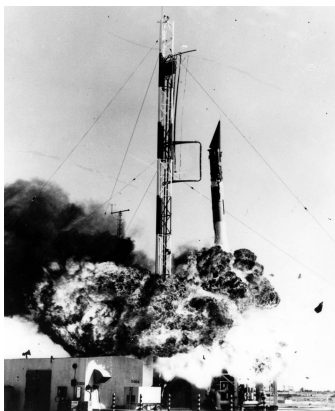


1. Uvod

1.1 Uvodna razmatranja

Poslednjih godina sve se više u tehničkom, a i u svakodnevnom govoru čuje reč **POUZDANOST**. Razlog leži u činjenici da smo već duže vremena svedoci eksplozije tehnoloških dostignuća, koja donosi mnoštvo novih proizvoda čineći život lakšim i udobnijim. U isto vreme postajemo sve zavisniji od tih proizvoda, tj. od ispravnosti njihovog funkcionisanja. Kada kupujemo neki skup uređaj, prvo pitanje na koje bismo želeli da dobijemo odgovor je: koliko je taj uređaj pouzdan, tj. koliko će raditi bez popravki? Svesni smo činjenice da je čak i cena proizvoda u drugom planu, u poređenju sa skupim popravkama koje ćemo kasnije, eventualno, morati da izvršimo. S druge strane, nepouzdanost povlači za sobom troškove, izgubljeno vreme, nepovoljne psihološke efekte, a u određenim slučajevima obiljne pretnje po ličnu bezbednost i bezbednost okoline. Cena nepouzdanosti ne predstavlja samo cenu proizvoda koji je otkazao, već uzima u obzir i prateće efekte koji su nastali zbog otkaza. Na primer, otkaz tranzistora u radio-aparatu prouzrokuje trošak jednak ceni tog tranzistora, dok otkaz sličnog tranzistora u jednom prekookeanskom avionu može da ugrozi izvršenje zadatka takvog aviona, što znači i ogromne troškove. Pri razmatranju pouzdanosti moraju se imati u vidu troškovi održavanja. Činjenica da je došlo do otkaza podrazumeva da će biti potrebno utrošiti vreme za dijagnozu i otklanjanje uzroka, kao i vreme potrebno za prateće aktivnosti. Tome treba dodati cenu rezervnog dela, troškove njegovog držanja na skladištu, troškove transporta, i sl. Izgubljeno vreme zbog nekorišćenja sistema usled otkaza nekog od elemenata u sistemu može da znači veliku stavku u okviru sveukupnih troškova. Uzmimo, kao primer, koliko košta svaki minut kada pomenuti avion ne provodi u letu zbog otkaza nekog elementa u njegovom sistemu.

Što se tiče psihološkog efekta koji nepouzdanost može da ima, treba se setiti dva neuspela lansiranja američkog satelita *Vanguard*, Slika 1.1, koja su prethodila uspešnom lansiranju. U žurbi da što pre parira Sovjetskom savezu, koji je lansirao satelit *Sputnjik I* amerikanci su prenebegli detaljnije razmatranje pouzdanosti *Vanguarda*, što im se kasnije dugo svetilo po pitanju tehnološkog prestiža. U tržišnoj proizvodnji psihološki efekti nepouzdanosti mogu imati velike posledice na promet i poverenje potrošača. Tako, na primer, ako se televizor ili automobil često kvare to ne znači samo smanjenje efektivnog vremena upotrebe, već to zahteva skupe popravke kojima se ne vidi kraja. Kao rezultat toga, u jednoj jačoj konkurenciji, proizvođač koji proizvodi takve televizore, odnosno automobile, ostao bi bez kupaca.



Slika 1.1: Neuspešno lansiranje satelita *Vanguard*



Slika 1.2: Avion *Northrop T-38 Talon*

Budžet je gotovo uvek ograničavajući faktor u procesu razvijanja jednog sistema. Udeo pouzdanosti u finansiranju razvoja jednog sistema je, na neki način, kontraverzan. U početku, pouzdanost je skupa jer zahteva organizovano i efikasno planiranje, ispitivanje i izveštavanje bez mogućnosti da se dokaže, tj. da pokaže svoju vrednost u odnosu na ono što je uloženo. Međutim, posle početnog perioda, dostignuta viša pouzdanost i ekonomski će se isplatiti jer će biti sprečeni mnogi otkazi koji bi se verovatno desili i prouzrokovali velike materijalne i druge gubitke. Međutim, problem je u tome što ipak ne možemo da tvrdimo sa stoprocentnom sigurnošću o nečemu što se još nije dogodilo, tj. teško je pokazati neto-uštede zahvaljujući ulaganjima u pouzdanost. Posledica toga je da je finansiranje aktivnosti u vezi sa pouzdanošću često nedovoljno. Zato je obaveza tehničkog i upravljačkog kadra u privrednim organizacijama da poseduju teorijska i praktična znanja iz područja pouzdanosti, kako bi bili u boljoj situaciji da utiču i poprave takvo stanje.

Sledećih nekoliko primera, zasnovanih na stvarnim praćenjima, ilustruju ogromne koristi realizovane sagledavanjem značaja organizovanog, planskog i detaljnog praćenja pouzdanosti:

- u 1958. godini amerikanci su lansirali uspešno samo 28 % satelita, dok je trenutno ta cifra 92 % i ima stalnu tendenciju porasta, čemu je glavni uzrok analiziranje pouzdanosti,
- u 1959. godini, period garancije za automobil iznosio je 90 dana, ili 6000 km, dok danas neki proizvođači nude garanciju od 7 godina ili 150000 km,
- hidraulična pumpa na avionu DC-8 prvobitno je imala srednje vreme između remonta 1200 h. Kontinualnim prikupljanjem podataka o otkazima, omogućene su konstrukcijske izmene koje su povećale pouzdanost pumpe. Kao rezultat toga povećano je srednje vreme između remonta na 2000 h, zatim 4000 h i najzad 5800 h. Znači, povećana pouzdanost rezultirala je smanjenjem troškova održavanja,
- godine 1959. izvršena je procena pouzdanosti aviona T-38, Slika 1.2. Na osnovu toga napravljen je program povećanja pouzdanosti koji je u prve tri godine rezultirao u 441 izmeni koje su predložene posle analize 2262 otkaza. Troškovi povećanja pouzdanosti iznosili su 1,5 miliona dolara, dok su uštede u periodu 1960, 1961 i 1962. godine iznosile oko 32 miliona dolara. Uštede su se odnosile na manji obim održavanja, veću raspoloživost, manji broj udesa i manji broj rezervnih delova.

