na jedno mesto. Naglašavanjem razlika između pojedinih metoda olakšaće se odabir one metode koja je najpogodnija za primenu na sistem održavanja koji je predmet ovog rada, to jest održavanje flote školskih aviona u drugom stepenu.

Osnovna podela politika održavanja je podela na održavanje jednokomponentnih sistema i održavanje višekomponentnih sistema. Jednokomponentni sistemi su poslužili kao osnova za razvoj politika održavanja višekomponentnih sistema i zato se i više obrađuju u literaturi. Sledeća ključna podela je na održavanje prema proteklom vremenu i održavanje prema stanju. Na primer politika periodičnog PM (periodic PM) je politika vremenskog održavanja a politika intenziteta otkaza (failure limit) je politika održavanja prema stanju.

### 3.3.2 Vremenski zavisno preventivno održavanje (Age-dependant PM Policy)

U ovom načinu održavanja, sistem se preventivno održava kada dostigne propisanu starost  $T$  (pri čemu je  $T$  konstantno) ili pri otkazu, šta god da se desi prvo. Za ovaj tip održavanja postoje razni modeli neperfektnog održavanja sa varijacijama i dodacima prema kojima su ili preventivno održavanje PM ili korektivno održavanje CM neperfektni ili oba istovremeno. tabela T. 2 daje pregled najčešće pominjanih metoda neperfektnog održavanja u uslovima vremenskog preventivnog održavanja. Sve ove metode i njihove varijacije koje ovde nisu nabrojane klasifikovane su kao vremensko preventivno održavanje pre svega zato što je provođenje preventivnog održavanja PM planirano u periodima kada se dostigne određena, propisana, starost jedinice ili podsistema. Prema ovoj politici održavanja jedinica se preventivno održava kad dostigne propisanu starost  $T$  ili se popravlja pri svakom otkazu sve dok se nad njom ne sprovede neka vrsta perfektnog održavanja, bilo da je ono preventivno ili korektivno. Iz ovoga se lako može

zaključiti da i PM i CM mogu biti svako za sebe ili perfektni ili neperfektni ili minimalni. Isto tako kada su u pitanju troškovi održavanja, oni mogu biti konstantni ili u funkciji starosti jedinice ili broja popravki.

Ako se dostignuta starost  $T$  definiše kao slučajna promenljiva onda se takva vremenski zavisna politika definiše kao slučajna vremenski zavisna politika održavanja. Ovakav koncept održavanja je primenljiv ako je nepraktično da se jedinica održava striktno u konstantnim vremenskim periodima. Ako jedinica ima neustaljenu dužinu vremena u radu, onda je svakako neefikasno vršiti održavanje u sred radnog ciklusa. Ovde je najbitnije iskoristiti eventualno svako raspoloživo slobodno vreme za održavanje.

**T. 2 Studije neperfektnog održavanja u okviru vremenski zavisnog načina preventivnog održavanja (Wang i Pham 2006)**

Studija	PM	CM	Matematički metod	Kriterijum optimizacije	Teorija modelovanja	Vreme planiranja
Chin and Downs (1971)	Neperfektno	Perfektno	$(p, q)$ pravilo	Raspoloživost	Polu-Markovljev	Neograničeno
Nakagawa (1979)	Neperfektno	Perfektno	$(p, q)$ pravilo	Intenzitet otkaza	Teorija obnavljanja	Neograničeno
Beichelt (1980)	Perfektno	Neperfektno	$(p(t), q(t))$ pravilo	Intenzitet otkaza	Teorija obnavljanja	Neograničeno
Fontenot and Proschan (1984)	Perfektno	Neperfektno	$(p, q)$ pravilo	Intenzitet otkaza	Teorija obnavljanja	Neograničeno
Block et al. (1988)	Perfektno	Neperfektno	$(p(t), q(t))$ pravilo	Intenzitet otkaza Ukupni trošak	Teorija obnavljanja	Neograničeno Ograničeno
Rangan and Grace (1989)	Perfektno	Neperfektno	$(p, q)$ pravilo	Ukupni trošak	Teorija obnavljanja	Ograničeno
Sheu (1991a)	Perfektno	Neperfektno	$(p(t), q(t))$ pravilo	Intenzitet otkaza (slučajni trošak)	Teorija obnavljanja	Neograničeno Ograničeno
Sheu and Kuo (1993)	Perfektno	Neperfektno	$(p(t), q(t))$ pravilo	Intenzitet otkaza (slučajni trošak)	Teorija obnavljanja	Neograničeno
Sheu et al. (1995)	Perfektno	Neperfektno	$(p(t), q(t))$ pravilo	Intenzitet otkaza (slučajni trošak)	Teorija obnavljanja	Neograničeno
Wang and Pham (1996a)	Neperfektno	Neperfektno	$(p, q)$ pravilo $(a, \beta)$ pravilo	Intenzitet otkaza Raspoloživost	Teorija obnavljanja	Neograničeno

U vremenski zavisnoj politici zamene komponenti, komponenta se menja kada dostigne određenu starost. Ovo vreme se meri od poslednje zamene te iste komponente. Ako se između zamena sprovode samo minimalna održavanja prilikom otkaza ova vremenski zavisna politika zamene se onda naziva „Periodična zamena sa minimalnim popravkama pri otkazu.

Bitno je samo još napomenuti da se kod vremenski zavisne politike uglavnom podrazumeva da intenzitet otkaza raste kako se starost sistema povećava.

### 3.3.3 Periodično preventivno održavanje - (Periodic PM Policy)

Kod periodičnog preventivnog održavanja, komponenta se preventivno održava u fiksnim vremenskim intervalima  $kT$  ( $k=1,2,\dots$ ) nezavisno od prethodne istorije kvarova i popravlja se prilikom kvarova i vremenski interval  $T$  je konstantan. U nekim ranijim istraživanjima razmatrana je politika blok zamene kod koje je jedinica menjana za unapred predviđeno vreme  $kT$  ( $k=1,2,\dots$ ) a isto tako i pri svakom otkazu. Politika blok zamene dobila je svoje ime po ustaljenoj praksi pri kojoj se zamenjuje ceo blok ili grupa komponenti u sistemu u propisanim vremenskim intervalima  $kT$  ( $k=1,2,\dots$ ) nezavisno od istorije prethodnih otkaza i najčešće se primenjuje kod višekomponentnih sistema.

(Liu, Makis i Jardine 1995) su istraživali model proširenog periodičnog održavanja. Po njihovim tvrdnjama zamena služi da se sistem vrati u stanje „kao nov“. Remont služi da se izvrše fina podešavanja i da se eliminišu svi potencijalni otkazi koji prete sistemu (pod remontom se ovde podrazumeva PM). Popravka služi da sistem vrati u operativno stanje nakon što je ovaj otkaza to jest u stanje „kao prethodno“ (održavanje u nuždi). Dok je remont i zamenu moguće planirati popravke se dešavaju nasumično i nemoguće ih je predvideti. Koristeći označavanje primenjeno kod modela virtuelne starosti kao u (Kijima, Morimura i Suzuki 1988) oni smatraju da sistem dobija (neperfektno) preventivno održavanje svakih  $T$  vremenskih jedinica, kvarovi između održavanja se podvrgavaju minimalnim popravkama i komponenta se menja posle određenog fiksnog broja preventivnih održavanja.

(Nakagawa 1986) proučava sličan model, ali on smatra da je PM neperfektno u smislu da se nakon PM intenzitet otkaza menja i da se sistem zamenjuje prilikom  $N$ -tog PM.

Prethodna dva rada predlažu modele održavanja koji mogu da se razvrstaju u drugu kategoriju periodične politike PM koja bi se zvala Politika periodične zamene sa minimalnim popravkama pri otkazu. Treća kategorija periodičnih politika PM bila bi periodična politika bez zamene pri otkazima, to jest jedinica se uvek zamenjuje u vremenu  $kT$  ( $k=1,2,\dots$ ), ali se nikad ne menja pri otkazima.

Proširenja politike blok zamene predložena od strane autora (Berg i Epstein 1976) sastoje se u tome da se odredi limit starosti uređaja. Predložili su da se otkazala jedinica zameni novom, sa druge strane jedinica čija starost je manja ili jednaka limitu  $t_0$  ( $0 \leq t_0 \leq T$ ) u predviđenom vremenu zamene  $kT$  ( $k=1,2,\dots$ ) se ne menja već se ostavlja da radi dok ne otkáže ili do sledećeg planiranog vremena zamene.

(Nakagawa 1981) predstavlja tri modifikacije za politiku periodičnih zamena sa minimalnim popravkama pri otkazu. Sve modifikacije koje je predložio su uvedene u svrhu boljeg spoja sa praksom održavanja različitih sistema.

Sve tri nove predložene politike održavanja uvode novi pojam a to je referentno vreme  $T_0$  pored već postojećeg periodičnog vremena  $T^*$ .

Konkretne pretpostavke za ove tri nove politike održavanja glase:

- a) Ako se otkaz dogodi pre vremena  $T_0$ , onda se sprovodi minimalna popravka.
- b) Ako je vreme rada jedinice  $T^*$  onda se sprovodi zamena jedinice u vreme  $T^*$ ,
- c) Ako dođe do otkaza u vremenu između vremena  $T_0$  i  $T^*$  onda;
  - i. (Politika broj 1) jedinica se ne popravlja i ostaje u otkazu do vremena  $T^*$ ,
  - ii. (Politika broj 2) otkazala jedinica se menja novom jedinicom onoliko puta koliko je to potrebno do vremena  $T^*$ ,
  - iii. (Politika broj 3) otkazala jedinica se zamenjuje novom.

U sve tri predložene politike upravljačke promenljive su  $T_0$  i  $T^*$ . Jasno je da ako se definiše da je  $T_0 = T^*$  sve tri politike postaju periodične zamene sa minimalnim popravkama pri otkazu. Ako se definiše da je  $T_0 = 0$  onda politika broj 3 postaje politika blok zamene.

Istraživanja vezana za periodično preventivno održavanje data su u tabeli T. 3.

#### 3.3.4 Intenzitet otkaza (Failure Limit Policy)

Ovaj način održavanja podrazumeva da se PM preduzima samo onda kada je intenzitet otkaza ili neki drugi indikator pouzdanosti određene komponente na nekom unapred definisanom nivou, a

na otkaze se reaguje popravkama. (Malik 1979) je izveo raspored PM prema kome komponenta radi iznad ili na minimumu prihvatljivog nivoa pouzdanosti. (Lie i Chun 1986) su formulisali model troškova održavanja gde se PM preduzima kad god komponenta dostigne unapred određeni maksimum intenziteta otkaza. Oni su definisali dva tipa preventivnog održavanja:

- ✓ 1P. *Jednostavni tip preventivnog održavanja* koji menja vreme sistema na krivoj intenziteta otkaza ka nekom novijem vremenu, ali nikada do vrednosti nula (sistem nije „kao nov“). Stepem poboljšanja intenziteta otkaza nakon ovog održavanja naziva se faktor poboljšanja.

- ✓ 2P. *Preventivna zamena*, koja kao i korektivna zamena vraća krivu intenziteta otkaza na poziciju nula, to jest sistem „kao nov“ Ona se razlikuje u odnosu na korektivnu zamenu samo po stanju u kojem se sistem nalazi kada se sprovedi zamena.

Intenzitet troškova održavanja sistema po ovoj politici održavanja je formulisan kao odnos prosečnih troškova za ciklus (vreme između dve zamene) i prosečnog trajanja ciklusa. Optimalni broj 1P tipa održavanja pre nego što se sprovede 2P tip održavanja je dobijen minimiziranjem intenziteta troškova a na primeru Weibulove raspodele vremena otkaza. Optimalna rešenja za takvu predloženu politiku održavanja dobijena su u funkciji faktora poboljšanja i unapred definisanog gornjeg limita intenziteta otkaza.

(Jayabalan i Chaudhuri 1992a) pronašli su optimalnu politiku održavanja za unapred određeni vremenski period pod pretpostavkom da je vreme zastoja potrebno za instalaciju komponente i PM zanemarivo. U ovom radu autora koriste i definicije 1P i 2P tipa preventivnog održavanja koje su već korišćene kod drugih autora, kao što se moglo videti.

U drugim radovima, (Jayabalan i Chaudhuri 1992b) razmatraju vreme zastoja potrebno za zamenu komponente kao pozitivnu konstantu za razliku od svog prethodnog rada gde su

posmatrali vreme zastoja kao zanemarivo. Kako komponenta stari uzastopna vremena zastoja potrebna za PM postaju sve veća. Da bi uspeli da uvrste ovo vreme potrebno za PM (Jayabalan i Chaudhuri 1992b) podrazumevaju da vreme za PM sledi eksponencijalnu raspodelu sa određenim matematičkim očekivanjem i da se vrednost matematičkog očekivanja povećava sa starenjem sistema. U suštini vreme potrebno za sprovođenje PM se povećava sa brojem sprovedenih PM.

Bitno je napomenuti da su politike PM kontrole intenziteta otkaza izuzetno komplikovane za izračunavanje i skoro nemoguće za primenu u praksi.

Pregled politika kontrole intenziteta otkaza dat je u tabeli T. 4

T. 3 Studije neperfektnog održavanja u okviru politika periodičnog preventivnog održavanja (Wang i Pham 2006)

Studija	PM	CM	Matematički metod	Kriterijum optimizacije	Teorija modelovanja	Vreme planiranja
Nakagawa (1979)	Neperfektno	Minimalno	$(p, q)$ pravilo	Intenzitet troškova	Teorija obnavljanja	Neograničeno
Nakagawa (1980)	Neperfektno	Perfektno Minimalno	$(p, q)$ pravilo $x$ pravilo	Intenzitet troškova	Teorija obnavljanja	Neograničeno
Bechelt (1981a, b)	Perfektno	Neperfektno	$p(t), q(t)$ pravilo	Intenzitet troškova	Teorija obnavljanja	Neograničeno
Fontenot and Proschan (1984)	Perfektno	Neperfektno	$(p, q)$ pravilo	Intenzitet troškova	Teorija obnavljanja	Neograničeno
Nakagawa (1986)	Neperfektno	Minimalno	Različiti intenziteti otkaza	Intenzitet troškova	Teorija obnavljanja	Neograničeno
Abdel-Hameed (1987a)	Perfektno	Neperfektno	$p(t), q(t)$ pravilo	Intenzitet troškova	Stohastički procesi	Neograničeno
Nakagawa and Yasui (1987)	Neperfektno	Perfektno	$(p, q)$ pravilo	Raspoloživost	Teorija obnavljanja	Neograničeno
Kijima et al. (1988)	Perfektno	Neperfektno	Virtuelna starost	Intenzitet troškova	Teorija obnavljanja	Neograničeno
Kijima and Nakagawa (1991)	Neperfektno	Perfektno	Šok model	Intenzitet troškova	Teorija obnavljanja	Neograničeno
Jack (1991)	Perfektno	Neperfektno	Ostali	Ukupni troškovi	Teorija obnavljanja	Ograničeno
Chun (1992)	Neperfektno	Minimalno	$x$ pravilo	Ukupni troškovi	Verovatnoća	Ograničeno
Sheu(1992)	Perfektno	Neperfektno	$p(t), q(t)$ pravilo	Intenzitet troškova	Teorija obnavljanja	Neograničeno
Liu et al. (1995)	Neperfektno	Minimalno	Virtuelna starost	Intenzitet troškova	Teorija obnavljanja	Neograničeno
Wang and Pham (1996c)	Neperfektno	Neperfektno	$(p, q)$ pravilo $(\alpha, \beta)$ pravilo	Intenzitet troškova Raspoloživost	Teorija kvazi-obnavljanja	Neograničeno
Wang and Pham (1999)	Neperfektno	Neperfektno	$p(t), q(t)$ pravilo	Intenzitet troškova Raspoloživost	Teorija obnavljanja	Neograničeno

T. 4 Studije neperfektnog održavanja u okviru politika održavanja kontrole intenziteta otkaza (Wang i Pham 2006)

<i>Studija</i>	<i>PM</i>	<i>CM</i>	<i>Pokazatelj koji se unapređuje</i>	<i>Kriterijum optimizacije</i>	<i>Teorija modelovanja</i>	<i>Vreme planiranja</i>
<i>Malik (1979)</i>	Neperfektno	Nema	Pouzdanost	Pouzdanost	Verovatnoća	Neograničeno
<i>Canfield (1986)</i>	Neperfektno	Nema	Intenzitet otkaza	Intenzitet troškova	Teorija obnavljanja	Neograničeno
<i>Lie and Chun (1986)</i>	Neperfektno	Neperfektno	Intenzitet otkaza	Intenzitet troškova	Teorija obnavljanja	Neograničeno
<i>Jayabalan (1992a)</i>	Neperfektno	Minimalno	Intenzitet otkaza	Ukupni trošak	Verovatnoća	Ograničeno
<i>Jayabalan and Chaudhuri (1992c)</i>	Neperfektno	Minimalno	Starost i Ostali	Intenzitet troškova	Verovatnoća	Neograničeno
<i>Jayabalan and Chaudhuri (1992d)</i>	Neperfektno	Nema	Starost	Ukupni trošak	Verovatnoća	Ograničeno
<i>Chan and Shaw (1993)</i>	Neperfektno	Perfektno	Intenzitet otkaza	Raspoloživost	Verovatnoća	Neograničeno
<i>Suresh and Chaudhuri (94)</i>	Neperfektno		Pouzdanost i intenzitet otkaza	Ukupni trošak	Verovatnoća	Ograničeno
<i>Jayabalan and Chaudhuri (1995)</i>	Neperfektno	Minimalno	Starost	Ukupni trošak	Teorija obnavljanja	Ograničeno
<i>Monga et al. (1996)</i>	Neperfektno	Minimalno	Redukcija (starost i intenzitet otkaza)	Intenzitet troškova	Teorija obnavljanja	Neograničeno

### 3.3.5 Sekvencijalno PM (Sequential PM Policy)

Kada se sistem održava u različitim intervalima (za razliku od periodične politike PM), takav način PM poznat je pod imenom Sekvencijalno PM. Uobičajen slučaj je da se vremenski intervali skraćuju sve više i više kako vreme prolazi, što je u skladu sa mišljenjem da većina podsistema zahteva češće održavanje kako vreme prolazi.

Rani razvoj politike sekvencijalnog održavanja potiče još od (Barlow i Proschan 1962). U ovoj sekvencijalnoj politici održavanja starost sistema za koji se predviđa PM nije uvek ista kako nailaze sledeća PM već zavisi od preostalog vremena samo do sledećeg PM. Ova uvedena fleksibilnost omogućava da se sa sekvencijalnom politikom PM postižu manji troškovi nego sa optimalnom vremenskom politikom zamene. Sa sekvencijalnom politikom PM sledeće PM se planira tako da minimizuje očekivane troškove tokom preostalog vremena. Na taj način ova

politika ne planira na početku vremenski raspon za sva PM, već nakon svakog PM određuje interval samo do sledećeg PM. Ova fleksibilnost omogućava smanjenje troškova.

(Nakagawa 1986) i (Nakagawa 1988) razmatra sekvencijalno PM gde se PM izvodi u fiksnim intervalima  $x_k$  za  $k=1,2,\dots,N$ . Jedinca se zamenjuje pri  $N$ -tom PM. Pri svakom otkazu između PM jedinica se minimalno održava, uz tu napomenu da jedinice imaju različitu raspodelu otkaza između PM.

(Nakagawa 1988) uvodi faktor poboljšanja u:

- ✓ Intenzitet otkaza sistema u sekvencijalnoj politici preventivnog održavanja gde je  $x_k < x_{k-1}$  za  $k=2,3,\dots,N-1$  fiksni interval u kojem se izvodi PM, a sistem se zamenjuje pri  $N$ -tom PM. Intenzitet otkaza  $z(t)$  nakon  $k$ -tog preventivnog pod uticajem faktora poboljšanja intenziteta otkaza  $a_k$  dobija vrednost  $a_k z(t)$ . Ako je  $A_k h(t)$  intenzitet otkaza u periodu  $k$  preventivnog održavanja gde je  $1 = a_0 < a_1 < a_2 \leq \dots \leq a_{N-1}$  Intenzitet otkaza sistema se povećava sa brojem PM.
- ✓ Starost sistema nakon PM. Nakon  $k$ -tog preventivnog održavanja starost sistema se redukuje za faktor poboljšanja  $b_k$  na  $b_k t$  ako je pre PM bila  $t$ . Odnosno starost sistema  $t$  postaje  $t(1 - b_k)$  jedinica mlađa nakon  $k$ -tog preventivnog održavanja gde je  $0 = b_0 < b_1 < b_2 < \dots < b_N < 1$

Ovaj način modelovanja održavanja je praktičan zato što više različitih komponenti ima potrebu za češćim održavanjem, kako im se starost povećava. Isto tako sekvencijalno PM se razlikuje od politike PM kontrole intenziteta otkaza, zato što kontroliše dužine  $x_k$  direktno, dok se sa intenzitetima otkaza kontrolišu intenzitete otkaza, starost, pouzdanost, itd. i zato su skoro neprimenljivi u praksi i komplikovani za izračunavanje.

(Wu i Clementis-Crome 2005) su osmislili takvo PM gde se ono sekvencijalno izvršava na svakih  $\tau_n$  vremenskih jedinica nakon  $(n-1)$ -vog PM gde je  $n=1,2,\dots$ . Između dva susedna PM izvodi se CM pri svakom otkazu. I PM i CM su neperfektni  $\tau_n$  je nezavisno u odnosu na  $n$  (*broj ciklusa održavanja*) i ustanovljeno je na osnovu minimizovanja troškova održavanja. Kao razlog za kreiranje ovakve politike održavanja autori su naveli da je u većini literature vreme sprovođenja PM ignorisano kada se traže optimalne politike održavanja. Po nekim realističnijim scenarijima po kojima se odvija održavanje troškovi otkaza sistema mogu da variraju sa vremenom trajanja otkaza, tako da bi ignorisanje vremena trajanja održavanja dalo nerealne rezultate. Pregled politika sekvencijalnog PM dat je u tabeli T. 5.



T. 5 Studije neperfektnog održavanja u okviru sekvencijalnih politika preventivnog održavanja (Wang i Pham 2006)

Studija	PM	CM	Matematički metod	Kriterijum optimizacije	Teorija modelovanja	Vreme planiranja
Nakagawa (1986)	Neperfektno	Minimalno	Različiti intenziteti otkaza	Intenzitet troškova	Teorija obnavljanja	Neograničeno
Nakagawa (1987)	Neperfektno	Minimalno	Redukovanje (starosti i intenziteta otkaza)	Intenzitet troškova	Teorija obnavljanja	Neograničeno
Kijima and Nakagawa (1992)	Neperfektno	Minimalno	Šok model	Intenzitet troškova	Teorija obnavljanja	Neograničeno
Monga et al. (1996)	Neperfektno	Minimalno	Redukovanje (starosti i intenziteta otkaza)	Intenzitet troškova	Teorija obnavljanja	Neograničeno
Wu and Clmcnts-Croome (2005)	Neperfektno	Neperfektno	$(\alpha, \beta)$ pravilo	Intenzitet troškova	Teorija obnavljanja	Neograničeno

### 3.3.6 Politike ograničenja popravki (Repair Limit Policy)

Kada komponenta otkáže, trošak popravke se utvrđuje i popravka se preduzima ako je predviđeni trošak manji od nekog limita  $L$ , u suprotnom, komponenta se zamenjuje. Ovo se zove *Repair Cost limit Policy- Politika ograničenja troškova popravki*. (Yun i Bai 1987) su proučavali optimalne politike troškova održavanja pod pretpostavkom neperfektnog održavanja na taj način da je nakon popravke sistem dobar „kao nov“ sa verovatnoćom  $(1-p)$  ili je minimalno popravljen sa verovatnoćom  $p$ . Očekivani intenzitet troškova održavanja je korišćen kao kriterijum za optimizaciju. Postojanje jedinstvenog optimalnog limita  $L$  je proučavano za slučaj Weibulove raspodele vremena do otkaza sistema i negativne eksponencijalne raspodele troškova održavanja. Zanimljivo je da u uvodnom delu svog rada ovi autori tvrde je politika ograničenja troškova popravki dobar reprezent načina na koji većina ljudi razmišlja u vezi održavanja kada treba da odluče da li nešto treba da se zameni ili da se popravi.

Politika ograničenja vremena održavanja- *Repair Time Limit Policy* je predložena od strane (Nakagawa i Osaki 1974) . Na primeru redundantnog sistema sa dve komponente i modifikovane metode regenerativnih tačaka i Markovljevih procesa regeneracije predložen je model u kojem je proučavana raspoloživost ovakvog sistema. U njemu se komponenta popravlja ako se pokvari.

Ako popravka može da se završi unutar određenog vremenskog roka  $T$  komponenta se vraća u upotrebu, ukoliko ne može da se izvrši popravka u zahtevanom roku menja se novom.  $T$  se naziva limit vremena popravke.

(Nguyen i Murthy 1981) su proučavali politike limita vremena popravke pod pretpostavkom neperfektnog održavanja. Popravke su neperfektno u smislu da je matematičko očekivanje životnog veka manje od matematičkog očekivanja životnog veka novog sistema.

U drugom delu rada u politici zamene sa ograničenjem popravki koji su predložili postoje dva tipa popravke, lokalna popravka i centralna popravka. Lokalna popravka je neperfektna dok je centralna popravka perfektna. Optimalne politike su izvedene da bi se minimizovao očekivani intenzitet troškova u neograničenom vremenskom roku.

Istraživanja u smislu politike ograničenja popravki su prikazani u tabeli T. 6.

T. 6 Studije neperfektnog održavanja u okviru politike ograničenje popravki (Wang i Pham 2006)

Studija	CM pre limita troškova	CM nakon limita troškova	Matematički method	Kriterijum optimizacije	Teorija modelovanja	Vreme planiranja
Beichelt (1978, 1981b)	Minimalno	Perfektno	$(p(t), q(t))$ Pravilo	Intenzitet troškova	Teorija obnavljanja	Neograničeno
Nguyen and Murthy (1981)	Neperfektno	Perfektno	Ostali	Intenzitet troškova	Teorija obnavljanja	Neograničeno
Yun and Bai (1987)	Neperfektno	Perfektno	$(p, q)$ pravilo	Intenzitet troškova	Teorija obnavljanja	Neograničeno
Yun and Bai (1988)	Minimalno	Perfektno	Ostali	Intenzitet troškova	Teorija obnavljanja	Neograničeno
Wang and Pham (1996c)	Neperfektno	Neperfektno	$(p, q)$ pravilo / $(\alpha, \beta)$ pravilo	Intenzitet troškova Raspoloživos	Teorija kvazi-obnove	Neograničeno

### 3.3.7 Politike brojanja popravki i referentnog vremena (Repair Number Counting and Reference Time Policy)

(Morimura i Makabe 1963a) su predložili novu politiku održavanja gde se jedinica menja nakon  $k$ -tog otkaza. Prvih  $(k-1)$  otkaza se otklanjaju minimalnim popravkama. Nakon zamene čitav proces se ponavlja. Takva politika održavanja zove se **politika brojanja popravki**. Upravljačka promenljiva, to jest ona na osnovu koje se donose odluke, je u ovom slučaju  $k$ . U svom narednom radu na ovu temu autor (Morimura 1970) je proširio ovu politiku u tom smislu da je uveo novu promenljivu  $T$  koji je nazvao **kritično referentno vreme** i koja je pozitivan

broj. U ovoj proširenoj politici, svi otkazi pre  $k$ -tog otkaza se koriguju samo minimalnim održavanjem. Ako se  $k$ -ti otkaz dogodi pre akumuliranog operativnog vremena  $T$ , on se otklanja minimalnom popravkom, ali se pri sledećem otkazu deo zamenjuje. Ako se  $k$ -ti otkaz dogodi nakon referentnog vremena  $T$  onda se odmah pristupa zameni jedinice. Kao što se može primetiti ova politika objedinjuje ideje brojanja otkaza i beleženja proteklog operativnog vremena. U slučaju da se definiše da je promenljiva  $T=0$  ova politika se automatski svodi na politiku brojanja otkaza.

Slično kao i kod gorepomenutih autora istraživana je i verzija sa neperfektnim (umesto sa minimalnim održavanjem). U svom radu (Jack 1991) daje integralnu verziju jednačine za procenu očekivanih troškova održavanja putem zamene komponenti u neograničenom vremenu posmatranja. Asimptotska procena očekivanih troškova je data kroz primer politike održavanja koja uključuje neperfektno održavanje pri otkazima sa zamenama nakon  $N$ -tog otkaza. Na osnovu toga optimalne politike održavanja sa brojem popravki  $N^*$  su proračunate i za konačno i za beskonačno vreme posmatranja sistema.

Slično politici brojanja popravki a na osnovu Modela zamene sa minimalnim popravkama pri otkazu koji su prvi put predstavili (Barlow i Proschan 1965) u radu (Park 1979) predstavljen je model održavanja koji nakon određenog broja minimalnih popravki podrazumeva zamenu. Optimalno rešenje je predloženo na primeru Weibulove raspodele otkaza za iznalaženje minimalnih prosečnih troškova održavanja.

(Lam 1988) je istraživao politiku brojanja popravki s tim da su se dužine operativnih ciklusa smanjivale dok su se dužine ciklusa popravki produžavale.

Istraživanja politike zamene sproveo je i (Muth 1977) koja su slična ideji proširene politike brojanja popravki kao u (Morimura 1970) gde se odlučuje između popravke ili zamene sistema koji je otkazao. (Muth 1977) definiše sledeće: „Ako se uzme da je  $x$  akumulirano operativno vreme sistema nakon poslednje zamene i ako je  $\tau$  upravljačka promenljiva na osnovu koje se vrši održavanje sistema onda imamo da: Ako sistem otkáže i ako je  $x < \tau$  onda se otkaz popravlja. Ako sistem otkáže i  $x \geq \tau$  onda se vrši zamena sistema. Zamena sistema se smatra da je perfektna popravka, a same popravke su minimalne. Za razliku od politike referentnog vremena  $T$  u ovom modelu se ne vrši zamena baš u tom trenutku nago nakon toga.

U svojim radovima (Makis i Jardine 1991) (Makis i Jardine 1993) su diskutovali o optimalnoj politici zamene sa neperfektnim popravkama pri otkazu. Pored perfektne popravke koja je moguća sa verovatnoćom  $p(x)$  ili minimalne popravke sa verovatnoćom  $q(x)$  dodaju i treću

mogućnost a to je da je popravka neuspela sa verovatnoćom  $s(x) = 1 - p(x) - q(x)$  te da se sistem mora odbaciti i zameniti po dodatnim troškovima. Sve ovo je pod pretpostavkom da postoji optimalan broj popravki  $T$  na osnovu koga se izračunavaju prosečni troškovi.

U (Makis i Jardine 1992) takođe se pominje opšta politika zamene po kojoj jedinica može biti zamenjena u bilo koje vreme, a nakon  $n$ -tog otkaza jedinica može biti ili zamenjena ili podvrgnuta neperfektnoj popravci. Zavisno od postavljenih uslova ovaj model može da se primeni kao politika brojanja popravki, politika referentnog vremena, ili politika periodične zamene sa minimalnim popravkama pri otkazu i zato je okarakterisana kao opšta.

U suštini politike brojanja popravki su efikasnije za primenu u slučajevima kada se ukupno vreme rada jedinice ne beleži ili kada nije suviše vremenski zahtevna i skupa operacija zamene nekog dela na jedinici u toku rada. (Muth 1977) je u svom radu dokazao da politika referentnog vremena u dužem vremenskom obimu generiše veće očekivane troškove po jedinici vremena nego periodična politika PM, pod pretpostavkom da se preostali životni vek jedinice do otkaza konstantno smanjuje nakon nekog vremena  $t_0$ . Ako se uzme u obzir ova osobina sistema da u nekom periodu počinje tzv. pozitivno starenje onda je ekonomski isplativije da se jedinica zameni nego da se izvode minimalna održavanja jedno za drugim. Dokazano je takođe da politika brojanja popravki daje niži intenzitet očekivanih troškova nego politika zamene po vremenskim resursima. Isto tako je i broj otkaza pre zamene kod politike brojanja popravki manji nego kod politika zamene po vremenskim resursima. Treba samo obratiti pažnju da je sve ovo dokazano samo za model Weibulove raspodele otkaza.

Kod politike brojanja popravki uglavnom se ne razmatraju PM. Ove politike kao što im i ime samo kaže uglavnom se baziraju na brojanju popravki i/ili referentnom vremenu. Kod vremenski zavisnog PM i periodičnih PM politike se zasnivaju na vremenima za PM po kojima se obavlja održavanje. Održavanje koje se obavlja u politikama brojanja otkaza i/ili referentnog vremena ne podrazumeva da se akcija održavanja sprovodi u referentnom vremenskom trenutku. Broj održavanja i referentno vreme su upravljачke promenljive. U politikama sa PM vreme PM je jedina upravljачka promenljiva.

### 3.4 Multikomponentni sistemi

#### 3.4.1 Razvoj modela održavanja multikomponentnih sistema

(Zhao 1994) je ustanovio model raspoloživosti u kojem mogu biti modelovana perfektna i minimalna popravka. On podrazumeva da popravka komponenti ne može biti takva da su posle toga „kao nove“ i da raspodele vremena između otkaza mogu da prate bilo koji tip raspodele

nakon popravke i da je ona različita od one koja je bila ranije te je tako došao do srednje granične raspoloživosti i srednjeg vremena rada i zastoja sistema. U ovom modelu serijskog sistema vreme popravke nije zanemarivo i samim time ovaj model je primenljiv u praksi. Zhao je svoj model bazirao na radu (Barlow i Proshan 1975).

U radu ovog autora je predložen opšti model raspoloživosti za popravljive komponente uvezane u serijski sistem. Smatra da je korisno da se uvede model raspoloživosti koji bi bio baziran na neperfektnom održavanju. Ovaj model podrazumeva da se otkazala komponenta vraća u stanje „kao nova“ (perfektna popravka) sa verovatnoćom  $p$  ili se vraća u stanje „kao pređašnje“ sa verovatnoćom  $1-p$  (minimalna popravka). Obzirom da popravka može biti minimalna a smatra se da pripada velikom sistemu sa mnogo nedominantnih komponenti, onda je bolje da se u nekom trenutku zameni nego da se popravlja mnogo puta.

Ovaj pristup problemu multikomponentnih sistema je sličan onome koji su primenili (Subramanian i Natarajan 1990)

Kao što se može videti postoji najmanje šest opštih politika održavanja koje su razvijene za jednokomponentne sisteme. Generalno, svaki višekomponentni sistem može da se posmatra kao sistem od više podsistema (jedinica). Optimalna rešenja za takav sistem mogu da se svedu na rešenja za jednokomponentne sistema samo ako unutar takvog složenog sistema ne postoji ekonomska strukturna ili međuzavisnost otkaza među podsistemima. Ako je pretpostavka o nepostojanju međuzavisnosti tačna, onda se bilo koja od šest politika održavanja može primeniti na bilo koji od podsistema (zavisno od toga koja najbolje odgovara određenom podsistemu).

Međutim, ako postoji neka od zavisnosti, npr. ekonomska, onda primena zasebnih politika održavanja na svaki od podsistema neće dati optimalnu odluku za te podsisteme. Odluka o optimalnom održavanju sigurno zavisi i od stanja u kojem se nalaze ostali podsistemi. Jedan praktičan primer može biti i taj da ako otkaze jedan podsistem onda se može ukazati prilika da se i drugi sistem koji nije otkazao podvrgne inspekciji ili preventivnom održavanju. Ovo je primer tzv. Oportunističke politike održavanja višekomponentnih sistema.

Modeli neperfektnog održavanja za multikomponentnih sisteme su dati u tabeli T. 7.

### 3.4.2 Grupne politike održavanja

Problem grupnih politika održavanja koje su sa stanovišta pouzdanosti sistema i operativnih troškova najbolje može se podeliti u tri klase:

- ✓ Prva klasa problema grupnih politika održavanja obrađuje pitanje koje su to kategorije komponenti koje je potrebno zameniti kada jedinica otkáže. Ovo je posebno bitno kada su različiti troškovi povezani sa rastavljanjem i ponovnim sastavljanjem i simultanim PM raznih kategorija komponenti.
- ✓ Druga klasa problema je povezana sa pokušajima smanjenja troškova održavanja uvođenjem redundantnih jedinica u sistem.
- ✓ Treća klasa problema bavi se izučavanjem grupnih politika održavanja sistema koje se sastoji od više zasebnih mašina, od kojih svaka podleže istoj raspodeli otkaza.

Za rešenje ovih problema predložene su tri vrste politika održavanja i to:

- ✓ Prva politika je tzv. *T- starost* grupna politika zamene i podrazumeva inspekciju komponenti kada sistem dostigne starost  $T$ .
- ✓ Druga politika se naziva politika *m- otkaza* politika grupne zamene i podrazumeva da se izvrši inspekcija sistema nakon što se dogodi  $m$  otkaza.
- ✓ Treća politika kombinuje prednosti prve i druge politike. Naziva se  $(m, T)$  grupna politika zamene i zahteva inspekciju sistema kada se dostigne fiksna starost sistema  $T$  ili kad  $m$  broj mašina u sistemu otkáže, šta god se prvo od ovo dvoje dogodi.

#### 3.4.3 Oportunističke politike održavanja

Kao što je ranije napomenuto održavanje višekomponentnih sistema se razlikuje od održavanja jednokomponentnih. Ukoliko postoji ekonomska zavisnost moguće je jednu komponentu preventivno održavati ako je sistem već otkazao zbog druge komponente. Druga zavisnost je međuzavisnost otkaza, ili takozvani korelisani otkazi. Na primer, ako jedna komponenta otkáže taj otkaz može uticati na druge podsisteme tako da njihova vremena do otkaza postaju statistički zavisna. O problemima oportunističkog održavanja biće više reči u narednom pasusu gde e pominju radovi koji obrađuju probleme zavisnosti.

#### 3.5 Zavisnosti (dependence)

Postoje tri vrste zavisnosti:

- ✓ ekonomska zavisnost,
- ✓ zavisnost zvana korelisani otkazi i popravke i
- ✓ međuzavisnost otkaza.

Autori kao što su (Rander i Jorgenson. 1963) bavili su se pitanjem ekonomske zavisnosti u sistemima sa  $n$  komponenti.

