

**Факултет инжењерских наука
Универзитета у Крагујевцу**



Назив студијског програма: Машинско инжењерство
Ниво студија: Основне академске студије
Модул: Машинске конструкције и механизација
Предмет: Поузданост машинских система
Број индекса: 91/2010

Урош М. Кркотић

**Показатељи поузданости
елемената машинских система**

завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Добривоје Ћатић, ред. проф. - ментор
2. _____
3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да обради следеће теме:

- ПОДЕЛА ПОКАЗАТЕЉА ПОУЗДАНОСТИ,
- ПОКАЗАТЕЉИ ИСПРАВНОГ РАДА,
- ПОКАЗАТЕЉИ ТРАЈНОСТИ,
- ПОКАЗАТЕЉИ ТЕХНИЧКОГ ОДРЖАВАЊА И
- ЕКОНОМСКИ ПОКАЗАТЕЉИ ПОУЗДАНОСТИ.

Препоручена литература:

[1] Јовичић С., Основи поузданости машинских конструкција, Научна књига, Београд, 1990.

[2] Ћатић Д., Развој и примена теорије поузданости, монографија, Крагујевац, 2005.

[3] Bertsche B., Reliability in Automotive and Mechanical Engineering. VDI-Buch Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.

Крагујевац, октобар 2013.

ментор:
Др Добривоје Ћатић, ред. проф.

Резиме

У раду је обрађена проблематика проучавања и одређивања показатеља поузданости машинских система.

Растом сложености машинских система, поузданост и расположивост се све више приближавају критичним вредностима. Технолошки напредак омогућио је стварање нових, сложених машина и уређаја са високим захтевима у погледу радних и економских показатеља, што је захтевало да се посебна пажња посвети њиховом предвиђању квалитета, трајности и спремности да извршавају своју функцију.

За конструктора и технолога најважнији задаци су повећање времена исправног рада, трајност и прилагођеност условима експлоатације машинских система а да се притом економски импути одрже на оптималном нивоу.

У раду се приказује приступ поузданости, расположивости и одржавања система путем анализе параметара поузданости. Анализирају се неки проблеми и искуства примене класичне теорије поузданости, која се заснива на показатељима исправног рада, трајности, техничког одржавања и економским показатељима и указује на могућност обезбеђења поузданости и одржавања погонске спремности савремених техничких система.

Дате су теоретске поставке параметара поузданости као и смернице за њихову практичну примену.

Кључне речи: поузданост, расположивост, трајност, економичност, одржавање.

Abstract

This paper deals with the study of the figures and the dependability of mechanical systems.

Increase in the complexity of mechanical systems, reliability and availability are increasingly approaching the critical values. Technological advances have enabled the creation of new, complex machines and devices with high demands in terms of jobs and economic indicators, which is required to pay special attention to their prediction quality, durability and willingness to carry out its function.

For designers and technologists most important tasks are to increase uptime, durability and adaptability of operating conditions of mechanical systems and the economic inputs while maintaining an optimal level.

This paper provides an approach to reliability, availability and maintenance of the system by analyzing the reliability parameters. Analyze some of the problems and experiences to the standard theory of reliability, which is based on indicators of proper operation, durability, maintenance, and technical and economic indicators point to the possibility of providing the reliability and maintenance of operational readiness of modern technical systems.

The paper provides the theoretical reliability parameters and guidelines for their practical application.

Keywords: reliability, availability, durability, cost, maintenance.

САДРЖАЈ:

1. Увод	1
2. Историјски развој теорије поузданости.....	3
3. Дефиниције поузданости.....	6
4. Подела показатеља поузданости	8
5. Показатељи исправног рада	11
5.1 Вероватноћа исправног рада.....	11
5.2 Интензитет отказа	13
5.3 Параметар тока отказа	15
5.4 Временски променљив степен сигурности.....	17
5.5 Процена показатеља исправног рада	18
5.5.1 Бројне карактеристике времена рада до отказа.....	18
6. Показатељи трајности.....	27
7. Показатељи техничког одржавања.....	29
7.1 Одржавање и поузданост	31
8. Економски показатељи поузданости	34
8.1 Цена и сигурност.....	36
8.2 Трошкови одржавања	37
9. Закључак	39
10. Литература	41

1. УВОД

Технолошки напредак омогућио је стварање нових, сложених машина и уређаја са високим захтевима у погледу радних и економичних показатеља, што је захтевало да се посебна пажња посвети њиховом квалитету, трајности и спремности да извршавају своју функцију [1]. Томе је допринела наука о поузданости.