1.2 Značaj i pokazatelji pouzdanosti

Merilo pouzdanosti mašinskih konstrukcija predstavlja broj otkaza u jedinici vremena. Pouzdanost je **verovatnoća** na određenom nivou poverenja, da će mašinska konstrukcija izvršavati svoju funkciju (zadatak) u predviđenim radnim uslovima (radno opterećenje, radni vek, ...) u određenom vremenskom periodu bez pojave otkaza. Pouzdane mašinske konstrukcije izvršavaju svoju funkciju bez ili sa što manjim brojem otkaza. Ova karakteristika mašinskih konstrukcija se predstavlja u vidu pozitivnog broja koji se nalazi između nule i jedinice (0-1) ili 0 ... 100 % na osnovu izraza:

$$R(t) = \frac{n_1(t)}{n} \quad (1.1)$$

gde je:

$n_1(t)$ – broj uzoraka koji su uspešno izvršili svoju funkciju posle vremena t ,

n – broj posmatranih jednakih uzoraka.

Pošto je broj posmatranih uzoraka uvek određen broj, prema izrazu (1.1) dobija se "procenjena pouzdanost". Stvarna (teorijska) pouzdanost dobija se kada broj posmatranih uzoraka teži beskonačno velikoj vrednosti (što znači da se posmatra cela populacija):

$$R(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{n_1(t)}{n} \quad (1.2)$$

Zbog ove razlike između stvarne i procenjene pouzdanosti, u definiciji pouzdanosti, uveden je pojam "nivo poverenja". Na osnovu nivoa poverenja procenjuje se stepen udaljenosti procenjene pouzdanosti od stvarne pouzdanosti. Na primer, ako je pouzdanost neke mašinske konstrukcije 0,97 na nivou poverenja od 95 %, to znači da postoji rizik od 5 % da pouzdanost mašinske konstrukcije bude manja od 0,97.

Primer: U jednom paketu nalazi se 100 elektroda. Elektrode su pravilno uskladištene i upotrebljene. Pri upotrebi 5 elektroda nije izvršilo ispravno svoju funkciju. Odrediti pouzdanost elektroda.

$$R = \frac{n_1}{n} = \frac{95}{100} = 0,95$$

Visoka pouzdanost, pouzdanost sa velikim nivoom poverenja, nalaže što kraće vreme izvršenja funkcije. Na primer, veoma je teško ostvariti visoku pouzdanost ležaja u velikom vremenskom intervalu. Savremene mašinske konstrukcije su sve složenije zbog velikog broja elemenata (komponentata). Visoka pouzdanost mašinskih konstrukcija nalaže visoko kontrolisanu proizvodnju, montažu, eksploataciju (u cilju obezbeđivanja projektovanih radnih uslova) i održavanje, što znatno povećava cenu proizvoda.

Otkaz nastaje kada neki element (komponenta) mašinske konstrukcije prestane da izvršava (obavlja) svoju elementarnu ili parcijalnu funkciju (ležaj, zavrtnaj, sklop, ...). Kako će se otkaz nekog elementa reflektovati na funkcionisanje mašinske konstrukcije, zavisi da li je posmatrani element od primarnog (vitalnog) ili sekundarnog značaja za ispravno funkcionisanje. Podela otkaza prema kriterijumu mogućnosti korišćenja konstrukcije nakon njihove pojave je na potpune ili delimične. Potpuni otkaz podrazumeva nesposobnost mašinske konstrukcije da izvršava svoju opštu funkciju

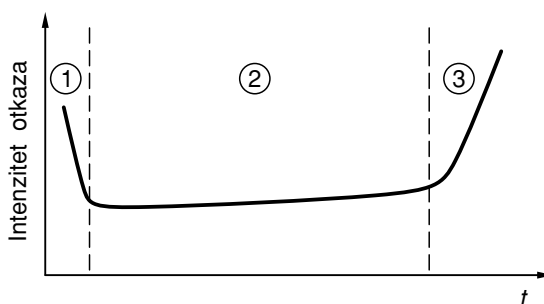
Kod delimičnog otkaza mašinske konstrukcije mogu se pojaviti tri karakteristična slučaja:

- mašinska konstrukcija izvršava svoju funkciju, ali ne sa projektovanim performansama u pogledu snage, protoka, brzine (poremećaj radnih parametara),
- mašinska konstrukcija izvršava svoju funkciju sa projektovanim performansama, ali sa povećanim intenzitetom habanja kontaktnih površina, vibracija, buke, potrošnje goriva, zagađenja okoline ...
- mašinska konstrukcija izvršava svoju funkciju sa povećanim rizikom da dođe do potpunog otkaza i/ili narušavanja propisanog stepena bezbednosti.

Da li mašinska konstrukcija u uslovima delimičnog otkaza treba da radi i ako treba koliko dugo može da radi zavisi od složenosti tehnološkog postupka koji mašinska konstrukcija izvršava i potencijalne opasnosti da dođe do ugrožavanja ljudskih života, velike materijalne i ekološke štete. Otkazi mašinske konstrukcije u funkciji vremena rada mogu se prikazati grafički, Slika 1.3.

Na dijagramu sa Slike 1.3 mogu se uočiti tri karakteristične zone:

- Rani otkazi** (period dečijih bolesti), može se izbeći od strane proizvođača uhadavanjem većim opterećenjem od radnog u kratkom periodu pre isporuke.
- Stabilan period rada sa **slučajnim otkazima**.
- Period starenja** usled potrošenosti.



Slika 1.3: Opšti dijagram intenziteta otkaza

Stepen pouzdanosti mašinske konstrukcije zavisi od broja otkaza u jedinici vremena. **Učestalost otkaza** mašinske konstrukcije zavisi od broja **kritičnih**, slabih mesta na mašinskoj konstrukciji. Broj kritičnih mesta zavisi od **naslednih uslova, uslova eksploatacije i održavanja** mašinske konstrukcije.