T. 7 Multikomponentni sistemi tretirani neperfektnim održavanjem (Wang / Pham 2006)

Studija	PM	CM	Matematički metod	Kriterijum optimizacije	Teorija modelovanja	Horizont / arhitektura / politika
Shaked and Shanthikumar (1986)	Nema	Neperfektno	Višestruko (p,q) pravilo	Nema	Teorija obnavljanja	Neograničan / proizvodnja/
Subramanian and Natarajan (1990)	Nema	Neperfektno	Ostali	Pouzdanost Raspoloživost	Stohastički procesi	Neograničen / Dvo-komponentni standby/
Zheng and Fard (1991)	Perfektno	Neperfektno	Ostali	Intenzitet troškova	Verovatnoća	Neograničen / proizvodnja / Ograničenje popravki
Sheu and Griffith (1991b)	Nema	Neperfektno	Višestruko (p(t),q(t))	Nema	Teorija obnavljanja	Neograničen / proizvodnja / Vremenski zavisna
Sheu and Liou (1992c)	Perfektno	Neperfektno	(p(t),...,p <sub>n</sub> (t))	Intenzitet troškova	NHPP	Neograničena / t-od-n / Vremenski zavisna
Zhao (1994)	Nema	Neperfektno	Ostali	Raspoloživost	Verovatnoća	Neograničen / Serijski
Sheu and Kuo (1994)	Perfektno	Neperfektno	(p(t),q(t))	Intenzitet troškova (slučajni troškovi)	Teorija obnavljanja	Neograničen / t-od-n / Vremenski zavisna
Wang and Pham (2006)	Nema	Neperfektno	( $\alpha, \beta$ )	Raspoloživost	Teorija Kvazi-obnavljanja	Neograničen / Serijski/
Wang (1997)	Perfektno	Neperfektno	(p(t),q(t))	Raspoloživost Intenzitet troškova	Teorija obnavljanja	Neograničen / Proizvoljni / Vremenski zavisna
Pham and Wang (2000)	Neperfektno	Neperfektno	(p,q) pravilo	Raspoloživost Intenzitet troškova	Teorija obnavljanja	Neograničen / t-od-n / Periodična
Wang et al. (2001)	Neperfektno	Perfektno	(p(t),q(t))	Raspoloživost Intenzitet troškova	Teorija obnavljanja	Neograničen / Proizvoljni / Vremenski zavisna

Efekte otkaza i ekonomsku zavisnost unutar primenjene politike održavanja sa periodičnim zamenama proučavao je (Ozekici 1988) i došao je do korisnih rezultata u vezi sa karakteristikama optimalne politike periodičnih zamena.

Istraživanja zavisnosti zvane korelisani otkazi i popravke za neke od popravljivih sistema sprovodio je autor (Goel, Shiravastava and Gupta 1992) (Goel, Gupta and Tayagi 1993) (Goel, Mumataz and Gupta 1996) i to za: dvokomponentne stand-baj sisteme, dvokomponentne redundantne sisteme sa definisanim prioritetom, stand-baj sisteme u pripravnosti,

dvokomponentne stend-baj sisteme bez pripravnosti, dvoservevske dvokomponentne sisteme, itd. Korišćenjem bivarijanske eksponencijalne funkcije raspodele je modelovao zajedničku raspodelu vremena otkaza i vremena popravke. Autori (Gupta, Mumataz and Rastogi 1999) su analizirali u svom radu korist koja se dobija pri korišćenju dva ne identična stend-baj sistema bez pripravnosti i sa korelacijom otkaza i popravki i međusobnom zamenom.

(Harris 1968) je koristio bivarijansnu eksponencijalnu funkciju da bi opisao korelisane otkaze dve komponente i izračunao je srednje vreme do otkaza sistema korišćenjem tehniku zamenskih promenljivih za procenjeno vreme popravke. U svom radu autor Osaki S. je proširio ovu analizu da bi dobio raspoloživost sistema korišćenjem jedne verzije polu-Markovljevih procesa sa određenim tačkama ne obnavljanja. (Pijenenburg, Ravichandran and Regterschot 1993) je proračunao pouzdanost, srednje vreme do otkaza i shodno tome, i konačnu raspoloživost i zajedničku raspoloživost i pouzdanost unutar intervala vremena koristeći proces umetnutog obnavljanja. Modelovanjem zavisnosti otkaza unutar sistema sa  $n$  komponenti korišćenjem zajedničke raspodele vremena do otkaza  $n$  komponenti bavili su se u svojim radovima (Shaked and Shanthikumar 1988) i (Sheu and Griffith 1992)

(Albin and Chao 1992) istraživali su politike preventivnog održavanja PM za serijske sisteme sa zavisnošću otkaza i ekonomskom zavisnošću koristeći procese Markovljeva.

(Nakagawa and Murthy 1993) razmatrali su dvokomponentni sistem sa dve vrste zavisnosti otkaza kada jedna komponenta otkáže:

- ✓ komponenta broj 2 otkazuje sa verovatnoćom  $\alpha_j$  gde  $j$  predstavlja  $j^{th}$  otkaz komponente broj 1,
- ✓ komponenta broj 1 izaziva oštećenje sa raspodelom  $G(z)$  na komponenti broj 2 i oštećenja su kumulativnog karaktera i komponenta broj 2 otkazuje u trenutku kada oštećenja pređu određeni prag.

(Nakagawa and Murthy 1993) došli su do izraza za očekivane intenzitete troškova održavanja za dvokomponentne modele uz pretpostavku da se sistem zamenjuje novim pri otkazu komponente broj 2 ili  $n$ -tom otkazu komponente broj 1 i dali su predloge za optimalne politike održavanja.

Razmatranja problema ocene parametara za modele sa međuzavisnošću otkaza dali su autori u (Murthy and Wilson 1994) svom radu.



(Pham 1992) proučava pouzdanost sistema sa visokim naponima sa međuzavisnošću otkaza i tretira međuzavisnost otkaza na takav način da kada jedna komponenta otkáže ona izaziva povećanje intenziteta otkaza na drugoj komponenti.

## 4. Razvoj metodologije za primenu modela neperfektnog održavanja

### 4.1 Produženje veka upotrebe vazduhoplova

Očekivani životni vek školskog aviona G-4 originalno je bio definisan na 20 godina kalendarskog trajanja ili 3000 časova naleta. Prva procena mogućnosti produženja veka upotrebe izvršena je 2004. godine i donesena je odluka da se životni vek produži na 30 godina odnosno 5000 časova naleta. Ova prva procena izvršena je u vreme kada je prvim serijskim avionima isticao životni vek od 20 godina. Bitno je napomenuti da je proizvodnja serijskih primeraka ovog tipa aviona trajala u rasponu od 5 godina. Produženje koje je stupilo na snagu odnosilo se na sve primerke G-4. Godine 2010. izvršena je nova procena stanja sistema na avionima i donesena je odluka da se životni vek produži za dodatnih 8 godina odnosno 1000 časova naleta. Ukupno sa prvim produženjem veka upotrebe to iznosi 38 godina ili 6000 časova naleta. Drugo produženje životnog veka urađeno je kada je poslednjim serijskim primercima školskog aviona G-4 istekao originalni životni vek od 20 godina a produženje se odnosilo na sve primerke ovog tipa aviona. Tokom prvih 20 godina upotrebe flota školskih aviona G-4 je u proseku ostvarila nalet od 1500 časova, ili posmatrano u normama projektovanog godišnjeg iskorišćenja, avion je projektovan za 167 časova godišnjeg iskorišćenja, a u praksi je iskorišćenje bilo 50-70 časova godišnje. Na osnovu analize strukture životnog veka a prevedeno u termine efektivnosti, ovo znači da je tokom veka upotrebe flota aviona provela većinu u tzv. slobodnom vremenu (avioni su bili ispravni ali se nisu upotrebljavali). Preostala dva vremena, vreme korišćenja i vreme zastoja pojedinačno su bili manji od slobodnog vremena.

Drugo produženje životnog veka flote školskih aviona G-4 sprovedeno 2010. godine zasnovano je pre svega kako je to definisano u (Siladic 2007, 53-59) na nekoliko stavki:

1. *Pouzdanost sredstva tokom eksploatacije.* Ključni faktor za početnu analizu mogućnosti produženja resursa ili veka upotrebe aviona (motora) predstavlja baza podataka o istoriji otkaza(neispravnosti) posmatranog sredstva i posledicama koje su ti otkazi izazvali. Pri tome treba imati u vidu da se resursi i vek upotrebe aviona i motora definišu u časovima rada (npr. časovni resurs), dok se za pojedine delove, opremu i naoružanje resurs i vek upotrebe mogu izraziti drugim karakterističnim veličinama, npr. brojem sletanja (stajni trap), brojem opaljenja (za top), itd. (Pravilo vazduhoplovno-tehničke službe VTU-I/2 1986) U slučaju flote školskih aviona

G-4 postoje adekvatno registrovani relevantni podaci (npr. vreme rada do otkaza, vreme rada od zadnje opravke ili remonta, odstupanje od performansi, lažna signalizacija otkaza). Za razliku od preporučene prakse date u literaturi (Siladic 2007) ovi podaci nikada nisu statistički obrađeni niti je urađena analiza pouzdanosti na taj način. Odluka o produženju veka upotrebe donesena je na osnovu uvida u dokumentaciju u kojoj se nalaze relevantni podaci i procene kadra koji se dugi niz godina bavio održavanjem ovog tipa vazduhoplova i koji ima pozitivna iskustva sa održavanjem ovog tipa vazduhoplova.

2. *Iskustvo kadra.* Iako je već pomenuto u prethodnom pasusu iskustveni faktor postoji i kao zaseban činilac u donošenju odluke o produženju veka upotrebe. On igra značajnu ulogu u definisanju sadržaja programa za produženje roka rada ili veka upotrebe konkretnog sredstva, kao i pri prognoziranju ostatka resursa. Ovde je bitno napomenuti da je jedan od osnovnih motiva za produženje veka upotrebe bio taj da je što se tiče časovnih resursa samo polovina potrošena tokom 20 godina prvobitno definisanog veka upotrebe. Na osnovu ekspertskog iskustva koje je podrazumevalo detaljno poznavanje geneze nastajanja standardnih i nestandardnih otkaza, njihovih manifestacija, tempa daljeg razvoja i posledica po motor i avion donesena je odluka da je moguće produžiti vek upotrebe flote aviona za dodatnih 18 godina odnosno 3000 časova bez bitnijeg uticaja na njihovu pouzdanost.

3. *Neophodnost.* Prilikom donošenja odluke o produženju roka rada ili veka upotrebe vazduhoplova i/ili motora moraju se proceniti potreba i rizici ulaska u takav poduhvat, uzimajući u obzir sledeće faktore:

- Imperativ održavanja borbene gotovosti vazduhoplovstva;
- Stanje remontnih kapaciteta;
- Stanje, nivo i savremenost i raspoloživost potrebne ispitno-merne i druge opreme;
- Stanje stručne osposobljenosti pripadnika vazduhoplovno-tehničke službe;
- Nivo poznavanja konkretnog sredstva, stečenog iskustva i znanja;
- Nivo prihvatljivog rizika;
- Usklađenost realnih mogućnosti izvođenja remonta i potrebe za raspoloživim avionima u operativnim jedinicama;

- Uslovljenost izvršenja remonta u inostranstvu za sredstva čiji remont nije osvojen u zemlji;
- Mogućnost nabavke novih borbenih aviona i motora sa domaćeg i/ili inostranog tržišta.

Obzirom da je projekat modernizovanog školskog aviona G-4 MD, koji treba da posluži kao prelazni tip vazduhoplova ka višenamenskom borbenom avionu, u zastoju u odnosu na prvobitno planirane rokove a da je obuka kadra za potrebe Vazduhoplovstva Vojske Srbije kao i održavanje trenaže stalnog sastava vazduhoplovnih eskadrila koje lete na ovom tipu vazduhoplova od ključnog značaja za njegov dalji opstanak, neophodnost ovakve odluke nije potrebno dalje pravdati.

Zajedničko za sva tri navedena argumenta je da se oslanjaju na inherentnu (urođenu) pouzdanost flote školskih aviona G-4 na osnovu koje je doneta odluka o produženju životnog veka. U poslednjih par godina primećeno je narušavanje pouzdanosti i samim tim pad raspoloživosti (broja raspoloživih aviona) aviona tipa G-4. Ako smo u prethodnom periodu imali da je u strukturi životnog veka preovlađivalo slobodno vreme u odnosu na vreme korišćenja i vreme zastoja, sada dolazimo u situaciju da nam vreme zastoja sve više raste na račun slobodnog vremena. Zahtevi za korišćenjem su realno na mnogo manjem nivou u odnosu na period od pre 20 i više godina. Razlozi za ovo su razni: kao što je manji broj kadeta na školovanju u Vojnoj akademiji, nedostatak ostalih materijalnih sredstava koji prate odvijanje letačke obuke, kao i lošiji meteorološki uslovi na trenutnim aerodromima baziranja (manji broj raspoloživih letaćkih dana).

I pored toga što su zahtevi manji struktura naleta flote školskih aviona je takva da po aparatu godišnji nalet u proseku bude 50 do 70 časova. Do ovakvog stanja se došlo zahvaljujući narušenoj raspoloživosti i praksa je pokazala da trenutno nema prostora za dalji porast godišnjeg iskorišćenja na način kako je do sada organizovano održavanje i logistička podrška uopšte. Može se zaključiti da se na ovaj način ušlo u iznuđeno ravnotežno stanje. Realno nalet aviona je daleko od onog koji mu je projektovanjem određen i stabilno je na tom smanjenom nivou već dugi niz godina a opet i pored svih napora da se on poveća ne uspeva se u toj nameri.

Jedan od mogućih odgovora ukazuje na to da je moguće da je avion G-4 kao sistem ušao u fazu starenja bez obzira na to što je kod produženja životnog veka procenjeno da mu je ostalo još dosta resursa i časovnog i kalendarskog. Potvrda ovog stava se može naći i u literaturi (UK Gov RA5724 2014), gde se kaže da se ulaskom u program produženja životnog veka uvek rizikuje da se uđe u fazu starenja sistema, ako se životni vek sistema posmatra kao kriva oblika

kade gde imamo na početku period dečijih bolesti sistema, zatim period nastanka slučajnih otkaza i na kraju period starenja. Problem istraživanja ovog rada je mogućnost ponovnog sagledavanja pouzdanosti flote aviona G-4, statističkom analizom relevantnih podataka i proračun efektivnosti vazduhoplova G-4 u svojoj školskoj nameni kao i poboljšanje raspoloživosti aviona G-4 primenom metoda neperfektnog održavanja.

Ako se ponovo konsultuje referentna literatura može se videti koji su ostali predviđeni koraci kada se donosi odluka o produženju životnog veka aviona pored tri koja su navedena imamo u (Siladic 2007, 53-59) da treba razmotriti i sledeće:

- ✓ *Isplativost postupka.* Sve aktivnosti na produženju roka rada i veka upotrebe sredstava moraju biti analizirane s aspekta cena/efikasnost. Jedino kada ovo nije bitan faktor je u slučaju neposredne ratne opasnosti kada je odbrana imperativ za državu.
- ✓ *Uspostavljenost koncepta i sistema za održavanje.* Veoma je bitno razlikovati situaciju kada je koncept za održavanje uspostavljen pravilno i kada svi prateći elementi logističke podrške funkcionišu. Pravilno funkcionisanje koncepta i sistema održavanja podrazumeva da:
  - Postoji odgovarajuća opremljenost kapaciteta za tekuće održavanje i remont,
  - Adekvatno dimenzionisani kapaciteti za remont,
  - Materijalno- finansijska podrška,
  - Kadrovska popunjenost i osposobljenost,
  - Racionalni utrošak roka rada vazduhoplova i motora.

Tek ako su ispunjeni svi ovi uslovi može se pristupiti planskoj obnovi roka rada vazduhoplova i motora.

U suprotnom slučaju dolazi do: nagomilavanja aviona sa isteklim rokom rada u jedinicama, dužeg zadržavanja aviona (motora) na remontu, u narušavanju dinamike izvršenja remonta i konačno u manjku aviona i (motora) za izvršenje planiranih zadataka u operativnim jedinicama.

Nešto više o problemima narušavanja dinamike remonta može se naći u radu (Rašuo i Đuknić 2013)

- ✓ *Znanje i tehnička osposobljenost kadra.* Ne treba posebno napominjati koliko je potrebno da kadar koji se bavi pitanjima produženja životnog veka poseduje multidisciplinarna znanja. Sa druge strane potrebno je da poseduju bogato iskustvo iz prakse, posebno kada je reč o sredstvu koje se konkretno predlaže za produženje životnog veka. Da bi se uspešno mogao kompletirati ceo planirani proces potrebno je

takođe, konsultovati se sa referentnim izvorima u drugim zemljama sveta o njihovim iskustvima metodama i dostignućima u dijagnostici stanja i mogućnostima monitoringa na istovetnim i sličnim sredstvima.

- ✓ *Opremljenost nadležnih nivoa za održavanje.* Oštećenja kojima su izložene komponente motora i aviona variraju po složenosti i načinu formiranja kao i po tempu napredovanja. Mogućnost detekcije takvih oštećenja i posledice koje one mogu da izazovu su takođe raznovrsne. Da bi se sve ove moguće posledice predupredile kao i da bi se sa što većom pouzdanošću i brzinom ustanovio nivo oštećenja nadležni stepen održavanja mora posedovati odgovarajuću opremu. Zanimljiva je konstatacija autora (Siladic 2007) da oprema za dijagnostiku mora da obezbedi uslove za daljinsku kontrolu. Daljinska kontrola stanja podrazumeva da se sa tom opremom može steći uvid u unutrašnje stanje komponenti agregata, aviona i motora sa vrlo ograničenim obimom rastavljanja ili bez rastavljanja. Ova konstatacija posebno dolazi u prvi plan poredi sa predmetom ovog rada i mogućim predlozima za rešavanje problema održavanja u drugom stepenu flote školskih aviona u okviru trenutne organizacije. U prethodnim poglavljima ovog rada koja su se bavila modelima održavanja koji su razvijeni na osnovu metoda neperfektnog održavanja nekolicina autora je u svojim radovima dala razloge zbog kojih održavanje može da bude neperfektno ili čak minimalno (Nakagawa i Yasui 1987) i (Brown i Proshan 1982). Između ostalog najčešće se navode nenamerna oštećenja pojedinih komponenti kada se popravljaju (zamenjuje) susedna, otkazala komponenta. Isti problemi koji se javljaju pri zameni komponenti mogu se preslikati i na problem njihove inspekcije. Pored svega gore navedenog ljudstvo koje rukuje dijagnostičkom opremom mora dobro da poznaje način njene upotrebe, opseg tačnosti i ograničenja kao i kompromise koji se moraju prihvatiti u operativnoj upotrebi.
- ✓ *„Postupnost u primeni programa tokom uvođenja i verifikacije.* Bilo koji postupak produženja resursa i životnog veka upotrebe aviona i motora mora biti dobro osmišljen sa preciziranim ograničenjima, mestima pregleda, vremenskim intervalima pregleda, preciziranim dozvoljenim granicama tolerantnih oštećenja, granicama odstupanja merenih veličina i parametara, preciziranim parametrima koji se kontinualno prate, mogućim posledicama tolerantna oštećenja poprime neplanirani ili neočekivani karakter propagacije i definisanim postupcima pilota u slučaju prekoračenja specificiranih parametara.

S obzirom da se metodologija, sadržaj i obim radova za produženje resursa i veka upotrebe verifikuju na konkretnim sredstvima u realnoj eksploataciji, potrebno je utvrditi ciljanu veličinu tog produženja, npr. 200 sati ili 300 sletanja, kada će se koncept ideje u potpunosti analizirati i preispitati, ali i kontrolne tačke kroz koje će se kontrolisati prognozirano ponašanja posmatranog aviona i motora.“ (Siladic 2007, 55)

- ✓ *Pouzdana verifikacija metodologije.* Tokom izvršenja predviđanih radova na produženju resursa i veka upotrebe aviona i motora stvaraju se uslovi da se detektuju sva tolerantna oštećenja i da se izvrši popravka svih netolerantnih oštećenja. Ukoliko je to potrebno i moguće, radno opterećenje pojedinih kritičnih komponenti može se smanjiti. Ipak i pored svih izvršenih pregleda uvek postoji određena doza rizika koja se mora prihvatiti kada se ulazi u program produženja životnog veka. Svio ovi rizici moraju biti verifikovani kroz realizaciju ovog programa i pri tome se ključne sledeće četiri faze:

- „Izvršenje radova i pregleda po programu,
- Ispitivanje aviona (motora ) na zemlji,
- Ispitivanje aviona (motora) u vazduhu,
- Brzo reagovanje i pronalaženje rešenja koja će adekvatno amortizovati svaki vanredni poremećaj, tako da takva poremećaj ne ugrozi baznu koncepciju programa za produženje resursa ili veka upotrebe“ (Siladic 2007)

- ✓ *Sveobuhvatnost odluke.* Prilikom donošenja odluke o produženju resursa aviona i /ili motora moraju se imati na umu sledeći faktori:

- „Bezbednost letenja, izražena kroz pouzdan rad strukture, sistema, opreme i motora,
- Zadovoljenje taktičko-tehničkih zahteva, odnosno obezbeđenje odgovarajućih performansi aviona i motora;
- Racionalno (ekonomično) iskorišćenje životnog veka aviona i motora
- Adekvatna prognostika, koja će moći da podrži princip eksploatacije aviona sa tolerantnim oštećenjima.
- Izbor odgovarajućih intervala dijagnostike stanja i održavanja, koji neće narušiti borbenu gotovost ili dovesti do katastrofalnih otkaza.“ (Siladic 2007) Ovaj faktor koji je poslednji u nizu sagledavanja sveobuhvatnosti odluke je u suština istraživanja ovog rada gde su definisane dobiti od istraživanja na sledeći način:
  - Praćenje pouzdanosti vazduhoplova i njegovih sistema;

- Uvođenje metodologije za izbor modela neperfektnog održavanja i shodno tome primena izabranog modela u proračun normi održavanja u drugom stepenu;
  - Predlog normi i postupaka za dostizanje zadate raspoloživosti flote vazduhoplova;
  - Predlog za smanjenje troškova.
- ✓ *Poznavanje principa za upravljanje životnim vekom aviona.* Kada je reč o principima za upravljanje životnim vekom aviona i njihovih komponenti u vazduhoplovstvo postoje dva principa. Prvi od njih je striktniji i bazira se na tome da ni jedan materijal ne sme da ima inicijalna oštećenja. To znači da nisu dozvoljene nikakve anomalije ili defekti i da ciklusi zamora materijala budu projektovani da nadmaše norme (vremenske intervale i cikluse) korišćenja aviona/motora. Ovakve strukture mogu da se kontrolišu metodama nedestruktivnih pregleda u toku same proizvodnje.

Sa druge strane princip tolerantnog oštećenja aviona i motora u eksploataciji se zasniva na realističnoj pretpostavci da je svaka struktura podložna oštećenju i otkazima, ali da se oni tolerišu do određene granice. Ukoliko je moguće proceniti vrstu i tempo napredovanja otkaza, onda je potrebne preglede planirati tako da se preduzimaju u polovini procenjenog vremena do nastanka otkaza. U takvo slučaju se vrši rigorozna procena mogućnosti nedestruktivnih metoda.

## 4.2 Definisane drugog stepena održavanja kroz kategorije neperfektnog održavanja

### 4.2.1 Analiza koncepta (politika) održavanja flote dozvučnih borbenih aviona

Koncepti održavanja ili kako se u pojedinoj literaturi nazivaju politike održavanja (Rašuo, Vazduhoplovno-tehničko obezbeđenje 2002) predstavljaju niz propisanih mera, aktivnosti i načina obavljanja poslova vezanih za održavanje nekog sistema. U konceptima održavanja su definisani potrebni obimi i nivoi na kojima će se obavljati pojedine aktivnosti održavanja. Takođe daje i potrebne elemente za integralno logističko obezbeđenje.

Koncept održavanja propisuje predviđeni obim održavanja nekog sistema, definiše zadatke preventivnog održavanja i nivo održavanja na kojima će se ovi zadaci obavljati. Najlogičniji pristup uspostavljanju koncepta održavanja je da se prilikom projektovanja sistema paralelno



projektuje i koncept održavanja. Na taj način moguće je ispoštovati i zahteve u vezi sa pogodnošću održavanja vazduhoplova. U literaturi (Rašuo, Vazduhoplovno-tehničko obezbeđenje 2002) kaže se da je sve zastupljenija međusobna zavisnost tipa konstrukcije vazduhoplova i definisanja koncepta njegovog održavanja.

Primenjeni koncept održavanja može i da definiše tip konstrukcije sistema. Naime, sistem može da bude sastavljen od integralnih, nedeljivih modula, (blokova) koji se ne popravljaju već se komplet zamenjuju. U trećem poglavlju ovog rada gde je bilo reči o klasifikaciji modela neperfektnog održavanja prema politikama (konceptima) održavanja kada je bilo reči o Politici periodičnog preventivnog održavanja pomenuto je da se kao jedna od verzija javlja i kao Politika blok zamene (Block replacement policy). Ovaj naziv potiče baš upravo iz činjenice što je samim konceptom (politikom) definisano da se celi blokovi komponenti u sistemu zamenjuju nakon nekog vremenskog perioda. Pored nepopravljivih elemenata sistem može biti sastavljen i od delimično popravljivih ili od potpun popravljivih elemenata.

Nepopravljivi elementi su obično modularni i ukoliko uz to imaju i nisku cenu obično se prilikom otkaza odbacuju i zamenjuju novim. Ukoliko. Ipak imaju višu cenu, može se u određenim uslovima predvideti popravka ili reparacija a zatim i ponovno korišćenje kao rezervnog dela. Modularni tip elemenata prema konstrukcionim zahtevima mora da omogućiti laku demontažu i zamenu.

Kod delimično popravljivih sistema popravka se vrši uklanjanjem podsistema i njihovom zamenom dok se podsistemi popravljaju neispravnih komponenti.

Izbor koncepta održavanja zavisi od operativnih zahteva a vezan je i za odgovarajuću logističku podršku.

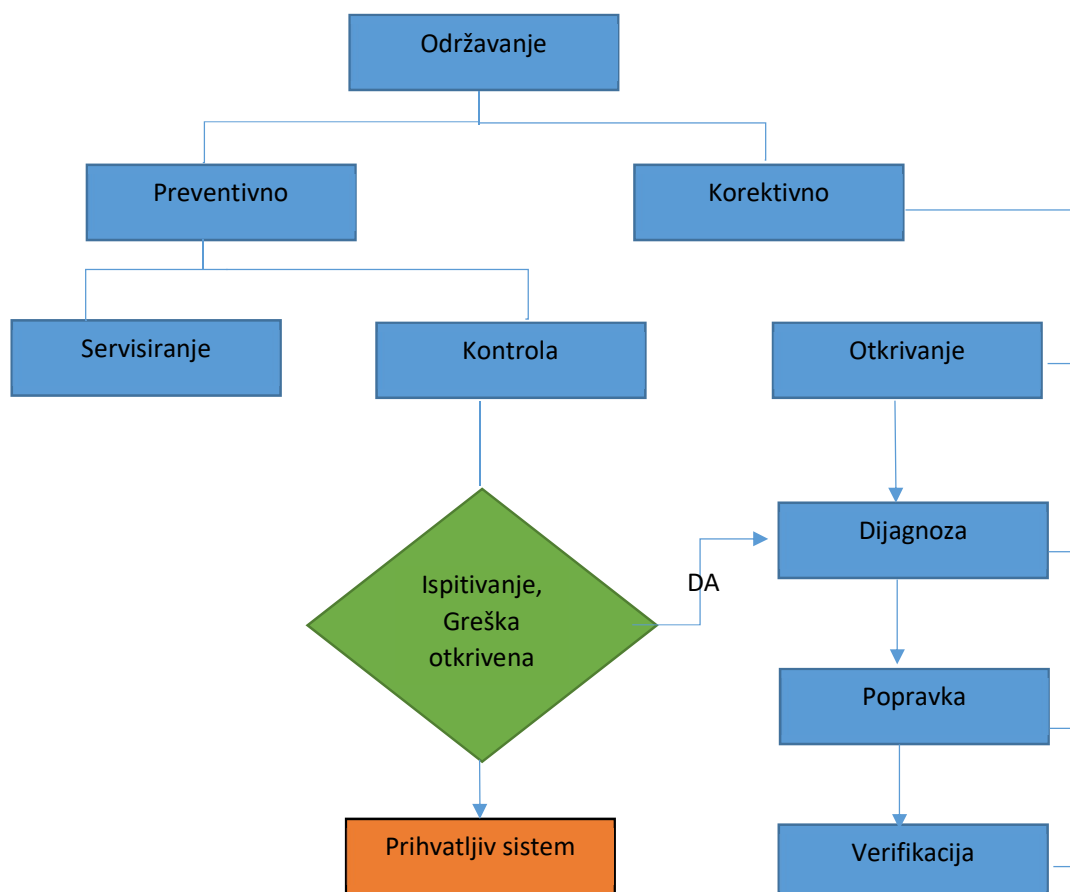
Popravljivi sistemi zahtevaju kompletnu logističku podršku sa uređajima za ispitivanje i pomoćnom opremom, rezervnim delovima koji su potrebni, kvalifikovanim osobljem, dokumentacijom i radionicama.

Koncept održavanja moguće je menjati u toku životnog ciklusa, obzirom da je vek upotrebe vazduhoplova relativno dug. Ove promene se odvijaju u funkciji obavljenih konstruktivnih modifikacija, inovacija opreme i sistema, stanja rezervnih delova i mogućnosti njihove nabavke na tržištu, zastarelosti i slično. U domenu mogućih perioda promene koncepcije održavanja svakako se nalazi i plansko produženje roka rada, kada je i inače po jednom od preporučenih

koraka (Siladic 2007) za donošenje sveobuhvatne odluke potrebno ispitati uspostavljenost koncepta i sistema za održavanje. Predloženi predmet i cilj istraživanja za ovaj rad su analiza pouzdanosti aviona G-4 statističkom analizom relevantnih podataka i ispitivanje mogućnosti povećanja raspoloživosti flote aviona G-4 posle produžetka veka njegove upotrebe primenom modela neperefektnog održavanja. Potvrda opravdanosti predloženog predmeta postaje jasnija u kontekstu ovog pasusa.

Koncepcija održavanja predstavlja najvažnije obeležje sistema održavanja. Princip po kome se donose odluke o sprovođenju postupaka može biti zasnovan na dve koncepcijske mogućnosti koje su bile često pominjane u trećem poglavlju ovog rada a to su:

- ✓ Preventivno održavanje,
- ✓ Korektivno održavanje.



Sl. 12 Aktivnosti održavanja

Navedene mogućnosti za donošenje odluka su ujedno i osnovne vrste aktivnosti koje se sprovode u održavanju. Načelan sled odvijanja ovih aktivnosti može se videti na slici Sl. 12

Preventivno održavanje podrazumeva postupke koji se sprovode pre nego što dođe do pojave otkaza, odnosno kako i samo ime kaže, ove aktivnosti imaju zadatak da spreče ili odlože pojavu otkaza. Preventivno održavanje se sprovodi na osnovu prethodno definisanog plana radi zadržavanja sistema u zadovoljavajućem operativnom stanju. Na slici Sl. 12 možemo videti da ono obuhvata:

1. Periodična ispitivanja
2. Servisiranje,
3. Kontrolu.

Otkrivanje neispravnosti i grešaka može se desiti i u toku samog preventivnog održavanja.

Nasuprot preventivnom održavanju korektivno održavanje predviđa da se postupci sprovode tek pošto dođe do pojave otkaza. Korektivno održavanje vraća sistem u operativno stanje, nakon otkaza koji se dogodio. U trećem poglavlju ovog rada u kojem je bilo reči o metodama neperfektnog održavanja često se definisalo da se sistem nakon ove akcije vraća u stanje „kao pređašnje“ konkretno to znači da mu je intenzitet otkaza kao što je i bio pre korektivnog održavanja. Korektivno održavanje obuhvata Sl. 12:

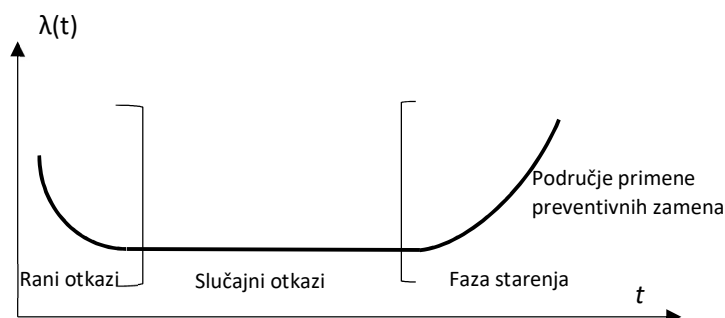
1. Otkrivanje greške,
2. Dijagnozu,
3. Popravku,
4. Verifikaciju.

U samoj praksi najčešća je kombinacija ova dva tipa održavanja, preventivnog i korektivnog, to jest kombinovano održavanje.

Kada je reč o preventivnom održavanju može se reći da postoje dve osnovne vrste preventivnog održavanja. Prvi vrsta preventivnog održavanja se sprovodi isključivo na osnovu informacija o pouzdanosti, to jest na osnovu poznate raspodele vremena rada do otkaza za posmatrani sistema, odnosno podsistem ili komponentu. Druga vrsta preventivnog održavanja podrazumeva da se posmatra i prati neki pokazatelj ili parametar koji reprezentuje stanje posmatranog sistema. Obe vrste preventivnog održavanja mogu da se veži ili za neki određeni period vremena ili za vreme

koje se unapred ne određuje već se tokom rada sistema podešava a na osnovu prikupljenih informacija o izabranim pokazateljima stanja.

U literaturi (Rašuo, Vazduhoplovno-tehničko obezbeđenje 2002) kaže se da: „Preventivne zamene elemenata tehničkih sistema imaju smisla samo ako se na taj način, sasvim izvesno, doprinosi povećanju pouzdanosti, odnosno, ako se time neposredno smanjuje verovatnoća pojave otkaza, što je osnovni cilj preventivnog održavanja uopšte. Ovo će biti samo pod uslovom da je posmatrani element u svom životnom veku zašao u područje takozvanih poznih otkaza.<sup>15</sup> To se jasno može videti iz dijagrama intenziteta otkaza.“ Sl. 13



Sl. 13 Intenzitet otkaza

Preventivni postupci održavanja prema stanju zasnovani su na sprovođenju propisanih pregleda, odnosno provera stanja. Proverama prema stanju dobija se uvid u to da li posmatrani element ima tragova nekog oštećenja koji može dalje da pređe u otkaz ili je možda otkaz već nastupio, odnosno proverava se da li je element u dobrom stanju. Kao što se može naslutiti, za ovakav tip inspekcija potrebno je posedovati dijagnostičku opremu koja je pogodna za ispitivanje stanja datih sklopova.

Preventivno održavanje može se sprovesti i u trenucima kada se za to ukaže najpovoljnija prilika. Obično je ovakav sled događaja vezan za pojavu nekog otkaza u sistemu. Obzirom, da je u tom trenutku ionako potrebno sprovesti održavanje zbog komponente koja je u otkazu, na prvom mestu ekonomski, je isplativije izvoditi postupke preventivnog održavanja na ostalim komponentama. U tom periodu se izvode preventivni postupci na drugim elementima i podsistemima, najčešće u vidu detaljnih pregleda stanja odnosno analize odgovarajućih pokazatelja. Oportunističke politike održavanja o kojima je bilo reči u trećem poglavlju ovog rada

<sup>15</sup> Neposredno pred ulazak u fazu starenja (wear-out phase) – primedba autora

definišu ovakvu vrstu održavanja kao ekonomsku zavisnost i dosta modela neperfektnog održavanja urađeno je na ovu temu, posebno zato što se odnose na višekomponentne sisteme koji u ranijim istraživanjima nisu posebno bili obrađivani.

Suština otkaza je u tome da se oni najčešće javljaju neplanirano tako da će uvek biti potrebe za korektivnom intervencijama i to iz nekoliko razloga:

1. Greške: ljudske, ispitne opreme i proceduralne,
2. Otkazi: dotrajalogost; primarna i sekundarna,
3. Razlike (odstupanja): pogoršanje performansi, oštećenje u rukovanju, uticaj okoline i neoperativni kvarovi.

U dosadašnjem razvoju vazduhoplovstva dominantan oblik održavanja borbenih aviona i njihovih motora se zasniva na propisanom časovnom i/ili kalendarskom roku rada. Najčešće norme koje se propisuju kada je reč o časovnom roku rada je u granicama od 800 do 1000 sati leta a kalendarski rok rada se kreće u granicama od 8 do 10 godina. Treba razgraničiti zašto se rokovi definišu po i po časovnom i vremenskom principu. Časovni rok rada uveden je da bi se ograničila opterećenja u letu koja trpi avion u letu i koja izazivaju defekte strukture letelice i habanje pojedinih delova. Vremenski rok rada je nametnut starenjem pojedinih materijala (zaptivni materijali, cevovodi i gumeni rezervoari), starenjem optoelektronike i pojavom korozije na pojedinim strukturama.