Најједноставније речено поузданост је способност објекта (компоненте, уређаја, система) да успешно обавља задату функцију, под одређеним условима, у датом временском интервалу.

Поузданост је вероватноћа, на одређеном нивоу поверења, да ће систем успешно, без отказа, обавити функцију за коју је намењен, унутар специфицираних граница перформанси, у току специфицираног времена трајања задатака, када се користи на прописани начин и у сврху за коју је намењен, под специфицираним нивоима оптерећења, узимајући у обзир и претходно време коришћења система.

За конструктора и технолога најважнији задаци су повећање времена исправног рада, трајност и прилагођеност условима експлоатације машинских система. При планирању поузданости машинских система мора се водити рачуна о економским аспектима конструкције јер је циљ да уложена средства за повећање поузданости буду враћена кроз експлоатацију.

О поузданости машинских система се мора води рачуна још у процесу пројектовања. То значи да се у фази пројектовања поузданост утемељује, у фази израде обезбеђује, а у процесу експлоатације реализује.

При пројектовању машинских система на поузданост се може утицати дизајном машинских делова и склопова, избором материјала, избором методе заштите од спољних утицаја, избором подмазивања и избором одржавања и сл.

При изради се на поузданост може утицати квалитетом израде делова, контролом производње, управљањем технолошког процеса и сл.

При експлоатацији на поузданост утичу услови експлоатације, техничко одржавање, режим рада и сл.

Појмови у теорији поузданости су по правилу везани за случајне појаве које се математички описују коришћењем теорије вероватноће [2]. Сваки отказ објекта је случајан догађај, време исправног рада до отказа је случајна величина, а процес који доводи до губитка радне способности је случајна функција времена. Показатељи поузданости могу се поделити на: показатеље исправног рада, трајности, техничког одржавања и економске показатеље поузданости.

Избор показатеља зависи од опште намене система, али на њега може такође утицати и значај функција, које извршава систем [2]. При избору показатеља поузданости техничког система, треба имати у виду неке очигледне препоруке:

- број показатеља поузданости треба да буде што је могуће мањи;
- треба избегавати сложене комплексне показатеље, који се добијају у облику неких група критеријума;
- изабрани показатељи поузданости морају обезбедити могућност провере у фази пројектовања;
- изабрани показатељи поузданости морају имати прост физички смисао;

- изабрани показатељи поузданости морају омогућити статистичку (експерименталну) процену при специјалним испитивањима или по резултатима експлоатације;

- изабрани показатељи поузданости морају омогућити задавање поузданости у квантитативном облику.

Од савремених техничких система захтева се висок ниво поузданости, уз истовремено смањење трошкова и скраћења времена развоја. Поузданост игра важну улогу, поготово у сектору техничких производа као што су возила, ручни алати или потрошачка електроника где се због великог броја функција, као и сложености њиховог извршавања врло брзо утврђује степен поузданости. Наука о поузданости техничких направа и система се темељи на примени теорије вероватноће и математичке статистике. Ове математичке дисциплине су омогућиле разраду специјалних метода прорачуна основних показатеља поузданости.

2. ИСТОРИЈСКИ РАЗВОЈ ТЕОРИЈЕ ПОУЗДАНОСТИ

За велике машинске системе, управљање дизајном и поузданошћу постаје важно питање. За сада нема јасних доказа да су се у Месопотамији (6000 - 1100. г. п.н.е.), цивилизацији долине Инда (3300 – 1300. п.н.е.), Старом царству Египта (3000 - 2000. п.н.е.), и другим старим цивилизацијама, бавили проучавањем нечега што би личило на модерну теорију вероватноће [3]. Тачније речено, за сада ми немамо доказе о постојању директних утицаја ових старих цивилизација на стварање модерне науке о вероватноћи.

Имхотеп, који је изградио прву познату египатску пирамиду, у Сахари, око 2650. године п.н.е, може се назвати првим пројектантом. Инжењерски цртежи везани за пројектовање и њихова историја могу се пратити уназад до 4000 године пре нове ере, када је халдејски инжењер Гудеа угравирано на камену плочу план тврђаве.