Nasledni uslovi se formiraju pri procesu stvaranja — izrade svakog elementa mašinske konstrukcije, a zavise od:

- konstrukcionih uslova (kvalitet, konstrukciono rešenje...),

- kvaliteta materijala (hemijski sastav, stanje, ...),
- kvaliteta izrade (obrada rezanjem, livenje, kovanje, termička obrada),
- kvalitet montaže (zazori, preklopi),
- kvalitet uhodavanja svakog izvršnog elementa.

Svako odstupanje od **propisanih eksploatacionih uslova** u pogledu: opterećenja, temperature, brzine, stanja radne sredine i tehnologije značajno utiče na kvantitet kritičnih mesta mašinske konstrukcije.

Stvarni **uslovi održavanja** moraju biti kompatibilni sa propisanim uslovima održavanja za datu mašinsku konstrukciju, u pogledu blagovremenog servisiranja i originalnosti zamenjenih delova (komponenti). Da bi se svi ovi uslovi uzeli u obzir (razmatranje) pri procesu konstruisanja novih ili varijantnih mašinskih konstrukcija potrebno je imati odgovarajuće informacije o svim ovim uslovima.

Svi propusti i nepravilnosti nastali pri procesu stvaranja i održavanja mašinske konstrukcije najbrže i najlakše se mogu registrovati u fazi eksploatacije. Informacije o ponašanju mašinske konstrukcije u eksploatacionim uslovima su veoma važan *input* za konstruisanje naredne generacije mašinskih konstrukcija. Ove informacije su najčešće statističke prirode, te se mogu predstaviti u statističkoj formi.

Poznato je da se na osnovu stvarnog toka radnog napona ne može sagledati pravo stanje o režimu rada (laki, srednji, teški) nekog mašinskog dela, već tek kada se on transformiše, prevedu u odgovarajući spektar napona. Ovaj posao je veoma složen i dugotrajan, ali su zato istovremeno informacije o ponašanju mašinskih konstrukcija u eksploatacionim uslovima toliko važne da ih proizvođači čuvaju u "fiokama". A kako i ne bi kada od njih direktno zavisi pouzdanost naredne generacije mašinskih konstrukcija. Proizvođači mašinskih konstrukcija direktno prikupljaju informacije o naslednim uslovima tj. materijalu, izradi, montaži. Međutim, informacije o ponašanju mašinske konstrukcije u eksploatacionim uslovima i održavanju su u rukama korisnika mašinskih konstrukcija. O ovim informacijama proizvođači mašinskih konstrukcija dolaze indirektno preko korisnika mašinskih konstrukcija. Pošto su ove informacije za proizvođače veoma važne u pogledu kvaliteta i kvantiteta, proizvođači mašinskih konstrukcija sve češće prihvataju održavanje svojih proizvoda. Na ovaj način proizvođač direktno prati ponašanje svoje konstrukcije u eksploatacionim uslovima. Direktno prikuplja podatke o oštećenjima, smetnjama i radnim uslovima. Ima neposredan uvid o vrsti i količini oštećenja i radnim uslovima pri kojima je oštećenje nastalo. Prati montažu i demontažu mašinske konstrukcije ili nekog njenog dela pri otklanjanju kvara ili redovnom održavanju. Ovaj vid održavanja se organizuje preko mreže servisnih radionica. Ovako dobijene informacije su najpouzdaniji *input* za konstruisanje naredne generacije mašinske konstrukcije.

Imperativ svakog konstruktora je da njegova mašinska konstrukcija **uspešno obavlja funkciju** za koju je namenjena uz **minimalne ukupne troškove** (proizvodna cena i troškovi eksploatacije i održavanja). Ovo merilo kvaliteta mašinske konstrukcije, posmatrano u određenom vremenskom intervalu naziva se **efektivnost mašinske konstrukcije**.

Efektivnost mašinske konstrukcije zavisi od:

- vrste konstrukcionog rešenja,
- primenjene tehnologije izrade,
- načina upotrebe,
- kvalitet montaže (zazori, preklopi),
- načina održavanja.

Prema tome, efektivnost mašinskih konstrukcija zavisi od konstruktora, tehnologa, korisnika i inženjera, tehničara i majstora koji učestvuju u njihovom održavanju.

1.3 Otkazi mašinskih konstrukcija

Pod otkazom u smislu pouzdanosti podrazumeva se prestanak sposobnosti konstrukcije da vrši zahtevanu funkciju. U toku eksploatacije mašinske konstrukcije i njihovi sastavni elementi mogu se naći u jednom od dva

moguća stanja: ispravnom ili neispravnom. U ispravnom stanju karakteristike mašinske konstrukcije zadovoljavaju propisane zahteve, kako radne, tako i sporedne kao što su izgled, pogodnost za eksploataciju i sl. Svako odstupanje od propisanih radnih zahteva može se smatrati otkazom ili neispravnošću.

Otkaz je događaj koji mašinsku konstrukciju dovodi iz ispravnog stanja (stanja radne sposobnosti) u neispravno stanje. Dakle, otkaz predstavlja potpuni ili delimični gubitak radne sposobnosti konstrukcije.

Kod mašinskih konstrukcija se mogu sresti i tzv. drugostepene neispravnosti – defekti, koje ne narušavaju njihov ispravan rad i sistemi se mogu koristiti i posle te vrste neispravnosti bez bojazni za ispravno obavljanje zadataka.

Osim toga, moguće je govoriti o relevantnim i irelevantnim otkazima (tj. oni koji se uzimaju odnosno ne uzimaju u proračunu). Pod relevantnim se podrazumevaju greške u primeni, greške konstrukcije, greške izrade kao i promena karakteristika izvan onih utvrđenih tehničkom dokumentacijom. Pod irelevantnim otkazima podrazumevaju se greške instaliranja i postavljanja, greške rukovanja, sva slučajna oštećenja kao i greške izazvane nepravilnom primenom opreme za ispitivanje.

Da bi se lakše analizirali, otkazi se klasifikuju. Kriterijuma klasifikacije ima više, pa je u Tabeli 1.1 dat pregled vrsta otkaza prema raznim kriterijumima klasifikacije. Jedan otkaz može odgovarati raznim kriterijumima pa će na taj način biti razvrstan u više vrsta.