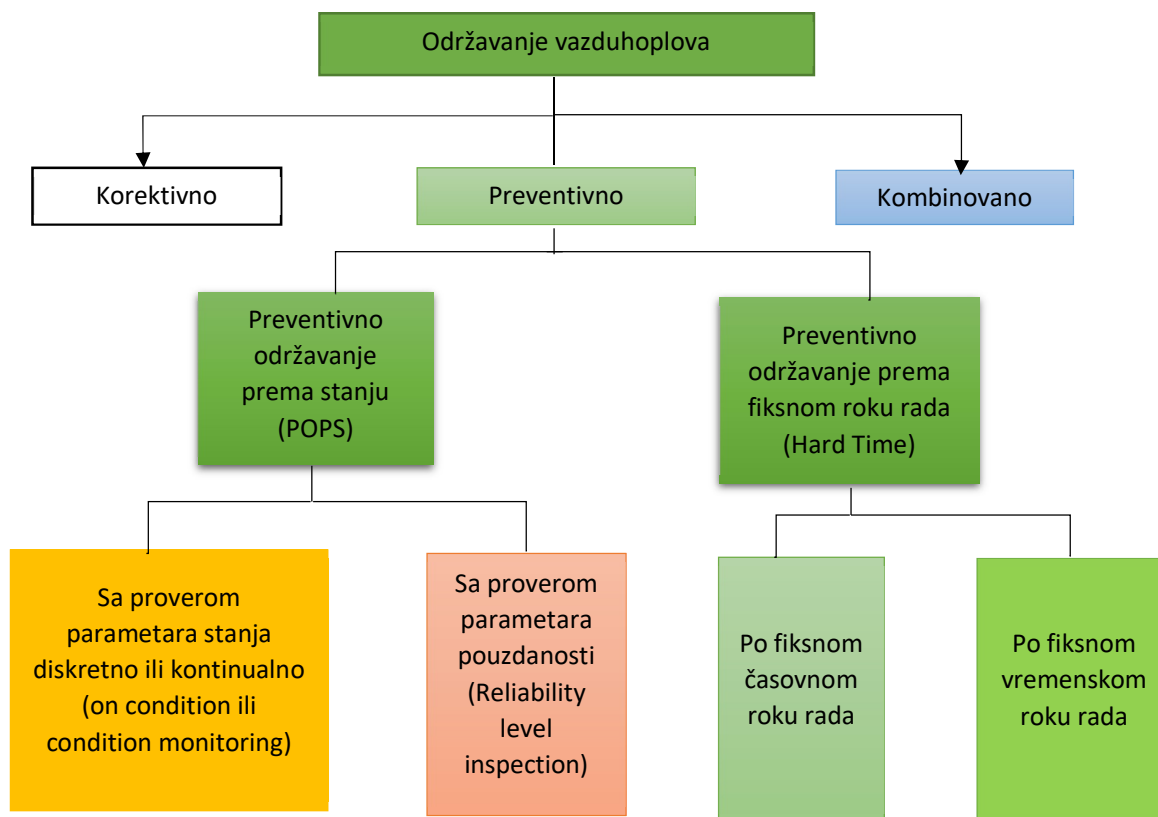
Na nivou letačke jedinice ili vazduhoplovne baze vrše se razne vrste periodičnih pregleda a posle isteka roka rada avioni i motori se šalju u remontne zavode na remonte koji se odvijaju prema propisanoj tehnologiji rada.

Iako je potpuno jasno da svi avioni istog tipa ne rade u istim uslovima i sa istim opterećenjima ipak, se svaki od njih šalje u isto vreme kako na preglede tako i na remonte. Praksom utvrđeno da postoji realna potreba da se uvede margina sigurnosti po kojoj će svi vazduhoplov bez obzira da li je to stvarno potrebno ili ne biti poslani na remont nakon propisanog vremenskog ili časovnog roka rada, u zavisnosti koji rok pre istekne.

Održavanje prema stanju, o kojem je već bilo reči, uvedeno je kao vrsta preventivnog održavanja za borbene avione početkom osamdesetih godina prošlog veka i to samo za motore i pojedine sisteme. Osnovni zahtev da bi ovakav koncept održavanja bilo moguće sprovesti je taj da se prilikom projektovanja vodi računa o ugradnji opreme za dijagnostifikovanje i praćenje stanja.

Pored toga što omogućava praćenje stanja resursa aviona ovaj koncept doprinosi i unapređenju tehnologije izrade dijagnostičke opreme kako na avionu tako i na zemlji.

Koji je to bio ključni momenat za prelazak na ovakav vid održavanja? Ključni momenat je bio uvođenje modularnih konstrukcija. Zamena modula motora je postala moguća na nivou radionice i to u roku od nekoliko časova.<sup>16</sup>



Sl. 14 Konceptije održavanja borbenih aviona (Siladic 2007)

Nakon otkaza, isteka dozvoljenog broja ciklusa ili broja časova rada, skidaju se pojedini moduli i zamenjuju se novima, a motor i avion ostaju očuvani kao celina. Nakon toga skinuti delovi se remontuju, opravljaju ili odbacuju. Ipak obzirom da je avion kao celina sastavljen iz više različitih podsistema nije jednostavno primeniti jedan koncept održavanja, pre svega zato što ni svi

<sup>16</sup> Na avionu MiG-29 zamena jednog motora je moguća za manje od jednog časa.

podsystemi nemaju isti uticaj na bezbednost letenja. Prema tome kriterijumu avion se deli na podsysteme koji su:

- ✓ Značajni za bezbednost letenja i
- ✓ Podsystemi čije umanjene performanse ili otkazi bitno ne utiču na bezbednost leta.

„Teorija pouzdanosti i teorija održavanja predstavljaju osnovu za programiranje i praktičnu realizaciju kvalitetnih postupaka održavanja. U vazduhoplovstvu koje pripada sistemima visoke bezbednosti, metodologija održavanja je i sama zasnovana na održavanju prema pouzdanosti“. (Siladic 2007)U drugom poglavlju ovog rada je bilo reči o zahtevima kvaliteta i pouzdanosti kod tehničkih sistema. Tom prilikom data je definicija održavanja okrenutog prema pouzdanosti.

Krajnji izgled sistema održavanja savremenih borbenih aviona u odnosu na primenjenu tehnologiju i organizaciju je predstavljen na slici Sl. 14

#### 4.2.2 Nivoi održavanja vazduhoplova

Broj nivoa održavanja propisuje sam korisnik sredstva u zavisnosti od organizacije održavanja i tipa sistema koji se održava. Kada je reč o održavanju borbene avijacije u svetu se najčešće primenjuju tri nivoa održavanja, ali postojali su slučajevi kada je bilo propisano četiri ili pet nivoa održavanja.

##### *I stepen održavanja*

Održavanje u prvom stepenu je veoma važno za svaku letaćku jedinicu, jer od kvaliteta ovog održavanja zavisi izvršenje namenskih zadataka vazduhoplova i jedinice uopšte. U prvom stepenu održavanja najviše se koristi osnovno održavanje ili opsluživanje, koje podrazumeva obavljanje sledećih postupaka:

- 1) Punjenje gorivom,
- 2) Punjenje mazivom, specijalnim tečnostima i gasovima;
- 3) Podešavanje ubojnih sredstava,
- 4) Čišćenje, pranje i podmazivanje,
- 5) Održavanje prema stanju koje podrazumeva određene preglede stanja u prvom stepenu održavanja, kao što su: prepoletni, međuletni, posleletni pregledi, kao i pregledi u tehničkom danu i vanredni pregledi.

U prvom stepenu održavanja često je u primeni koncept održavanja u pogodnom trenutku, gde se obavezno u situaciji kada je došlo do otkaza nekog elementa vrši provera i pregled stanja ostalih elemenata.

Što se tiče vremena održavanja ono nije određeno, osim za 25-to časovne preglede i preglede u tehničkom danu koji se u načelu obavljaju na svakih 7 dana, već se pojedini pregledi obavljaju zavisno od konkretnih uslova, odnosno zadatka jedinice.

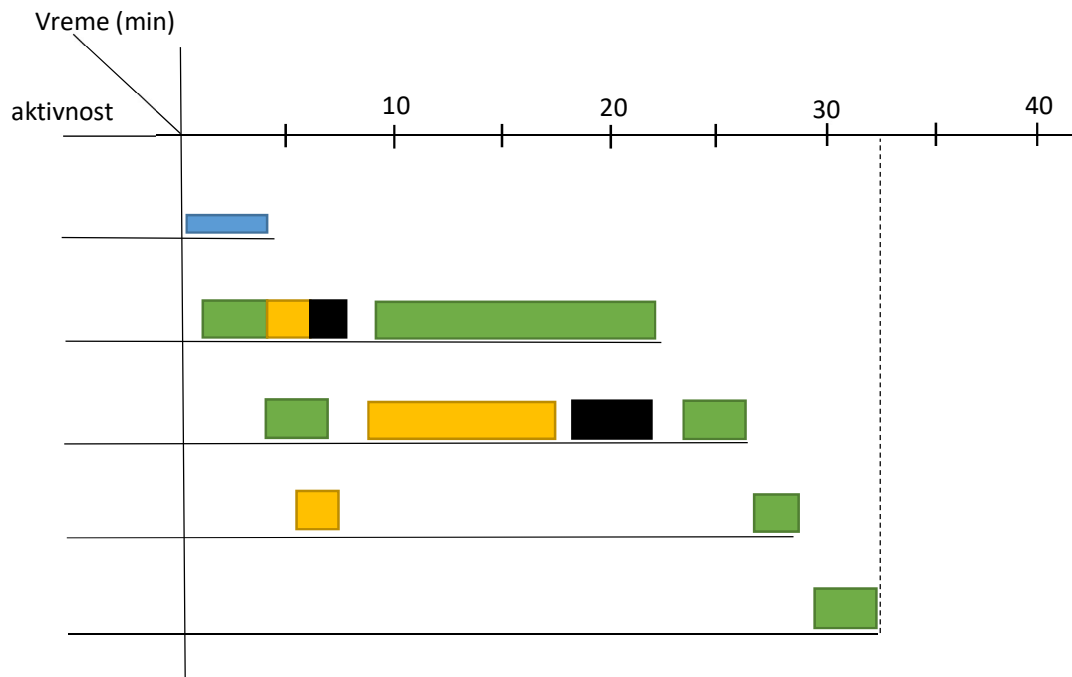
Tipična šema prepoletnog pregleda pojedinačnog vazduhoplova izgledala bi kao na slici Sl. 15

### *II stepen održavanja*

U drugom stepenu održavanja najviše se primenjuje održavanje prema stanju. U drugom stepenu održavanja obavljaju se povremeni pregledi na kojima se vrši pregled stanja svih elemenata vazduhoplova po propisanim listama. Na osnovu izvršenih inspekcija a zavisno od nađenog stanja preduzimaju se odgovarajući postupci održavanja. Ukoliko se proceni da je stanje određene komponente do te mere loše da se u vrlo kratkom roku očekuje njen otkaz, onda se takva komponenta skida i zamenjuje rezervnom. Ukoliko, ipak stanje nije takvo da zahteva momentalnu zamenu, onda je dovoljno i preduzimanje samo nekih preventivnih mera kao što su čišćenje i podmazivanje da bi se osigurao bezotkazni rad.

Prema literaturi (Norme vremena za opsluživanje i održavanje vazduhoplova, VTU-01.VTUP.000/27.1 1990) povremeni pregledi na vazduhoplovima koji u upotrebi u tadašnjem RViPVO izvodili su se na : 25 (75)h, 50h, 100h (godišnji), 200h (dvogodišnji), 300h (600h), 400h, 900h, 1600h (1200h), 1800h, sa tom napomenom da kod pregleda pored kojih stoji vrednost u zagradi ne podrazumeva iste radnje.





Uslovne oznake:

- Tehničar vazduhoplova (mehaničar)
- Pomoćnik tehničara (vojniki)
- Tehničar po vazduhoplovnoj opremi
- Tehničar po vazduhoplovnom naoružanju

1. Otkrivanje i otvaranje poklopaca pristupnih otvora
2. Spoljni pregled vazduhoplova po maršruti pregleda
3. Pregled u kabini i provere pod naponom
4. Dopunjavanje tečnostima i gasovima
5. Završni radovi i popunjavanje dokumentacije

Sl. 15 Načelna šema prepoletnog pregleda pojedinačnog vazduhoplova (SSNO- Vazduhoplovnotehnička uprava 1990)

U okviru ovog stepena održavanje jako su zastupljene preventivne zamene, zato što su takve norme propisane odnosno preventivno održavanje prema fiksnom roku rada je najzastupljenije.

U okviru fiksnog roka rada ipak je zastupljenije održavanje nakon određenog vremena leta vazduhoplova nego nakon vremenskog roka rada, kao što se može videti iz gornjeg pasusa. Takođe, potrebno je reći da se ovde posebno primenjuju takozvane oportunističke politike održavanja jer je ustaljena praksa da se avioni šalju na povremene preglede u pogodnom trenutku. Pedeset časovne preglede je moguće izvoditi sa odstupanjima od +/- 5 časova.

Uz povremene preglede svakako uvek idu korektivna održavanja sklopova koji su otkazali.

### *III stepen održavanja*

U trećem stepenu održavanja, uglavnom se obavljaju generalni remont, pregledi i opravke vazduhoplova posle isteka propisanog roka rada, na osnovu čega se jasno može zaključiti da je prisutno preventivno održavanje nakon propisanog vremena rada. Tom prilikom se obavljaju pregledi stanja svih sklopova i elemenata VTMS nakon čega se preduzimaju određeni postupci održavanja a zavisno od konstatovanog stanja pojedinih sklopova i elemenata.

Normalno i u ovom stepenu održavanja, veoma je prisutno korektivno održavanje, to jest, različite opravke sklopova i elemenata koji su otkazali.

#### 4.2.3 Analiza postojećeg stanja

U radu (Wang i Pham 2006) se kaže: „Sistemi koji se koriste za proizvodnju dobara ili za uslugu dostave, čine veliku većinu industrijskog kapitala. Ovi sistemi su izloženi propadanju bilo upotrebom bilo starenjem.“

Trenutna situacija sa flotom školskih aviona G-4 je takva da se aparati ne koriste u onolikoj meri koliko im je na početku životnog veka bio propisan godišnji nalet a ipak se zbog starenja troše. Potvrda ovog stava je u tome da ni pored velikih napora uloženi od strane održavanja, da povećá godišnje iskorišćenje vazduhoplova u toj nameri ne uspeva. Česta je pojava netipičnih otkaza zbog kojih cela flota neko vreme mora da se prizemlji dok se ne pronađe uzrok otkaza i dok se ne izvrše pregledi na svim ostalim aparatima, a zatim urade potrebne modifikacije na konstrukciji ili delovima opreme. Jedan od takvih slučajeva analiziran je i u radu (Trifkovic, i drugi 2011). Što se tiče tipičnih otkaza, moglo bi se utvrditi kojoj distribuciji pripadaju otkazi pojedinih sistema na vazduhoplovima i kojeg su intenziteta kada se nakon dužeg stajanja počnu koristiti, ali taj korak

je bilo potrebno uraditi pre donošenja odluke o produženju veka upotrebe. Iz iskustva kadra koji se bavi održavanjem ovog tipa vazduhoplova može se saznati da se nakon dužeg perioda ne

korišćenja u početku javljaju češći i ozbiljniji kvarovi sve dok se nakon određenog perioda i niza korektivnih održavanja dostignuta pouzdanost a samim time i raspoloživost ne dovedu na zadovoljavajući nivo. Shodno tome imamo:

- 1) Zanimljivo je da se vazduhoplovi u vremenu u kojem se ne koriste vode kao ispravni (bili su ispravni kada su prestali da se koriste), odnosno po terminologiji korišćenju u teoriji pouzdanosti oni se nalaze u slobodnom vremenu ili čak se može reći i da su u vremenu pripravnosti, pa ipak kada dođe do njihove upotrebe pokaže se da su neispravni. Odnosno potreban im je duži vremenski period da počnu da funkcionišu na zadovoljavajućem nivou
- 2) Sa druge strane, kada se vazduhoplovi redovno koriste njihova pouzdanost, odnosno raspoloživost je na sasvim zadovoljavajućem nivou, sve dok ponovo ne dođe do nekog većeg kvara na pojedinom sistemu, zbog čega mora da se obustavi letenje na čitavoj floti aviona.

Ovakvo ponašanje otkaza najviše podseća na teoriju Šok modela neperfektnog održavanja gde se posle određenog vremena akumuliranja oštećenja na pojedinoj komponenti javlja otkaz, to jest šokovi u vidu otkaza. Mada je daleko verovatnija druga pretpostavka koja se pojavljuje u teoriji neprefektnog održavanja, da sistemi koji stare zahtevaju PM u sve kraćim intervalima.

U svakom slučaju iz gore navedenog mogu se izvesti pretpostavke:

1. Usled dužeg ne korišćenja i stajanja vazduhoplovi propadaju zbog toga što ne dobijaju dovoljno održavanja u tom periodu, Zašto je ovde upotrebljena reč dovoljno? Zato što postoje propisane određene procedure i pregledi koji su periodičnog i preventivnog karaktera koji se sprovode na vazduhoplovima koji se duži vremenski period ne koriste (npr. ako se ne koristi, avion jednom mesečno mora da se podigne na dizalice i da se priključi na hidroagregat da mu se ispita stajni trap, itd.), međutim po svojoj prilici to nije dovoljno. Pretpostavka je da je ovo preventivno održavanje po terminologiji neperfektnog održavanja na nivou neperfektnog koje teži ka minimalnom i zato u kasnijem periodu (misli se na to kada se pojave zahtevi za korišćenjem vazduhoplova) ne daje željene rezultate.

2. U toku redovnog korišćenja vazduhoplova a u konkretnom slučaju to je angažovanje većeg intenziteta, (nakon perioda nekorisćenja i kvarova koji se javljaju nakon toga) nizom radnji CM- korektivnog održavanja vazduhoplovi se dovode na nivo na kojem treba da bude njihova pouzdanost i raspoloživost. Po svoj prilici ovo korektivno održavanje više teži ka

neperfektnom održavanju umesto da je minimalno kako se inače u modelima neperfektnog održavanja ono definiše. Ovo je zaista delimično istinito obzirom da iz iskustva iz prvog stepena održavanja, gde se opslužuje letenje jedinice, uglavnom se sprovodi korektivno održavanje i da se pri svakom otkazu pojedine komponente ona zamenjuje drugom komponentom, pa je sa stanovišta teorije neperfektnog održavanja ovo u stvari perfektna popravka, tj. zamena=perfektna popravka. Opet treba napomenuti da je to delimično istinito. Zašto? Zato što u poslednje vreme to nisu nove komponente, već su u najbolju ruku remontovane (znači da i one same u sebi imaju deo neperfektnog održavanja). Druga verovatna opcija je da su skinute sa nekog drugog aviona (kanibalizam) pa su nejednakih resursa sa ostacima podсистema u koji se ugrađuju, što je takođe neperfektna popravka. Treća opcija je da su donesene iz skladišta gde su ležale kao skinute ispravne komponente kojima je istekao kalendarski rok rada, a obzirom na koncepciju održavanja po resursima morale su biti skinute. Zbog delimičnog prelaska na održavanje prema stanju otvorena je mogućnost ispitivanja funkcionalnosti i ponovnog ugrađivanja na avion. One su i ispitane na ispravnost tako što su stavljene na probne stolove i nađeno stanje je bilo da funkcionišu (za elektronsku opremu je ovo legalna i dozvoljena procedura od kad se delom prešlo na održavanje po stanju- On condition).

Međutim, takvom politikom održavanja došlo se u situaciju da sada komponente koje su ugrađene u sisteme vazduhoplova ne daju iste rezultate pouzdanosti kao nove, tj dobijamo određeni stepen neizvesnosti kada će doći do njihovog otkaza, odnosno nakon određenog vremena dolazi do pojave gorepomenutih netipičnih (šok otkaza) zbog kojih mora da se prizemlji cela flota aviona. I tako se dešava da avioni stoje duže vremena zbog toga što moraju da se izvrše neplanirani pregledi, zamene ili čak konstrukcijske prepravke pojedinih komponenti. I nakon tog dužeg nekorisćenja ponovo se vraća na početak priče iz prvog primera.

3. Nakon generalnih opravki, koje podrazumevaju skidanje motora kao i rastavljanje pojedinih delova konstrukcije radi sprovođenja aktivnosti PM, prilikom povratka u

proces letenja ponovo dolazi do problema sa raspoloživošću. Ovom prilikom se javljaju otkazi opreme koji mogu da se reše sa više uzastopnih korektivnim održavanjem. Ovde se pre svega misli na otkaze u vidu nepouzdanih pokazivanja parametara rada motora i avionske opreme. Može se pretpostaviti da prilikom remonta, koji kao što je poznato konceptijski

pripada preventivnom održavanju, nije dovoljno poklonjeno pažnje kategorijama kalibracije i regulisanja (podešavanja) u meri u kojoj je to predviđeno. Ili je zbog dotrajalosti i čestog skidanja komponenti nemoguće podesiti podsisteme po normama koje su predviđene kada su bili novi. U svakom slučaju i ova neperfektnost održavanja doprinosi povećanju intenziteta otkaza i smanjenju raspoloživosti flote vazduhoplova.

4. Poslednji razlog neperfektnosti održavanja leži u tome što je odluka o produženju roka rada donesene na osnovu nekoliko parametara i iz razloga neophodnosti, o čemu je bio reči na početku ovog poglavlja.

#### 4.2.4 Predlog rešenja

Ako se ponovo razmotri problem PM- preventivnog održavanja flote školskih vazduhoplova G-4, videćemo da shodno u odnosu na gornje tvrdnje ono ne može adekvatno da predvidi periode kada treba da se izvedu preventivni pregledi te tako ne može da odgovori zahtevima za održanjem pouzdanosti i raspoloživosti flote aviona. Sve ovo se dešava iz razloga zato što je CM- korektivno održavanje neperfektno u smislu da se ugrađuju prvenstveno remontovani a ne novi delovi a na osnovu toga PM-je neperfektno jer ne prati raspodelu i intenzitet otkaza ugrađenih delova, već onog ranije projektovanog tipa i intenziteta raspodele otkaza novih delova.

Rešenje bi bilo ustanoviti nove norme za preventivne preglede pojedinih sistema na vazduhoplovu, to jest one koji se pokažu da najviše utiču na raspoloživost flote aviona. Način na koji bi se to izvelo bio bi taj da se na osnovu analize održavanja, u smislu koncepcije, predlože određene izmene koje bi mogle potencijalno da se primene u praksi. Metode neperfektnog održavanja koje po svemu prethodnom teže da definišu svoje politike (koncepcije) održavanja na način kako je to predviđeno kod realnih sistema mogu da posluže kao dobra osnova.

Da bi se mogao predložiti pravilan model neperfektnog održavanja iz domena odgovarajuće koncepcije (politike) održavanja najpre je potrebno definisati na koji stepen održavanja će se primenjivati.

U ovom poglavlju može se videti da je po trenutnoj organizaciji održavanja prvi stepen održavanja zadužen za postupke osnovnog održavanja i pripreme vazduhoplova za konkretne zadatke. Pregledi koji se obavljaju spadaju u održavanje prema stanju, ali u sušti svode se na inspekcije i preglede vizuelnim putem od strane mehaničara aviona i tehničara ostalih specijalnosti. Takva vrsta pregleda traje vrlo kratko, strogo je definisana svojim trajanjem i ne poznaje odstupanja. Isto tako i ukoliko dođe do određenih odstupanja, obično su ona zbog dosipanja veće količine goriva, maziva ili gasova i o tome se ne vodi evidencija. Evidencija trajanja radova na popravkama u prvom stepenu se u suštini ni ne vodi. Kada se prilikom pregleda ustanovi otkaz, tu je obavezno reč o zameni otkazalog elementa. On se menja na licu mesta ukoliko je moguće, ukoliko nije moguće ili se zamenom nije otklonio otkaz, avion se predaje u drugi stepen održavanja. Može se zaključiti da pored toga što za prvi stepen postoje definisani preventivni pregledi u koncepcijskom smislu oni nisu mnogo bitni za prvi stepen održavanja.

Kada je bilo reči o analizi modela neperfektnog održavanja kroz postojeće politike održavanja, zaključeno je da se politike uglavnom baziraju na principu po kojem tretiraju PM. Jedinice politike u kojoj se nije javljali PM bile su politike brojanja popravki i referentnog vremena.

Drugi stepen održavanja flote školskih aviona bi u suštini bio najpogodniji za primenu metoda neperfektnog održavanja upravo iz domena koncepcije održavanja kojoj i sam pripada, obzirom da su u njemu uključene klasične koncepcije održavanja koje su ranije razrađene i pomenute. Shodno tome, bitno je napomenuti da se po trenutnoj organizaciji održavanja u drugom stepenu izvode preventivni pregledi po časovnom roku rada i po proteklom vremenu, po definisanim normama na početku veka upotrebe flote školskih aviona G-4 (Norme vremena za opsluživanje i održavanje vazduhoplova, VTU-01.VTUP.000/27.1 1990). Isto tako pregledi i popravke koji su sprovode su definisani vremenskim trajanjem i o tome se vode beleške, zbog utroška radnih sati i angažovanja ljudstva na održavanju. Propisani indeks utroška radnih sati ljudstva na održavanju za jedan sat leta kod aviona tipa G-4 je oko 10 sati po satu leta. Vode se evidencije o dolasku aviona na popravku koji je poslat iz prvog stepena održavanja sa konkretnom primedbom na ispravnost i evidencija o dostignutom časovnom roku rada od poslednjeg povremenog pregleda u tom trenutku. Nakon izlaska aviona iz radionice drugog stepena beleži se vreme trajanja popravke. Prilikom prijema aviona na povremene preglede pored zabeleženog dostignutog časovnog roka rada koji može biti +/- 5 časova od propisanog beleži se da li je avion imao i neki otkaz na svom poslednjem letu pred prijem. Ovakav pristup održavanju ilustruje primenu

konceptije oportunističkih politika održavanja i politiku ekonomske zavisnosti. Zaključak je da se zbog prirode posla i organizacije u drugom stepenu vodi dokumentacija koja omogućava utvrđivanje intenziteta otkaza pojedinih sistema na avionu (vreme između otkaza), a isto tako i vremena trajanja popravki pa ga to definiše kao vrlo pogodnog za primenu metoda neperfektnog održavanja. Treći stepen održavanja je najkompleksniji. Iako u suštini konceptijski spada u preventivne preglede ne bi bio pogodan za primenu metoda neperfektnog održavanja. U ovom stepenu održavanja radnje se odvijaju najduže i sa najneizvesnijim ishodom, jer zavise umnogome od raspoloživosti merne opreme i složenih alata. Logistička podrške celom ovom procesu mora da bude na visokom nivou da bi ceo proces funkcionisao dobro i da bi se pojedine radnje završile na vreme kao što se može videti u (Rašuo i Đuknić 2013) Zbog svoje inertnosti ne bi bila moguća primena metoda neperfektnih održavanja na njega, već bi više trebao biti predmet radova koji se bave upravljanjem logističkom podrškom.

Odabranom metodom neperfektnog održavanja koja u zavisnosti u koju politiku održavanja spada (Vidi: T. 2 do T. 7) menjale bi se odgovarajuće upravljačke promenljive da bi se dobile vrednosti za veličine koje mogu da optimizuju održavanje. Te veličine predstavljaju u stvari kriterijume po kojima se optimizuje održavanje. Najčešće su to troškovi održavanja odnosno njihov intenzitet po jedinici vremena, dok je raspoloživost vazduhoplova nešto ređe zastupljena. Određene metode ipak omogućavaju da se po metodologiji proračuna, numeričkim metodama, koristeći se zahtevanim parametrima izračuna raspoloživost flote aviona (na osnovu podataka o pouzdanosti sistema vazduhoplova). Svaka od ovih predloženih metoda kao što se moglo videti u poglavlju 3 zahteva upotrebu matematičkog aparata koji je predviđen u te svrhe.

S obzirom na uvedenu neperfektnost održavanja rezultati za troškove održavanja ili raspoloživost koje se dobijaju za modele neperfektnog održavanja obično se razlikuju od rezultata dobijenih klasičnim metodama (T. 8 i T. 9 služe kao ilustracija).

U literaturi (Wang i Pham 2006) je dat primer koji potkrepljuje gornje tvrdnje. tabela T. 8 prikazuje podatke za sistem koji je sastavljen od četiri komponente vezane redno. (Barlow i Proshan 1975) su dali primer sistema sa srednjim vremenima do otkaza  $\mu$  i vremenima popravke  $\eta$  kao u Tabeli 8. Uz pretpostavku da su vremena do otkaza i vremena popravke nezavisna proračunali su parametre raspoloživosti za slučaj perfektnog održavanja kao u tabeli T. 9 (srednja kolona).

(Wang i Pham 2006) su za isti taj sistem razmatrali slučaj neperfektnog održavanja pod pretpostavkom da svaka komponenta može biti neperfektno popravljena najviše  $(k-1)$  puta. Kad bilo koja od komponenti otkáže  $k_i$  puta podvrgava se perfektnom održavanju (treba obratiti pažnju da su vremena perfektnih popravki za različiti stepen oštećenja komponenti na različitim nivoima

održavanja u praksi drugačija). Korelisani otkazi i popravke (tip zavisnost) su dozvoljeni a vrednosti za  $k_i$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  su takođe dati u tabeli T. 8.

T. 8 Primer sistema koji je sačinjen od podsistema vezanih rednom vezom (Wang i Pham 2006)

Indeks komponente	Tip komponente	Srednje vreme do otkaza $\mu$ (časovi)	Srednje vreme popravke $\eta$ (časovi)	$k$ (broj otkaza)	$\alpha$ (indeks vremena do otkaza sistema)	$\beta$ (indeks trajanja popravke)
1	Pogonska grupa	50	0,1	6	0,9	1,05
2	Analogna oprema	100	0,2	5	0,9	1,05
3	Digitalna oprema	1000	1,0	6	0,95	1,05
4	Mehanički delovi	10000	20,0	7	0,92	1,05

T. 9 Poređenje rezultata pouzdanosti klasičnom metodom i metodom neperfektnog održavanja (Wang i Pham 2006)

parametri raspoloživosti	Perfektna popravka (Barlow i Proshan 1975)	Neperfektna popravka (Wang i Pham 2006)
Granična raspoloživost	0,993	0,9903
Granična prosečno vreme rada sistema (časovi)	32,15	25,5890
Granično prosečno vreme sistema u otkazu (časovi)	0,225	0,2516
Granični broj otkaza sistema po času		0,0387
$D_{av,1}$	0,002	0,0029
$D_{av,2}$	0,002	0,0027
$D_{av,3}$	0,001	0,0013
$D_{av,4}$	0,002	0,0029
$\bar{N}_1$	0,020	0,0254
$\bar{N}_2$	0,010	0,0121
$\bar{N}_3$	0,001	0,0011
$\bar{N}_4$	0,0001	0,0001



Nakon toga, obzirom da metode neperfektnog održavanja to dozvoljavaju, može se za zadanu raspoloživost (npr Availability  $A=0,96$ ) izvesti optimalna politika održavanja, to jest da se odredi

vrednosti upravljačkih promenljivih. U slučaju PM- preventivnih održavanja to bi bila vremena između njih. U pojedinim modelima neperfektnog održavanja ,kijih ima nekoliko, pored rasporeda preventivnih održavanja moguće je raspoloživost maksimizirati i putem ograničavanja broja uzastopnih neperfektnih popravki  $k_i$ . Ovo bi posebno bilo zanimljivo u slučaju održavanja flote školskih aviona G-4, gde imamo slučaj da se nakon određenog broja otkaza koji se otklanjaju zamenama (neperfektnim) javljaju otkazi koji na duže vremena izbacuju celu flotu aviona iz upotrebe.

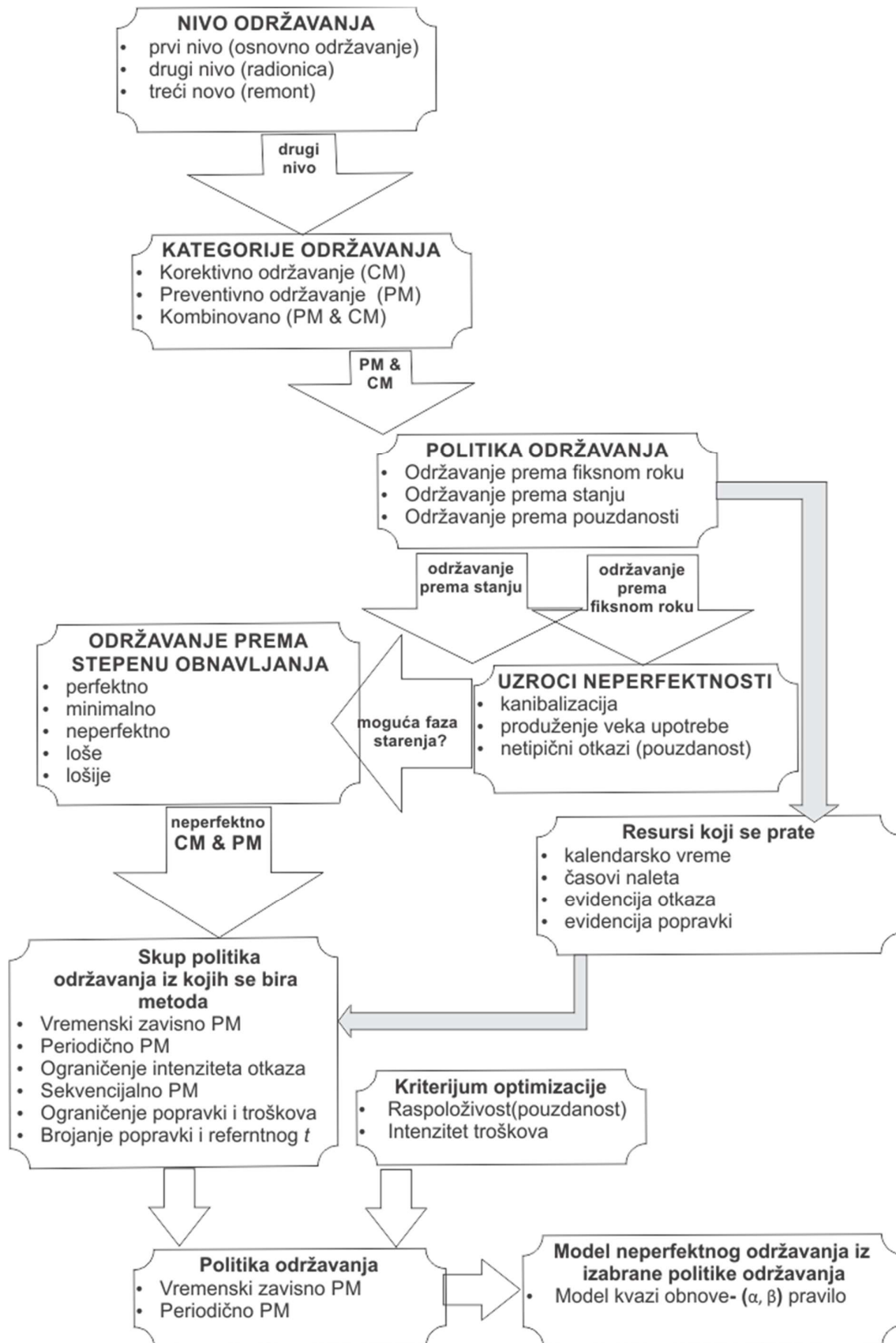
Da bi se mogla iznaći odgovarajuća modifikacija koncepcije održavanja veoma je bitan izbor metode neperfektnog održavanja iz domena trenutne koncepcije koja je primenjena, ali i u odnosu na organizaciju održavanja i podatke o održavanju koji se beleže a koji su dostupni.

U tu svrhu predložena je metodologija data u radu (Knežević, i drugi 2017) data dijagramom uzroka i posledica kao na slici Sl. 16

Redosled odlučivanja shodno predloženoj metodologiji trebao bi da bude sledeći:

- 1) Odrediti za koji nivo održavanja je potrebno da se izvrši optimizacija;
- 2) Proučiti za dati sistem održavanja koje se akcije održavanja preduzimaju;
- 3) Proučiti za dati sistem koji su koncepti održavanja u upotrebi;
- 4) Na osnovu pokazatelja ispravnosti i analize sistema održavanja proučiti da li ima razloga za neperfektno ili minimalno održavanje;
- 5) Poslužiti se pregledom kategorizacije metoda neperfektnog održavanja da bi se na osnovu koncepta (politike) održavanja izabrao niz pogodnih metoda neperfektnog održavanja;
- 6) Pomoću dokumentacije koja se vodi u izabranom stepenu održavanja izdvojiti parametre koji se prate u konkretnom sistemu i na osnovu njih eliminisati koncepcije i metode koje funkcionišu sa drugim parametrima;
- 7) Za željeni kriterijum optimizacije i na osnovu parametara koji se prate odlučiti se za konkretni tip modela neperfektnog održavanja iz domena izabrane koncepcije

Da bi bilo moguće primeniti predloženu metodologiju izbora modela neperfektnog održavanja na izabrani sistem održavanja konkretnog tipa vazduhoplova potrebno je kao prvo uraditi studiju pouzdanosti sistema koji se nalaze na njemu. Za potrebe ovog rada je na osnovu podataka koji se vode prilikom održavanja flote školskih vazduhoplova G-4 u drugom stepenu održavanja urađena studija pouzdanosti po metodologiji predstavljenoj u narednom poglavlju.



Sl. 16 Dijagram toka uzročno- posledičnih veza za izbor metode neperfektnog održavanja

## 5. Studija slučaja utvrđivanja pouzdanosti i održavanja flote školskih aviona G-4 u periodu nakon produženja veka upotrebe

### 5.1 Potreba za utvrđivanjem pouzdanosti flote aviona

Trenutna pouzdanost flote školskih aviona G-4 nije poznata. U istraživanjima problema vezanih za trenutno funkcionisanje ovog tipa vazduhoplova, kroz razgovore sa kadrom koji se bavi održavanjem kao i inženjerima instituta u kojem je projektovan dotični vazduhoplov došlo se do saznanja da ni jednom tokom celog veka upotrebe nije ni pokušavano sprovođenje studije pouzdanosti.

Jedini pokazatelj trenutno dostignute pouzdanosti je godišnji nalet koji prosečno ostvaruje flota koji je po pojedinačnom aparatu (vazduhoplovu) dosta manji od onog koji su projektanti predvideli na početku veka upotrebe.

Ovakvo stanje može biti posledica više raznih uticaja. Jedna od mogućnosti je da je integralna logistička podrška procesu letanja, koja nije direktno vezana za održavanje, loša tako da i pred raspoloživih aviona ne može da se ostvari veći nalet. Druga opcija je da se održavanjem koje je nekom smislu neperfektno došlo do toga da se pouzdanost aviona sa godinama upotrebe smanjuje tempom koji je brži od onog koji bi bio da je održavanje na višem nivou za šta postoje realne indicije.<sup>17</sup> Treća opcija, koja je sve izvesnija, je da se produženjem veka upotrebe, koje je izvršeno već drugi put, nisu sagledali svi aspekti pravilno tako da je i pored toga što je avionima preostala polovina časovnog resursa veka upotrebe, vremenski resurs presudno uticao i „uveo“ avione u period starenja.

U svakom slučaju potreba za sprovođenjem studije pouzdanosti postoji iz više razloga, a jedan od njih je i potreba za primenom metoda neperfektnog održavanja na koncept održavanja u drugom stepenu

### 5.2 Metodologija

Računanje pouzdanosti pojedinih podistema vazduhoplova bilo bi urađeno na osnovu podataka koje su dobijeni od Vazduhoplovno-tehničkog bataljona koji se bavi održavanjem vazduhoplova u drugom stepenu.