Реченица која је пронађена на глиненој плочици у архивама фирме “Синови Мурасу” из Ниппура у Индији, која датира из тридесет пете године владавине Артаксереса I, 429. године пре нове ере, јасно говори о томе колико је појам поузданости стар и гласи: “Што се тиче златног прстена са смарагдом, ми гарантујемо да следећих двадесет година смарагд неће испати из златног прстена [4]. Ако би смарагд испао из златног прстена пре него што прође двадесет година, ми ћемо исплатити Бел-Надиму-Схуму одштету од десет мана у сребру”.

Писани докази о употреби техничких цртежа сеже до само 30. године п.н.е када Витрувиус, римски архитекта, писао студије о архитектури. У 1849. години, у савременом контексту, американац Вилијам Минифи је био прва особа која је написала књигу о инжењерском дизајну под називом Геометријски цртежи.

Старе цивилизације су углавном биле заробљене идејом апсолутне истине. У науци су тражиле извесност сличну античкој грчкој чију доктрину је изражавао Платонов Федон у Дијалозима: “Аргументи на основу вероватноће су наметнути”. Тек се Карнеад (грч. Καρνεάδης, 214/3-129/8 г. п.н.е.) у 2. веку п.н.е. померио из традиционалног грчког реализма ка почетној теорији вероватноће разликујући три врсте могућности, али без дубљег разумевања случајног догађаја и шансе. Затим је трајао дуги период стагнације у разумевању природе случајности све до краја средњег века, када је почео научни успон Европе.

Први радови европских математичара који су садржали основне идеје теорије вероватноће појавили су се у 16. и 17. веку и били у вези са одређивањем шанси добитка у играма на срећу. Такви радови могу се наћи код Кардана, Паскала и Ферме. Следећа етапа се везује за Јакоба Бернулија. Теорема коју је он доказао, а која се данас назива Бернулијев закон великих бројева, представљала је теоретску основу тада разматраних чињеница. Значајан допринос развоју теорије вероватноће дали су такође Муавр, Лаплас, Гаус, Пуасон, као и Чебишев, Марков и многи други научници. Аксиоматско заснивање теорије вероватноће је резултат радова Колмогорова из тридесетих година 20. века.

Ево неколико података из живота и рада научника који су својим радовима доприносили развоју Теорије вероватноће [3]. Дироламо (латински: Хијеронимус) Кардано (1501-1576), италијански математичар, филозоф и лекар. У младости се бавио искључиво медицином, да би касније постао професор математике у Болоњи и Милану. За Кардана се обично везују формуле за одређивање корена једначине трећег степена.

Кардано је написао књигу о играма са коцкицама и систематски обрадио рачунање вероватноћа догађаја у тим играма.

Блез Паскал (1623-1662), француски математичар, физичар и филозоф. Пре Паскала нико од математичара није рачунао вероватноће догађаја на начин на који се то и сада ради.

Пјер Ферма (1601-1665), француски правник и математичар. Бавио се теоријом бројева, геометријом, алгебром и теоријом вероватноће. Његова преписка са Блезом Паскалом је основ теорије вероватноће.

Јакоб Бернули I (1654-1705), швајцарски математичар. Његов допринос математици обухвата развој анализе бесконачно малих величина, теорије редова, варијационог рачуна и теорије вероватноће. У теорији вероватноће Јакоб Бернули је доказао један специјалан случај закона великих бројева и конструисао модел за описивање низа независних експеримената, тзв. Бернулијева, или биномна шема.

Абрахам де Муавр (1667-1754), енглески математичар рођен у Француској. Доказао је важну теорему из теорије вероватноће, и та теорема постоји у свим уџбеницима из ове области. У теорију вероватноће је увео појам случајног догађаја.

Пјер Симон Лаплас (1749-1827), француски математичар, физичар и астроном. Развио је и систематизовао резултате Паскала, Ферме, Бернулија. Доказао је теорему која се назива Муавр-Лапласова теорема. Увео је и појам математичког очекивања.

Џорџ Бул (1815-1864), енглески математичар. Оснивач математичке логике. Такође се бавио и теоријом вероватноће.

Андреј Николајевич Колмогоров (1903-1987) совјетски математичар. Са великим успехом бавио се многим математичким дисциплинама: анализом функција реалне променљиве, теоријом вероватноће, математичком статистиком и топологијом (то су само неке од области у којима су његови радови имали значајног утицаја).