1. Neočekivani (iznenadni) otkazi

Otkaz koji je nastao kao rezultat nagle promene jednog ili više parametara mašinske konstrukcije zove se neočekivani otkaz. Javlja se usled nagomilavanja neispravnosti i oštećenja. Naziv potiče otuda što obično izostaju vidni znaci njihovog približavanja, tj. pre nastupanja takvog otkaza obično se ispoljavaju kvantitativne promene karakteristika konstrukcije. Uzroci neočekivanog otkaza u većini slučajeva su skriveni defekti materijala i delova konstrukcije, ali i nepravilna upotreba. Ovaj otkaz je konačan i dovodi mašinsku konstrukciju do potpunog gubitka radne sposobnosti.

2. Postepeni otkaz

On se karakteriše postepenom izmenom jednog ili više parametara konstrukcije. Postepeni otkazi se javljaju kao posledica pohabanosti materijala, starenja materijala, itd. Karakteristično je da se promena parametra može registrovati pomoću mernih instrumenata. Parametri konstrukcije mogu u toku rada dostići kritične vrednosti, pri kojim je stanje nezadovoljavajuće, tj. dolazi do otkaza. Pošto trenutak u kome neki od posmatranih parametara napušta dozvoljene granice nije tačno određen, teško je ustanoviti da li je otkaz nastao usled neočekivane ili postepene promene. U tom smislu, podela na neočekivane i postepene otkaze je uslovna i među njima nema principijelne razlike. Neočekivani otkazi, u velikom broju slučajeva, nastaju kao rezultat postepene, ali skrivene promene parametara.

3. Zavisni i nezavisni otkaz

Otkazi su slučajni događaji, koji mogu biti zavisni i nezavisni. Otkaz je zavisan, ako se pri pojavi jednog otkaza menja verovatnoća pojavljivanja drugog otkaza. Kod nezavisnih otkaza verovatnoća pojavljivanja jednog otkaza ne zavisi od činjenice da li su se desili drugi otkazi ili ne. Nezavisan je otkaz elementa, koji nije uslovljen kvarovima i otkazima drugih elemenata sistema. Najčešće nastaje u jednom elementu. Zavisan otkaz je otkaz elementa, koji je uslovljen kvarovima i otkazima drugih elemenata.

4. Potpun i delimičan otkaz

Po osnovu kriterijuma mogućnosti koršćenja posle nastajanja otkaza, otkazi se dele na potpune i delimične. Otkaz, posle čijeg se nastanka konstrukcija ne može koristiti do popravke je potpuni otkaz. Mnogi elementi se posle potpunog otkaza ne mogu opraviti. Posle nastajanja delimičnog otkaza, postoji mogućnost delimičnog korišćenja konstrukcije. Ovaj otkaz ima za posledicu samo pogoršanje neke karakteristike konstrukcije.

5. Permanentni otkaz i otkaz koji se sam otklanja

Po prirodi eliminisanja otkaza razlikuju se permanentni otkazi i otkazi koji se sami otklanjaju. Pri permanentnim otkazima radi uspostavljanja radne sposobnosti konstrukcije neophodno je izvršiti njenu opravku (regulisanje). Otkaz koji se sam otklanja i čije je trajanje malo u poređenju sa vremenom roka do sledećeg otkaza je prolazni otkaz.

6. Slučajni otkazi

Otkazi kod kojih je intenzitet otkaza konstantan zovu se slučajni otkazi. Tada su otkazi uslovljeni mnogim statističkim uticajima koji potiču od međusobno nezavisnih faktora.

7. Sistematski otkazi

Intenzitet otkaza kod ove vrste otkaza je promenljiv u toku vremena, i uslovljen određenim uticajem nekog od mehanizama otkaza. U ovu grupu spadaju rani otkazi i otkazi usled starenja. U početku korišćenja neke konstrukcije obično se javlja veći broj otkaza koji se mogu pripisati početnim slabostima ili propuštenim efektima u toku proizvodnje. To su tzv. rani otkazi. Kod njih se intenzitet otkaza naglo smanjuje u toku vremena a pojavljuju se u relativno kratkom periodu vremena. U početnom periodu rada, koji se u praksi zove uhodavanje (*running-in*), odmah posle puštanja u rad nepouzdana konstrukcija brzo otkazuje. Statistički podaci o eksploataciji različitih ureaja pokazuju da se 50 % svih otkaza otkriva u inicijalnom periodu rada konstrukcije. Period uhodavanja traje nekoliko desetina, pa i nekoliko stotina sati, zavisno od složenosti, namene i komplikovnosti konstrukcije. Ispitivanja pokazuju da se posle procesa uhodavanja intenzitet otkaza značajno smanjuje. Međutim, treba napomenuti i da vreme uhodavanja utiče na povećanje cene proizvodnje. Otkazi koji su posledica dotrajalosti i starenja, pojavljuju se usled procesa istrošenosti i habanja elemenata i njihov intenzitet otkaza raste sa vremenom.

Tabela 1.1: Podela otkaza po raznim kriterijumima klasifikacije

Kriterijum manifestacije	Vrsta otkaza
Vrsta izmene stanja	Neočekivani (iznenadni) otkaz Postepeni (degradacioni) otkaz
Veza sa drugim otkazima	Nezavisni otkaz Zavisni otkaz
Mogućnost korišćenja posle otkaza	Potpuni otkaz Delimični otkaz
Priroda eliminisanja otkaza	Permanenti otkaz Otkaz koji se sam otklanja
Spoljna manifestacija otkaza	Očigledan otkaz Prikriven otkaz
Uzrok nastajanja otkaza	Konstrukcioni otkaz Tehnološki otkaz Eksploatacioni otkaz
Priroda nastajanja otkaza	Prirodni otkaz Veštački otkaz
Vreme nastajanja otkaza	Otkazi pri ispitivanju Otkazi u periodu priprema Otkazi pri normalnoj eksploataciji Otkazi pri kraju perioda eksploatacije
Po intenzitetu otkaza	Slučajni otkazi Sistematski otkazi

2. Osnovni pokazatelji pouzdanosti

Matematičko predstavljanje pokazatelja pouzdanosti je povezano sa teorijom verovatnoće i matematičkom statistikom. Pri praktičnom određivanju pokazatelja pouzdanosti važno je da u skupu posmatranih uzoraka, na osnovu kojeg se izvode zaključci o pouzdanosti konstrukcije, uzroci otkaza svakog uzorka budu isti. Ovakvi skupovi su statistički homogeni. U praksi je moguće realizovati statistički homogen skup. Homogeni slup predstavljaju konstrukcije proizvedene na istoj proizvodnoj traci, od elemenata koje su proizveli isti proizvođači (npr. svi ležaji u prenosniku snage su od istog proizvođača).