---

<sup>17</sup> Kao što se moglo videti iz prethodnih poglavlja, opadanje pouzdanosti sa godinama je neminovno kod svih tehničkih sistema.

Metodologija računanja pouzdanosti je korišćena u tehničkoj informaciji od strane NASA Langley Research Center iz februara 2001. Godine pod imenom: General Aviation Aircraft Reliability Study, od autora *Duane Pettit and Andrew Turnbull, FDC/NYMA, Inc., Hampton, Virginia.* (NASA/CR-2001-210647 2001) koja podrazumeva nekoliko osnovnih koraka.

### 5.2.1 Osnovne postavke

Studija pouzdanosti na primeru flote školskih aviona zasniva se na predloženoj metodologiji u tehničkom izveštaju (NASA/CR-2001-210647, 2001) uz pojedine izmene, koje su unesene uvažavajući činjenicu da je ovde reč o mlaznom avionu a ne o avionu generalne avijacije.

Neophodni koraci su:

1. Definisane misije aviona i radnog okruženja (školski letovi, borbeni letovi/mirnodopski scenario, ratni scenario).
2. Definisane podsisteme na vazduhoplovu .
3. Identifikacija izvora podataka o otkazima.
4. Definisane osnovnih pravila i pretpostavki.
5. Sakupljanje podataka o otkazima za flotu aviona.
6. Analiziranje podataka radi određivanja pravilnog tipa matematičke raspodele za modeliranje otkaza.
7. Provođenje ispitivanja o pogodnosti izabrane raspodele
8. Procena parametara raspodele i pouzdanosti za svaki od podsistema.

### 5.2.2 Definisane zadatke školskog aviona i radnog okruženja

Da bi se shvatilo koji su to dodatni parametri i uslovi u kojima se vrši eksploatacija flote školskih aviona i koji je njihov uticaj na pouzdanost treba znati sledeće:

G-4 je jednomotorni, mlazni podzvučni avion potpuno metalne konstrukcije koji je namenjen za;

- Osnovnu i naprednu obuku kadeta Vojne akademije i pilota
- Za izvršavanje višenamenskih borbenih zadataka kao laki jurišni avion,
- Vuču vazdušnih meta<sup>18</sup>.

Iz ovog se može zaključiti da postoje dve osnovna tipa angažovanja za G-4 u operativnoj upotrebi, a to su: mirnodopska i ratna uloga. Slična podela angažovanja kao što se može naći

<sup>18</sup> Ovi avioni spadaju u predserijske modele i nisu predmet razmatranja ovog rada.

u radu (Pohl, 1991) (za avion F-15). Za potrebe ovog rada biće razmatrana samo mirnodopska uloga.

U (Jiankang, Hongyan, Chen, & Jiaxue, 2010) se kaže da je pouzdanost vazduhoplova sposobnost da se obezbedi funkcionisanje aeronautičke tehničke opreme u zahtevano vreme ili u toku zahtevanog vremena po svim zadacima za koje je on planiran. Ova definicija ima više veza sa definicijom efektivnosti sistema. Efektivnost sistema se odnosi na sposobnost sistema da izvede zadatak za koji je namenjen, uključujući tu i frekvenciju otkaza koji se dešavaju na njemu, probleme koji se javljaju u toku sprovođenja radnji na održavanju, kao i održivošću sistema prilikom izvođenja zadataka za koje je namenjen ako se njime upravlja na način kako je to predviđeno konceptom razvoja.

Iz ove definicije i (Misra 2008) može se reći da:

- Sistem mora da bude sposoban da obavi svoju funkciju kada se to od njega zatraži a dva termina koja su vezana za to su *operaciona gotovost* i *raspoloživost*.
- Verovatnoća da se funkcionisanje sistem na način kako je to konstrukcijski predviđeno u toku trajanja nekog zadatka, ako je pre toga bio ispravan definiše kao pouzdanost zadatka.
- Verovatnoća da će sistem obaviti svoj zadatak pod uslovom da je bio ispravan na početku zadatka u skladu sa svojim karakteristikama i to predstavlja funkcionalnu podobnost.

Osnovni zadatak u mirnodopskom angažovanju aviona G-4, spada u domen prve namene, i predstavlja zadatak obuke kadeta Vojne akademije. Ono što posebno izdvaja obuku kadeta Vojne akademije od obuke ostalih pilota je obuka u osnovnom letenju. Obuka u osnovnom letenju odvija se u vizuelnim uslovima VFR (visual flight rules) sa letovima koji u proseku traju po 50 minuta ili 0,83 hrs. Ovaj podatak je bitno znati i poslužiće za kasnije proračune pouzdanosti.

Bitno je znati i da je održavanje ovog tipa vazduhoplova organizovano u tri nivoa. U daljem radu pod terminom održavanje će se podrazumevati drugi stepen održavanja koji je predmet ovog rada i o kojem je bilo reči u prethodnom poglavlju. Kako je reč o mirnodopskoj upotrebi flote aviona, u tom slučaju potrebne nabavke rezervnih delova za održavanje stižu iz sopstvenih skladišta, kao i od proizvođača i dobavljača.

### 5.2.3 Definisane sistema i podsistema na vazduhoplovu

Definisaneju vazduhoplova G-4 kao tehničkog sistema za potrebe izvođenja studije pouzdanosti pristupiće se po principu trostepene organizacije kao na slici Sl. 9. To znači da će vazduhoplov u celini biti posmatran kao sistem, njegovi sistemi (hidraulika, gorivo, komande, itd.) će biti definisani na nivou jedinica ili podsistema, a za podsisteme će se smatrati da su sačinjeni od komponenti. U tom smislu a na osnovu (Norme vremena za opsluživanje i održavanje vazduhoplova, VTU-01.VTUP.000/27.1 1990) imamo da je:

*Konstrukcija(Zmaj aviona) – svaka komponenta ili struktura koja je ključna za integritet konstrukcije vazduhoplova*

*Kabina i izbacivo sedište – uključujući i podsistem klimatizacije i presurizacije*

*Stajni trap i sistem za upravljanje na zemlji- svaka komponenta ili struktura koja je ključna za voženje, kretanje po zemlji (sa ili bez upotrebe motora), stvaranje kočione sile, primanje sile udara prilikom sletanja, i za davanje odgovarajuće signalizacije.*

*Komande leta -svaka komponenta ili upravljačka površina za komandovanje nagibom, pravcem ili visinom ili za promenu aerodinamičkih karakteristika vazduhoplova u letu*

*Gorivni sistem – svaka komponenta ili struktura povezana sa distribucijom goriva ka motoru i preraspodelom goriva između rezervoara i odgovarajući signalizacioni elementi i rezervoarima i vodovima.*

*Hidraulički sistem svaka komponenta ili struktura koja je ključna za proizvodnju hidrauličke sile i distribuciju hidrauličke sile ka potrošačima (kao što su, komande leta, sistemi za upravljanje po zemlji, stajni trap), i odgovarajuća signalizacija.*

*Pogonska grupa – svaka komponenta ili sistem koji je vitalan za proizvodnju potiska za pokretanje aviona*

*Instrumenti i elektrooprema aviona – minimum instrumenata za vazduhoplov koji leti u IFR (instrumental flight rules conditions<sup>19</sup>) uslovima, sistem osvetljenja i svaka komponenta koja je uključena u distribuciju električne energije.*

<sup>19</sup> Ovo je više instrumenata nego što je potrebno za letenje u VFR uslovima, ali će biti prihvaćeno u ovom radu

*Radio i radarska oprema – instrumentacija i odgovarajući sistemi koji su ključni za obezbeđivanje navigacijske pomoći pilotu, za generisanje podataka baziranih na radio signalima, ili doplerovom efektu (ADF, VOR, radio visinomer)*

#### 5.2.4 Identifikacija izvora podataka o otkazima

Podaci potrebni za izvođenje studije pouzdanosti nalaze se u dnevnim izveštajima i knjižicama održavanja kao i radnim listama održavanja za 12 aviona flote školskih vazduhoplova. Više od hiljadu dnevnih izveštaja o održavanju je analizirano, i oni pokrivaju period od početka 2012 godine do kraja 2014. godine. Ovi dnevni izveštaji sadrže podatke koji se odnose na radnje održavanja koje preuzima drugi stepen održavanja koji organizacijski pripada vazduhoplovnoj brigadi. Ranije je u radu navedeno da se drugi stepen održavanja bavi preventivnim održavanjem, zamenama motora i korektivnim održavanjem u smislu podrške prvom stepenu održavanja. Ova korektivna održavanja su ona koje ne mogu da se izvedu u prvom stepenu održavanja, pre svega u smislu dostupnosti dijagnostičke opreme. Vazduhoplovi koji imaju potrebu za takvim održavanjem se sklanjaju sa stajanke i prebacuju u hangar koji je pod nadzorom drugog stepena održavanja. Kao rezultat toga, otkazi koji su se desili upisuju se u specifičan izveštaj o održavanju koji sadrži:

- Serijski broj aviona
- Datum
- Opis otkaza (klasifikovan po podsistemima na način kako su prethodno opisani (po dijagnozi otkaza koju je dao prvi stepen održavanja))
- Podaci o izvršenom naletu od poslednjeg preventivnog pregleda (50 časovni)
- Potreba za ispomoći u radovima od strane remontnog zavoda i/ili druge firme

Ukoliko je potrebno da avion provede više dana da bi se završio posao na otklanjanju otkaza, isti serijski broj aviona se upisuje u izveštaj iz dana u dan, odnosno svi serijski brojevi svih aviona koji su na održavanju u radionici drugog stepena, dok god se nalaze u njoj. Na taj način se automatski beleži vreme popravke koje traje do trenutka povratka aviona na letačke zadatke, jer od tog trenutka nije više njegov broj u izveštaju. Ista stvar se dešava kada su u pitanju i preventivni pregledi, sa tom razlikom da avion može biti primljen na preventivni pregled ranije ili kasnije (10% vremena) ili sa nekim otkazom koji zahteva CM. Ovo je primer primene oportunističkih koncepcija održavanja u praksi.

#### 5.2.5 Osnovna pravila i pretpostavke

Ovaj pasus je veoma bitan u smislu razumevanja onoga što je uzeto u obzir kao otkaz podsistema prilikom analize sadržaja dokumenata, a kasnije je korišćeno za utvrđivanje



parametara matematičke raspodele otkaza. Ova osnovna pravila omogućavaju da se prati svaki korak studije slučaja, da bi se na kraju mogli protumačiti dobijeni rezultati za norme održavanja.

Osnovno je da se na početku definiše šta se podrazumeva pod otkazom. Prema (NASA/CR-2001-210647, 2001) „do otkaza dolazi kad se izgubi urođena sposobnost komponente da obavlja svoju namenjenu funkciju i to može da dovede do gubitka funkcije jednog od sistema na vazduhoplovu“.

Slično kao i u (NASA/CR-2001-210647 2001) ali uz uvažavanje razlika između vazduhoplova generalne avijacije i mlaznog školskog aviona može se reći da su osnovna pravila i pretpostavke sledeći:

- Samo dijagnostifikovani i potvrđeni otkazi su uzeti u obzir. Primedbe u knjižicama održavanja date od strane pilota na ispravnost vazduhoplova, a koje nisu potvrđene od strane osoblja koje se bavi održavanjem ili dijagnostičkom opremom nisu predmet ove studije slučaja. Drugim rečima, samo otkazi koji su zahtevali preduzimanje akcija korektivnog održavanja od strane drugog stepena održavanja i preusmereni njima na rešavanja te su zabeleženi u njihovim izveštajima su predmet razmatranja ove studije.
- Zazori u ležajevima ili komponente čija je osobina da se troše, nisu uzimani u obzir kao otkazi.
- Komponente koje se redovno menjaju, kao što su one koje za koje se zna da se troše ili otkazuju nakon nekog perioda (npr. sijalice ili ležajevi) nisu uzete u razmatranje.
- Otkazi izazvani zamenama neodgovarajućih komponenti su uračunati.
- Otkazi nastali nenamernim oštećenjima od strane tehničkog osoblja su uračunati.
- Sekundarni otkazi nizu uračunati (upad stranog objekta u usisnik motora, udar ptice, itd.)
- Svi sistemi su povezani redno.
- Svi sistemi su nezavisni (npr. gubitak funkcije jednog sistema na avionu ne rezultuje gubitkom drugog).
- Na osnovu (Barlow & Proshan, 1975), serijski sistem poput ovog potpada pod pravilo o isključivosti (the shut-off rule): kada se zbog otkaza jedne komponente sistem podvrgne održavanju sve ostale komponente se zadržavaju u zatečenom stanju „prividnog mirovanja“. Nakon popravke sistem se vraća u rad. U tom trenutku, komponente koje su se nalazile u stanju mirovanja nastavljaju da rade

intenzitetom i sa stanjem u kojem su bile kao i pre otkaza „kao prethodno“ (princip minimalne popravke).

### 5.2.6 Analiza podataka

Nakon analize sadržaja preko hiljadu izveštaja o održavanju iz drugog stepena održavanja flote školskih aviona G-4 za svaki od pojedinačnih vazduhoplova dobijeni su podaci o otkazima po pojedinim podsistemima koji su definisani ranije u ovom radu.

Korišćenjem softverskih alata za statističku analizu obrađeni su dostupni podaci i deskriptivna statistika za svaki od podsistema je data kao u tabeli T. 10.

T. 10 Deskriptivna statistika za podsisteme školskog aviona G-4

<i>Sistem</i>	<i>Matematičko očekivanje</i>	<i>Standardna devijacija</i>
<i>Zmaj aviona</i>	163	145,32979
<i>Kabina i izbacivo sedište</i>	88,59	73,1036808922779
<i>Stajni trap i organi za voženje</i>	37,1071428571429	35,8852070891431
<i>Komande leta</i>	77,1911764705882	60,3539760374527
<i>Gorivni sistem</i>	157,648888888889	137,128881662876
<i>Hidro sistem</i>	77,8446666666667	74,3508196579535
<i>Pogonska grupa</i>	47,5	42,8872246103966
<i>Avionski instrumenti i oprema</i>	71,3705555555555	69,2380015914605
<i>Radio i radarska oprema</i>	80,9275	67,5832445211089

Pregledom Tabele 10 ne stiču se dovoljni uslovi da se tvrdi da intervali otkaza za pojedine podsisteme slede jedan drugog po eksponencijalnoj raspodeli (to jest vremenski nezavisno). Da bi se ovo moglo tvrditi matematičko očekivanje i standardna devijacija moraju da imaju iste vrednosti. Približno istu vrednost matematičko očekivanje i standardna devijacija imaju samo za podatke koji govore o otkazima Zmaja aviona i donekle stajnog trapa, ali to sve mora biti provereno pomoću drugih softvera sa analizu i potvrđeno testovima za pogodnost raspodele..

U (NASA/CR-2001-210647, 2001) se kaže: „Kako se tvrdi u SAE ARP 4761, *Aerospace Recommended Practice (preporučena praksa u avijaciji)*, proračuni pouzdanosti u civilnoj avijaciji (ne i u GA - generalnoj avijaciji) su zasnovani na prosečnim verovatnoćama i računaju se za sve avione istog tipa. Intenziteti otkaza se podrazumevaju da su konstantni tokom

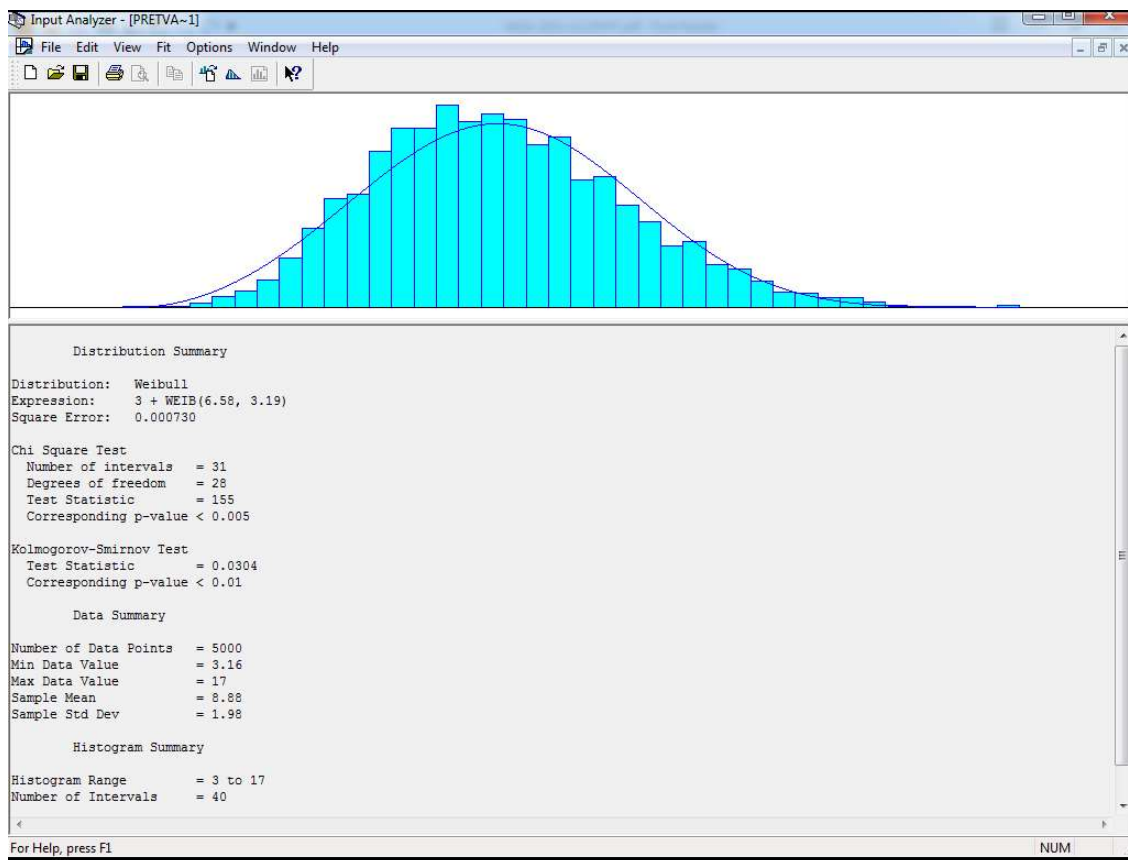
vremena i procene se odnose na period upotrebe nakon perioda dečijih bolesti i pre odumiranja sistema. Raspodela o kojoj je ovde reč je eksponencijalna.“

Ako se ipak uzme u obzir period dečijih bolesti i period odumiranja onda eksponencijalna raspodela ne može da se koristi apriori, već mora da se nađe neka drugi tip raspodele (nije sigurno da opet nećemo dobiti eksponencijalnu raspodelu).

Ako se ponovo pogleda Tabela T. 10 a na osnovu prethodne tvrdnje mogla bi se izvesti pretpostavka da je reč o dominantnim otkazima perioda dečijih bolesti ili perioda starenja.

Sledeći potreban korak da bi se odredio tip matematičke raspodele otkaza za definisane sisteme na avionu je da se sirovi podaci o intervalima između otkaza uzeti iz izveštaja održavanju ubace u softver za utvrđivanje tipa matematičke raspodele. Ovakva vrsta softvera vrši procenu parametara i tipa raspodele, utvrđivanje intervala pouzdanosti za ove parametre kao i testove pogodnosti raspodele (Kolmogorov-Smirnof, Ksi kvadratni test, itd). Ukoliko podaci koji su pohranjeni u softver po proceni odgovaraju za više tipova raspodele, onda se svaka od raspodela sa svojim parametrima podvrgava testu pogodnosti i rangira na osnovu rezultata testova. Jedan tipičan primer primene softvera za određivanje tipa matematičke raspodele sa svojim izgledom interfejsa na kome su dati rezultati za određeni niz podataka predstavljen je na slici Sl. 17

Nakon unošenja podataka u softver za određivanje tipa matematičke raspodele vremena između otkaza za svaki od definisanih sistema na avionu G-4 podaci za dobijene raspodele su kao u tabeli T. 11



SI. 17 Arena Input Analyzer softver

T. 11 Sistemi na mlaznom školskom avionu i njihov tip raspodele otkaza

<i>Sistem</i>	<i>Tip raspodele</i>	<i>Parametri</i>		
		Alpha ( $\alpha$ )	Beta ( $\beta$ )	Lambda( $\lambda$ )
<i>Zmaj aviona</i>	Exponential			0,00613
<i>Kabina i izbacivo sedište</i>	Weibull (2p)	0,85802	90,863	
<i>Stajni trap i organi za voženje</i>	Weibull (2p)	0,85879	34,961	
<i>Komade leta</i>	Gamma (2p)	2,1515	38,12	
<i>Gorivni sistem</i>	Weibull (2p)	0,882	139,26	
<i>Hidro sistem</i>	Weibull (2p)	0,96759	76,771	
<i>Pogonska grupa</i>	Weibull (2p)	0,998	45,789	
<i>Avionski instrumenti i oprema</i>	Weibull (2p)	0,86	66,47	
<i>Radio i radarska oprema</i>	Weibull (2p)	0,912	86,121	

### 5.2.7 Pogodnost raspodele

Sledeći korak u studiji pouzdanosti je da se oceni koliko je funkcija raspodele otkaza data tipom i parametrima pogodna za predstavljanje vremena između otkaza za date podatke za svaki od sistema na avionu ponaosob.

U tu svrhu proračunat je koeficijent korelacije koji je dat jednačinom (48)

$$\text{Cor}(X_1, X_2) = \frac{\text{Cov}(X_1, X_2)}{\sigma_{X_1} \sigma_{X_2}} \quad (48)$$

Gde je  $\text{Cov}(X_1, X_2)$  is kovarijansa između komponenti  $X_1$  i  $X_2$  i predstavlja meru linearnog između njih. Jednačina (49) pokazuje da je matematičko očekivanje dobijeno kovarijansom u stvari matematičko očekivanje nove promenljive .

$$\text{Cov}(X_1, X_2) = E[(X_1 - E(X_1))(X_2 - E(X_2))] \quad (49)$$

U studiji slučaja za avion G-4 korelacija je izvedena na sledeći način. Vrednosti funkcije gustine raspodele generisane su na osnovu dostupnih podataka za svaki podatak o vremenu između otkaza pojedinog sistema, a pomoću tipa matematičke raspodele koju je predložio softver, sa datim parametrima. Zatim su međusobno upoređeni nizovi tih vrednosti sa nizom originalnih podataka.

U jednačini (48)  $\sigma_{X_1}$  i  $\sigma_{X_2}$  su standardne devijacije za svaki od navedenih nizova podataka.

Korelacija je bezdimenziona vrednost i uvek je između -1 i +1. Vrednosti korelacije koje su bliže -1 ili +1 daju jaču korelaciju, a vrednosti koje su bliže nuli daju slabiju korelaciju.

U slučaju studije pouzdanosti sistema na avionu G-4 korelacija izabranih tipova raspodela sa stvarnim podacima je kao u tabeli T. 12.

T. 12 Korelacija matematičkih raspodela i podataka o otkazima za avion G-4

Sistem	Korelacija
Zmaj aviona	0,95
Kabina i izbacivo sedište	0,93
Stajni trap i organi za voženje	0,92
Komande leta	0,96
Gorivni sistem	0,93
Hidro sistem	0,93
Pogonska grupa	0,93
Avionski instrumenti i oprema	0,92

Radio i radarska oprema | 0,92

### 5.2.8 Procene pouzdanosti

Na osnovu vremena trajanja karakteristične misije, kao i na osnovu definicija pouzdanosti i podataka iz tabele T. 11 izvršena je procena pouzdanosti za sisteme na avionu G-4

Pouzdanost za eksponencijalni tip matematičke raspodele dešavanja otkaza data je jednačinom (50)

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (50)$$

Pouzdanost za dvo-parametarski tip Weibulove raspodelu otkaza data je jednačinom (51)

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\eta} \quad (51)$$

Pouzdanost za dvo-parametarski tip Gama raspodele otkaza data je jednačinom (52)

$$R(t) = 1 - \Gamma_I(\Theta; \eta) \quad (52)$$

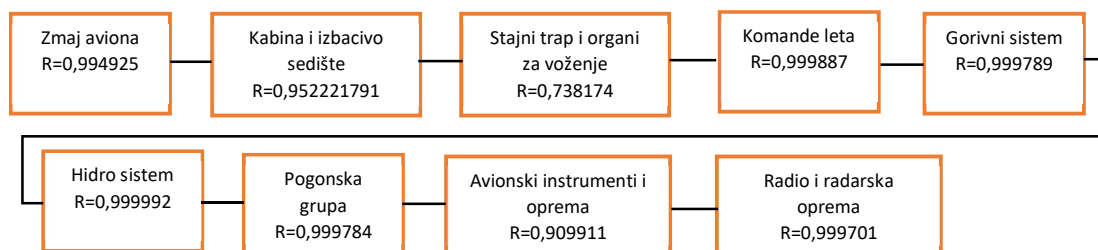
Gde je  $\Gamma(\Theta, \eta)$  Funkcija gustine raspodele (CDF) koja je računata numerički, obzirom da za Gama raspodelu ne postoji zatvorena forma analitičkog rešenja, kao što to postoji za eksponencijalnu i Weibulovu raspodelu.

Na kraju pouzdanost svakog od pojedinih sistema na avionu G-4 data je kao u tabeli T. 13

Brza rekapitulacija procena pouzdanosti iz tabele T. 13 pokazuje da sistemi kao što su *Stajni trap i organi za upravljanje na zemlji* sa svojih 74 procenta pouzdanosti kao i *Avionski instrumenti i oprema* sa 91. procentom daju neočekivane i netipične pouzdanosti, uzevši u obzir činjenicu da su sastavni deo vazduhoplova kao sistema

Na kraju pouzdanost vazduhoplova G-4 a na osnovu studije pouzdanosti može se prikazati kao serijska veza svojih sistema i izgleda kao na slici Sl. 18 i data je jednačinom (53)

$$R_{system} = \prod_{i=1}^n R_i \quad (53)$$



Sl. 18 Redna veza podsistema na avionu G-4

T. 13 Procene pouzdanosti podsistema na školskom avionu G-4

Sistem	Raspodela	Pouzdanost sistema				
		Teta ( $\Theta$ )	eta ( $\eta$ )	Lambda ( $\lambda$ )	Trajanje zadatka (t)-časovi	
Zmaj aviona	Exponential			0,00613	0,83	0,994925
Kabina i izbacivo sedište	Weibull (2p)	0,85802	90,863		0,83	0,952221791
Stajni trap i organi za voženje	Weibull (2p)	0,85879	34,961		0,83	0,738174
Komade leta	Gamma (2p)	2,1515	38,12		0,83	0,999887
Gorivni sistem	Weibull (2p)	0,882	139,26		0,83	0,999789
Hidro sistem	Weibull (2p)	0,96759	76,771		0,83	0,999992
Pogonska grupa	Weibull (2p)	0,998	45,789		0,83	0,999784
Avionski instrumenti i oprema	Weibull (2p)	0,86	66,47		0,83	0,909911
Radio i radarska oprema	Weibull (2p)	0,912	86,121		0,83	0,999701

## 6. Numerički primer primene modela neperfektne popravke i neperfektnog preventivnog održavanja

### 6.1 Polazne osnove

Prethodno poglavlje dalo je odgovor na to koje su očekivane pouzdanosti i koje su to matematičke raspodele otkaza zastupljene kod Sistema aviona G-4 kao i vrednosti njihovih parametara. Studija slučaja urađena je na osnovu modifikovane metodologije date u (NASA/CR-2001-210647, 2001). Tabela T. 14 prikazuje maksimalan broj uzastopnih akcija CM preduzetih u drugom stepenu održavanja na jednom vazduhoplovu za svaki od definisanih sistema<sup>20</sup>

T. 14 Maksimalan broj uzastopnih CM na pojedinim podsistemima

System	Zmaj aviona	Kabina i izbacivo sedišta	Stajni trap i organi za voženje	Komande leta	Gorivni sistem	Hidraulički sistem	Pogonska grupa	Avionski instrumenti i oprema	Radio i radarska oprema
number of CM	3	3	10	6	3	6	5	7	5

Ovi podaci uzeti iz realnog održavanja odgovaraju procenama pouzdanosti datim u tabeli T. 13 u tom smislu da najviše uzastopnih CM imaju sistemi sa najlošije procenjenom pouzdanošću (*Stajni trap i organi za voženje i Avionski instrumenti i oprema*).

U svrhu poboljšanja dostignute pouzdanosti i shodno tome raspoloživosti, a na osnovu metodologije predložene u poglavlju 4 ovog rada predložen je model neperfektnog održavanja iz domena odgovarajućeg koncepta održavanja koji može definisati nove intervale vremena između PM uz određivanje troškova održavanja i ograničavanje broja uzastopnih korektivnih održavanja između dva PM.

### 6.2 Numerički primer neperfektnog CM i neperfektnog PM

Numerički primer je baziran na modelima neperfektnog održavanja broj 3 dat u (Wang & Pham, 2006, pp. 64-68) i broj 8 dat u (Wang & Pham, 2006, pp. 76-80).

<sup>20</sup> Podaci iz dnevnih izveštaja o održavanju



Pretpostavka je da jedinica (podsistem) počinje da radi u vreme 0, i da se pri otkaza  $i$  popravlja po trošku  $c_f + (i-1)c_v$  ako je  $i=1,2,3,\dots$ , i  $c_f$  su fiksni deo troškova popravke a  $c_v$  su dodatni deo troškova popravke.

Popravka je neperfektna u smislu da se nakon svake popravke vreme do sledeće popravke smanjuje za indeks  $\alpha$  od svoje neposredno prethodne vrednosti i da je nezavisno od svih prethodnih vremena. Vreme trajanja popravke će se povećati za indeks  $\beta^{21}$  u odnosu na svoju prethodnu vrednost i biće nezavisno od prethodnih vremena trajanja popravke.

Uzastopna vremena između otkaza formiraju opadajući proces kvazi-obnove sa parametrom  $\alpha$ , a uzastopna vremena popravke formiraju rastući niz procesa kvazi-obnove sa parametrom  $\beta$ . Neka životni ciklusi između otkaza nove jedinice budu predstavljeni slučajnom promenljivom  $X_I$ , onda je njeno matematičko očekivanje  $\mu$ , a prvo vreme trajanja popravke je slučajna promenljiva  $Y_I$ , sa svojim matematičkim očekivanjem  $\delta$ .

Nakon  $k^{te}$  neperfektne popravke nakon otkaza, jedinica se ili menja pri sledećem otkazu po trošku  $c_{fr}$  ili se preventivno menja po dostignutom vremenu  $T$  po trošku  $c_p$ , koje god od ta dva da se prvo dogodi. Slično kao i u slučaju flote školskih aviona G-4 kada se sistem pusti u rad, prvih  $(k-1)$  popravki će biti izvršeno po nižim troškovima  $c_f + (i-1)c_v$  zato što je sistem u dobrom operativnom stanju. Nakon tih  $(k-1)$  popravki sistem će biti u lošijem stanju i biće potrebe za nekim vidom perfektne popravke (PM ili neke druge). Takođe dozvoljena je u određenoj meri primena oportunističkih politika održavanja.

Iz (Wang & Pham, 2006) imamo da je dugoročni očekivani trošak održavanja po jedinici vremena, ili intenzitet troškova:<sup>22</sup>

$$L(T, k; \alpha, \beta) = \frac{(k-1)c_f + \frac{(k-1)(k-2)}{2}c_v + c_p \times s_1(\alpha^{1-k}T) + c_{fr} \times F_1(\alpha^{1-k}T)}{\frac{\mu(1-\alpha^{k-1})}{1-\alpha} + \frac{\eta(1-\beta^{k-1})}{1-\beta} + \int_0^T s_1(\alpha^{1-k}x)dx} \quad (54)$$

I da je za taj slučaj vrednost asimptotske srednje raspoloživosti data kao:

<sup>21</sup> U slučaju sistema održavanja G-4 ovo nije primenljivo obzirom na velike vrednosti logističkih i administrativnih vremena

<sup>22</sup> Za detaljan dokaz videti (Wang & Pham, 2006, pp. 76-80)

$$A(T, k; \alpha, \beta) = \frac{\frac{\mu(1-\alpha^{k-1})}{1-\alpha} + \int_0^T R_1(\alpha^{1-k}x) dx}{\frac{\mu(1-\alpha^{k-1})}{1-\alpha} + \frac{\delta(1-\beta^{k-1})}{1-\beta} + \int_0^T R_1(\alpha^{1-k}x) dx} \quad (55)$$

$R_I(t)$  predstavlja raspodelu funkcije preživljavanja ili funkciju pouzdanosti novog sistema

$$R_I(t) = 1 - F_I(t)$$

$\mu$  - matematičko očekivanje jedinice koja ima Weibulovu raspodelu vremena između otkaza, kao što je slučaj za većinu sistema na avionu G-4, a što se može videti iz studije pouzdanosti. i dato je jednačinom:

$$\mu = \alpha \times \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right) \quad (56)$$

Gde je  $\Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)$  gama funkcija vrednovana u  $\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)$

$\delta$ - je matematičko očekivanje vremena trajanja popravke

Ako se uzmu vrednosti i koeficijenta troškova, indeksa za vremena između otkaza i vremena trajanja popravke iz (Wang & Pham, 2006, p. 79) datih kao u tabeli T. 15<sup>23</sup> :

T. 15 Parametri za proračun intenziteta troškova održavanja

$c_f$	$c_v$	$c_p$	$c_{fr}$	$\alpha$	$\beta$	$\delta$
2	0.06	4	12	0.95	1.05	0.03

Da bi se našli minimalni troškovi po jedinici vremena  $L(T, k; \alpha, \beta)$  moraju se menjati upravljačke promenljive  $T$  i  $k$ , to jest interval između PM i broj uzastopnih korektivnih popravki na svakom sistemu na vazduhoplovu zasebno.

Iz tabele T. 10 gde je matematičko očekivanje vremena između otkaza za svaki od sistema dato nalaze se potrebne vrednosti za  $\mu$

<sup>23</sup> Što se tiče matematičkog očekivanja vremena trajanja popravke  $\delta$  i indeksa popravke  $\beta$ , zbog trenutnog stanja u kome velikog uticaja na vreme servisiranja (popravke) imaju logističko i administrativno vreme te se ne mogu smatrati validnim za ocenu koncepta održavanja. Vrednosti ovih parametara su uzeti kao u primeru iz literature (Wang i Pham 2006).

Ako je dato da je  $F_I(t) = I - R_I(t)$  jednačina (56) se transformiše u:

$$L(T, k; \alpha, \beta) = \frac{(k-1)c_f + \frac{(k-1)(k-2)}{2}c_v + (c_p - c_{fr}) \times R_1(\alpha^{1-k}T) + c_{fr}}{\frac{\mu(1-\alpha^{k-1})}{1-\alpha} + \frac{\delta(1-\beta^{k-1})}{1-\beta} + \int_0^T R_1(\alpha^{1-k}x)dx} \quad (57)$$

Korišćenjem softvera za nelinearno programiranje i numeričkih metoda za rešavanje određenog integrala, koji se nalazi u imeniocu koja pod imenom Simpsonovo pravilo dobijen je niz rešenja jednačine (57). Na osnovu toga dobijaju se optimalne koncepcije (politike) održavanja, po izabranim parametrima optimizacije, koje minimizuju intenzitet troškova održavanja a čiji su rezultati prikazani u tabeli T. 16.

T. 16 Optimalna politika održavanja u odnosu na intenzitet troškova

Sistem	Kabina i izbacno sedište	Stajni trap i organi za voženje	Gornji sistem	Hidraulički sistem	Pogonska grupa	Avionski instrumenti i oprema	Radio i radarska oprema
$L(T, k; \alpha, \beta)$	3.13592	3.203	3.0367	2.79908	2.74733	3.14602	2.95861
$K$	5.19≈5	5.41≈5	5.12≈5	5.19≈5	5.29≈5	5.67≈6	5.13≈5
$T$	0.64882	0.594	0.682	0.72454	0.73743	0.81844	0.91402

### 6.3 Diskusija

Rezultati iz tabele T. 16 pokazuju da od sedam obuhvaćenih sistema koji imaju vremena otkaza koja prate Weibulovu raspodelu četiri neperfektna uzastopna održavanja zahtevaju šest od njih. Pre nego što se stekne potreba da se preventivno zamene ili da se na njima uradi neka druga perfektnija popravka. Samo sistem *Avionski instrumenti i oprema* zahteva pet neperfektnih popravki.

Intenzitet troškova održavanja je dat za svaki od sistema ponaosob u prvom redu tabele T. 16.

Broj neperfektnih uzastopnih popravki  $k$  je u suštini ceo broj, ali je iz razloga lakšeg računanja izračunat kao realan broj pa je onda zaokružen na najbližu celobrojnu vrednost.

Poredeći rezultate iz tabele T. 16 sa onima iz tabele T. 14 može se primetiti da je primena modela neperfektnog održavanja uticala na promenu koncepta održavanja u tom smislu da je uvela ograničenja u broju uzastopnih akcija CM. Sistemi koji su imali potrebu za najveći broj uzastopnih CM kao što su (*Stajni trap i organi za upravljanje na zemlji i Avionski instrumenti i oprema*) dobili najveća preporučena smanjenja. Obzirom da su to ujedno bili i sistemi sa

najmanjom pouzdanošću, dolazi se u situaciju da se povećanjem njihove dostignute pouzdanosti ostvaruje uticaj i na raspoloživost aviona u celosti. Kako su za većinu sistema ograničenja u broju uzastopnih CM ista ili slična, ovo dodatno omogućava primenu, ionako zastupljenog koncepta oportunističkih politika održavanja

#### 6.4 Validacija

Da bi se mogla izvršiti potvrda uticaja primene modela neperfektnog održavanja na raspoloživost, izvršeni su proračuni korišćenjem jednačine (55) unošenjem parametara za koeficijente iz tabele T. 15 i normi održavanja iz tabele T. 16. Nakon proračuna dobiju se vrednosti raspoloživosti za svaki od pojedinih sistema kao u tabeli T. 17 i može se videti da su na zadovoljavajućem nivou od 96 procenata i više.