Почетак брзог развоја поузданости као научне дисциплине везује се за 30-те године прошлог века, када је почео и нагли развој ваздухопловне индустрије [5]. Проблем поузданости постао је занимљив прво у техници. Врло брзо је уочено да са повећањем сложености техничког система његова поузданост брзо пада. То је довело до тога да се сматрало да ће поузданост представљати границу величине и сложености техничког система. Наиме, постојао је страх да ће поузданост великог и сложеног система бити тако мала да уопште неће имати смисла градити тај систем. Џон фон Нојман и други научници, истих 30 тих година 20 тог века, су доказали да поузданост не представља границу величине и сложености система, односно да је могуће изградити систем било које величине и сложености и било које поузданости.

Проучавање феномена поузданости довело је до стварања посебног научног правца тзв. Теорије поузданости чији је један од твораца Џон фон Нојман. У 1958. години американци су лансирали успешно само 28% сателита, док је сада та цифра 92% и има сталну тенденцију пораста.

У 1959. години, период гаранције за аутомобил износио је 90 дана или 6000 километара, док данас неки произвођачи већ нуде гаранцију од 10 година или 150000 километара.

Хидраулична пумпа на авиону ДЦ-8 првобитно је имала време између ремонта 1200 часова. Континуалним прикупљањем података о отказима, омогућене су конструкцијске измене које су повећале поузданост пумпе. Као резултат тога повећано је средње време између ремонта на 2000 часова, затим 4000 часова и најзад 5800 часова. Значи, повећана поузданост резултирала је смањењем трошкова одржавања.

Добро постављеним и вођеним програмом, поузданост система наоружања на авиону Ф-105 подигнута је са 0,7263 на 0,8986. Трошкови поузданости били су високи

25,5 милиона долара, али су зато и уштеде биле огромне, 54 милиона долара годишње у трошковима одржавања.

Инжењерски дизајн је добар само ако је ефикасан и поуздан. Историја управљања поузданости је знатно краћа него инжењерства и само се може пратити уназад до 1950. године. Вероватно први доказ који се односи на управљање поузданошћу је формирање ад хок комитета 1958. године за поузданост вођених ракета под вођством помоћника секретара за истраживање одбране и инжењерство. Војни спецификација, МИЛ - Р - 27542, резултат је напора Одељења одбране у развоју претпоставки за организовање програма предвиђања поузданости.

Историја је сведок многих пропуста у пројектовању, посебно, у непосредној прошлости два пропуста у дизајну имала су веома велики публицитет хаварија у нуклеарки Чернобил и хаварија летилице Челенцер.

Током година многи стручњаци су проучавали различите пропусте у дизајну и закључили да не може бити много различитих разлога за отказе производа у распону од једноставног отказа до катастрофе.

Теорија поузданости развија се данас као самостална научна дисциплина, заснована на теорији вероватноће и математичкој статистици, бавећи се поступцима планирања, дизајнирања, пројектовања, конструисања, производње односно израде уређаја и система, проблемима припреме, транспорта, прихватања и употребе производа или система са сврхом осигуравања максималне делотворности, као и развојем општих метода процењивања поузданости и расположивости, сигурности и ризика система на основу познавања поузданости и расположивости компонената система и метода повећања поузданости, расположивости и сигурности производа за време конструисања и производње, складиштења и употребе.

И више од тога: теорија поузданости утврђује правилности догађања отказа компонената и система и методе предвиђања.

У производњу и експлоатацију уводи једно од квантитативних обележја квалитета производа – поузданост и установљава да ли је нађена најекономичнија равнотежа између трошкова и погодности почетног дизајна, развоја и производње.

Без сумње, теорија поузданости сложена је научна дисциплина повезана с физиком, хемијом, електротехником, машинством, економијом итд. Међутим, велики број проблема теорије поузданости по својој природи има сасвим математички карактер и захтева употребу како познатог апарата математике тако и развијање новог. Проучавање и решавање многих проблема тражи примену теорије вероватноће и математичке статистике, будући да су, без обзира колико се трудили да одрже непромењене поступке технологије или услове рада у околини, случајни процеси су од великог утицаја.

3. ДЕФИНИЦИЈЕ ПОУЗДАНОСТИ

Отказ компонената у току времена и читавог система може се посматрати као случајна променљива [6]. Услови и закони математичке теорије вероватноће могу да се примене код ових случајних догађаја. Појам вероватноће је од посебног значаја и биће описан кроз следеће законитости.