2.1 Odabir pokazatelja pouzdanosti

Pri izboru pokazatelja pouzdanosti mašinskih konstrukcija treba imati u vidu neke očigledne preporuke:

- broj pokazatelja pouzdanosti treba da bude što je moguće manji,
- treba izbegavati složene, kompleksne pokazatelje, koji se dobijaju u obliku nekih grupa kriterijuma,
- izabrani pokazatelji pouzdanosti moraju obezbediti mogućnost provere u fazi projektovanja,
- izabrani pokazatelji pouzdanosti moraju imati prost fizički smisao,
- izabrani pokazatelji pouzdanosti moraju omogućiti statističku (eksperimentalnu) procenu pri specijalnim ispitivanjima ili po eksploatacionim rezultatima,
- izabrani pokazatelji pouzdanosti moraju omogućiti zadavanje pouzdanosti u kvantitativnom obliku.

Treba imati na umu da podatak o pouzdanosti konstrukcije nije dobijen matematiziranjem, već ga svi veliki proizvođači daju kao tehnički podatak koji se dobija na bazi obrade mnoštva eksperimentalnih podataka i to kao funkciju mnogih faktora kao što su mehanička i termička opterećenja, uticaj okoline, uslovi upotrebe, klasa kvaliteta komponenata, itd. Prema tome, prognoza pouzdanosti konstrukcije je matematička metoda bazirana na eksperimentalno utvrđenim podacima o pouzdanosti komponenata koje su u konstrukciju ugrađene.

2.2 Funkcija pouzdanosti

Funkcija pouzdanosti je neprekidna opadajuća funkcija:

$$R(t) \approx \frac{n_1(t)}{n} \quad (2.1)$$
$$R(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{n_1(t)}{n}.$$

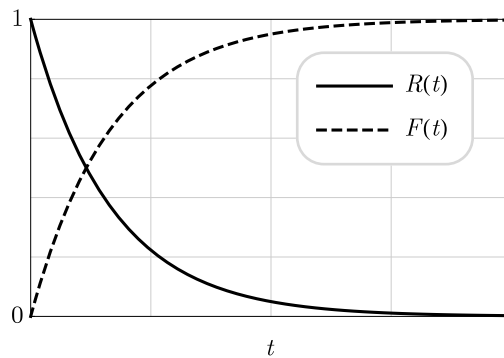
Promena pouzdanosti u toku vremena neke mašinske konstrukcije prikazana je na Slici 2.1 punom crnom linijom.

2.3 Funkcija nepouzdanosti

Funkcija nepouzdanosti je neprekidna rastuća funkcija:

$$F(t) \approx \frac{n_0(t)}{n} = \frac{n - n_1(t)}{n} = 1 - R(t) \quad (2.2)$$

gde je $n_0(t)$ broj elemenata koji nije izvršio svoju funkciju u posmatranom vremenskom periodu. Promena nepouzdanosti u toku vremena neke mašinske konstrukcije prikazana je na Slici 2.1 crnom isprekidanom linijom.



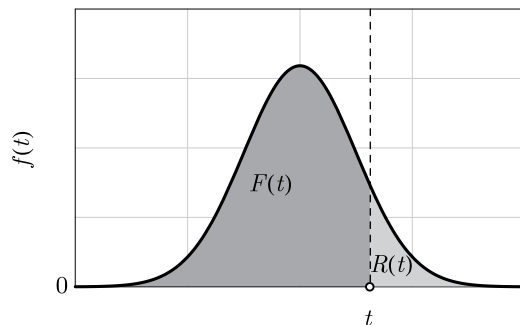
Slika 2.1: Promena funkcija pouzdanosti i nepouzdanosti u toku vremena

2.4 Funkcija gustine otkaza

Na osnovu funkcije gustine otkaza, Slika 2.2, koja se određuje na osnovu izraza:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (2.3)$$

može se odrediti pouzdanost i nepouzdanost mašinske konstrukcije ili neke njene komponente.



Slika 2.2: Funkcija gustine otkaza

Nepouzdanost $F(t)$ je određena površinom ispod funkcije gustine otkaza $f(t)$ u intervalu od 0 ili $-\infty$ do posmatranog vremena t :

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt \quad (2.4)$$

Pouzdanost je određena površinom ispod funkcije gustine otkaza $f(t)$ u vremenskom intervalu $(t \dots +\infty)$:

$$R(t) = \int_t^{+\infty} f(t) dt \quad (2.5)$$

U tehničkoj praksi se najčešće koriste sledeće funkcije raspodele gustine otkaza $f(t)$: eksponencijalna, normalna i Weibulova.

Između funkcija pouzdanosti $R(t)$, nepouzdanosti $F(t)$ i gustine otkaza $f(t)$ može se uspostaviti sledeća zavisnost:

$$\begin{aligned}
 R(t) &\approx \frac{n_1(t)}{n} = \frac{n - n_0(t)}{n} = 1 - \frac{n_0(t)}{n} = 1 - F(t) \\
 \frac{dR(t)}{dt} &= \frac{d}{dt} \left(1 - \frac{n_0(t)}{n} \right) = -\frac{1}{n} \cdot \frac{dn_0(t)}{dt} \\
 f(t) &= -\frac{1}{n} \cdot \frac{dn_0(t)}{dt} \\
 \int_1^R dR(t) &= -\int_0^t f(t) dt \\
 R(t) &= 1 - F(t) \\
 \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) dt &= 1
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

U posmatranom vremenskom intervalu Δt funkcija gustine otkaza $f(t)$ može se odrediti približno:

$$f(t) \approx \frac{n_1(t) - n_1(t + \Delta t)}{n \cdot \Delta t} = \frac{n_0(t)}{n \cdot \Delta t} \tag{2.7}$$

2.5 Funkcija intenziteta otkaza

Funkcija intenziteta otkaza pokazuje promenu intenziteta otkaza u toku vremena, odnosno pokazuje meru relativne količine otkaza u jedinici vremena (brzinu priraštaja otkaza u jedinici vremena):

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \approx \frac{\frac{n_0(\Delta t)}{n \cdot \Delta t}}{\frac{n_1(t)}{n}} = \frac{n_0(\Delta t)}{n_1(t) \cdot \Delta t} \tag{2.8}$$