T. 17 Dostignuta raspoloživost nastala primenom optimalne politike održavanja

<i>Sistem</i>	<i>Kabina i izbacivo sedište</i>	<i>Stajni trap i organi za voženje</i>	<i>Gorivni sistem</i>	<i>Hidraulički sistem</i>	<i>Pogonska grupa</i>	<i>Avionski instrumenti i oprema</i>	<i>Radio i radarska oprema</i>
$A(T,k;\alpha,\beta)$	0.967	0.965	0.968	0.97	0.970	0.966	0.968

Ova validacija je urađena iz tog razloga, što postavljanje parametara održavanja samo u svrhu smanjenja troškova održavanja, može dovesti do toga da se dobiju nezadovoljavajuće vrednosti za raspoloživost. Ako bi se desio takav scenario, onda bi se morao postaviti dodatni uslov u softver za numerički proračun. Optimalne politike (koncepti) održavanja bi se morali podešavati prema zahtevanoj raspoloživosti ( $A_0$ ), a shodno tome dobili bi se i drugačiji parametri za norme održavanja.

## 7. Razvoj simulacionog modela procesa eksploatacije flote aviona G-4 za karakteristični zadatak u školskoj nameni, sa primenjenim modelom neperfektnog održavanja

### 7.1 Koncept simulacionog modela

Da bi da se mogao oceniti uticaj izmenjenih normi dobijenih numeričkim proračunima na sistem održavanja koji je predmet simulacije, performanse flote aviona koja se nalazi u simuliranom sistemu posmatraju se kroz niz statističkih pokazatelja od kojih su za potvrdu koncepta neperfektnog održavanja koji je prezentovan u poglavlju 6 ovog rada najinteresantniji:

- *Raspoloživost flote,*
- *Prosečna dnevna ispravnost,*
- *Procenat izvršenja planiranih letova i*
- *Broj izvršenih letova.*

Prvi i najvažniji pokazatelj je svakako *raspoloživost flote* odnosno tačan naziv u ovom slučaju je ***Operativna raspoloživost*** a to je po definiciji elemenata efektivnosti sistema verovatnoća da sistem, kada se koristi pod specificiranim uslovima, zadovoljavajuće funkcioniše u bilo kom trenutku vremena, pri čemu vreme koje se ovde razmatra obuhvata vreme korišćenja i vreme zastoja.

Sledeći ovu logiku, u simulacionom modelu održavanja flote školskih aviona G-4 podmodel u kome se simuliraju prepoletni i međuletni pregledi, o kojem će kasnije biti više reči, proverava ispravnost svakog od devet podsistema koji su ranije bili definisani na avionu. Samo ukoliko su svi podsistemi ispravni (u stanju „IDLE“) avion kreće na „zadatak“ i njegova raspoloživost za taj let se računa da je jedan. U suprotnom njegova raspoloživost je nula. Svaki od aviona se proverava na isti način pred svaki let u toku simuliranog radnog dana. Na kraju dana sumiraju se sve pojedinačne raspoloživosti i dobija prosečna dnevna raspoloživost za flotu aviona koja će u svrhu kontinualanog praćenja biti prikazana na grafikonu. Nakon završetka radnog vremena kao i u dane vikenda kada se ne zahteva angažovanje avijacije raspoloživost se na računa, (odnosno ostaje na dostignutom nivou) uzimajući u obzir činjenicu da se za razliku od ***Operativne gotovosti*** u ovom slučaju vreme skladištenja kao i slobodno vreme ne uzima u obzir.

Vreme kada se avion nalazi na planiranom preventivnom održavanju u drugom stepenu održavanja, bez obzira da li je on ušao u radionicu kao ispravan ili kao neispravan (što može a i ne mora biti slučaj) računato je kao vreme zastoja, odnosno u tom periodu raspoloživost konkretnog aviona bila bi nula.

Sledeći pokazatelj koji prikazuje funkcionisanje održavanja u simuliranom modelu, nema toliko veze sa potvrdom teoretskog modela koncepta neperfektnog održavanja niti sa numeričkim primerom iz poglavlja šest, ali je uvršten u simulaciju kao veza sa realnim sistemom održavanja i poslužiće kao podatak za verifikaciju simulacionog modela, a to je *Prosečna dnevna ispravnost*. Podatak koji se dobije na kraju definisanog simulacionog vremena odvijanja dnevnih aktivnosti naleta i održavanja flote školskih aviona G-4 u vidu *Prosečne dnevne ispravnosti vazduhoplova* može se naći i u dokumentaciji koja je korišćena u studiji slučaja pouzdanosti flote školskih aviona. Tip i obim podataka iz te dokumentacije poslužio je kao smernica prilikom odabira konkretne metode neperfektnog održavanja iz niza ponuđenih za analizirani koncept održavanja. (Sl. 16)

Prosečna dnevna ispravnost avijacije računa se od strane drugog stepena održavanja na dnevnom, nedeljnom, mesečnom, i godišnjem nivou i predstavlja odnos broja vazduhoplova koji su ispravni a koji nisu na održavanju u radionici drugog stepena, bilo da je to u pitanju planirano preventivno održavanje ili neki otkaz koji prvi stepen održavanja ne može da otkloni (poslovi kojima se inače bavi drugi stepen održavanja), u odnosu na ukupan broj vazduhoplova u upotrebi.

Izveštaj o broju ispravnih vazduhoplova koji dostavi drugi stepen održavanja služi kao polazna osnova za planiranje naleta avijacije za naredni dan. Po istom tom principu odvija se planiranje naleta u simulacionom modelu flote školskih aviona G-4.

Kao što se može videti na prvi pogled parametar u vidu dnevne ispravnosti avijacije pored toga što je potvrda ispravnosti modela služi i kao dopuna podatku operativne raspoloživosti jer dodatno govori o tome gde se u sistemu i koliko dugo nalaze i zadržavaju avioni. Isto tako obzirom da se broj planiranih letova za naredni dan određuje na osnovu broja ispravnih aviona ,bez aviona koji su u tom trenutku na održavanju u drugom stepenu, podaci o operativnoj raspoloživosti su uvek za nijansu manji od onih o dnevnoj ispravnosti jer se avion koji nije dostupan u trenutku kada se to od njega traži uvek računa sa raspoloživošću nula bez da se ulazi u razloge toga. Bitno je napomenuti da se može naći na primere u literaturi da se parametar dnevne ispravnosti izjednačava sa operativnom raspoloživošću.

(T. Raivio, et al. 2001) u svom radu o održavanju i raspoloživosti vojnih aviona simuliraju korišćenje flote školskih aviona Bae Hawk Mk51. U ovom radu simulirano je korišćenje i održavanje aviona Hawk u mirnodopskom scenariju upotrebe (što je uvek bitno naglasiti) na osnovu podataka o održavanju za jednu godinu upotrebe. U poglavlju o validaciji i analizi osetljivosti ovi autori kažu: „Raspoloživost je u ovom radu definisana kao odnos operativnih aviona naspram ukupnog broja aviona.“ (T. Raivio, et al. 2001). Na osnovu prethodno iznete definicije operativne raspoloživosti a potvrđeno nizom drugih primera i definicija iz literature (O'Connor 2008) , (Pohl 1991), (Wang i Pham 2006) može se reći da ova definicija ne odgovara definiciji raspoloživosti i ne daje tačan podatak, a operativna raspoloživost kao takva je veoma bitna kada se govori o efektivnosti vojnih sistema, kao što je avion za obuku Hawk . Ipak, kao podatak koji može da posluži za validaciju i analizu osetljivosti može da nađe svoju primenu i svako je tačan. Upravo zbog gorepomenutih razloga a i u ove svrhe uvršten je i u simulacioni model upotrebe flote školskih aviona G-4.

Druga dva parametra u vidu *Procenta izvršenja planiranih letova* i *Broja izvršenih letova* služe za ilustraciju efikasnosti planiranja i realizacije naleta flote školskih aviona. Sa jedne strane procenat izvršenja planiranih letova govori o tome koliko je moguće pouzdano planirati zadatke u nekom periodu i sa kojim brojem aviona ako se planiranje oslanja samo na podatak o dnevnoj ispravnosti avijacije dobijenom od drugog stepena održavanja. Sa druge strane broj izvršenih letova govori o tome koliko je moguće izvršiti različitih zadataka u određenom periodu ako se zadaci razvrstaju prema prosečnom trajanju letova<sup>24</sup>. Isto tako broj letova je koristan podatak i služi takođe za verifikaciju ispravnosti simulacionog modela, jer je poznat podatak koliko pojedinačno svaki avion napravi naleta u toku godine i koliki je prosečan nalet po aparatu flote školskih aviona. Prosečni nalet po aparatu flote školskih aviona može se uporediti sa onim koji je predviđen kao optimalni po normama definisanim na početku veka upotrebe (SSNO- Vazduhoplovnotehnička uprava 1990, 37) te se shodno tome može se videti gde i u kom smeru je odmakla pouzdanost posmatranog vazduhoplova.

Letovi aviona G-4 koji su deo simulacije odvijaju se po normalnom režimu dnevnih aktivnosti eskadrile školskih aviona u mirnodopskoj upotrebi i imaju promenljivu prosečnu dužinu trajanja i zavise od tipa obuke koji se u tom trenutku provodi sa kadetima pilotima. U organizacijskom smislu koncept održavanja u samoj simulaciji je podeljen u tri stepena i identičan je kao i u stvarnosti i to:

<sup>24</sup> Da bi ovaj podatak bio još pouzdaniji urađene su simulacije sa različitim prosečnom dužinom trajanja leta, jer različite dužine trajanja leta daju drugačije rezultate pouzdanosti zadatka.

- Prvi nivo - First level (organizational level-flight line),
- Drugi nivo, radionica avio baze - Second level (intermediate, base-level back shop).
- Treći nivo, remontni zavod ili fabrika - Third level (depot level).

Treći nivo, odnosno remontni zavod nije bio predmet interesovanja te tako nije ni simulirana njegova uloga u čitavom procesu operacija flote školskih aviona, obzirom da su modeli neperfektnog održavanja neprimenjivi na njegovo funkcionisanje.

Akcentat je stavljen na drugi nivo održavanja, obzirom da su ranijom statističkom analizom otkaza i popravki kao u (Knežević, i drugi 2017) i (Analiza postojećeg stanja str. 101) prepoznati problemi u vidu povećanog zadržavanja aviona na popravci u drugom stepenu i povećan broj uzastopnih korektivnih akcija na pojedinim podsistemima. Svi ovi faktori zajedno rezultuju smanjenom raspoloživošću flote školskih aviona G-4 koji je neposredno pre toga prošao kroz proces produženja životnog veka.

Rezultati do kojih se došlo primenom metoda neperfektnog održavanja u numeričkom primeru kao u (Knežević, i drugi 2017) mogli bi biti ispitani u realnom sistemu održavanju, ali bi zahtevali odvajanje velikih ljudskih i materijalnih resursa samo za potrebe izvođenja eksperimenta, i samim tim su neizvodljivi u praksi. Verifikaciji dobijenih normi pristupilo se putem razvoja simulacionog modela u programskom paketu za diskretne simulacije Arena, akademska verzija softvera 14.7.00 firme Rockwell koja pruža iste mogućnosti po pitanju kreiranja modela kao i profesionalna verzija istog softvera.

U samom numeričkom primeru u radu (Knežević, i drugi 2017) dobijeni rezultati mogu se podeliti u dve grupe. U prvu grupu spadaju norme koje su za svaki od sedam analiziranih podsistema, od devet ukupno koliko ih ima na avionu, date u vidu maksimalnog broja uzastopnih korektivnih akcija. T. 14 (red „K“). Razlika između stvarnog broja podsistema na avionu i onih za koje su numerički izračunate nove norme stvorena je zbog toga što algoritam koji koristi diferencijalnu jednačinu broj 56 funkcioniše samo sa otkazima po tipu Weibulove raspodele. Zmaj aviona i komande aviona na osnovu dostupnih podataka pripadaju eksponencijalnom odnosno gama tipu raspodele i na njih se ovaj algoritam ne odnosi.

Druga grupa rezultata je proračun potrebnog trajanja perioda između povremenih pregleda za svaki od podsistema pojedinačno i dati su u vidu procenta od trenutne norme. T. 16 (red „T“). Nove proračunate veličine perioda između preventivnih pregleda u procentima od trenutne norme variraju u zavisnosti od vrste podsistema i iznose od 60 do 92%. Ovakav podatak na prvi pogled ne izgleda uverljivo i primenljivo u praksi i to je tačno, ali treba imati na umu da



je algoritam generisao norme za svaki od podsistema pojedinačno ne uzimajući u obzir intenzitete otkaza drugih podsistema niti bilo kakvu vrstu oportunističkih politika održavanja<sup>25</sup> o kojima je već bilo reči u ovom radu.

Upravo ova činjenica je i bila još jedan motiv zbog koga je provera i primena dobijenih normi numeričkim putem pokušana kroz simulacioni model.

Kada se gorepomenuti rezultati uvrste u jednačinu za proračun maksimalne asimptotske raspoloživosti br. 56 (Wang & Pham, 2006, p. 79) dobijaju se značajno bolji rezultati raspoloživosti za svaki sistem ponaosob nego što je dobijeno analizom pouzdanosti. T. 17

Već na prvi pogled uočavaju se nedostaci ovakvog pristupa rešavanju problema održavanja, obzirom da dobijene norme smanjenja vremena između preventivnih održavanja variraju od 60 do 92%. Tako nešto nije izvodljivo organizacijski a ne bi ni donelo veću raspoloživost za sistem u celini. Jedino što se može naslutiti je to da treba ograničiti broj uzastopnih korektivnih popravki i da vreme između povremenih pregleda treba smanjiti. Pristup problematici održavanja sistema koji stare (ageing systems) putem smanjenja perioda između povremenih pregleda nije tako neuobičajen. Pored toga što je na više mesta pominjan u (Wang & Pham, 2006) pristup u održavanju ovakvih sistema smanjenjem vremena između povremenih pregleda pominje se još i u (UK Gov RA5724, 2014). U realnom životu česta je situacija da se u automobilskoj industriji nakon pređene određene kilometraže propisuju češći servisi i znatno manji rokovi između zamene pojedinih komponenti.

Ne postoji jednačina koja bi numeričkim putem objedinila sve norme i pružila odgovor na to koja bi to bila optimalna norma perioda između povremenih pregleda za sve sisteme niti koji je optimalan broj uzastopnih korektivnih akcija koji bi bio jedinstven za sve podsisteme koji se nalaze unutar jednog složenog sistema kao što je to školski avion G-4. Ovako nešto moguće je ustanoviti samo u praksi i iz velikog broja letova uz precizno vođenje statistike o otkazima i popravkama. Drugi način je provera normi u simulacijama uz povremeno opitovanje u praksi onih normi koje su se pokazale kao primenljive i uspešne.

Operaciona raspoloživost kao što je rečeno na početku ovog poglavlja je vrlo bitna za avijaciju i zajedno sa pouzdanošću zadatka čini ključni deo efektivnosti sistema. Pouzdanost zadatka uključuje u sebi i vreme trajanja karakteristične misije (zadatka). Prosečno trajanje

---

<sup>25</sup> Ove politike predviđaju podvrgavanje kompletnog sistema nekom tipu održavanja (perfektnog ili neperfektnog) ako bilo koji od  $k$  različitih podsistema otkaze a ukoliko je period između preventivnih održavanja pri isteku.

karakterističnog zadatka u slučaju mirnodopske upotrebe školskog aviona G-4 zavisi od vrste obuke koja se u tom trenutku provodi sa pilotima ili kadetima koji su na obuci. Iz tog razloga je zanimljivo da se vidi kakve će rezultate Prosečne dnevne raspoloživosti generisati simulacioni model u slučaju kada se dužina trajanja letova bude menjala.

Simulirane su prosečne dužine trajanja letova od:

- 1 hr
- 50 min (0.83 hrs)
- 45 min (0.75 hrs)

Kada je u pitanju norma vremena između povremenih pregleda u drugom stepenu održavanja trenutno su u upotrebi tri norme za tri različite vrste preventivnih pregleda koje su jasno definisane po časovnom ili kalendarskom roku rada (SSNO- Vazduhoplovnotehnička uprava 1990), i to:

- 50 časova naleta
- 100 časova naleta ili jedna godina
- 200 časova naleta ili dve godine.

Detaljan proces odvijanja preventivnih pregleda je simuliran za takozvani 50 časovni pregleda, tj. normu od 50 časova akumuliranog vremena. Isto tako analiza osetljivosti modela na predložene promene normi vremena između preventivnih pregleda koja će naknadno biti prikazana odnosi se samo na ovaj tip. povremenih pregleda.

Za razliku od nekih drugih radova koji su se bavili sličnom tematikom (simulacija održavanja) (Raivio, et al., 2001) i (Salaman, et al., 2007) u ovom radu stok rezervnih delova nije uvek dostupan. Delovi ne postoje u dovoljnoj količini, to jest rezervni delovi pristižu u veoma retkim intervalima i nije poznato šta stiže od rezervnih delova, sve dok se ne razvrstaju u virtuelnom skladištu. Teoretski posmatrano to znači da je ovaj aspekt u modelu stohastički a u praktičnom smislu to bi značilo da nije moguće naručivanje rezervnih delova pa se tako otežava posao kompletiranja radova oko povremenih pregleda i pojedinih popravki koje zahtevaju zamenu delova, a to je upravo ono što se i dešava u praksi zbog slabe integralne logističke podrške sistemu održavanja.

Rezervni delovi u simulaciji stižu u sledećim intervalima:

**T. 18 Intenzitet dotoka rezervnih delova u sistem**

<i>1 deo na 150 dana</i>	<i>slab dotok rezervnih delova</i>
<i>1 deo na 25 dana</i>	dobar dotok rezervnih delova

Kao i u radu (Salaman, et al., 2007) svaki od postavljenih scenarija po kojima se vrši varijacija osnovnog modela simulacije omogućuje upotrebu kanibalizacije kao instrumenta održavanja ili je isključuje pa se tako ispituje i njen uticaj na Prosečnu dnevnu raspoloživost i Ispravnost vazduhoplova.

Uticaj angažovanja dodatne radne snage u vidu dodatnih ekipa u radionici drugog stepena održavanja za obavljanje povremenih pregleda takođe je omogućen kao opcija, budući da su ekipe za preventivne preglede definisane u simulacionom modelu kao resursi.

## 7.2 Raspored modula i logika funkcionisanja modela

U samom simulacionom modelu izdvaja se nekoliko karakterističnih celina.

U osnovnoj postavci logike modela Sl. 19 razlikuju se podmodel za planiranje letova (podmodel broj 1 „Plan letenja“) koji na kraju radnog dana dobija podatke od podmodela za proveru ispravnosti (podmodel broj 2 „Provera ispravnosti na kraju dana“) o broju ispravnih vazduhoplova a koji se pri tome ne nalaze na povremenim pregledima u radionici drugog stepena održavanja (podmodel broj 6 „Radionica drugog stepena). Tek nakon što se razmene podaci između ova dva modula planirani letovi se upućuju ka odabranim avionima. Za svaki od ispravnih aviona planira se po tri leta određenog trajanja (1 hr, 0.83 hr ili 0.75 hr) što praktično znači da se letenje planira u tri smene u toku jednog radnog vremena od 8 časova.

Podmodel za proveru ispravnosti vrši inspekciju ispravnosti na kraju radnog dana (posleletni pregled) koji traje koliko je propisano za normalno<sup>26</sup> funkcionisanje flote tih vazduhoplova, i „javlja“ podmodelu za planiranje da li je vazduhoplov ispravan za narednu dan. Pored toga on služi i za izvršenje pretpoletnih i međuletnih pregleda kojima je određeno takođe da traju onoliko koliko je propisano za vazduhoplov G-4. Unutar ovog modela odvija se logika funkcionisanja jednog dela poslova prvog stepena održavanja, to jest onog dela koji se odnosi na preglede ispravnosti. Obzirom da funkcionisanje prvog stepena održavanja nije bio predmet simulacije, on je modelovan samo u onoj meri u kojoj je to bilo neophodno da bi se mogao odvijati proces letenja. Bitno je napomenuti da se izvršenje planiranog letenja koje podmodel

<sup>26</sup> Postoje i skraćeni pregledi u borbenim uslovima.

„Plan letenja“ planira u 3 smene za svaki ispravan avion odvija prema modulu za proveru ispravnosti praktično u 4 smene naleta avijacije. Ovakva logika funkcionisanja sistem uvedena je iz tog razloga što se letenje avijacije tako odvija i u praksi. Naime, zbog većeg procenta izvršenja planiranog naleta, eskadrile imaju običaj da neizvršene letove iz prve tri smene (zbog neispravnosti pojedinih vazduhoplova) preplaniraju u četvrtu smenu sa preostalim ispravnim vazduhoplovima.

Podaci koje generiše modul za proveru ispravnosti služe da bi modulu za upućivanje aviona na let (podmodel broj 3 „Kreiranje aviona“) dao dozvolu da avion krene sa stajanke na svoj planirani let. U samom podmodelu „Kreiranje aviona“ mesto aviona na stajanci je modelovano Arena naprednim transfer modulom tipa Stanica (*eng. Station*) i daje mogućnost da se u daljem razvoju ovog modela grafički prikaže put koji avion prelazi dok ide sa svoje pozicije na stajanci ka pisti ili ka radionici i obrnuto, ukoliko bi npr. predmet simulacije bio rad prvog stepena održavanja na stajanci.

Otkazi pojedinih podsistema koji su definisani kao resursi koji se troše i povećavaju svoje akumulirane časove naleta definisani su u naprednim proces modulima za podatke, softvera Arena (*eng. Failure data module*) i predstavljaju matematičke raspodele verovatnoća otkaza za svaki od podsistema po tipu i po parametrima koji su proračunati u studiji pouzdanosti u radu (Knežević, i drugi 2017) i nalaze se u tabeli T. 11. Princip po kome je modelovano ponašanje resursa kada mu se uputi zahtev za opsluživanje a on je u otkazu ili mu sledi otkaz je jedan od ponuđenih u softveru

Arena i to princip „ignore“ (resurs prima zahtev za opsluživanje, radi sa entitetom onoliko vremena koliko je to predviđeno, pa tek onda otkazuje ili ide na pauzu, ako mu je to definisano). Primenjeno na realni sistem održavanja to bi bilo isto kao da se svaki otkaz bilo kog podsistema detektuje jedino na stajanci prilikom pregleda od strane prvog stepena održavanja isto kao i u radu (T. Raivio, et al. 2001). Takođe, vremena otkaza su definisana i dešavaju se samo nakon proteklog vremena sistema „u radu“ (Busy state only) a ne nakon ukupno proteklog vremena, jer su na taj način i računata u studiji pouzdanosti školskog aviona G-4. Na kraju važno je istaći da se smatra da su svi podsistemi na avionu vezani redno i da otkaz bilo kog od njih definiše ceo sistem kao neispravan, a to je takođe bila i jedna od osnovnih pretpostavki u studiji pouzdanosti.

Osnovna namena podmodela za kreiranje aviona, Sl. 19 (podmodel broj 3), kao što mu ime kaže je da na početku simulacionog vremena „kreira“ u istom trenutku sve vazduhoplove kao

fabrika u kojoj se sklapaju avioni . Svaki od njih je u stvari skup devet entiteta koji predstavljaju svaki od podsistema koji se nalazi u vazduhoplovu i koji se na taj način i održavaju u stvarnosti, a da bi se simulirao rad tih podsistema u prethodnom pasusu je objašnjeno da svaki od njih ima svog para u vidu istoimenog resursa koji se angažuje na zahtev za opsluživanjem. Nakon kreiranja, svaki od vazduhoplova dobija svoju brojnu oznaku i ta oznaka je dodeljena svakom od podsistema koji originalno potiče sa tog vazduhoplova. Ovo je urađeno u tu svrhu da bi se moglo pratiti gde završavaju pojedini delovi, u ovom slučaju celi podsistemi, sa vazduhoplova, ako se koristi kanibalizacija kao instrument održavanja. Zatim se vazduhoplov postavlja na svoje mesto na stajanci i čeka provere i izvršenja letova.

Kad podmodel za proveru ispravnosti „odobri“ polazak na let za pojedini avion, entitet u vidu aviona kreće iz podmodela za kreiranje aviona u svoj odgovarajući podmodel za izvršenje naleta Sl. 19 (podmodeli broj 5, „Nalet aviona, 1,2,3,4,5,6“) gde se anagažuju svi podsistemi na avionu u vidu resursa koji se troše i kojima se dodaje vreme angažovanja za onoliko minuta koliko je definisano trajanje prosečnog leta i tako se akumulira nalet. Pri izlazu iz podmodula „Nalet aviona“ proveravaju se dostignuti resursi i ukoliko je aviona dostigao normu da treba se šalje na neki od povremenih pregleda, ne vraća se na svoje mesto na stajanci već nastavlja u modul „Radionica drugog stepena“ Sl. 19 (podmodul broj 6, „Radionica drugog stepena)

Unutar samog podmodula Radionica drugog stepena postoje dve radne stanice za rasklapanje i sklapanje vazduhoplova i to za 50 časovni pregled i za 100 časovni pregled gde se skupni entitet u vidu aviona rastavlja na 9 entiteta koji su spojeni u jedan nakon trenutka kada su kreirani u podmodulu za kreiranje aviona. Sada ti entiteti koji predstavljaju podsisteme prestaju da budu resursi koji se troše i vrše rad i postaju entiteti nad kojima se izvršava rad unutar narednog modula tj. „Radnih stanica drugog stepena“ Sl. 19 (podmodul broj 6a „Radne stanice drugog stepena). U suštini resursi, koji su Arenini moduli tipa *osnovni procesi podataka* nigde se ni ne kreću već ostaju unutar podmodula „Nalet aviona“, (gde su i postavljeni fizički) ali obzirom da im logika simulacije ne upućuje više zahteve za opsluživanje u vidu letova, oni ostaju u prethodnom stanju, to jest stanje „IDLE“, zato što je unapred definisano da im se stanje menja samo nakon određenog broja časova provedenog u radu. Ako je nekom od resursa i bio „plairan“ otkaz on je to ignorisao, odnosno sačekao je da se poslednji let pred slanje na povremeni pregled završi. Kada ceo avion krene na održavanje, obzirom da je preventivno održavanje svakako po vremenu duže nego korektivna popravka čije se trajanje definiše naprednih modulom za otkaze (Failure data module) zajedno sa raspodelom i intenzitetom otkaza, svakako će se i taj resurs vratiti u stanje „IDLE“ do vremena izlaska iz radionice drugog

stepena. Avioni rastavljeni na podsisteme u vidu entiteta koji su u stanju da se kreću kroz sistem razvrstavaju se po tipovima i odlaze svaki u svoju radnu stanicu radionice drugog stepena.

U podmodulu „Radne stanice drugog stepena“ postoje dva podmodula i to za 50 časovni pregled i za 100 časovni pregled gde svaka vrsta entiteta (podsistema) prolazi inspekciju ispravnosti u zavisnosti od toga na koji je pregled upućena.

Procenat ispravnosti ili neispravnosti za pojedini podsistem definiše se verovatnoćom unutar jednog osnovnog modula grananja „Decide“ modula, i određena je na osnovu konsultacija sa tehničarima iz održavanja na osnovu njihovog dugogodišnjeg praćenja ovih radnji unutar radionice drugog stepena održavanja za avion G-4.

Ukoliko je podsistem ispravan, a i svi ostali podsistemi sa tim serijskim brojem aviona su ispravni, na inspekciji u drugim radnim stanicama, on se automatski vraća u podmodul „Radionica drugog stepena“ gde se u odgovarajućoj stanici za vrstu povremenog pregleda ponovo sastavlja u skupni modul i vraća u podmodul za kreiranje aviona na svoje mesto na stajanci gde čeka nastavak proces letenja.

Ukoliko je određeni podsistem ispravan, a bilo koji od ostalih podsistema koji pripadaju tom serijskom broju aviona nije ispravan i ukoliko je opcija kanibalizacije dozvoljena po trenutno aktivnom scenariju osnovnog simulacionog modela, logika koju sledi podsistem je drugačija. Nakon provere taj se entitet (podsistem) stavlja u poseban red čekanja gde se poredi njegovi dostignuti resursi sa resursima podsistema sa nekog drugog vazduhoplova koji je proglašen za neispravan. Da bi to bilo moguće, prilikom polaska aviona iz svog podmodula „Nalet aviona“ dostignuti resursi za svaki od podsistema se upisuju u odgovarajuću matricu pod imenom „Radna lista“ zajedno sa serijskim brojem tog aviona koji im je dodeljen pri kreiranju.

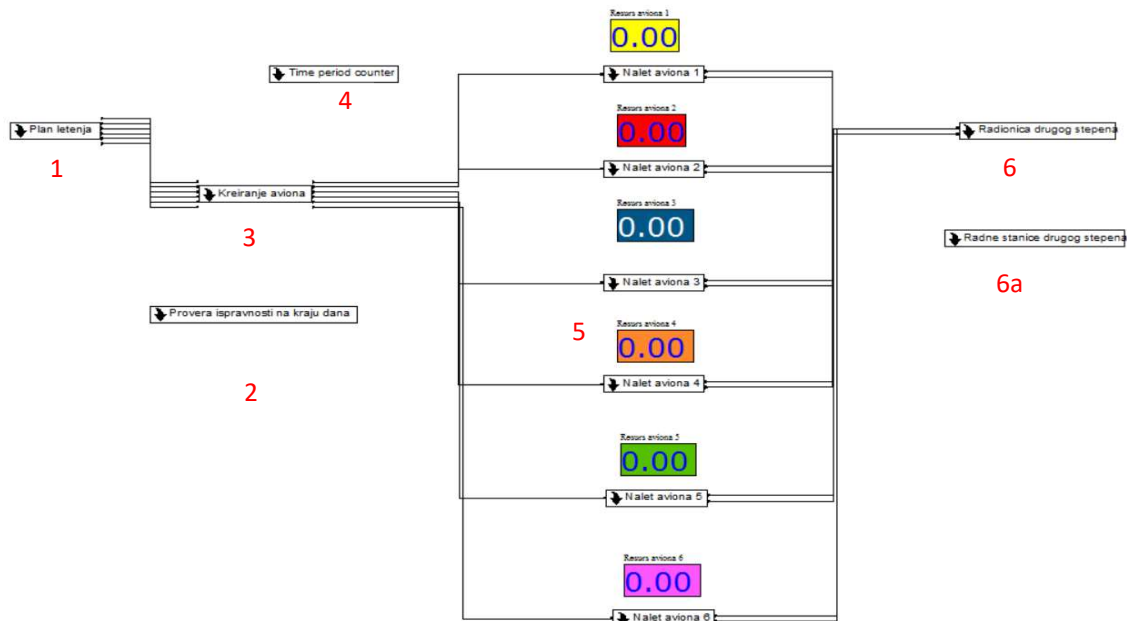
Opcija kada podsistem ne prođe inspekciju na ulazu u radnu stanicu šalje entitet da kruži kroz dve petlje pretraživanja. U prvoj petlji entitet šalje upit u skladište rezervnih delova Sl. 20 (element broj 1) i ukoliko postoji odgovarajući zamenski entitet, odnosno podsistem transporter Sl. 20 (element broj 2) dovozi taj entitet u stanicu odakle se šalje u modul<sup>27</sup> „Radionica drugog stepena“ na odgovarajuću stanicu za sklapanje. Logika rada transportera i pokretne trake koji se mogu videti na slici Sl. 20 je modelovana tako da vreme koje je potrebno

<sup>27</sup> U stvarnosti transporter ne postoji, u ovom slučaju to je samo opcija kojom se predstavlja logističko i administrativno vreme

da se locira entitet u skladištu i doveze u stanicu odakle se šalje na sklapanje predstavlja logističko i administrativno vreme u održavanju.

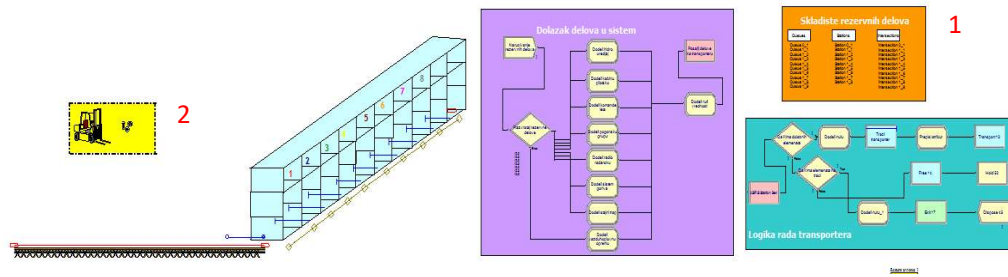
Na slici Sl. 20 može se još videti i elemenat sa modulima koji određuju logiku dolaska određenih rezervnih delova (podsistema) u skladište. Nakon silaska sa pokretne trake preuzima ih transporter koji ih raspoređuje po policama po vrstama gde stoje u redovima čekanja da bi se na zahtev poslali na sklapanje.

Ako rezervni deo ne postoji u skladištu, entitet odlazi u petlju u kojoj iz reda čekanja, za ispravne podsisteme istog tipa rastavljene sa drugih vazduhoplova, pravi upit da li postoji podsistem sa manje dostignutih resursa. Ovo je moguće samo u slučaju da je kanibalizacija omogućena i da je neki od podsistema ušao u red čekanja. Ako postoji odgovarajući podsistem biće skinut iz reda čekanja i poslat na sastavljanje s tim što će serijski broj ovog dela ostati isti a biće mu promenjeno polje „redni broj“ u matrici „Radna lista“ da odgovara serijskom broju sa „novog“ aviona da bi se pomoću prvobitnog serijskog broja moglo pratiti kretanje rezervnih delova sa aviona na avion. U slučaju da nema drugih podsistema u redu čekanja entitet ponovo ide u petlju traženja novog rezervnog dela i tako u krug sve dok ne stigne rezervni deo ili se ne obavi kanibalizacija.<sup>28</sup>



Sl. 19 Osnovna logika postavke modula

<sup>28</sup> Po izjavama inženjera koji se bave održavanjem aviona g4 odnos ugrađenih novih rezervnih delova I skinutih sa drugih aviona je ipak 50 naprema 50%. Ali, obzirom da rezervni delovi stižu neredovno I neplanirano, kao što je to ovde slučaj, uvek se prvo uradi kanibalizacija pa onda se ugrađuju novi delovi. Takva politika održavanja stvara velike zastoje.



Sl. 20 Izgled i logika rada skladišta rezervnih delova i transportera<sup>29</sup>

<sup>29</sup> Transporter i pokretna traka u simulacionom modelu predstavljaju samo interne module softvera Arena pomoću kojih je između ostalog moguće simulirati administrativno i logističko vreme u sistemu održavanja a ni u kom slučaju ne predstavljaju repliku fizičkih entiteta u stvarnom sistemu održavanja



## 8. Analiza i diskusija dobijenih rezultata i poređenje sa rezultatima u referentnoj literaturi

### 8.1 Određivanje potrebnog broja ponavljanja osnovnog modela

Pored toga što su u osnovnom simulacionom modelu definisani pokazatelji koji omogućavaju poređenje sa realnim sistemom čija se upotreba simulira (dnevna ispravnost avijacije, godišnji nalet vazduhoplova) za simulacioni model je bitno je potvrditi da su parametri koje generiše simulacija statistički validni.

Za konačne simulacije kao što je simulacija upotrebe i održavanja školskog aviona G-4 relativno je lako iz modela prikupiti podatke za statističke pokazatelje i analizu. Ono što je bitnije to je: odrediti i sprovesti određeni broj *n- nezavisnih* ponavljanja da bi numeričke vrednosti sadržane u tim pokazateljima bile statistički validne. Koliki je to tačno broj ponavljanja, teško je znati obzirom da nije unapred poznato koliko potencijalnih varijacija postoji u izlaznim podacima. Sam softverski paket Arena interno čuva i snima podatke o svim ponavljanjima ponaosob u svojim izveštajima koje generiše, a sumarni izveštaj (*eng.* Category Overview) sadrži i prosečne vrednosti za svaki od rezultata kroz sva ponavljanja zajedno sa vrednostima polovine 95-postotnih intervala pouzdanosti od očekivane vrednosti izlaznih podataka. Da bi se vrednosti intervala pouzdanosti smanjile jasno je da je potrebno imati veći uzorak događaja. Veći uzorak je moguće dobiti jedino iz većeg broja ponavljanja. Promena veličine intervala pouzdanosti sa promenom broja ponavljanja ponudiće odgovor na pitanje koliki je potreban broj ponavljanja, pogotovo ako su poznate vrednosti intervala iznad kojih se rezultati za pojedine vrste pokazatelja ne mogu tolerisati.

Ako se za početak uzme da je potreban broj ponavljanja 10, onda će vrednosti parametara *Raspoloživosti flote* i *Prosečne dnevne ispravnosti* za svako od ponavljanja pojedinačno biti dati kao u tabeli T. 19

Na osnovu vrednosti iz tabele T. 19 i prosečne vrednosti istih parametara datih u skupnim izveštajima koje generiše softver Arena datih na slikama Sl. 21 i Sl. 22 dobija se da je statistička analiza za deset ponavljanja osnovnog modela data kao u tabeli T. 20.