Класична дефиниција вероватноће (Лаплас 1812. године):

Прво размишљање о вероватноћи дали су коцкари заинтересовани за предвиђање могућих шанси, где је оптимално да се коцкају са високим улозима. Да би одговорили на питање "колико је вероватно" да се одређени догађаји десе у игри коцкања, Лаплас и Паскал су дали следећу дефиницију:

$$\text{Вероватноћа } P(A) = \frac{\text{Број случајева повољних за } A}{\text{Број свих могућих случајева}}. \quad (3.1)$$

Тако, на пример, вероватноћа добијањем шестике бацањем коцке (догађај A) је:

$$\text{Вероватноћа } P(\text{за добијање } 6) = \frac{1}{6} = 0,167.$$

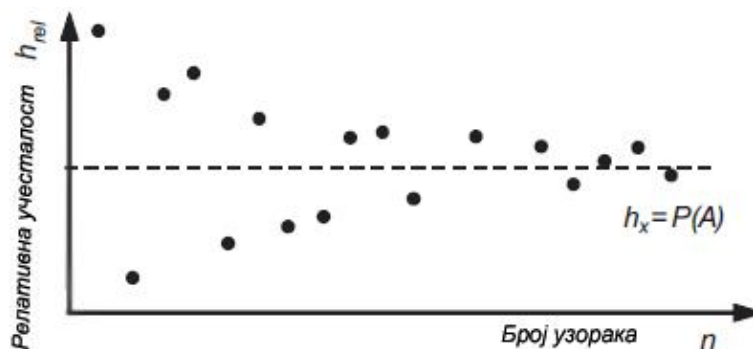
То значи да после неколико бацања, 16,7 % покушаја би довело до 6. Међутим, дефиниција у једначини (3.1) није универзална. Ова једначина се може применити само када нема бесконачно много догађаја који треба да се догоде и када је сваки могући резултат једнако вероватан. У принципу, ово је адекватно за игре на срећу. У техничкој стварности, међутим, појаве се обично јављају у различитим вредностима.

Статистичка дефиниција вероватноће (фон Мизес 1931):

За тестирање случајног узорка величине n , где су сви елементи равноправни у једном процесу, отказ m елемената је евидентиран. Релативна учесталост појаве је:

$$h_{rel} = \frac{m}{n}. \quad (3.2)$$

Ако је могуће спровести тестирање узорака, независно један тест од другог са различитим случајним узорцима, добиће се различите релативне учесталости појаве. За све већи случајни тестирани узорак n је уочено, да се вредности n мање расипају у односу на константну вредност h_x , приказано на слици 1 [6].



Слика 1. Зависност релативне учесталости од величине случајног узорка

Зато је добро дефинисати границе релативне учесталости као вероватноћу догађаја A .

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{m}{n} = P(A) \quad (3.3)$$

Нажалост, дефиниција вероватноће према једначини (3.3) није универзална јер се бави проценом, а не дефиницијом. Покушај да се развије универзална теорија вероватноће на основу једначине (3.3), резултирало је нивоом прихватања и математичким потешкоћама које се не могу решити.

Аксиоматска дефиниција поузданости (Колмогоров 1933):

У аксиоматској дефиницији "поузданост" није дефинисана у ужем смислу. У савременој теорији, "поузданост" се види много више као основни принцип који испуњава одређене аксиоме. Аксиоми поузданости које је предложио Колмогоров су следећи:

1. Сваки случајан догађај A је означен реалним бројем $P(A)$ за $0 \leq P(A) \leq 1$, који се зове вероватноћа од A (*ненегативност*).

2. Вероватноћа за одређени догађај је: $P(E) = 1$ (*нормираност*)

3. Ако су $A_1, A_2, A_3, \dots$ случајни догађаји, који су неспојиви са другима, тј. $A_i \cap A_j = 0$ за $i \neq j$, тада је:

$$P(A_1 \cup A_2 \cup A_3 \cup \dots) = P(A_1) + P(A_2) + P(A_3) + \dots \quad (\text{адитивност})$$

Са овим аксиомима може се развити цела теорија вероватноће.