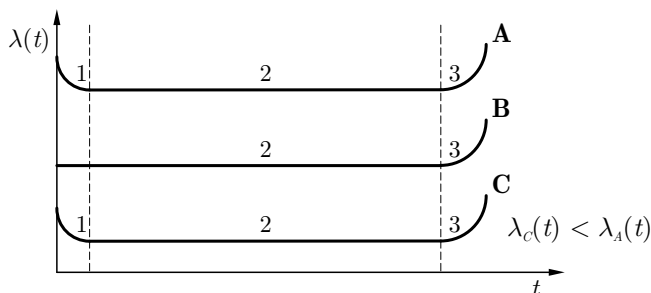
Zavisnost između funkcije pouzdanosti $R(t)$ i funkcije intenziteta otkaza $\lambda(t)$ može se uspostaviti na sledeći način:

$$\begin{aligned}
 \frac{dR(t)}{dt} &= -\frac{1}{n} \cdot \frac{dn_0(t)}{dt} \Big/ \frac{1}{n_1(t)} \\
 \frac{n}{n_1(t)} \cdot \frac{dR(t)}{dt} &= -\frac{n}{n_1(t)} \cdot \frac{dn_0(t)}{dt} = -\lambda(t) \\
 \int_1^R \frac{dR(t)}{R(t)} &= -\int_0^t \lambda(t) dt \\
 \ln R(t) &= -\int_0^t \lambda(t) dt \\
 R(t) &= e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

Verovatnoća bezbednog (pouzdanog) rada mašinske konstrukcije u vremenskom intervalu $(t_1 \dots t_2)$:

$$R(t) = e^{-\int_{t_1}^{t_2} \lambda(t) dt} \tag{2.10}$$

U opštem slučaju, kriva **A** na Slici 2.3, u oblasti 1 u početku korišćenja mašinske konstrukcije intenzitet otkaza je povećan zbog skrivenih grešaka ili propusta u konstruisanju, proizvodnji, montaži ili podešavanju. Ovaj period ranih otkaza često se naziva periodom dečijih bolesti. Period povećanog intenziteta otkaza može se znatno redukovati, ili u potpunosti izbeći visokom kontrolom procesa konstruisanja, proizvodnje i montaže. Često se u cilju smanjenja otkaza u ranom garantnom periodu, mašinska konstrukcija ispituje kod proizvođača, sa povećanim intenzitetom opterećenja, da bi se slabe komponente ili skrivene greške uklonile (kriva **B** na Slici 2.3). Može se zaključiti da su rani otkazi posledica neadekvatnog kvaliteta: konstruisanja, materijala, termičke obrade, tehnologije obrade, montaže, podešavanja. . .



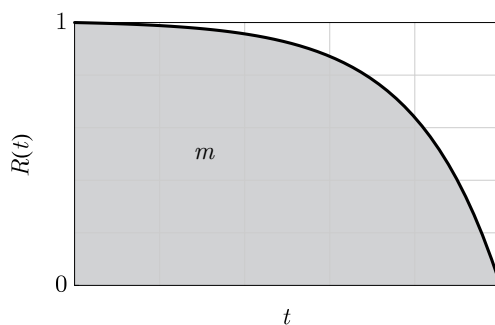
Slika 2.3: Funkcija intenziteta otkaza različitih konstrukcija

U oblasti 2 prisutni su slučajni otkazi. Intenzitet otkaza je približno konstantan u korisnom veku mašinske konstrukcije i prvenstveno zavisi od kvaliteta održavanja i odstupanja realnih radnih uslova od propisanih uslova. U radu kontaktne površine mašinskih delova su izložene različitim vidovima površinskog razaranja (habanje, piting, erozija, abrazija. . .), usled čega se materijal "troši", a komponentama mašinske konstrukcije se smanjuju dimenzije i znatno narušavaju početne tolerancije dimenzija, oblika, položaja i kvaliteta površina (hrapavosti). Usled ovih pojava intenzitet otkaza usled istrošenosti (starenja) mašinske konstrukcije naglo raste (oblast 3 na dijagramu sa Slike 2.3). U životnom veku proizvoda broj otkaza se može smanjiti, a koristan vek produžiti, detaljnim razvojem proizvoda i većim stepenom kontrole konstruisanja, proizvodnje, montaže i održavanja (kriva **C** na slici).

2.6 Srednje vreme bezotkaznog rada (srednje vreme između otkaza)

Srednje vreme bezotkaznog rada jednako je površini ispod funkcije pouzdanosti, Slika 2.4:

$$m(t) = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (2.11)$$



Slika 2.4: Srednje vreme bezotkaznog rada

Ako se ispituje n istih mašinskih konstrukcija ili komponenti, pri čemu se registruje vreme otkaza t_1, t_2, \dots, t_n onda se očekivano srednje vreme bezotkaznog rada može odrediti približno na sledeći način:

$$m = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} \quad (2.12)$$

pod pretpostavkom da je ponašanje mašinske konstrukcije ili delova u pogledu intenziteta otkaza isto kao kod novih sistema, odnosno mašinskih konstrukcija ili delova.

Ako se pri ispitivanju n uzoraka, ispitivanje prekine, obično iz ekonomskih razloga ili hitnosti rezultata ispitivanja, posle ispitanih do pojave otkaza r uzoraka, u tom slučaju procenjeno srednje vreme bezotkaznog rada se može odrediti kao:

$$m \approx \frac{\sum_{i=1}^r t_i + (n - r) \cdot t_r}{r} \quad (2.13)$$

pri čemu je t_r vreme trajanja ispitivanja dok se nije razorio i poslednji posmatrani uzorak.

Primer 1

Ispitivano je 8 hidrauličnih komponenti u laboratorijskim uslovima. U toku ispitivanja merena su vremena rada do pojave otkaza. Podaci o otkazima dati su u priloženoj tabeli. Odrediti funkciju gustine otkaza $f(t)$, funkciju intenziteta otkaza $\lambda(t)$ i funkciju pouzdanosti $R(t)$.