Vrednosti polovine 95% intervala pouzdanosti za parametar *Raspoloživosti flote* mogu se i ručno izračunati iz jednačine:

$$h = t_{n-1, 1-\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = 2.262 \frac{4,703947}{\sqrt{10}} = 3.36 \quad (58)$$

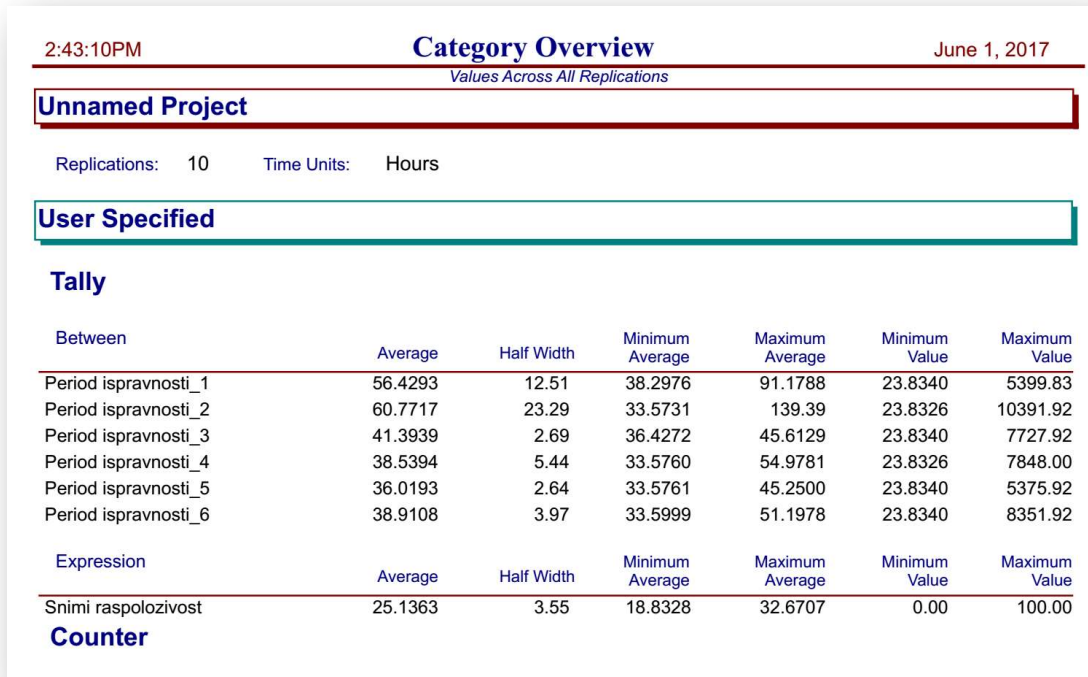
Gde je  $\sigma$ - standardna devijacija a  $n$ -broj ponavljanja, dobijene vrednosti nešto su drugačije, u zavisnosti od toga kojim načinom se računa vrednost Studentove t raspodele za  $n-1$  (devet stepeni) slobode i verovatnoću od 0,05%. U slučaju parametra raspoloživosti flote vrednost 3,36 iznosi 13% što ne predstavlja zadovoljavajuću vrednost.

**T. 19 Vrednosti statističkih pokazatelja za svaku od deset replikacija**

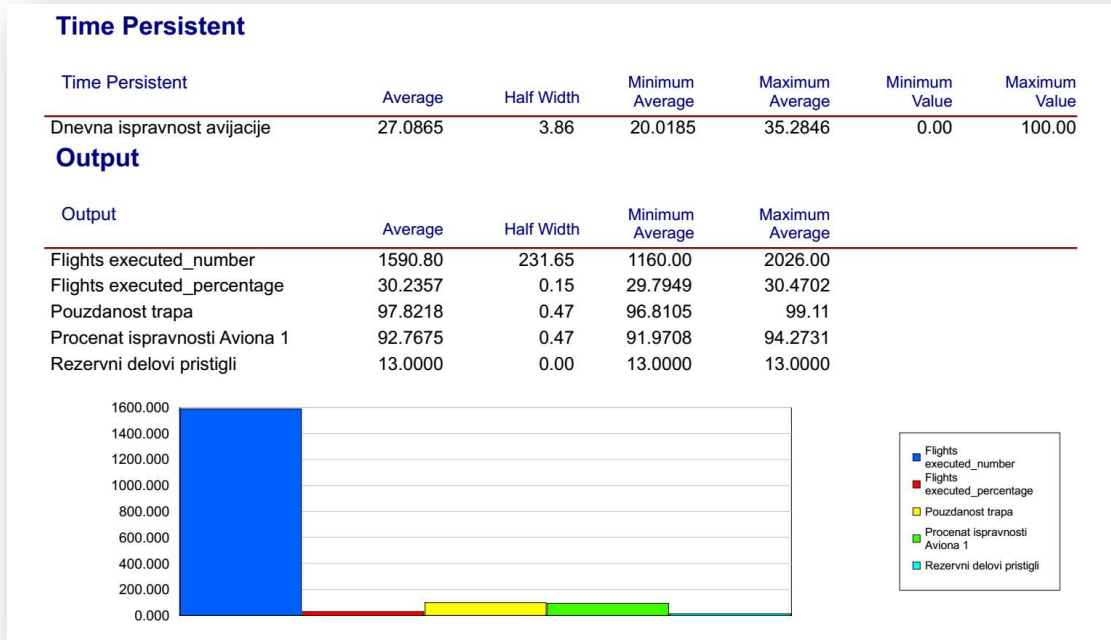
<i>r.br. ponavljanja</i>	<i>Raspoloživost flote</i>	<i>Prosečna dnevna ispravnost</i>
1.	32,6707	35,2846
2.	24,0826	26,1278
3.	18,8328	20,0185
4.	24,2992	26,2223
5.	22,1330	23,8144
6.	31,9572	34,5085
7.	31,0398	33,4460
8.	21,5724	23,3851
9.	20,8461	22,4171
10.	23,9297	25,6409

**T. 20 Statistička analiza osnovnog modela sa deset ponavljanja**

	<i>Raspoloživost flote</i>	<i>Prosečna dnevna ispravnost</i>
<i>Matematičko očekivanje (<math>\mu</math>)</i>	25.1364	27,0865
<i>Standardna devijacija (<math>\sigma</math>)</i>	4,703947	5,125044
<i>Polu vrednost 95% Intervala pouzdanosti (<math>h</math>)</i>	3,55	3,86
<i>Minimalna srednja vrednost</i>	18,8328	32,6707
<i>Maksimalna srednja vrednost</i>	20,0185	35,2846



Sl. 21 Skupni izveštaj statističkog pokazatelja prosečne raspoloživosti sa deset ponavljanja



Sl. 22 Skupni izveštaj više statističkih pokazatelja osnovnog simulacionog modela sa deset ponavljanja

Ukoliko se želi dobiti vrednost intervala pouzdanosti koja je manja od prvobitno dobijene za deset ponavljanja može se u jednačini 59 postaviti željena vrednost intervala pouzdanosti i zatim rešiti jednačinu po  $n$  gde se dobija da je potreban broj ponavljanja jednak:

$$n = t_{n-1, 1-\alpha/2}^2 \frac{\sigma^2}{h^2} \quad (59)$$

Problem sa ovim načinom je taj što ovde jednačina u suštini nije rešena po  $n$  obzirom da desna strana jednačine opet zavisi od  $n$  kroz stepene slobode Studentove  $t$  raspodele i kroz standardnu devijaciju  $\sigma$  dobijenu iz uzorka koja opet zavisi od broja ponavljanja i podataka dobijenih iz originalnog uzorka.

Nešto drugačiji način da bi se grubo mogao izračunati potreban broj ponavljanja bio bi da se kritična vrednost za Studentovu  $t$  raspodelu za poznati broj stepeni slobode ( $n-1$  ponavljanja) zameni za kritičnu vrednost normalne raspodele (kada se uzorak uzima iz populacije koja ima normalnu raspodelu) koja standardno ima uzorak veličine veći od 30 ( $n = 30$  ponavljanja). Za vrednost standardne devijacije bi moralo da se pretpostavi da bi imala vrednost kao i u slučaju sa deset ponavljanja. U tom slučaju potreban broj ponavljanja dobio bi se koristeći jednačinu:

$$n \cong z_{1-\alpha/2}^2 \frac{\sigma^2}{h^2} \quad (60)$$

Gde je  $z_{1-\alpha/2}$  kritična vrednost za normalnu raspodelu i za interval od 0.25% iznosi 1.96

Poslednji način aproksimacije potrebnog broja ponavljanja bio bio bi kao što je to dato jednačinom:

$$n \cong n_0 \frac{h_0^2}{h^2} \quad (61)$$

Gde je  $n_0$  – prvobitni broj ponavljanja a  $h_0$  prvobitni interval pouzdanosti koji se dobije iz njih. Ukoliko bi željeni interval pouzdanosti bio  $h=1$  ili manje, odnosno manje od 5% u odnosu na vrednost matematičkog očekivanja, aproksimacija potrebnog broja ponavljanja bi shodno jednačinama 61 i 62 bila:

$$n \cong 1.96^2 \frac{4.7039^2}{0.98^2} = 88,5$$

ili

$$n \cong 10 \frac{3,55^2}{0,98^2} = 139$$

Kada se u osnovnom modelu napravi izmena i sprovede 140 ponavljanja umesto originalnih 10 dobija se vrednost 95% intervala pouzdanosti kao na slici Sl. 23

9:13:46AM		Category Overview			June 5, 2017	
Values Across All Replications						
<b>Unnamed Project</b>						
Replications:	140	Time Units:	Hours			
<b>User Specified</b>						
<b>Tally</b>						
Between	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Period ispravnosti_1	76.2856	< 6.62	36.5230	227.39	23.7510	13007.75
Period ispravnosti_2	61.7829	< 4.77	33.5731	194.36	23.7510	10655.92
Period ispravnosti_3	46.2573	< 3.14	33.5739	184.85	23.6680	12959.83
Period ispravnosti_4	58.5371	< 29.54	33.5760	2090.66	23.7510	10703.92
Period ispravnosti_5	37.8979	< 1.76	33.5725	140.09	23.6680	7751.92
Period ispravnosti_6	68.7123	< 53.30	33.5763	3805.71	23.7510	12959.83
Expression	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Snimi raspolozivost	28.7366	< 1.14	15.2013	51.4016	0.00	100.00
<b>Counter</b>						

Sl. 23 Vrednost intervala pouzdanosti nakon 140 ponavljanja

Interval pouzdanosti vrednosti  $h=1,14$  ili manji kao što se može videti iz skupnog izveštaja koji generiše softver Arena, zaista je greška manja od 5% u odnosu na vrednost matematičkog očekivanja statističkog pokazatelja *Raspoloživosti flote* i sa te strane se može smatrati da je postignuta dovoljna tačnost rezultata. Sa druge strane vrednost intervala nije manja od  $h=1$  kao što je bilo pretpostavljeno, ali treba uzeti u obzir da su jednačine 61 i 62 samo aproksimacije a ne tačni proračuni. Jedini način da se postigne željena vrednost intervala je daljim eksperimentisanjem sa simulacionim modelom i brojem ponavljanja za koji se sada pouzdano zna da ne sme biti manji od  $n=140$ . Nakon nekoliko pokušaja simulacije bez grafičke animacije (što značajno skraćuje vreme trajanja simulacije) dođe se do zaključka da je potreban broj ponavljanja da bi vrednost 95% intervala pouzdanosti bila manja od 1,  $n=200$ .

## 8.2 Definisane različite scenarije upotrebe u simulacionom modelu

### 8.2.1 Koncept održavanja kao osnovna scenarija u simulacionom modelu

U većini slučajeva nakon što se kreira osnovni simulacioni model, potrebno je radi ispitivanja reagovanja na promenu određenih normi napraviti njegove varijacije, ili verzije, odnosno *scenarije* kako je to nazvano u softveru Arena. Scenariji se mogu međusobno razlikovati od samo promenjenih vrednosti određenih parametara do fundamentalno različite logike. U svakom slučaju potrebno je ponovo sprovesti određene statističke metode nad izlaznim parametrima različitih scenarija da bi se moglo potvrditi da su dobijeni rezultati validni i da se na osnovu njih mogu izvući određeni zaključci.

Ime, odnosno imena scenarija simulacionog modela upotrebe i održavanja flote školskih aviona G-4 data su u odnosu na karakteristiku koja ih ključno razdvaja jedan od drugog, a to je koncept održavanja. Po toj karakteristici razlikuju se:

- Scenario koncepta održavanja prema dostignutim resursima (aktuelni koncept),
- Scenario koncepta neperfektnog održavanja (teoretski koncept).

### 8.2.2 Scenario koncepta održavanja prema dostignutim resursima- aktuelni koncept

U poglavlju 7 ovog rada, gde je objašnjen koncept simulacionog modela upotrebe i održavanja flote školskih aviona G-4, objašnjeni su i parametri pomoću kojih se utiče na ponašanje modela kroz njegovu definisanu logiku rada. Izlazni rezultati, odnosno statistički pokazatelji koji se pri tome dobiju (koji su takođe definisani u poglavlju 7) služe za kontrolu i poređenje sa performansama realnog sistema upotrebe i održavanja.

Obzirom da su prilikom izrade studije pouzdanosti bili dostupni izveštaji o trogodišnjoj upotrebi i održavanju flote školskih aviona G-4 u kojima je sadržano preko 1000 pojedinačnih dnevnih izveštaja od kojih je sklopljena statistika po godišnjim nivoima o *Prosečnoj dnevnoj ispravnosti*, može se sa sigurnošću tvrditi da postoji dovoljno podataka da bi se izvršila kasnija validacija simulacionog modela.

Na isti način, kroz te izveštaje se može pratiti koliki je ostvareni nalet svakog pojedinačnog aparata (vazduhoplova G-4), odnosno što je još zanimljivije koliki je ostvareni prosečni nalet po aparatu za celu flotu. Ovo je veoma bitan podatak, jer se kroz njega prelamaju i održavanje i planiranje letenja. Da bi se mogla oceniti dostignuta efikasnost planiranja letenja, statistički parametar procenat realizacije planiranih letova i broja izvršenih letova se beleži u toku celog perioda trajanja simulacije.

Poslednja izlazna vrednost koji se beleži u simulaciji a koji se inače ne vodi kao takav u evidenciji planiranja letenja niti održavanja je *Raspoloživost flote* koja inače potiče iz teorije efektivnosti sistema i može da se upotrebi kao parametar za ocenu efektivnosti flote vazduhoplova što je za vojnu primenu možda i korisniji podatak.

Svi ovi parametri snimaju se i proračunavaju na osnovu 200 ponavljanja petogodišnjeg funkcionisanja upotrebe i održavanja flote školskih aviona G-4.

Zbog konstantnog opadanja dostignute pouzdanosti u prethodnom periodu upotrebe došlo se do toga da je od propisanih 167 sati optimalnog godišnjeg iskorišćenja u praksi ostvarivo nešto više od 50 sati godišnjeg iskorišćenja. Po svoj prilici, to je posledica neperfektnog održavanja, i to najpre zbog velikog procenta upotrebe kanibalizacije, umesto zamene otkazalih delova novim komponentama i nedovoljno detaljno odrađene procedure produženja životnog veka, kao što je to objašnjeno u poglavlju 0.

Period od pet godina trajanja simulacije definisan je iz tog razloga što se ne bi moglo sa velikom pouzdanošću tvrditi da bi se za više od 5 godina moglo zadržati trenutno stanje, ako se uzme da su polazna tačka elementi pouzdanosti utvrđeni studijom slučaja koja je rađena na osnovu podataka od tri godine. Bez obzira na to što je međuremontni period za avione tipa G-4 1000 časova rada ili 10 godina kalendarskog resursa, pouzdanija predviđanja obzirom na gorenavedeno su moguća samo na polovini tog perioda. Drugi razlog za takvu odluku je što se i u referentnoj literaturi (T. Raivio, et al. 2001) može videti da su predviđanja raspoloživosti rađena za period od 4 godine na osnovu podataka iz jedne godine upotrebe i održavanja.

Na osnovu svega prethodno iznetog polazni to jest osnovni scenarionog modela scenarionog „aktuelni koncept“ varira se po parametrima datim kao u tabeli T. 21. Sve kombinacije pojedinih parametara su ispitane i biće kasnije prezentovane.

Treba napomenuti da su prve cifre u koloni „vrednost“ predstavljaju u potpunosti preslikan sistem upotrebe i održavanja flote školskih aviona G-4 koji služi za validaciju samog modela, poređenjem sa dostupnim podacima koji se mogu naći u izveštajima o održavanju.

Na osnovu toga dobijaju se statistički pokazatelji kao u tabeli T. 22

Ostale vrednosti parametara predstavljaju pokušaj simuliranja:

- uticaja primene normi održavanja koje su proračunate numerički (primenom teoretskog modela neperfektnog održavanja kao u poglavlju 6, pre svega norme vremena između povremenih pregleda),

- uticaj promene trajanja karakterističnog zadatka na dostignutu pouzdanost aviona,
- uticaj uključenja i isključenja kanibalizacije kao instrumenta održavanja,
- uticaj promena u integralnoj logističkoj podršci u vidu smanjenja perioda nabavke rezervnih delova (smanjenje logističkog i administrativnog vremena)

T. 21 Ulazni parametri za scenario aktuelnog modela i njegove varijacije

<i>parametar</i>	<i>vrednost</i>			
<i>trajanje leta (hr)</i>	0,83	0,75	1	
<i>Interval povremenih pregleda (hr)</i>	50	49	48	47
<i>kanibalizacija</i>	1	0		
<i>Period nabavke rezervnih delova (dana)</i>	150	25		

T. 22 Ulazni parametri i izlazni statistički pokazatelji modela za verifikaciju

<i>Ulazni parametri</i>	<i>trajanje leta (hr)</i>	<i>interval povremenih pregleda (hr)</i>	<i>kanibalizacija</i>	<i>period nabavke rezervnih delova (dana)</i>
<i>Statistički pokazatelji</i>	0,75	50	1	150
	<i>raspoloživost flote (%)</i>	<i>prosečna dnevna ispravnost (%)</i>	<i>procenat realizacije planiranih letova (%)</i>	<i>broj izvršenih letova</i>
	28,275	30,479	30,259	1803

Na osnovu dobijenih podataka a upoređivanjem sa dokumentacijom može se potvrditi da je procenat petogodišnje *Prosečne dnevne ispravnosti* u simulacionom modelu u potpunosti isti kao i procenti ispravnosti avijacije za svaku od tri godine za koju su bili dostupni podaci.

Kada se *broj izvršenih letova* pomnoži sa trajanjem leta i podeli sa pet godina i brojem od 6 aviona dobije se da je prosečni nalet po aparatu u tih pet godina bio 45 časova što takođe odgovara realnoj situaciji.

Na osnovu rezultata iz tabele T. 22 može se sa sigurnošću tvrditi da je postavkom ulaznih parametara kao u realnom održavanju, dokazana korelacija simulacionog modela sa realnim sistemom upotrebe i održavanja flote školskih aviona G-4.

Uticaj promene parametara u svrhu ispitivanja primene pojedinih koncepta na realni sistem biće ispitane u poglavlju analize osetljivosti.



### 8.2.3 Scenario koncepta neperfektnog održavanja (teoretski koncept)

Primenom metodologije izbora modela održavanja kao na slici Sl. 16 i na osnovu numeričkih proračuna u okviru odabranog modela neperfektnog održavanja u poglavlju 6 ovog rada dobijene su norme održavanja koje se razlikuju od postojećih. Na prvom mestu tu je period između povremenih pregleda i broj uzastopnih korektivnih akcija. Osnovni nedostatak numeričkih proračuna urađenih na osnovu jednačina broj 58 i 56 je taj što one daju parametre koji se odnose samo na posmatrani podsistem, što znači bez usaglašavanja sa ostalim podsistemima. Praktično to znači da za posmatrani sistem aviona G-4 ne postoji jedinstveno rešenje predloga promene normi održavanja. Samim time, prirodno se nametnula potreba provere primene odabranog koncepta neperfektnog održavanja na ceo sistem. Kao što je bilo objašnjeno u prethodnim poglavljima, jedino moguće rešenje je bila primena putem računarske simulaciju.

Simulacioni model upotrebe i održavanja flote školskih aviona G-4 proširen je u smislu primene teoretskog koncepta neperfektnog održavanja. Da bi se napravio scenario koncepta neperfektnog održavanja bilo je neophodno dodati određene parametre koji služe za upravljanje logikom koncepta neperfektnog održavanja, kao i za kontrolu i validaciju njegovih statističkih pokazatelja i statističkih pokazatelja funkcionisanja sistema upotrebe i održavanja flote vazduhoplova.

Ako se pogleda poglavlje 6 i tabela T. 15 može se videti niz parametara koji se kasnije koriste u numeričkom rešavanju jednačine broj 58 koja u stvari generiše nove norme održavanja u vidu procenta vremena u odnosu na trenutno vreme između preventivnih pregleda i broj uzastopnih korektivnih popravki. Prva četiri koeficijenta vezana su za proračun troškova održavanja i obzirom da smanjenje troškova nije bio cilj optimizacije već samo mogućnost (cilj je bio povećanje raspoloživosti) neće biti predmet simulacije. Koeficijenti koji su iz domena teorije neperfektnog održavanja a direktno utiču na raspoloživost su:

- $\alpha$  – faktor smanjenja vremena između otkaza podsistema
- $\beta$  – faktor povećanja vremena popravke.

Koeficijent  $\delta$  koji predstavlja vreme održavanja nove jedinice neće biti dat vrednošću kao što je to bio slučaj u numeričkom proračunu već će vreme popravke biti isto ono koje je definisano naprednim Arena modulima „Failure“ kao i u scenariju aktuelnog koncepta.

Da bi se u potpunosti primenio odabrani model neperfektnog održavanja za scenario teoretskog koncepta definisan je parametar broja uzastopnih neperfektnih popravki  $k$  čijim će variranjem

biti ilustriran uticaj na *Raspoloživost flote* i ostale statističke pokazatelje koji su prethodno bili definisani za scenario aktuelne upotrebe.

Kao što je bilo potrebno izvršiti verifikaciju statističkih pokazatelja scenarija aktuelnog koncepta održavanja sa realnim statistikama sistema upotrebe i održavanja tako je isto potrebno definisati statističke pokazatelje koji se mogu porediti sa izlaznim podacima pre i nakon primene odabrane metode neperfektnog održavanja. Parametar koji se pojavljuje pre i nakon numeričke primene odabrane metode neperfektnog održavanja je pouzdanost, odnosno u ovom slučaju (zbog načina računanja) raspoloživost pojedinog podsistema. Podaci koji se nalaze u tabeli T. 13 i nakon toga u tabeli T. 17 predstavljaju upravo te norme. Kao reprezentativni primer može se uzeti procena pouzdanosti podsistema stajnog trapa u tabeli T. 13 koja pre primene neperfektnog održavanja iznosi 73,81%.

Ako se ponovo, slično kao i u tabeli T. 21, svi parametri i njihove vrednosti stave na jedno mesto onda je scenario koncepta neperfektnog održavanja definisan kao u tabeli T. 23. Kao i u slučaju scenarija aktuelnog koncepta prva kolona služi da se na osnovu tih unosa, dobijene vrednosti statističkih pokazatelja uporede sa referentnim vrednostima.

**T. 23 Parametri za kontrolu scenarija koncepta neperfektnog održavanja**

<i>parametar</i>	<i>vrednost</i>										
<i>trajanje leta (hr)</i>	0,83	0,75	1								
<i>Interval povremenih pregleda (hr)</i>	50	49	48	47							
<i>Kanibalizacija</i>	1	0									
<i>Period nabavke rezervnih delova (dana)</i>	150	25									
<i>Koeficijent <math>\alpha</math></i>	0.95										
<i>Koeficijent <math>\beta</math></i>	1.05										
<i>Broj uzastopnih korektivnih akcija „k“</i>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Provođenje 200 ponavljanja simulacije petogodišnje upotrebe i održavanja flote školskih aviona G-4 po konceptu neperfektnog održavanja, bez primene ograničenja broja neperfektnih popravki, dobije se u stvari prvobitni scenario aktuelnog održavanja i može se predstaviti kao specijalni slučaj ovog scenarija sa datim normama. Iz podataka za studiju pouzdanosti iz koje

su i uzeti podaci i koje je kasnije služila kao polazna tačka za proračune numeričkog modela, dobiju se statistički pokazatelji sa kojima se porede statistički pokazatelji kao u simulaciji.

**T. 24 Statistički pokazatelji primene koncepta neperfektnog održavanja**

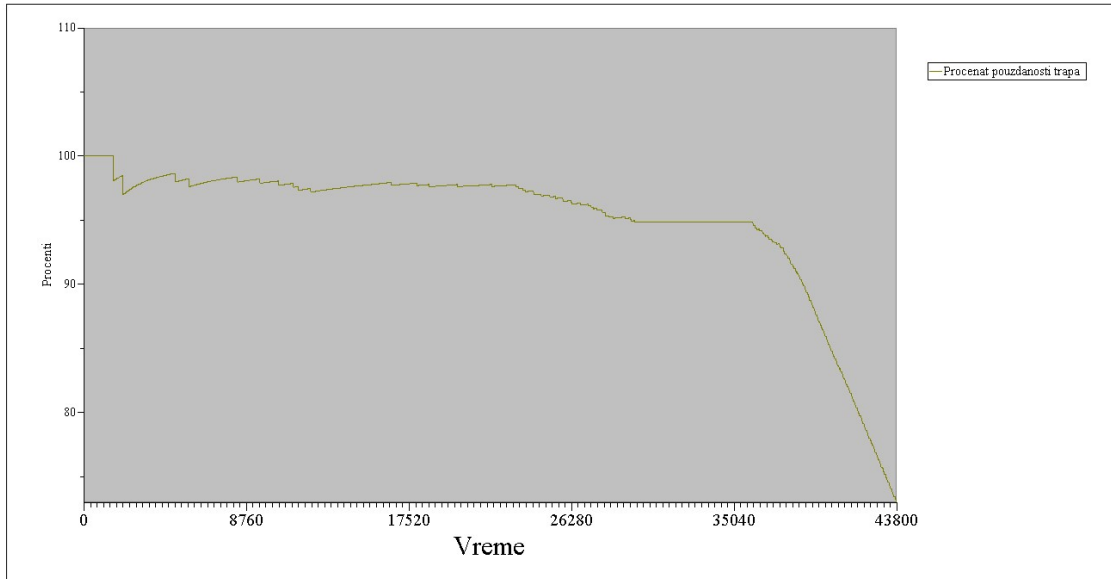
<i>Ulazni parametri</i>	trajanje leta (hr)	interval povremenih pregleda (hr)	kanibalizacija	period nabavke rezervnih delova (dana)	Koeficijent $\alpha$	Koeficijent $\beta$	Broj uzastopnih korektivnih akcija „k“
	0,83	50	1	150	0,95	1,05	0
<i>Statistički pokazatelji</i>	raspoloživost flote (%)	prosečna dnevna ispravnost (%)	procenat realizacije planiranih letova (%)	broj izvršenih letova	Pouzdanost trapa (%)	Procenat ispravnosti aviona 1 (%)	
	25,288	29,1684	28,4453	1618	74,2025	80,0801	

Podaci koji potvrđuju podatke iz tabele T. 13 za pouzdanost stajnog trapa (73,81%) sadržani su u koloni „Pouzdanost trapa“ u tabeli T. 24 gde se može videti da je generisana pouzdanost stajnog trapa u slučaju ne ograničavanja broja uzastopnih neperfektnih popravki jednaka 74,2025%. Ostali statistički pokazatelji približni su podacima iz tabele T. 22 za sve ostale tipove podataka.

Radi ilustracije kretanja pouzdanosti podsistema stajnog trapa u periodu od pet godina definisani statistički pokazatelj prikazan je na grafikonu na kojem je u vrednost x ose definisana u časovima simulacionog vremena (5 godina= 43800 časova) a na Y osi su vrednosti procenta pouzdanosti. Sl. 24

Sa slike Sl. 24 se vrlo lako uočava tendencija naglog pogoršanja pouzdanosti podsistema stajnog trapa što se karakteristično manifestuje u poslednjoj godini za posmatrani period simulacije.

Po istom principu kao za stalni trap norme iz prve kolone tabele T. 23 uvrštene se kao vrednosti parametara za scenario primene neperfektnog održavanja sa nula perfektnih popravki za svaki od 6 podsistema aviona G-4 čija vremena između otkaza pripadaju Weibulovom tipu raspodele (izuzev hidrauličkog sistema). Na osnovu skupnog izveštaja koji generiše softver Arena, nakon 200 ponavljanja simulacije 5 godina upotrebe i održavanja aviona G-4 dobijeni su statistički pokazatelji kao na slici Sl. 25 kojima se može izvršiti poređenje sa odgovarajućim vrednostima iz tabele T. 13 gde se vidi da su generisane vrednosti pouzdanosti iste ili veoma bliske vrednostima iz tabele.



Sl. 24 Kretanje pouzdanosti stajnog trapa u periodu od 5 godina

Na osnovu svega gore iznetog može se zaključiti da je simulacioni model u varijanti scenarija koncepta neperfektnog održavanja istovetan ulaznim uslovima sa kojima je započet numerički proračun normi za povećanje raspoloživosti za svaki od podsistema ponaosob i to sa izuzetno niskim vrednostima intervala pouzdanosti.

Primena ograničenja broja neperfektnih popravki i ostalih normi predloženih primenom odabranog modela neperfektnog održavanja biće izložena u poglavlju o analizi osetljivosti simulacionog modela.

12:08:19PM

## Category Overview

May 25, 2017

Values Across All Replications

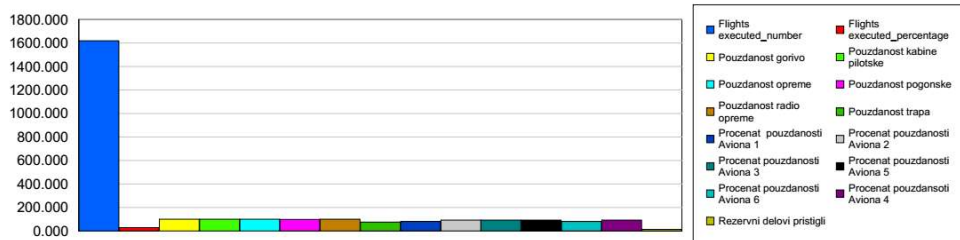
## Unnamed Project

Replications: 200 Time Units: Hours

## User Specified

## Output

Output	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average
Flights executed_number	1618.79	55.94	696.00	2856.00
Flights executed_percentage	28.4453	0.38	19.5489	30.7005
Pouzdanost gorivo	99.72	0.06	98.2379	100.00
Pouzdanost kabine pilotske	99.58	0.08	95.9596	100.00
Pouzdanost opreme	99.20	0.06	97.8979	100.00
Pouzdanost pogonske	98.4404	0.14	93.1507	100.00
Pouzdanost radio opreme	99.54	0.08	95.7447	100.00
Pouzdanost trapa	74.2052	5.29	-91	99.50
Procenat pouzdanosti Aviona 1	80.0801	2.38	32.5545	95.6604
Procenat pouzdanosti Aviona 2	92.8995	0.20	89.9582	97.8022
Procenat pouzdanosti Aviona 3	92.8559	0.27	87.6404	98.8636
Procenat pouzdanosti Aviona 5	92.7160	0.30	86.2745	98.9247
Procenat pouzdanosti Aviona 6	80.6701	1.20	59.4203	92.8515
Procenat pouzdanosti Aviona 4	92.6402	0.32	83.9623	97.8723
Rezervni delovi pristigli	13.0000	0.00	13.0000	13.0000



SI. 25 Skupni izveštaj i statistički pokazatelji pouzdanosti za sve podsisteme

## 8.2.4 Poređenje dva scenarija

Statističku potvrdu različitosti dva predložena scenarija najbolje je izvesti odgovarajućim metodama poređenjem izlaznih vrednosti statističkih pokazatelja ili bilo kojih drugih vrednosti koje je moguće zabeležiti u softveru Arena.

Nakon 200 ponavljanja za scenario aktuelnog koncepta upotrebe i scenario koncepta neperfektnog održavanja vrednosti koje se dobijaju za statističke pokazatelje *Raspoloživosti flote* i *Dnevne ispravnosti* i vrednosti njihovih intervala pouzdanosti su:

T. 25 Vrednosti intervala pouzdanosti za statističke pokazatelje dva scenarija

	<i>Raspoloživost flote i 95% interval pouzdanosti</i>	<i>Dnevna ispravnost i 95% interval pouzdanosti</i>
<i>koncept aktuelne upotrebe</i>	28,1085 (0,90)	30,2944 (0,98)
<i>koncept neperfektnog održavanja</i>	25,2882 (0,86)	29,1684 (1,01)

Obzirom da se iz po podacima iz tabele T. 25 ne može sa sigurnošću tvrditi da su vrednosti pokazatelja niti njihovih intervala bitno različite potrebno je izvršiti statističko poređenje dva scenarija drugim metodama umesto poređenja vrednosti intervala pouzdanosti.

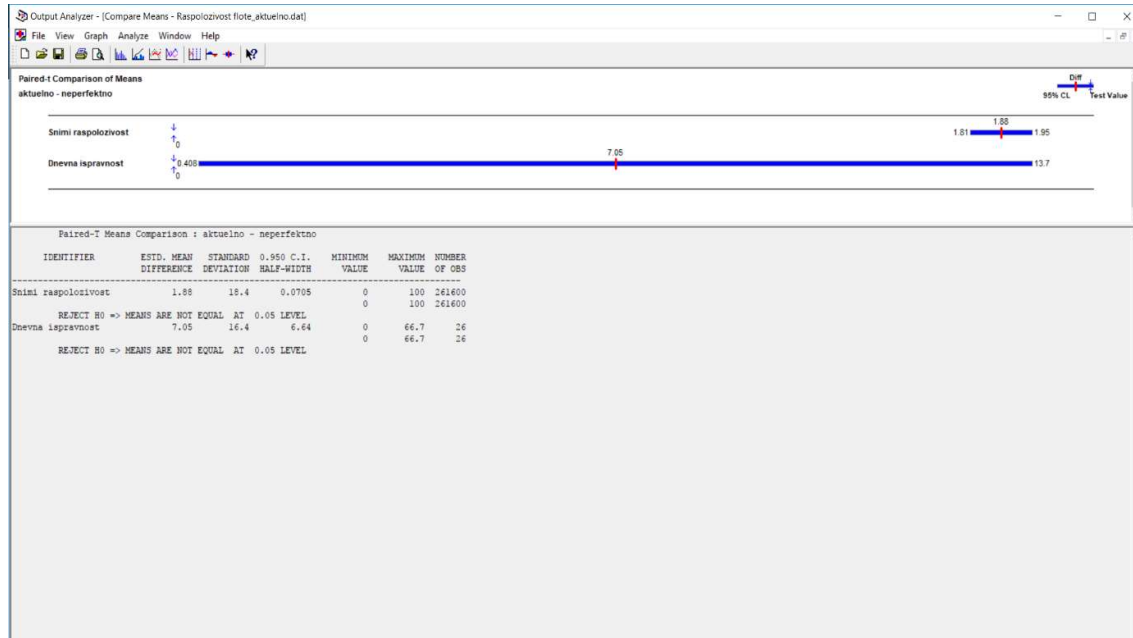
Za tu svrhu u okviru softverskog paketa Arena posebno je razvijen programski dodatak koji se zove „Output Analyzer“. Programski dodatak funkcioniše odvojeno od osnovnog softvera ali koristi fajlove koje generiše statistički modul u vidu izlaznih fajlova ekstenzije *.dat* koji su u binarnom obliku. Pored toga što daje podatke koje daje i sama Arena, kao što su intervali pouzdanosti oko očekivanih vrednosti izlaznih podataka moguće je izvršiti i statističko poređenje dva scenarija.

Statističko poređenje dva scenarija vrši se na osnovu poređenja razlike matematičkih očekivanja iz dva različita uzorka podataka i određivanja intervala pouzdanosti za tu razliku. U slučaju poređenja dva različita scenarija za simulacioni model upotrebe i održavanja flote školskih aviona poređenje bi se izvodilo u smeru od scenarija aktuelnog koncepta održavanja koji bi u ovom slučaju bio nazvan koncept „A“ ka scenariju koncepta neperfektnog održavanja koji bi bio nazvan koncept „B“.

Opcija „Compare Means“ u programskom dodatku Output Analyzer standardno sprovodi Studentov „upareni t test“ koji podrazumeva da su podaci u oba uzorku nezavisna posmatranja sa identičnim raspodelama da je uzorak tipa normalne raspodele (oba uzorka) i da su im nepoznate i nejednake varijanse. Upareni t test se standardno koristi u odnosu na neupareni t test zato što podaci u oba izlazna fajla potiču iz istog skupa generisanih pseudosluačajnih brojeva, obzirom da se za različite scenarije nije potencirala upotrebe različitog skupa brojeva.

Postavljenjem izlaznih *.dat* fajlova sa različitim imenima za različite scenarije (u koje upisuje izlazne podatke statistički Arena modul) kao ulaznih parametara za poređenje dva odabrana

statistička pokazatelja (*Raspoloživosti flote* i *Dnevne ispravnosti*) u smeru od A ka B kako je prethodno definisano dobija se grafički prikaz kao na slici Sl. 26.



Sl. 26 Izveštaj t testa za statističke pokazatelje *Raspoloživosti flote* i *Dnevne ispravnosti*

Sa izveštaja na slici Sl. 26 se vidi da postoji razlika u matematičkim očekivanjima za dva uzorka podataka za svaki od statističkih pokazatelja i da su te razlike dovoljno veće od nule sa stepenom pouzdanosti od 95%. Isto tako sa slike Sl. 26 se vidi da se može odbaciti hipoteza o nultoj razlici (Reject H0) te su stoga ova dva scenarija statistički različita.

Dodatak „Output Analyzer” daje i vrednost utvrđene razlike matematičkih očekivanja kao i grafički prikaz pozicije razlike u odnosu na nultu vrednost.

### 8.3 Analiza osetljivosti simulacionog modela

#### 8.3.1 Programski dodatak za analizu osetljivosti

Nakon završenog procesa definisanja različitih scenarija potvrđivanja pouzdanosti izlaznih statističkih pokazatelja (dovoljnim brojem ponavljanja) i upoređivanja različitih scenarija u smislu dokaza njihove statističke različitosti, potrebno je izvršiti analizu osetljivosti modela na promenu ulaznih parametara.

Da bi se lakše mogli varirati zadani parametri u odabranom scenariju u programskom paketu Arena postoji dodatak koji se naziva „Process Analyzer (PAN)” koji funkcioniše nezavisno od

osnovnog programa Arena, ali koristi programski fajl ekstenzije .p koji nastaje nakon puštanja u rad simulacije ili samo prilikom provere ispravnosti postavki u simulaciji.

Prilikom kreiranja varijanti scenarija u interfejsu dodataka PAN potrebno je naznačiti za koji od scenarija se veže ta varijanta odnosno koja su svojstva scenarija (Scenario Properties - izabrati potrebni .p fajl). Nakon toga treba odabrati kontrolne promenljive (Controls) za tu varijantu a to su u stvari parametri simulacionog modela odnosno željenog scenarija, kao i njihove vrednosti. Na kraju se definišu izlazni parametri (Responses) koji mogu biti ili statistički pokazatelji koje definiše korisnik ili bilo koji drugi izlazni parametar koji automatski generiše softver Arena. Sam programski dodatak prepoznaje koliko ponavljanja je potrebno uraditi, obzirom da je to podatak koji sa sobom nosi .p fajl iz osnovnog programa i to se primenjuje na sve varijante.