Redni broj otkaza	Vreme rada u časovima [h]
1	7
2	18
3	39
4	68
5	104
6	145
7	201
8	262

Ako postoji ukupno n komponenti koje se ispituju počev od vremena $t = 0$, onda će u bilo kom trenutku vremena t biti $n_1(t)$ komponenti koje nisu otkazale. U tom slučaju empirijska funkcija gustine otkaza $f(t)$ data je izrazom:

$$f(t) = \frac{n_1(t_i) - n_1(t_i + \Delta t_i)}{n \cdot \Delta t_i} = \frac{n_0(\Delta t_i)}{n \cdot \Delta t_i},$$

gde je $t_i \leq t \leq t_i + \Delta t_i$. Funkcija $f(t)$ jednaka je odnosu između broja otkaza u intervalu vremena Δt_i i ukupnog broja komponenti, podeljenom sa dužinom vremenskog intervala Δt_i .

Funkcija intenziteta otkaza $\lambda(t)$ jednaka je odnosu između broja otkaza u vremenskom intervalu Δt_i i broja elemenata koji nisu otkazali na početku tog intervala, podeljenom sa dužinom vremenskog intervala Δt_i :

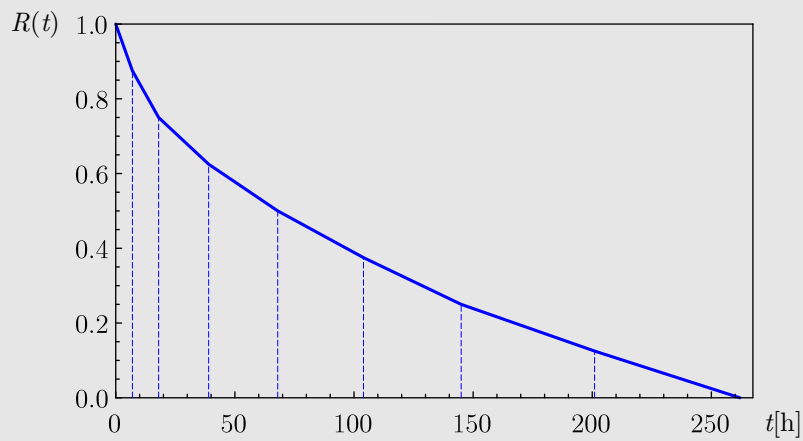
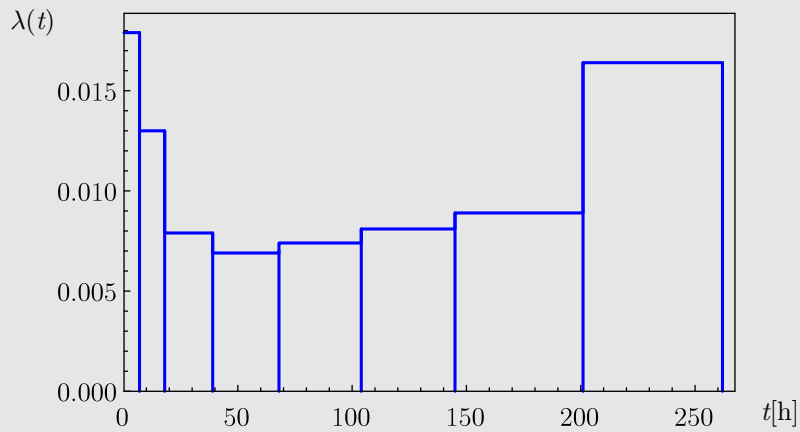
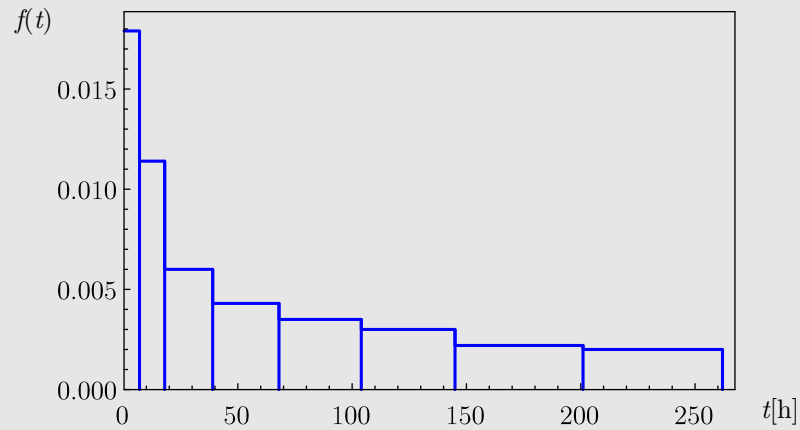
$$\lambda(t) = \frac{n_1(t_i) - n_1(t_i + \Delta t_i)}{n_1(t_i) \cdot \Delta t_i} = \frac{n_0(\Delta t_i)}{n_1(t_i) \cdot \Delta t_i}$$

gde je $t_i \leq t \leq t_i + \Delta t_i$.

Funkcija $f(t)$ mera je sveukupne brzine pojave otkaza, dok je $\lambda(t)$ mera trenutne brzine pojave otkaza. Vremenski interval Δt_i predstavlja vreme između otkaza, pri čemu prvi interval počinje od $t = 0$, a otkaz se događa na kraju vremenskog intervala. Upotrebom prikazanih izraza može se formirati sledeća tabela.

Δt_i [h]	$f(t)$	$\lambda(t)$	$R(t)$
0 – 7	$\frac{1}{8 \cdot 7} = 0,0179$	$\frac{1}{8 \cdot 7} = 0,0179$	$\frac{7}{8} = 0,8750$
7 – 18	$\frac{1}{8 \cdot 11} = 0,0114$	$\frac{1}{7 \cdot 11} = 0,0130$	$\frac{6}{8} = 0,7500$
18 – 39	$\frac{1}{8 \cdot 21} = 0,0060$	$\frac{1}{6 \cdot 21} = 0,0079$	$\frac{5}{8} = 0,6250$
39 – 68	$\frac{1}{8 \cdot 29} = 0,0043$	$\frac{1}{5 \cdot 29} = 0,0069$	$\frac{4}{8} = 0,5000$
68 – 104	$\frac{1}{8 \cdot 36} = 0,0035$	$\frac{1}{4 \cdot 36} = 0,0074$	$\frac{3}{8} = 0,3750$
104 – 145	$\frac{1}{8 \cdot 41} = 0,0030$	$\frac{1}{3 \cdot 41} = 0,0081$	$\frac{2}{8} = 0,2500$
145 – 201	$\frac{1}{8 \cdot 56} = 0,0022$	$\frac{1}{2 \cdot 56} = 0,0089$	$\frac{1}{8} = 0,1250$
201 – 262	$\frac{1}{8 \cdot 61} = 0,0020$	$\frac{1}{1 \cdot 61} = 0,0164$	$\frac{0}{8} = 0$

Grafički prikaz funkcija $f(t)$ i $\lambda(t)$ u obliku histograma, kao i funkcije $R(t)$ u obliku poligona dati su na sledećoj stranici.



Sa prikazanih dijagrama može se zaključiti da funkcija $\lambda(t)$ ima izražena sva tri perioda, što ukazuje na to da postoje sve tri vrste otkaza: rani, slučajni i usled starenja.

2.7 Klasiranje

Izdvajanje velikog broja podataka skupa ne daje preglednu sliku statističkog skupa. Da bi se dobila grafička predstava o učestanosti pojave otkaza vrši se, u slučaju velikog broja podataka (većeg od 25), grupisanje podataka. Apsisa se deli na vremenske intervale koji se označavaju kao klase. Brojevi otkaza se sređuju po klasama. Interval statističkog skupa:

$$I = t_{\max} - t_{\min}, \quad (2.14)$$

se deli na z klasa dužine Δt , tako da je:

$$\Delta t = \frac{I}{z} = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{z} \quad \text{ili} \quad \Delta t = \frac{t_{\max}}{z}, \quad (2.15)$$

gde je:

t_{\min} – vreme prve pojave otkaza, ili, često $t_{\min} = 0$, zbog početka posmatranja od $t = 0$,

t_{\max} – vreme poslednje pojave otkaza.

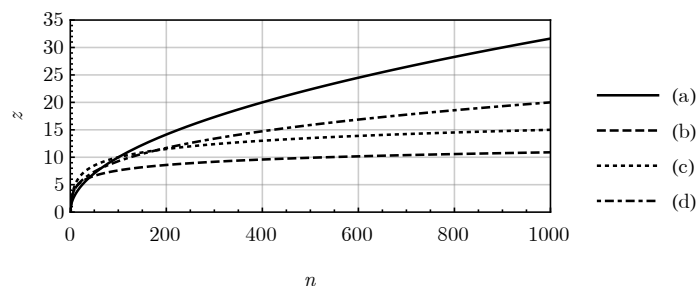
Uobičajeno je da su veličine klasa od $t = 0 \dots t_{\max}$, jednake širine, ali se često koriste i različite širine klasa zbog broja realizacija otkaza u njima.

Podela vremenske ose na klase i uređenje vremena otkaza u pojedine klase označava se kao klasiranje. Ovim postupkom gube se informacije o tačnom vremenu otkaza pošto se sistematizuju brojevi otkaza pojedinih učestanosti u intervale. Međutim, nasuprot gubitku informacija o tačnom vremenu otkaza dobija se na očiglednosti.

Pitanje broja klasa suptilno je pitanje. Broj klasa se ne može uvek jednostavno ustanoviti. Broj klasa se bira tako da se ne izgubi previše informacija. Ako se u ekstremnim slučajevima dobije samo jedan stubić u histogramu, prirodno je da on vrlo malo kazuje. Iskustvene preporuke za određivanje broja intervala z , vezane su za broj posmatranih otkaza n . Kao grubo približenje, odnosno prva procenjena vrednost za broj klasa z , mogu da posluže sledeći izrazi:

$$\begin{aligned} z &\approx \sqrt{n}, & (a) \\ z &\approx 1 + 3,3 \log n, & (b) \\ z &\approx 5 \cdot \log n, & (c) \\ z &\approx 2 \cdot \sqrt[3]{n} & (d) \end{aligned} \quad (2.16)$$

Do određene vrednosti n prikazani izrazi daju približno jednake rezultate. Navedene izraze ne treba šablonski primenjivati, ali je neophodno pridržavati se osnovnog principa da, što je veći broj podataka i broj klasa treba da je što veći. Pri tome treba voditi računa da se izrazi za z (2.16) značajno razlikuju pri velikom broju uzoraka. Na dijagramu sa Slike 2.5 prikazana je zavisnost broja klasa z od broja uzoraka n , određena na osnovu različitih izraza iz jednačine (2.16). Značajne razlike između izraza javljaju se pri $n > 100$.



Slika 2.5: Uticaj broja otkaza n na broj klasa z

Uobičajeno je da broj klasa bude $z \leq 5 \dots 12$, što zavisi od broja posmatranih otkaza n . Potrebno je izbegavati prazne klase (spajanjem susednih klasa). Ako otkaz padne na granicu dve klase, onda se on po pola ubraja u obe granične klase. Veštim izborom klasa ova situacija se najčešće može izbeći. Takođe, ako se pretpostavi simetrična raspodela, preporučuje se neparan broj intervala.

Primer 2 U laboratorijskim uslovima ispitivano je 16 istih mašinskih delova, čija su vremena do pojave otkaza data u priloženoj tabeli. Potrebno je izvršiti klasifikaciju, i prikazati histogram funkcije gustine otkaza $f(t)$ za dati skup podataka.

Vreme do pojave otkaza [h]			
4730	4430	4670	5600
5030	4930	4070	5190
5290	4720	4570	4320
5290	5580	6540	4660

Korišćena literatura

1. Vujanović N. (1990) **Teorija pouzdanosti tehničkih sistema**, Vojnoizdavački i novinski centar;
2. Ristivojević M. (2022) **Pouzdanost konstrukcija**, izvodi sa predavanja;
3. Ognjanović M. (2007) **Razvoj i dizajn mašina**, Mašinski fakultet Beograd;
4. Ivanović G. (1987) **Pouzdanost tehničkih sistema – zbirka rešenih zadataka**, Mašinski fakultet Beograd;
5. Ramović R. (2005) **Pouzdanost sistema – elektronskih, telekomunikacionih i informacionih**, Elektrotehnički fakultet Beograd;
6. Milčić D. (2005) **Pouzdanost mašinskih sistema**, Mašinski fakultet Niš;
7. Bertsche B. (2008) **Reliability in Automotive and Mechanical Engineering**, Inst. Maschinenelemente Universitat Stuttgart;
8. Kecicoglu D. (2003) **Robust Engineering: Design-By-Reliability**, Department of Aerospace and Mechanical Engineering The University of Arizona;