### 8.3.2 Analiza osetljivosti scenarija aktuelnog koncepta održavanja

U poglavlju 8.2.2 gde su nabrojani i objašnjeni ulazni parametri sa kojima je moguće varirati scenario aktuelnog koncepta održavanja, objašnjena je svrha variranja svakog parametra.

Svaka od varijanti scenarija koja je postavljena u programskom dodatku PAN sadrži u sebi jednu od međusobnih kombinacija parametara i postavka eksperimenata izgleda kao na slici Sl. 27

Scenario Properties			Controls						Responses								
S	Name	Program File	Broj delova	Dani popune	Interval pregleda	Kanibalizacija	Trajanje leta	Etapa za 50 časovni pregled	Broj smena	Smrni nove delove	Rezervni deo Numberin	Flights executed_percentage	Flights executed_number	Smrni raspoloživost	Dnevna ispravnost avijacije	Pouzdanost trasa	Procenat ispravnosti Aviona 1
1	✓ Promena perioda pregleda	60_Model održavanja 14.7_verzija	1.0000	150.0000	47.0000	1.0000	0.8300	4.0000	3.0000	---	---	---	---	---	---	---	---
2	✓ Promena perioda pregleda	60_Model održavanja 14.7_verzija	1.0000	25.0000	47.0000	1.0000	0.8300	4.0000	3.0000	---	---	---	---	---	---	---	---
3	✓ Promena perioda pregleda	60_Model održavanja 14.7_verzija	1.0000	150.0000	48.0000	1.0000	0.8300	4.0000	3.0000	---	---	---	---	---	---	---	---
4	✓ Promena perioda pregleda	60_Model održavanja 14.7_verzija	1.0000	25.0000	48.0000	1.0000	0.8300	4.0000	3.0000	---	---	---	---	---	---	---	---
5	✓ Promena perioda pregleda	60_Model održavanja 14.7_verzija	1.0000	150.0000	49.0000	1.0000	0.8300	4.0000	3.0000	---	---	---	---	---	---	---	---
6	✓ Promena perioda pregleda	60_Model održavanja 14.7_verzija	1.0000	25.0000	49.0000	1.0000	0.8300	4.0000	3.0000	---	---	---	---	---	---	---	---
7	✓ Promena perioda pregleda	60_Model održavanja 14.7_verzija	1.0000	150.0000	50.0000	1.0000	0.8300	4.0000	3.0000	---	---	---	---	---	---	---	---
8	✓ Promena perioda pregleda	60_Model održavanja 14.7_verzija	1.0000	25.0000	50.0000	1.0000	0.8300	4.0000	3.0000	---	---	---	---	---	---	---	---
9	✓ Promena perioda pregleda	60_Model održavanja 14.7_verzija	1.0000	150.0000	47.0000	0.0000	0.8300	4.0000	3.0000	---	---	---	---	---	---	---	---
10	✓ Promena perioda pregleda	60_Model održavanja 14.7_verzija	1.0000	25.0000	47.0000	0.0000	0.8300	4.0000	3.0000	---	---	---	---	---	---	---	---
11	✓ Promena perioda pregleda	60_Model održavanja 14.7_verzija	1.0000	150.0000	48.0000	0.0000	0.8300	4.0000	3.0000	---	---	---	---	---	---	---	---
12	✓ Promena perioda pregleda	60_Model održavanja 14.7_verzija	1.0000	25.0000	48.0000	0.0000	0.8300	4.0000	3.0000	---	---	---	---	---	---	---	---
13	✓ Promena perioda pregleda	60_Model održavanja 14.7_verzija	1.0000	150.0000	49.0000	0.0000	0.8300	4.0000	3.0000	---	---	---	---	---	---	---	---
14	✓ Promena perioda pregleda	60_Model održavanja 14.7_verzija	1.0000	25.0000	49.0000	0.0000	0.8300	4.0000	3.0000	---	---	---	---	---	---	---	---
15	✓ Promena perioda pregleda	60_Model održavanja 14.7_verzija	1.0000	150.0000	50.0000	0.0000	0.8300	4.0000	3.0000	---	---	---	---	---	---	---	---
16	✓ Promena perioda pregleda	60_Model održavanja 14.7_verzija	1.0000	25.0000	50.0000	0.0000	0.8300	4.0000	3.0000	---	---	---	---	---	---	---	---

Sl. 27 Izgled početne postavke parametara za scenario aktuelnog koncepta održavanja

Nakon provođenja eksperimenata sa promenom normi u scenariju koncepta aktuelne upotrebe rezultati su sledeći:

uticaj primene normi održavanja iz numeričkog modela (promena vremena između povremenih pregleda)

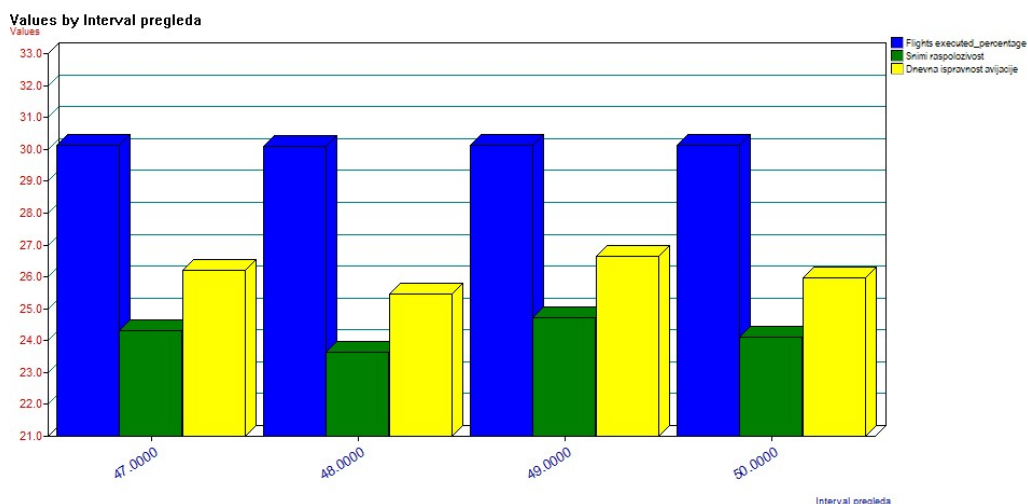
Ako se iz niza scenarija datih na slici Sl. 28 izdvoje scenariji koji imaju različito vreme između povremenih pregleda (kolona „Interval pregleda“) a sve ostale parametre istovetne („Broj



delova“ ; „Dani dopune“ ; „Kanibalizacija“ i „Trajanje leta“), a to su scenariji broj 1,3,5 i 7 dobija se predstava kakav bi uticaj imala promena intervala povremenih pregleda.

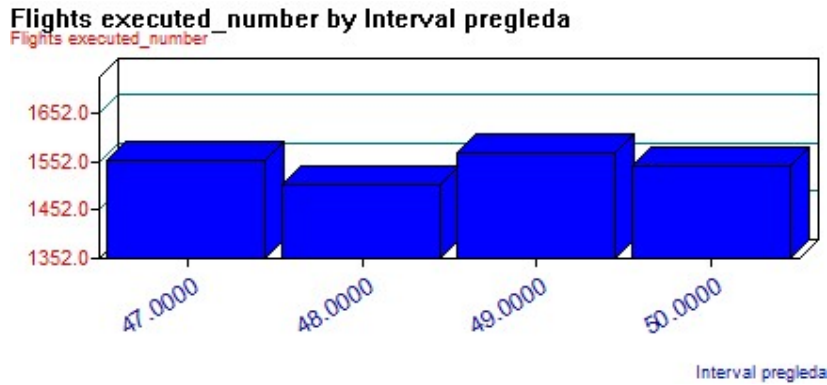
Scenario Properties				Controls				
S	Name	Program File	Reps	Broj delova	Dani popune	Interval pregleda	Kanibalizacija	Trajanje leta
1	Promena perioda pregled	49 : Model održavan	200	1.0000	150.0000	47.0000	1.0000	1.0000
2	Promena perioda pregled	49 : Model održavan	200	1.0000	25.0000	47.0000	1.0000	1.0000
3	Promena perioda pregled	49 : Model održavan	200	1.0000	150.0000	48.0000	1.0000	1.0000
4	Promena perioda pregled	49 : Model održavan	200	1.0000	25.0000	48.0000	1.0000	1.0000
5	Promena perioda pregled	49 : Model održavan	200	1.0000	150.0000	49.0000	1.0000	1.0000
6	Promena perioda pregled	49 : Model održavan	200	1.0000	25.0000	49.0000	1.0000	1.0000
7	Promena perioda pregled	49 : Model održavan	200	1.0000	150.0000	50.0000	1.0000	1.0000
8	Promena perioda pregled	49 : Model održavan	200	1.0000	25.0000	50.0000	1.0000	1.0000
9	Promena perioda pregled	49 : Model održavan	200	1.0000	150.0000	47.0000	0.0000	1.0000
10	Promena perioda pregled	49 : Model održavan	200	1.0000	25.0000	47.0000	0.0000	1.0000
11	Promena perioda pregled	49 : Model održavan	200	1.0000	150.0000	48.0000	0.0000	1.0000
12	Promena perioda pregled	49 : Model održavan	200	1.0000	25.0000	48.0000	0.0000	1.0000
13	Promena perioda pregled	49 : Model održavan	200	1.0000	150.0000	49.0000	0.0000	1.0000
14	Promena perioda pregled	49 : Model održavan	200	1.0000	25.0000	49.0000	0.0000	1.0000
15	Promena perioda pregled	49 : Model održavan	200	1.0000	150.0000	50.0000	0.0000	1.0000
16	Promena perioda pregled	49 : Model održavan	200	1.0000	25.0000	50.0000	0.0000	1.0000

Sl. 28 Postavka scenarija za prosečno trajanje leta 1hr



Sl. 29 Promena statističkih parametara sa promenom intervala između povremenih pregleda, trajanje leta 1 hr

Grafikon na slici Sl. 29 pokazuje da su u smislu povećanja *Raspoloživosti flote* i *Procena dnevne ispravnosti* (zelene i žute trake) intervali između povremenih pregleda od 47 odnosno 49 časova nešto pogodniji od 50 časovnog intervala. Ovo povećanje nije veliko u apsolutnom smislu jer za *Raspoloživost flote* (zelena traka) iznosi manje od 1% i ne može se uzeti kao dovoljno jak dokaz za postojanje tendencije povećanja raspoloživosti i ispravnosti posebno što se naknadnim eksperimentisanjem utvrđuje da se tendencija povećanja ne odražava na prosečno trajanje letova od 50 minuta (0.83 hr). Na slici Sl. 29 se vidi da nema nikakve promene u *Procentu izvršenja letova*, dok se sa slike Sl. 30 može videti da statistički pokazatelj *Broj izvršenih letova* generiše povećanje na intervalu od 49 časova kao i za raspoloživost i ispravnost.



Sl. 30 Promena broja izvršenih letova sa promenom interval između povremenih pregleda, let od 1 hr

Nešto bolja situacija sa povećanjem raspoloživosti i dnevne ispravnosti u odnosu na skraćenje intervala između povremenih pregleda je sa prosečnim trajanjem letova od 45 minuta (0.75 hr). I u ovom slučaju najbolji se pokazao interval pregleda od 49 časova, međutim to više odslikava jednu drugu osobinu samog simulacionog modela, ali i realnog sistema koja će biti ispitana u narednom pasusu.

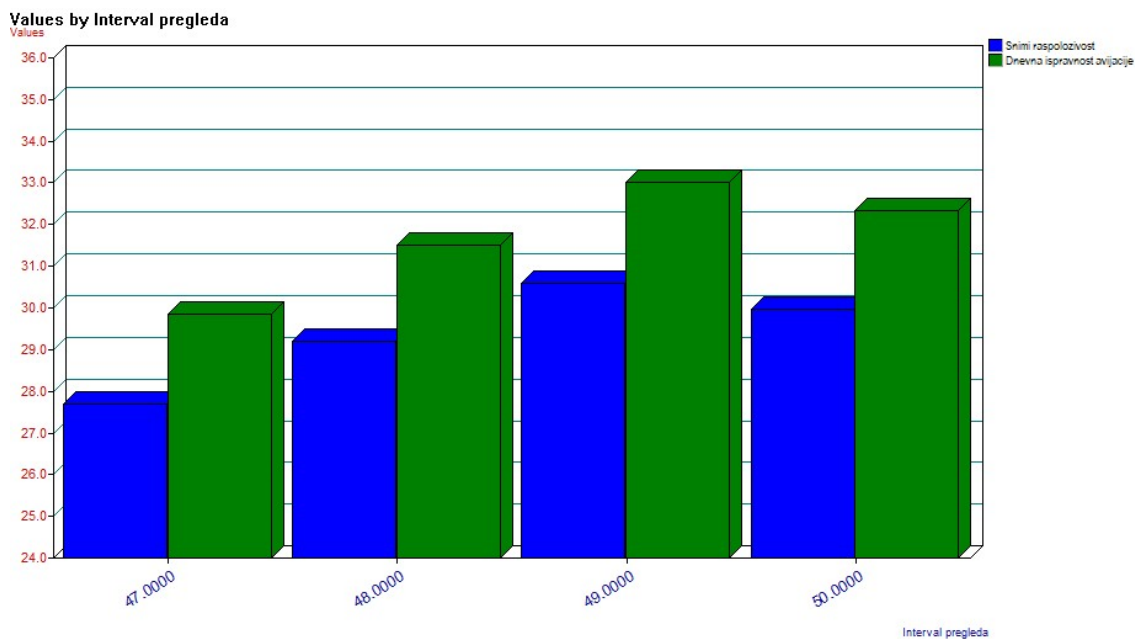
---

*uticaj promene trajanja karakterističnog zadatka na dostignutu pouzdanost aviona*

---

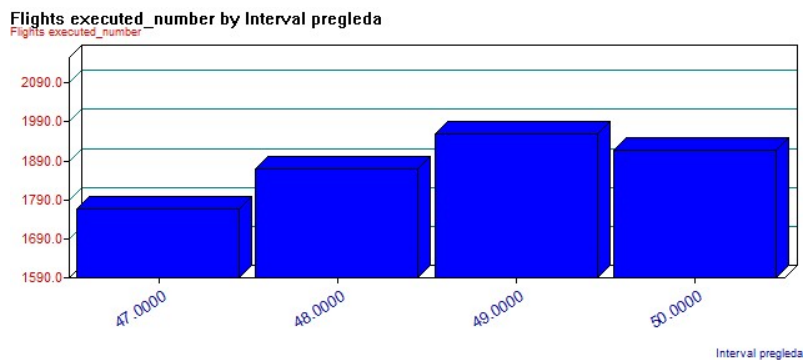
Kao što je već pomenuto uticaj promene trajanja karakterističnog zadatka može se videti kada se kao fiksni parametar postavi trajanje leta od 45 minuta dok svi ostali parametri uzimaju vrednosti kao u slučaju ispitivanja uticaja promene intervala pregleda na raspoloživost i dnevnu ispravnost.

Za razliku od prethodnog slučaja u ovom slučaju dolazi do značajnijeg rasta statističkih pokazatelja *Raspoloživosti flote* i *Prosečne dnevne ispravnosti*. Poređenjem podataka koji se mogu očitati na slikama Sl. 29 i Sl. 31 dolazi se do zaključka da je razlika u vrednostima 6 do 7% što predstavlja značajno poboljšanje.



Sl. 31 Statistički pokazatelji za scenario koncepta aktuelne upotrebe I prosečno trajanje leta od 45 min

Na isti način se uticaj smanjenja prosečnog trajanja leta reflektuje i na broj izvršenih letova, što se jasno vidi sa slike Sl. 32. Kao zaključak se nameće da je simulacioni model osetljiv na promenu dužine prosečnog trajanja leta, što je u korelaciji sa realnim sistemom flote školskih aviona koji bi trebalo da reaguje na smanjenje prosečne dužine trajanja leta, većom pouzdanošću izvršenja zadatka.



Sl. 32 Promena broja izvršenih letova sa promenom interval između povremenih pregleda, let od 45 min

---

*uticaj uključenja i isključenja kanibalizacije kao instrumenta održavanja*


---

Iako je ovo jedan od često upotrebljivanih postupaka u održavanju, kojim se utiče na operativnu gotovost, čak i za vazduhoplovstva koja raspolažu sa daleko većim ljudskim i materijalnim resursima, neprestano se dovodi u sumnju opravdanost upotrebe kanibalizacije. (Siladic 2007) U radu autora (Salaman, i drugi 2007) gde je ispitivan uticaj kanibalizacije na performanse flote aviona putem simlacionog modela došlo se do zaključaka da:

- Nabavka zaliha rezervnih delova, povećava operativnu gotovost flote više nego upotrebe kanibalizacije i da
- Kanibalizacija povećava operativnu gotovost flote po znatno nižoj ceni nego nabavka rezervnih delova.

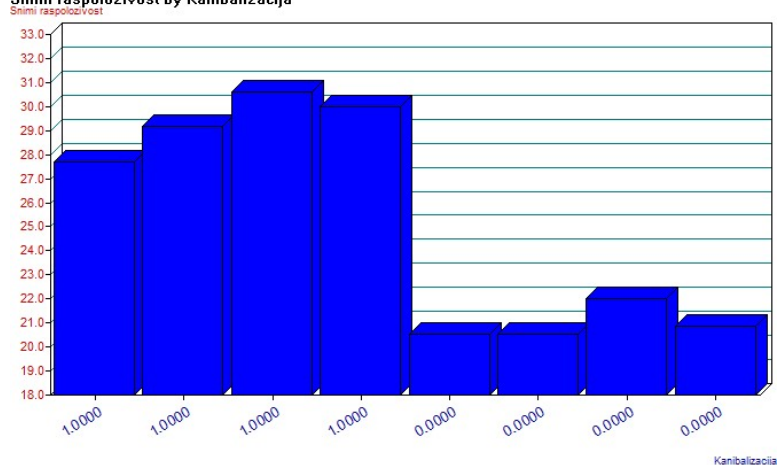
Shodno tome na simulacionom modelu upotrebe i održavanja flote školskih aviona G-4 ispitan je uticaj uključenja i isključenja kanibalizacije kao instrumenta održavanja. Ukoliko se u scenario aktuelnog koncepta održavanja kao fiksni parametri postave norme za:

- Prosečnu dužinu trajanja leta (npr. 45 minuta),
- Intenzitet popune rezervnim delovima (1 rezervni deo na 150 dana – slab dotok rezervnih delova),

I ako se za svaku od predloženih normi intervala između povremenih pregleda sprovede eksperiment sa primenjivanjem ili ne ne primenjivanjem kanibalizacije, na način kao što je objašnjeno u poglavlju 7.2. dobiju se podaci kao na slici Sl. 33. Na slici Sl. 33 označeno sa oznakom 1 ispod kolone (u slučaju primenjivanja kanibalizacije) ili sa 0 (u slučaju ne primenjivanja) dati su procenti *Raspoloživosti flote* za svaki od predloženih intervala između povremenih pregleda i to 47, 48, 49, 50 *hr*, gledano sa leva na desno.

Povećanje raspoloživosti koje se dobije u slučaju postojanja kanibalizacije je značajno i u svim slučajevima iznosi od 8 do 9%. Ovakvi rezultati odgovaraju gorenavedenim zaključcima iz literature (Salaman, i drugi 2007). U suštini situacija koja je simulirana u eksperimentu, predstavlja jeftiniji način da se postigne bolja raspoloživost flote umesto investiranja u skupe zalihe rezervnih delova.

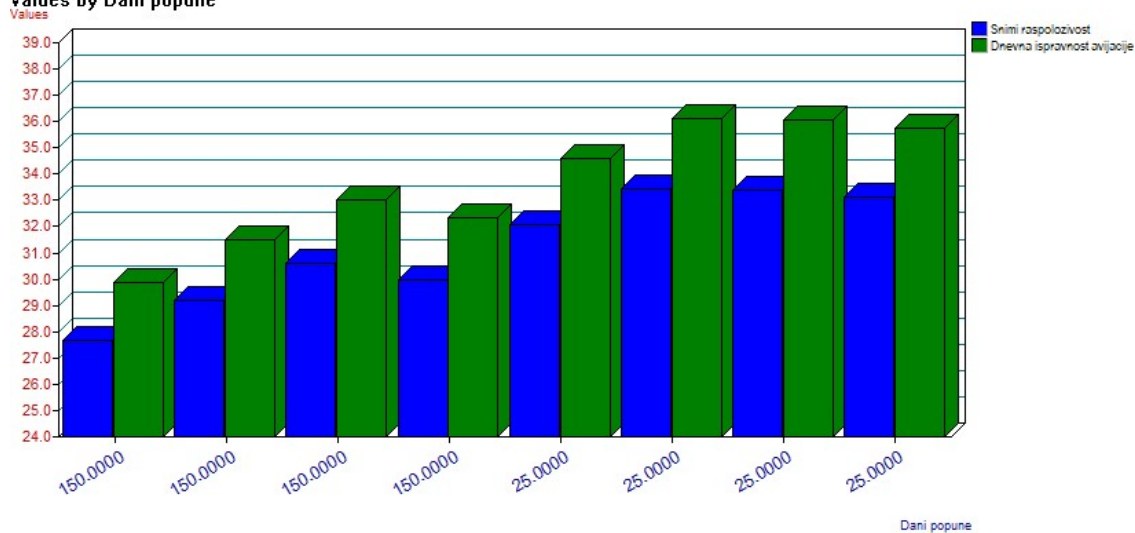
Snimi raspoloživost by Kanibalizacija



Sl. 33 Uticaj kanibalizacije na raspoloživost, prosečna dužina trajanja leta 45 minuta

Kada se parametri definišu na drugačiji način i dobijene vrednosti za definisani intenzitet dolaska rezervnih delova od 25 dana (dobar dotok rezervnih delova) sa izborom opcije kanibalizacije poređaju na desnoj strani po intervalima između povremenih pregleda od 47 do 50 hr (ispod svake kolone je vrednost 25) i to se upoređi sa vrednostima za raspoloživost flote i prosečnu dnevnu ispravnost sa desne leve u kojim je opcija kanibalizacije bila omogućena, ali je bio slab dotok rezervnih delova (jedan deo na 150 dana) dobije se situacija kao na slici Sl. 34.

Values by Dani popune



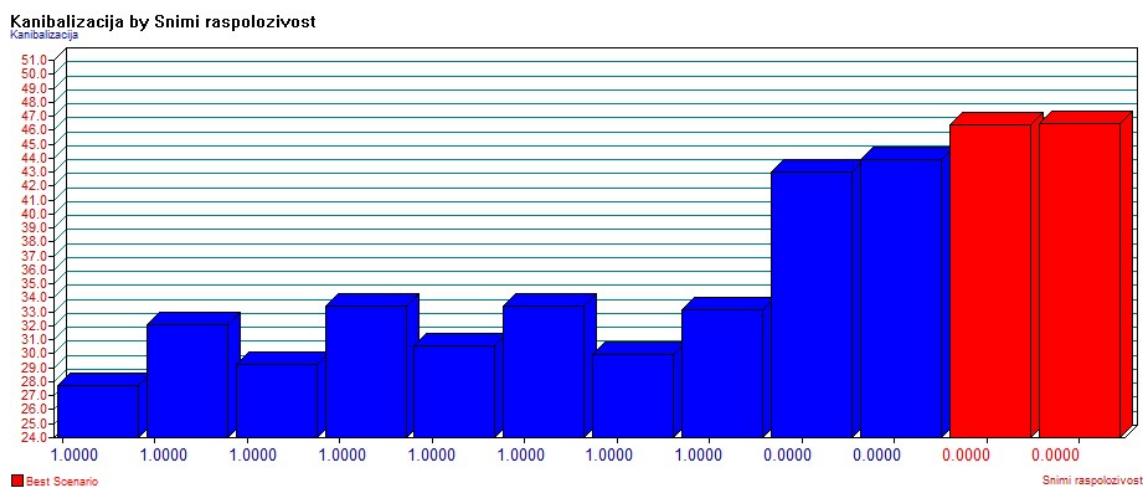
Sl. 34 Uticaj poboljšanja dotoka rezervnih delova u slučaju izbora opcije kanibalizacije za let od 45 min.

Sa slike Sl. 34 se može videti da je uz bolje snabdevanje rezervnim delovima (nabavke zaliha rezervnih delova) ostvaren porast od 3 do 4% kako u *Raspoloživosti flote*, tako i u ostvarenoj

Prosečnoj dnevnoj ispravnosti što se podudara sa prvim zaključkom iz rada (Salaman, i drugi 2007).

*uticaj promena u integralnoj logističkoj podršci u vidu smanjenja perioda nabavke rezervnih delova (smanjenje logističkog i administrativnog vremena)*

Poslednji od ispitivanih uticaja promene parametara na statističke pokazatelje je uticaj promena u integralnoj logističkoj podršci. Obzirom na način na koji je simuliran rad sistema organizacije letenja i održavanja flote školskih aviona G-4 i logiku njegovog rada unutar modula simulacije, moguće je uticati na snabdevanje rezervnim delovima na način ko što je to opisano u poglavlju 7.2. Bilo da je u pitanju slabo ili dobro snabdevanje rezervnim delovima, u oba slučaja u sistemu je dopuna stohastička veličina u smislu da se zna period između dolaska rezervnih delova, ali se ne zna koji za koji podsistem rezervni delovi stižu. Na ovaj način je i samo snabdevanje kao i održavanje definisano sa određenim intenzitetom neperfektnosti.



Sl. 35 Uticaj boljeg snabdevanja rezervnim delovima sa opcijom kanibalizacije ili bez, let od 45 minuta

Na slici Sl. 35 u kolonama ispod kojih je cifra 1 su date izlazne vrednosti statističkog pokazatelja *Raspoloživosti flote* sa uključenom opcijom kanibalizacije za slabo i dobro snabdevanje rezervnim delovima i za svaki od predloženih intervala između povremenih pregleda. Može se videti da se vrednosti pokazatelja kreću u rasponu od 28% za slabo snabdevanje rezervnim delovima i interval između pregleda od 47 časova do 33% za dobro snabdevanje rezervnim delovima i interval između pregleda od 49 časova što je već prikazano na slici Sl. 34. Na desnoj strani slike Sl. 35 prikazane su kolone ispod kojih stoji cifra 0. To su vrednosti statističkog pokazatelja *Raspoloživosti flote* koji su dobijeni nakon eksperimenta sa

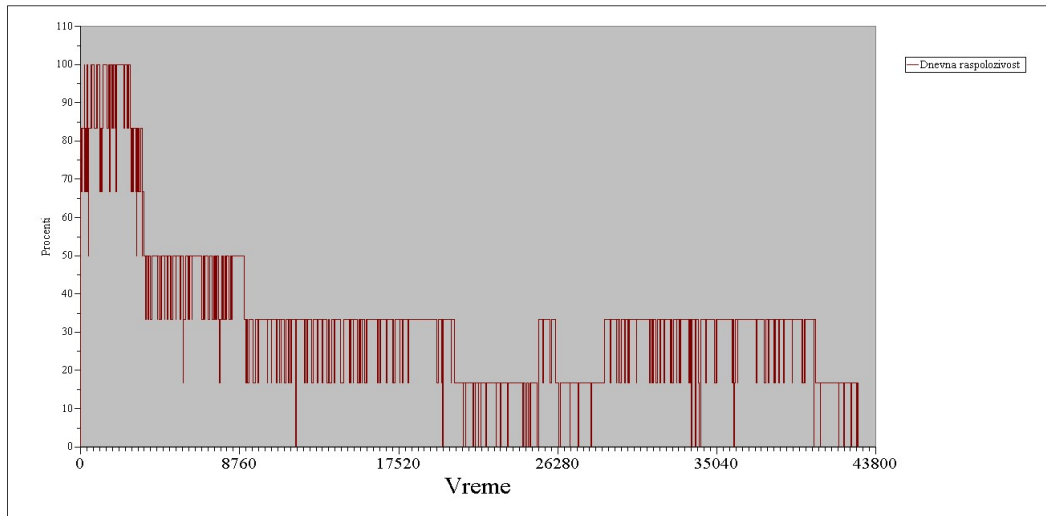
simulacionim modelom kod kojih je bila isključena opcija kanibalizacije, ali je parametar dolaska rezervnih delova u sistem bio fiksiran na vrednost od 25 dana (dobro snabdevanje). Prilikom generisanja grafika za sliku Sl. 35 u softverskom dodatku Proces Analyzer bila je uključena opcija da se identifikuje najbolji scenario (varijanta scenarija). Dve kolone koje su prikazane crvenom bojom su varijante scenarija aktuelnog koncepta održavanja za intervale između povremenih pregleda od 49 odnosno 50 časova, bez opcije kanibalizacije. U odnosu na osam varijanti scenarija kod kojih je uključena opcija kanibalizacije imaju 15 do 16 % veće generisane vrednosti *Raspoloživosti flote*.

Ovim je jasno dokazano da je simulacioni model najosetljiviji, u pozitivnom smislu, na intenzitet dotoka rezervnih delova i da je kanibalizacija neophodan instrument održavanja samo u slučaju kada postoji izraženo slabo snabdevanje rezervnim delovima Sl. 33. Određene naznake povoljnijih ishoda kod smanjenja intervala između povremenih pregleda na 49 časova postoje, ali ne u dovoljnoj meri i dovoljno statistički potvrđene da bi se mogli uzeti u obzir.

Još bolji prikaz osetljivosti simulacionog modela na promene u snabdevanju rezervnim delovima može se videti poređenjem grafikona sa slike Sl. 36 i grafikona sa slike Sl. 37 . U prvom slučaju na slici je grafički prikazano kretanje *Raspoloživosti flote* u slučaju kada je slabo snabdevanje rezervnim delovima i kad je uključena opcija kanibalizacije. Da bi scenario odgovarao realnoj situaciji norma intervala između povremenih pregleda je postavljena na vrednost od 50 časova.

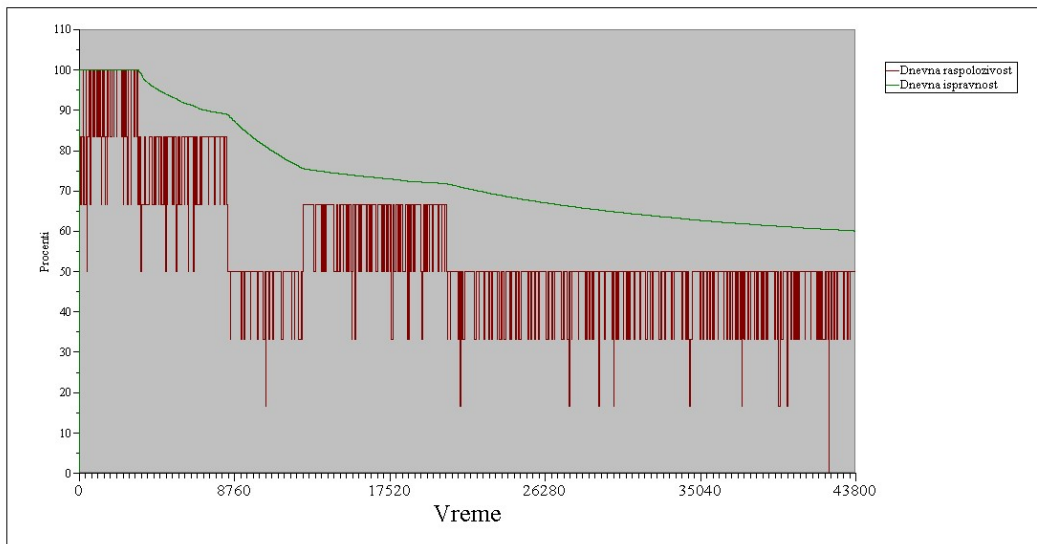
Prosečna vrednost *Raspoloživosti flote* za simulirani period od pet godina je prema izveštaju za statističke parametre koje generiše softverski dodatak Proces Analyzer na nivou od 33% (što odgovara stvarnoj situaciji) i može se videti da je posebno u toku treće godine više puta na nivou 0%, u stvarnosti to bi značilo da nema ni jedan ispravan avion na raspolaganju. Ukoliko bi se izvršila još detaljnija analiza dokumentacije koja prati proces održavanja moglo bi se sa određenom pouzdanošću utvrditi da li ima poklapanja između generisanih perioda nulte raspoloživosti i onih u stvarnosti, obzirom da ih je i u jednom i u drugom slučaju bilo.

Nasuprot tome na slici Sl. 37 se vidi da je kompletan grafikon kretanja vrednosti *Raspoloživosti flote* izdignut za 20% iznad vrednosti nule u odnosu na pređašnje stanje. U periodu između druge i treće godine to povećanje dostiže i do 50%. Jedini put kada *Raspoloživosti flote* dostiže vrednost nula je pred kraj pete godine. Razlika u vrednostima statističkih pokazatelja nastupila je usled povećanja intenziteta dolaska rezervnih delova.



Sl. 36 Kretanje vrednosti *Raspoloživosti flote* u roku od 5 godina, slab dotok rezervnih delova

Za svo vreme trajanja simulacije pokazatelj *Prosečne dnevne ispravnosti* je sa manjim ili blažim gradijentom u padu. U svakom slučaju daleko povoljnija situacija nastupa ukoliko se kao u slučaju sa slike Sl. 37 kanibalizacija isključi a pojača snabdevanje i integralna logistička podrška.



Sl. 37 Kretanje vrednosti *Raspoloživosti flote* u roku od 5 godina, dobar dotok rezervnih delova



### 8.3.3 Scenario koncepta neperfektnog održavanja

U poglavlju 8.2.3 u kojem je objašnjena suština scenarija koji podržava teoretski koncept neperfektnog održavanja dat je primer kako izgleda kretanje pouzdanosti podsistema stajnog trapa u roku od pet godina Sl. 24. Ako se u scenariju koncepta neperfektnog održavanja definišu faktori  $\alpha$  i  $\beta$  na način kao što je to objašnjeno u poglavlju 8.2.3 i ostavi da je promenljiva  $k$  (broj uzastopnih neperfektnih popravki) jednaka nuli dobija se specijalni slučaj ovog scenarija koji je u stvari postavka scenarija aktuelnog koncepta održavanja. Izveštaj o statističkom pokazatelju *Pouzdanosti stajnog trapa* koji prati gorepomenutu sliku Sl. 24 daje podatak da je pouzdanost stajnog trapa jednaka 74% (Sl. 25) što odgovara podacima iz studije pouzdanost, datim u tabeli T. 13.

Ne samo za stajni trap, već i za sve ostale podsisteme na avionu G-4, podudarnost u slučaju nepostojanja perfektnih popravki ( $k=0$ ) postoji i može se videti poređenjem podataka sa iz skupnog izveštaja sa slike Sl. 25 i podataka iz tabele T. 13.

Uvrštavanjem promenljivih i statističkih parametara u programski dodatak Proces Analyzer kao i u slučaju koncepta aktuelnog održavanja dobije se situacija kao na slici Sl. 38

		Responses							
Broj popravki	Interval pregleda	Snimi nove delove	Rezervni delovi pristigli	Flights executed_percentage	Flights executed_number	Snimi raspolozivost	Dnevna ispravnost avijacije	Pouzdanost trapa	Procenat pouzdanosti Aviona 1
0.0000	50.0000	8	13.000	28.767	1689.445	26.397	30.049	77.779	82.095
1.0000	50.0000	8	13.000	29.635	1761.080	27.523	30.281	90.271	86.319
2.0000	50.0000	8	13.000	29.761	1755.190	27.496	30.133	92.053	87.583
3.0000	50.0000	8	13.000	29.952	1743.470	27.259	29.679	94.664	89.684
4.0000	50.0000	8	13.000	30.055	1808.325	28.220	30.630	95.752	90.715
5.0000	50.0000	8	13.000	30.098	1778.070	27.761	30.084	96.251	91.078
6.0000	50.0000	8	13.000	30.109	1781.585	27.794	30.109	96.424	91.267
7.0000	50.0000	8	13.000	30.094	1761.570	27.512	29.799	96.550	91.347
8.0000	50.0000	8	13.000	30.112	1760.255	27.508	29.770	96.639	91.494
9.0000	50.0000	8	13.000	30.137	1795.995	28.035	30.341	96.652	91.453

Sl. 38 Postavka scenarija koncepta neperfektnog održavanja u programskom dodatku Process Analyzer

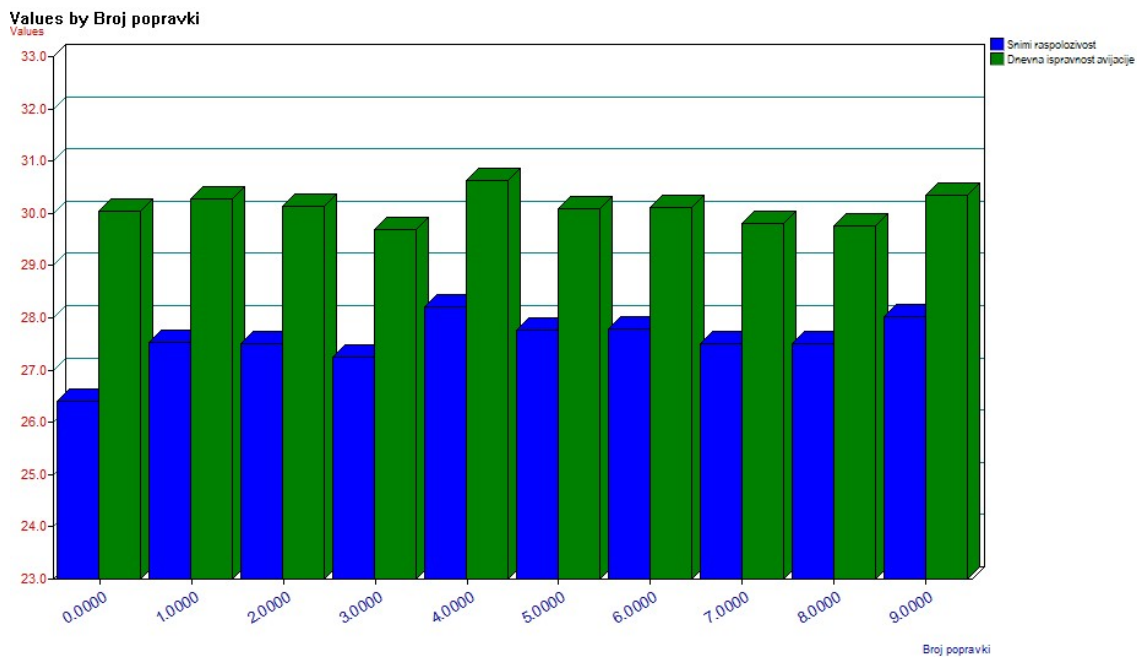
Na isti način kao što je definisana pouzdanost stajnog trapa i procenat pouzdanosti aviona 1 kao izlazna vrednost u programskom dodatku, tako su definisani i ostali podsistemi i avioni kojima su oni pridruženi, obzirom da svaki od šest aviona podržava perfektnu popravku za jedan dodeljeni podsistem iako nisu dati na ovoj slici. U krajnjoj levoj koloni na slici Sl. 38 vidi se da se Broj popravki varira od 0 do  $9^{30}$  kroz isti scenario.

<sup>30</sup> Najveći utvrđeni broj uzastopnih neperfektnih popravki po bilo kom podsistemu bio je 10 (T. 14)

Ostali parametri ostaju nepromenjeni, a to su:

- Prosečna dužina trajanja leta 50 minuta (0.83 hr),
- Opcija kanibalizacije (uključena),
- Dotok rezervnih delova (slab- 150 dana),
- Interval između povremenih pregleda (50 hr).

Nakon provođenja eksperimenta sa 200 ponavljanja za svaku od varijacija scenarija dobiju se rezultati kao na slici Sl. 39



Sl. 39 Generisane vrednosti *Raspoloživosti flote i Dnevne ispravnosti* u slučaju ograničenja broja uzastopnih popravki

Sa slike Sl. 39 se može videti da se vrednost statističkih pokazatelja raspoloživosti i ispravnosti povećava sa povećanjem broja dozvoljenih uzastopnih neperfektnih popravki, sve do broja 4. Nakon toga sa povećanjem broja popravki procenti padaju osim u slučaju broja 9 (ali i dalje ostaju manji nego za 4 dozvoljene popravke).

Što se tiče statističkog pokazatelja *Broja izvršenih letova* koji je prikazan na slici Sl. 40 . Kao i u slučaju raspoloživosti i ispravnosti broj letova raste sa povećanjem broja dozvoljenih popravki do vrednosti 4 nakon čega opada.

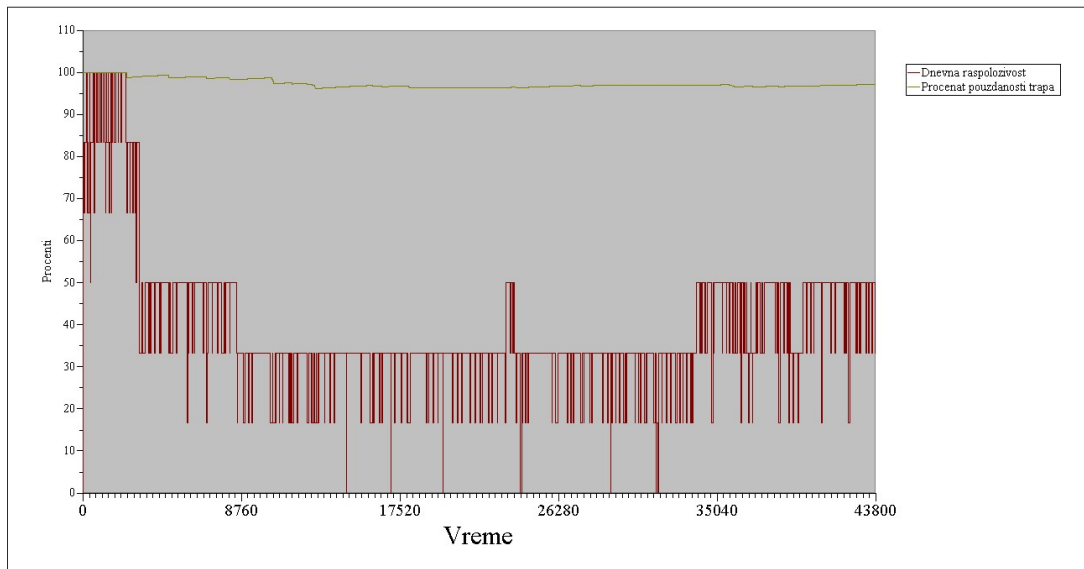


Sl. 40 Kretanje broja izvršenih letova sa promenom broja dozvoljenih uzastopnih popravki

Može se zaključiti da postoji određena korelacija između ograničenja broja popravki i statističkih pokazatelja funkcionisanja upotrebe i održavanja flote školskih aviona G-4. Međutim, u nekoj realnoj upotrebi primena ovog koncepta ne bi bila moguća bez određivanja realnih vrednosti za faktore  $\alpha$  i  $\beta$  jer su u i slučaju numeričkog primera u poglavlju 6, kao i simulacionog scenarija koncepta neperfektnog održavanja vrednosti ovih koeficijentata uzete kao što je bio primer u literaturi. Neka druga studija slučaja mogla bi da preciznije definiše ove faktore.

Ono što je još bitnije je činjenica da se na primeru scenarija simulacionog modela u kome je primenjen koncept i logika sistema neperfektnog održavanja potvrđuju rezultati dobijeni numeričkim proračunima datim u poglavlju 6, kao i u literaturi (Knežević, i drugi 2017), što se tiče ograničenja broja uzastopnih neperfektnih popravki. U tabeli T. 16 se vidi da je predloženo ograničenje broja uzastopnih neperfektnih popravki uglavnom za sve podsisteme 5, osim za *instrumente i opremu aviona* gde iznosi 6, dok jedinstveno rešenje koje je generisao simulacioni model iznosi 4.

Na samom kraju važno je proceniti kakav je uticaj ograničenja broja uzastopnih neperfektnih popravki na kretanje pouzdanosti pojedinih podsistema kao i raspoloživosti flote u celini. Poredeći sliku Sl. 41 i sliku Sl. 24 može se videti da je slučaju primene koncepta neperfektnog održavanja kriva koja prati pouzdanost stajnog trapa konstantno iznad vrednosti od 95% i da nema oscilacija, posebno nema nikakvih naglih padova kao na slici Sl. 24 u poslednjoj godini simulacionog perioda.



Sl. 41 Kretanje *Raspoloživosti flote* i pouzdanosti stajnog trapa kada je ograničenje neperfektnih popravki  $k=4$

Kada je reč o *Raspoloživosti flote*, iz podataka sa slike Sl. 39 se vidi da je procenat raspoloživosti u slučaju dozvoljene 4 neperfektno popravke oko 30,5% što je tek nešto više u odnosu na 28% koliko je bilo u slučaju scenarija koncepta aktuelnog održavanja, s tom razlikom što ako se porede slika Sl. 36 i slika Sl. 41 može se videti da su padovi raspoloživosti na vrednost nula mnogo ređi u slučaju neperfektnog održavanja. Isto tako u slučaju neperfektnog održavanja raspoloživost pri kraju pete godine raste, dok kod aktuelnog koncepta to nije slučaj.

Na osnovu ovoga se može zaključiti da koncept neperfektnog održavanja potencijalno pruža mogućnost povećanja prosečne ispravnosti i raspoloživosti u nekom dužem vremenskom, dok je u posmatranom periodu u simulaciji (5 godina) nulta raspoloživost daleko ređa i predvidivija.

## 9. Zaključak

Razvoj metode izbora modela održavanja u ovom radu predstavlja samo jedan pravac u kojem je moguće razmatranje problema povećanja raspoloživosti flote vazduhoplova, ili ocene raspoloživosti uopšte. Definisanjem dijagrama uzročno-posledičnih veza između elemenata unutar organizacione strukture održavanja, utvrđen je logički tok izbora metode neperfektnog održavanja koji se može primeniti na održavanje flote školskih aviona. Analizom postojećeg sistema i koncepcije održavanja flote školskih aviona, utvrđeni su uzroci neperfektnosti u procesu održavanja i definisan je trenutni nivo obnavljanja tehničkog stanja flote vazduhoplova. Paralelno sa tim na osnovu dostupnih podataka iz pojedinih segmenata održavanja izbor se usmerava na politike neperfektnog održavanja koje za optimizaciju održavanja koriste isti tip podataka. Završnu reč za izbor modela ima zahtevani kriterijum ili skup kriterijuma optimizacije, gde je u ovom slučaju primarni bio raspoloživost a sekundarni troškovi održavanja. Rezultati prikazanog istraživanja mogu se sažeti na sledeći način:

- 1) Osvrtom na pojmove pouzdanosti kvaliteta i bezbednosti i različite pristupe u dostizanju određenog nivoa kvaliteta i pouzdanosti definisano je šta predstavlja tradicionalni a šta moderan pristup ovom problemu. Ključni pojam je definisan kao takozvana cena kvaliteta. Osnovna pretpostavka je da umesto posmatranja smanjenja troškova pojedinačnog otkaza treba posmatrati pouzdanost uređaja u toku celog veka eksploatacije ili da se u krajnjem slučaju posmatraju intenziteti otkaza tog uređaja. Obzirom da je za sisteme kao što su vazduhoplovi od izuzetne važnosti sprečavanje pojave otkaza koji mogu izazvati katastrofalne posledice, ukazano je na tendenciju zaokreta ka tehnikama održavanja okrenutim ka pouzdanosti (*Eng. Reliability-centered maintenance*). Posebno je ukazano i na korišćenje prognostičkih alata (između ostalog i računara) koji na osnovu istorije prethodnih događaja uz određena ograničenja mogu da doprinesu razumevanju procesa nastanka otkaza na uređaju.
- 2) Analizom opšteg značenja pojma tehničke efektivnosti sistema prepoznati su uticaji koji na sistem vrše uslovi pod kojima se on koristi kao i uticaj od strane sistema održavanja kroz logističku podršku i administraciju. Uočeno je da se kao rezultat potrebe za realnijim praćenjem i unapređenjem pouzdanosti nedavno pojavio niz istraživanja nad modelima održavanja. Kao potpuno nov pravac u proučavanju modela održavanja javljaju se metode neperfektnog održavanja koje sada realnije definišu dostignuti stepen obnavljanja nakon

popravke. Definirano je da je potrebno poznavati veze između elemenata unutar sistema kao i intenzitete otkaza za pojedine podsistem, kao i koji je to željeni kriterijum optimizacije (raspoloživost ili troškovi) da bi se pravilno odabrao model održavanja. Iz prethodno definisanog zaključeno je da je u narednim koracima potrebno pristupiti izradi studije pouzdanosti flote vazduhoplova i pregleda razvoja modela održavanja.

- 3) Urađen je hronološki pregled razvoja modela neperfektnog održavanja gde se posebno navode uzroci za neperfektno održavanje kao i razne pretpostavke sa kojim je to propustima u održavanju vezano neperfektno održavanje. Radi boljeg razumevanja funkcionisanja modela neperfektnog održavanja dat je pregled najčešće korišćenih matematičkih metoda modelovanja neperfektnog održavanja kao što su (p, q) pravilo, faktor poboljšanja i druge. Kroz dati pregled posebno su naglašeni oni autori i metode koje su potekle iz prakse i koje imaju potencijalno praktičnu primenu. Kao poseban primer navedeni su modeli autora Wanga i Phama koji se ne baziraju na klasičnoj teoriji obnavljanja već na novoj, takozvanoj teoriji Kvazi-obnove. Da bi se kasnije ostvarila veza konkretnog sistema održavanja koji se optimizuje i predloženih modela izvršena je klasifikacija modela neperfektnog održavanja prema konceptima (politikama) održavanja. Kao najčešće pominju se politike vremenski zavisnog održavanja i periodičnog održavanja. Dane su definicije oportunističkih politika održavanja kao i prikaz ekonomske zavisnosti i korelisanih otkaza.
- 4) Sprovedena je analiza stanja nakon drugog produženja životnog veka školskih aviona G-4, kao i razloga zbog kojih se ušlo u drugo produženje životnog veka. Prepoznato je da je neophodnost i iskustvo kadra na održavanju bio presudni faktor u donošenju odluke. Isto tako uočeno je da je propuštena prilika da se definišu nove norme u održavanju (iako je to po svoj prilici neophodno), kao i da se izvrše modernizacija pojedinih podistema ili komponenti. Na osnovu poznavanja sistema održavanja definisano je koje su kategorije održavanja zastupljene i kojoj politici ili politikama održavanja pripada primenjeni koncept održavanja. Zbog svojih osobenosti drugi stepen održavanja je bio najpogodniji za primenu metoda neperfektnog održavanja. Izvedeni su zaključci koje su to pojave koje prate eksploataciju i održavanje flote a koje ukazuju da je u pitanju neperfektno održavanje. Dnevna ispravnost i prosečan godišnji nalet po vazduhoplovu definisani su kao parametri koji su najsigurniji indikatori ovakve tvrdnje. Na osnovu logičkog dijagrama

- odlučivanja zaključeno je koji je model održavanja najbolje primeniti na posmatrani sistem eksploatacije i održavanja.
- 5) Da bi bilo moguće primeniti izabrani model neperfektnog održavanja prethodno je definisano da je potrebno uraditi studiju pouzdanosti flote aviona G-4. Na osnovu dostupnih podataka iz izveštaja o dnevnom održavanju i unapred definisane metodologije izvedeni su zaključci o tipu i parametrima matematičke raspodele otkaza za svaki od podsistema na avionu G-4. Dodatno je na osnovu izabranog vremena trajanja karakterističnog zadatka u školskoj nameni urađen proračun pouzdanosti za svaki od njih. Proverom pogodnosti raspodele ustanovljene su vrlo visoke vrednosti korelacije koje su bile u rasponu od 92 do 96%.
  - 6) Na primeru koji se svodio na numeričko rešavanje diferencijalnih jednačina za intenzitet troškova  $L$  i raspoloživost  $A$  korišćenjem programa nelinearnog programiranja dokazano je da parametri u vidu vremena između povremenih pregleda i broja uzastopnih korektivnih popravki mogu da optimizuju održavanje. Definisanjem vrednosti parametara kvazi obnove  $\alpha$  i  $\beta$ , i upotrebom koeficijenata troškova iz literature za podsisteme koji prate tip otkaza Weibulove raspodele nađene su optimalne politike održavanja. Validacija u vidu primene optimalnih politika održavanja dala je zadovoljavajući rezultat u vidu povećanja nivoa raspoloživosti na vrednosti od 96 do 97%, uz napomenu da je svaki podsistem posmatran pojedinačno i da to nije dokaz globalne promenljivosti politike održavanja na sistem u celini.
  - 7) U svrhu ocene uticaja optimalne politike održavanja na flotu vazduhoplova nastale primenom odabranog modela neperfektnog održavanja izrađen je simulacioni model njegove eksploatacije i održavanja. Kao referenti sistem poslužio je scenario modela održavanja koji je u najvećoj meri replika aktuelnog sistema održavanja baziranog na održavanju prema dostignutim resursima. Statistički pokazatelji u vidu *Raspoloživosti flote*, *Prsečne dnevne ispravnosti*, *procenta izvršenja planiranih letova* i *Broja izvršenih letova* poslužili su za analizu osetljivosti. Eksperimenti koji su izvođeni uključivali su uticaj primene normi iz numeričkog modela, uticaj kanibalizacije, uticaj promene trajanja karakterističnog zadatka i uticaj promena u logističkoj podršci.. Potvrđeno je da se u okviru aktuelne organizacije održavanja flote školskih vazduhoplova, koja se trenutno primenjuje u drugom stepenu održavanja, bitne promene raspoloživosti i ostalih statističkih pokazatelja ostvaruju uz bolji dotok rezervnih delova ili upotrebom kanibalizacije kao instrumenta održavanja u slučaju da je dotok rezervnih delova slab.

Takođe je potvrđeno da ukoliko se izvrše promene u aktuelnoj organizaciji održavanja u vidu ograničavanja broja uzastopnih korektivnih intervencija za svaki od pojedinih podsistema, postiže se povećanje raspoloživosti flote školskih vazduhoplova. Potvrđeni su pozitivni uticaji na povećanje dostignute pouzdanosti pojedinih podsistema, a globalni uticaj je registrovan kroz stabilnije i predvidivije kretanje raspoloživosti flote u toku pet godina eksploatacije.

Razvoj metode izbora modela neperefektnog održavanja u svrhu povećanja raspoloživosti flote vazduhoplova otvara mogućnost daljih istraživanja usmerenih u pravcu:

- Razmatranja promene normi održavanja u svrhu prevazilaženja problema sa raspoloživošću flote nastalih nakon drugog produženja životnog veka.
- Usavršavanja prikazane metodologije izbora modela održavanja u smislu uključivanja novih faktora
- Primene metodologije kao alatke za brzu ocenu efikasnosti normi održavanja u smislu pouzdanosti i raspoloživosti i
- Ispitivanja mogućnosti primene razvijene metodologija na druge tehničke sisteme.



## Literatura

- Albin, S.L., / S. Chao. 1992. „Preventive replacement in systems with dependent components.“ *IEEE Transactions on Reliability* 41 (2): 230-238.
- Barlow, E., Richard, / Frank Proschan. 1962. „Planned Replacement.“ U *Studies in Applied Probability and Management Science*, autor J., Kenneth Arrow, Samuel Karlin / Herbert Scarf, 63-87. Stanford: Stanford University Press.
- Barlow, R. E., / F. Proschan. 1975. *Statistical Theory of Reliability and Life Testing*. New York: Holt, Rinehart & Winston.
- Barlow, R., E., / F. Proschan. 1965. *Mathematical Theory of Reliability*. New York: John Wiley & Sons.
- Berg, Menachem, / Benjamin Epstein. 1976. „A modified block replacement policy.“ *Naval Research Logistics* 23: 25-24.
- Blanchard, Benjamin, S., / Edward, E. Lowery. 1969. *Maintainability (principles and practices)*. New York: McGraw-Hill Book Company.
- Block, H., W., S. Borges, / T., H. Savits. 1988. „A general age replacement model with minimal repair.“ *Naval Research Logistics, An International Journal* 35 (5): 365- 372.
- Block, H., W., S. Borges, / T., H. Savits. 1985. „Age dependent minimal repair.“ *Journal* 35 (5): 370- 385.
- Brown, M., / F. Proschan. 1982. *Imperfect maintenance*. Hayward: Institute for Mathematical Statistics.
- Brown, Mark, / Frank Proschan. 1983. „Imperfect repair.“ *Journal of Applied Probability* (Applied Probability Trust) 20 (4): 851-859.
- Chan, Jack-Kang, / Leonard Shaw. 1993. „Modeling Repairable Systems with Failure Rates that Depend on Age & Maintenance.“ *IEEE TRANSACTIONS ON RELIABILITY* 42 (4): 566- 571.
- Chun, Y.H. 1992. „Optimal number of periodic preventive maintenance operations under warranty.“ *Reliability Engineering and System Safety* 37: 223-225.
- Dagpunar, J.S., / N. Jack. 1992. „Optimal repair-cost limit for a consumer following expiry of a warranty.“ *IMA Journal of Mathematics Applied in Business and Industry* 4: 155- 161.
- Fontenot, R.A., / F. Proschan. 1984. „Some imperfect maintenance models.“ *Reliability Theory and Models*.
- Goel, L.R., P. Shiravastava, / R. Gupta. 1992. „Two unit cold standby system with correlated failures and repairs.“ *International Journal of System Science* 23 (3): 379-391.
- Goel, L.R., R. Gupta, / P.K. Tayagi. 1993. „Cost benefit analysis of a complex system with correlated failures and repairs.“ *Microelectronics and Reliability* 33 (15): 2281-2284.

- Goel, L.R., S.Z. Mumataz, / R. Gupta. 1996. „A 2-Unit Duplicating Standby System with Correlated Failure Repair Replacement Times.“ *Microelectronics and Reliability* 36 (4): 517-523.
- Guo, R, / C., E. Love. 1992. „Statistical Analysis of an Age Model for Imperfectly Repaired System.“ *Quality and Reliability Engineering International* 8 (2): 133-146.
- Gupta, R., S.Z. Mumataz, / N. Rastogi. 1999. „Profit analysis of a system with mutual changeover of units and correlated failures and repairs.“ *Journal of Quality in Maintenance Engineering* 5 (2): 128-140.
- Harris, R. 1968. „Reliability Applications of Bivariate Exponential Distribution.“ *Operations Research* 16: 18-27.
- Helvic, B., E. 1980. „Periodic maintenance, on the effect of imperfectness.“ *10th Int Symp. Fault-tolerant Computing*. 204-206.
- Helvic, B.,E. 1980. „Periodic maintenance, on the effect of imperfectness.“ *10th International Symposium Fault-tolerant Computing*. 204-206.
- Huges, E., E. Chaerpentier, / A: Cabarbaye. 2002. „Application of Markov process to predict aircraft operational reliability.“ *3rd European Systems Engineering Conference*. Toulouse.
- Jack, Nat. 1991. „Repair Replacement Modelling over Finite Time Horizons.“ *The Journal of the Operational Research Society* 42 (9): 759-766.
- Jayabalan, V., / Dipak Chaudhuri. 1992a. „Cost Optimization of Maintenance Scheduling for a System with Assured Reliability.“ *IEEE TRANSACTIONS ON RELIABILITY* 41 (1): 21-25.
- Jayabalan, V., / Dipak Chaudhuri. 1992b. „Optimal Maintenance and Replacement Policy for a Deteriorating System with Increased Mean Downtime.“ *Naval Research Logistics* 39: 67-78.
- Jiankang, Dong, Ma Hongyan, Jangjie Chen, / Liu Jiaxue. 2010. „Mathematical Model of Aircraft Reliability Based on Fault Diagnosis.“ *2010 International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application*. 2010 IEEE DOI 10.1109/ISDEA.2010.330. 923-927.
- Kijima, Masaaki. 1989. „Some results for repairable systems with general repair.“ *Journal of Applied Probability* (Applied Probability Trust) 26 (1): 9102.
- Kijima, Masaaki, / Toshio Nakagawa. 1991. „A Cumulative Damage Shock Model with Imperfect Preventive Maintenance.“ *Naval Research Logistics* 38: 145- 156.
- Kijima, Masaaki, / Toshio Nakagawa. 1992. „Replacement policies of a shock model with imperfect preventive maintenance.“ *European Journal of Operational Research* 57: 100- 110.
- Kijima, Masaaki, Hidenori Morimura, / Yasusuke Suzuki. 1988. „Periodical replacement problem without assuming minimal repair.“ *European Journal of Operational Research* 37 (2): 194- 203.

- Knežević, A, Lj Vasov, S Vlačić, / Č Kostić. 2017. „Imperfect Maintenance Model for Estimating Aircraft Fleet Availability.“ *Aircraft Engineering and Aerospace Technology* 89 (2): 338-346.
- Knežević, Jezdimir. 1995. „Osnove teorije obnavljanja.“ *Održavanje mašina i opreme*. Beograd: Mašinski fakultet. 311-323.
- Lam, Y. 1988. „A note on the optimal replacement problem.“ *Advances in Applied Probability* 20 (2): 479-482.
- Lie, Chang, Hoon, / Young, Ho Chun. 1986. „An Algorithm for Preventive Maintenance Policy.“ *IEEE TRANSACTIONS ON RELIABILITY*, 35 (1): 71-75.
- Liu, Xiao-Gao, Viliam Makis, / K., S., Andrew Jardine. 1995. „A Replacement Model with Overhauls and Repairs.“ *NavalResearch Logistics* 42: 1063-1079.
- Love, C.E., / R. Guo. 1993. „An Application of a Bathtub Failure Model to Imperfectly Repaired Systems Data.“ *Quality and Reliability Engineering International* 9 (2): 127-135.
- Makis, V, / A., K., S Jardine. 1992. „Optimal replacement policy for a general model with imperfect repair.“ *Journal of the Operational Research Society* 43 (2): 111- 120.
- Makis, Viliam, / Andrew, K., S. Jardine. 1993. „A note on optimal replacement policy under general repair.“ *European Journal of Operational Research* 69 69: 75-82.
- Makis, Viliam, / Andrew, K., S., Jardine. 1991. „Optimal replacement of a System with Imperfect repair.“ *Microelectronics reliability* 31 (2/3): 381-388.
- Malik, , MAZHAR, ALI, KHAN. 1979. „Preventive Maintenance Scheduling.“ *AIIE Transactions* 11 (3): 221- 228.
- Misra, Krishna, B. 2008. *The handbook of performability engineering*. London: Springer-Verlag London Limited.
- Morimura, H. 1970. „On some preventive maintenance policies for IFR.“ *Journal of the Operations Research Society of Japan* 12: 94-124.
- Morimura, H, / H Makabe. 1963a. „A new policy for preventive maintenance.“ *Journal of the Operations Research Society of Japan* 5: 94-124.
- Murthy, D.N.P., / R.J. Wilson. 1994. „Parameter estimation in multi-component systems with failure interaction.“ *Applied Stochastic Models and Data Analysis* 10 (1): 47-60.
- Muth, Eginhard, J. 1977. „An optimal decision rule for repair vs replacement.“ *IEEE Transactions on reliability* 26 (3): 179-181.
- Nakagawa, , Toshio, / Shunji Osaki. 1974. „Optimum Preventive Maintenance Policies for a 2-Unit Redundant System.“ *IEEE TRANSACTIONS ON RELIABILITY* 23 (2): 86-90.
- Nakagawa, T., / D.N.P. Murthy. 1993. „Optimal replacement policies for a two-unit system with failure interactions.“ *RAIRO: Recherche Operationnelle* 27 (4): 427-438.
- Nakagawa, Toshio. 1981. „A summary of periodic replacement with minimal repair at failure.“ *Journal of the Operations Research Society of Japan* 24 (3): 213-227.

- Nakagawa, Toshio. 1979b. „Imperfect Preventive-Maintenance.“ *IEEE TRANSACTIONS ON RELIABILITY* 28 (5): 402.
- . 2005. *Maintenance Theory of Reliability*. London: Springer- Verlag.
- Nakagawa, Toshio. 1979a. „Optimum Policies When Preventive Maintenance is Imperfect.“ *IEEE TRANSACTIONS ON RELIABILITY* 28 (4): 331-332.
- Nakagawa, Toshio. 1986. „Periodic and Sequential Preventive Maintenance Policies.“ *Journal of Applied Probability* 23 (2): 536-542.
- Nakagawa, Toshio. 1988. „Sequential Imperfect Preventive Maintenance Policies.“ *IEEE TRANSACTIONS ON RELIABILITY* 37 (3): 295-298.
- Nakagawa, Toshio, / K. Yasui. 1987. „Optimum policies for a system with imperfect maintenance.“ *IEEE Transactions on Reliability* (IEEE) 36 (5): 631-633.
- NASA/CR-2001-210647. 2001. *General Aviation Aircraft Reliability Study*. Hampton, Virginia 23681-2199: Langley Research Center .
- Nguyen, D., G., / D., N., P. Murthy. 1981. „Optimal Repair Limit Replacement Policies with Imperfect Repair.“ *The Journal of the Operational Research Society* 32 (5): 409-416.
- O' Connor, D., T., Patrick, / Andre Kleyner. 2012. *Practical Reliability Engineering*. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons, Ltd.
- O'Connor, D.,T., Patrick. 2008. „A Practitioner' s View of Quality, Reliability and Safety.“ U *The Handbook of Performability Engineering*, autor Misra Krishna B., 71-80. London: Springer - Verlag London Limited.
- Ozekici, Suleyman. 1988. „Optimal periodic replacement of multicomponent reliability system.“ *Operations Research* 36 (4): 542-552.
- Park, Kyung, S. 1979. „Optimal Number of Minimal Repairs before Replacement.“ *IEEE TRANSACTIONS ON RELIABILITY*, 28 (2): 137-140.
- Pham, H. 1992. „Reliability analysis of a high voltage system with dependent failures and imperfect coverage.“ *Reliability Engineering and System Safety* 37 (1): 25-28.
- Pijenburg, M., N. Ravichandran, / G. Regterschot. 1993. „Stochastic analysis of a dependent parallel system.“ *European Journal of Operational Research* 68 (1): 90-104.
- Pohl, Letitia M. 1991. „EVALUATION OF F-15E AVAILABILITY DURING OPERATIONAL TEST.“ *Proceedings of the 1991 Winter Simulation Conference*. IEEE. 549-552.
- Raivio, T, E Kuumola, A., Ville Mattila, K Virtanen, / P., R Hamalainen. 2001. „A Simulation Model for Military Aircraft Maintenance and Availability.“ Prague: ESM European Simulation Multiconference.
- Raivio, T., Eemeli Kuumola, A., Ville Mattila, Kai Viratanen, and P., Raimo Hamalainen. 2001. "A Simulation Model for Military Aircraft Maintenance and Availability." *ESM2001 15th European Simulation Multiconference*. Prague: ESM2001.

- Rander, R., / Jorgenson. D., W. 1963. „Opportunistic replacement of a single part in the presence of several monitored parts.“ *Management Science* 10 (1): 70-83.
- Rašuo, Boško. 2002. *Vazduhoplovno-tehničko obezbeđenje*. Beograd: Mašinski fakultet u Beogradu.
- Rašuo, Boško, / Gradimir Đuknić. 2013. „Optimization of the aircraft general overhaul process.“ *Aircraft engineering and aerospace technology* 85 (5): 343-353.
- Salaman, S, C, Richard Cassady, A., Edvard Pohl, / W., S Ormon. 2007. „Evaluating the Impact of Cannibalization on Fleet Performance.“ *Quality and Reliability Engineering International* 23: 445-457.
- Shaked, M., / J.G. Shanthikumar. 1988. „Multivariate conditional hazard rates and the MIFRA and MIFR properties.“ *Journal of Applied Probability* 25 (1): 150-168.
- Shaked, Moshe, / J., George Shantikumar. 1986. „Multivariate Imperfect Repair.“ *Operations Research* 34 (3): 437-448.
- Sheu, S.H., / W.S. Griffith. 1992. „Multivariate imperfect repair.“ *Journal of Applied Probability* 29 (4): 947-956.
- Siladic, Mato. 2007. *Life Management of Aircraft and Engines*. Belgrade: EFEKT print Beograd.
- Šimšić, Vasilije, / Milutin Kokanović. 1998. „Analiza efektivnosti terenskog vozila PUCH 300.“ *XXV Jugoslovenski simpozijum o operacionim Istraživanjima SYM-OP-IS '98*. Herceg Novi.
- Srivastava, M.,S., / Yanhong Wu. 1993. „Estimation & Testing in an Imperfect-Inspection Model.“ *IEEE Transaction on Reliability* (IEEE) 42 (2): 280-286.  
doi:10.1109/24.229501.
- SSNO- Vazduhoplovnotehnička uprava. 1990. *Norme vremena za opsluživanje i održavanje vazduhoplova, VTU-01.VTUP.000/27.1*. Beograd: SSNO, Beograd.
- SSNO Vazduhoplovnotehnička uprava. 1986. *Pravilo vazduhoplovno-tehničke službe VTU-I/2*. Beograd: SSNO Beograd.
- Subramanian, R., / R. Natarajan. 1990. „Two-unit redundant system with different types of failure and 'imperfect' repair’.“ *Microelectronics and Reliability* 30 (4): 697-699.
- Trifkovic, Dragan, Slobodan Stupar, Srdjan Bosnjak, Milorad Milovancevic, Branimir Krstic, Zoran Rajic, / Momcilo Dunjic. 2011. „Failure analysis of the combat jet aircraft rudder shaft.“ *Engeneering Failure Analysis* 1998-2007.
- Uematsu, K, / T Nishida. 1987. „One-unit system with a failure rate depending upon the degree of repair.“ *Mathematica Japonica* 32 (1): 139- 147.
- UK Gov RA5724. 2014. *Regulatory Article 5724 - Life Extension Programme*. UK Government.
- Vasov, Ljubiša. 2002. *Prilog metodologiji ocene efektivnosti vazduhoplovnih turbinskih propulzora*. Beograd: Saobraćajni fakultet u Beogradu.

- Vujanović, Nikola. 1987. *Teorija pouzdanosti tehničkih sistema*. Beograd: Vojno- izdavački i novinski centar.
- Wang, , Hongzhou, / Hoang Pham. 1996b. „Optimal maintenance policies for several imperfect repair models.“ *International Journal of Systems Science* 27 (6): 543-549.
- Wang, Hongzhou, / Hoang Pham. 1996c. „A quasi renewal process and its applications in imperfect maintenance.“ *International Journal of Systems Science* 27 (10): 1055-1062.
- . 2006. *Reliability and Optimal Maintenance*. London: Springer-Verlag London Limited.
- Wu, Shaomin, / Derek Clementis-Crome. 2005. „Optimal Maintenance Policies Under Different Operational Schedules.“ *IEEE TRANSACTIONS ON RELIABILITY* 54 (2): 338-346.
- Yun, W., Y., / D., S. Bai. 1987. „Cost Limit Replacement Policy Under Imperfect Repair.“ *Reliability Engineering* 23: 23-28.
- Zhao, Ming. 1994. „Availability for Repairable Components and Series Systems.“ *IEEE TRANSACTIONS ON RELIABILITY* 43 (2): 329-344.

## Biografija

Aleksandar Knežević je rođen 26.08.1975. godine u Rumi, Republika Srbija

Osnovnu školu „Zmaj Jova Jovanović“ u Rumi završio 1990.godine odličnim uspehom.

Vazduhoplovnu vojnu gimnaziju „Maršal Tito“ u Mostaru upisao 1990. godine. Završio 1994 Vojnu Gimnaziju vazduhoplovni smer odličnim uspehom.

Od 1994. Godine do 1998. godine pohađao Vojnu akademiju Vojske Jugoslavije odsek RViPVO, smer avijacija. Diplomirao 1998 godine radom „Uređaji za povećanje uzgona“ iz predmeta Aerodinamika ocenom 10 (deset) i sa ukupnim prosekom na studijama odličan 8,74 delio prvo mesto u rangu klase i stekao zvanje oficir-pilot.

Nakon završetka akademije raspoređen na dužnost pilota-nastavnika letenja u 239. lovačko-bombarderskoj avijacijskoj eskadrili u na Aerodromu Podgorica.

Od 21.10.2001. godine pripadnik 252. lovačko-bombarderske avijacijske eskadrile na aerodromu Batajnica.

Od 31.08.2006. godine obavljao dužnost nastavnika letenja na avionima V-53 i N-62 u sastavu 252. Mešovite avijacijske eskadrile do 31.01.2011. godine a nakon toga do 31.07.2013. godine u sastavu 252. Školsko-trežne avijacijske eskadrile.

2009. godine magistrirao na Saobraćajnom fakultetu Univerziteta u Beogradu na katedri za Vazduhoplovna prevozna sredstva sa radom na temu „Izbor višenamenskog tipa vazduhoplova za potrebe Republike Srbije“ pod rukovodstvom mentora profesora Slobodana Gvozdenovića, dipl. inž. I stekao akademski naziv magistra tehničkih nauka sa ukupnim uspehom 9,50 u toku studija.

Na Vojnoj akademiji je od 31.07.2013. godine na mestu nastavnika i nastavnika letenja u katedri Vojnog vazduhoplovstva gde radi kao asistent na predmetu Navigacija 2 i kao predavač za predmet Gađanje Raketiranje i Bombardovanje.

Školske 2015/2016. godine upisao doktorske akademske studije na Univerzitetu u Beogradu, Saobraćajnom fakultetu

Naučna i stručna opredeljenost mu je bavljene naučnoistraživačkim radom na polju Vojnog vazduhoplovstva i saobraćajnog inženjerstva sa težištem na proučavanje pouzdanosti i efektivnosti vazduhoplova.

## Izjava o autorstvu

Ime i prezime autora Aleksandar Knežević

Broj indeksa 15d015

Izjavljujem

da je doktorska disertacija pod naslovom

Razvoj metode izbora modela održavanja u funkciji povećanja raspoloživosti flote vazduhoplova

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada;
- da disertacija u celini ni u delovima nije bila predložena za sticanje druge diplome prema studijskim programima drugih visokoškolskih ustanova;
- da su rezultati korektno navedeni i
- da nisam kršio/la autorska prava i koristio/la intelektualnu svojinu drugih lica.

Potpis autora

U Beogradu, \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_



## Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada

Ime i prezime autora \_\_\_\_\_ Aleksandar Knežević \_\_\_\_\_

Broj indeksa \_\_\_\_\_ 15d015 \_\_\_\_\_

Studijski program \_\_\_\_\_ Saobraćaj \_\_\_\_\_

Naslov rada Razvoj metode izbora modela održavanja u funkciji povećanja raspoloživosti flote vazduhoplova

Mentor \_\_\_\_ prof. dr \_Ljubiša Vasov, dipl.inž. \_\_\_\_\_

Izjavljujem da je štampana verzija mog doktorskog rada istovetna elektronskoj verziji koju sam predao/la radi pohranjena u **Digitalnom repozitorijumu Univerziteta u Beogradu**.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci vezani za dobijanje akademskog naziva doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane rada.

Ovi lični podaci mogu se objaviti na mrežnim stranicama digitalne biblioteke, u elektronskom katalogu i u publikacijama Univerziteta u Beogradu.

Potpis autora

U Beogradu, \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## Izjava o korišćenju

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Svetozar Marković“ da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu unese moju doktorsku disertaciju pod naslovom:

Razvoj metode izbora modela održavanja u funkciji povećanja raspoloživosti flote vazduhoplova

koja je moje autorsko delo.

Disertaciju sa svim priložima predao/la sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u Digitalnom repozitorijumu Univerziteta u Beogradu i dostupnu u otvorenom pristupu mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučio/la.

1. Autorstvo (CC BY)
2. Autorstvo – nekomercijalno (CC BY-NC)
3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerada (CC BY-NC-ND)
4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima (CC BY-NC-SA)
5. Autorstvo – bez prerada (CC BY-ND)
6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima (CC BY-SA)

(Molimo da zaokružite samo jednu od šest ponuđenih licenci.

Kratak opis licenci je sastavni deo ove izjave).

**Potpis autora**

U Beogradu, \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

1. Autorstvo. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence, čak i u komercijalne svrhe. Ovo je najslobodnija od svih licenci.
2. Autorstvo – nekomercijalno. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.
3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerada. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela. U odnosu na sve ostale licence, ovom licencom se ograničava najveći obim prava korišćenja dela.
4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada.
5. Autorstvo – bez prerada. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.
6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada. Slična je softverskim licencama, odnosno licencama otvorenog kod