Данас постоји више дефиниција поузданости [6]:

- најједноставније речено поузданост (енг. reliability) је способност објекта (компоненте, уређаја, система) да успешно обавља задату функцију, под одређеним условима, у датом временском интервалу;

- према америчком МИЛ стандарду под поузданошћу се подразумева вероватноћа да ће неки предмет своју наменску функцију обављати у датом временском интервалу, под задатим условима;

- немачки стандард ДИН дефинише поузданост као способност неког производа или робе да задовољи, у току примене, условљене захтеве који се постављају у погледу понашања или одржавања њихових особина за дужи временски период;

- према руском стандарду ГОСТ поузданост се дефинише као својство објекта да испуњава задате функције и одржава вредност експлоатационих параметара током времена у задатим границама, које су одређене задатим режимима и условима коришћења, техничког опслуживања, ремонта, складиштења и транспорта.

4. ПОДЕЛА ПОКАЗАТЕЉА ПОУЗДАНОСТИ

Са проблемом квантитативног изражавања поузданости повезан је појам показатеља поузданости [2]. Под овим појмом подразумева се квантитативна карактеристика неког од својстава које одређује поузданост.

До квантитативних података о поузданости може се углавном доћи на следећа три начина: прорачуном, лабораторијски и у току експлоатације.

Први начин је посебно интересантан за уређаје или системе. Поступак се састоји у утврђивању степена поузданости на основу познавања поузданости компонената или блокова, кола уређаја и предвиђених режима рада. Тако утврђена поузданост је прорачуната поузданост. Од значаја је при развијању нових типова уређаја и система, када се у фази пројектовања узима у обзир потребна поузданост као један од захтева који треба да испуни пројектовани уређај.

Други начин добијања података о поузданости је лабораторијски. Постоје разне нормалне и убрзане статичке и динамичке методе утврђивања поузданости у лабораторијским условима. Испитивања се врше било у нормалним било у посебним режимима рада.

Најзад, најприроднији начин добијања података о поузданости је на основу експлоатације. Специфичан проблем који се при томе јавља је организација добијања информација и веродостојност добијених информација.

С обзиром на то како је податак о поузданости формиран, говори се о утврђеној, оцењеној, екстраполираној, прогнозираној и стварној поузданости. Било којој карактеристици поузданости даје се једна од ових верзија. Верзија “утврђен” односи се на податке добијене на основу испитивања у којем сви испитни узорци нису престали да раде. Верзија “оцењен” односи се на податке који су одређени са одговарајућим нивоом веродостојности и представљају граничну вредност интервала веродостојности. Верзија “екстраполиран” односи се на податке о поузданости у датим условима рада који су дефинисани екстраполацијом или интерполацијом утврђених или оцењених података о поузданости у другим условима рада. Верзија “прогнозиран” односи се на податке прорачунате на основу утврђене, оцењене или екстраполиране поузданости. Верзија “стварна” односи се на податак добијен на основу испитивања у току којег су сви узорци престали да раде.

Математичка представа показатеља поузданости је повезана са теоријом вероватноће и математичком статистиком. При практичном одређивању показатеља поузданости важно је да у партији компонената, на основу којих се изводе закључци о поузданости компоненте, узроци отказа сваке компоненте буду исти. Оваква партија компонената је статистички хомогена. Практично је могуће реализовати статистички хомогену партију. Хомогену партију представљају уређаји произведени на истој производној траци од компонената које су производили исти произвођачи.

Према томе, прогноза поузданости система је математичка метода базирана на експериментално утврђеним подацима о поузданости компонената. У зависности од постављеног циља и од фазе и развоја, прогноза поузданости се може извести следећим трима методама:

- метод сличности опреме,
- метод набрајања компонената и
- метод оптерећења.

Основни показатељи поузданости компонената, уређаја и система су: функција расподеле отказа, функција поузданости, функција густине отказа, интензитет отказа и средње време рада до отказа и између отказа, показатељи трајности, показатељи техничког одржавања и економски показатељи поузданости.

Ради лакшег и јаснијег проучавања поузданости техничких система потребно је прво дефинисати неке основне појмове из области поузданости као што су: објекат поузданости, параметар функционисања, радна способност, отказ, време исправног рада, гранично стање објекта и радни век [1].

Објекат у теорији поузданости представља предмет на који се поузданост односи. Објекат поузданости може бити технички систем или његови елементи.

Параметри функционисања карактеришу различита својства објекта као што су: показатељи тачности функционисања, механичке карактеристике, кинематски и динамички показатељи, економски показатељи, експлоатациони показатељи итд.

Радна способност представља стање објекта при коме је он способан да извршава своју задату функцију, а да при томе одређени параметри функционисања не пређу граничне вредности.

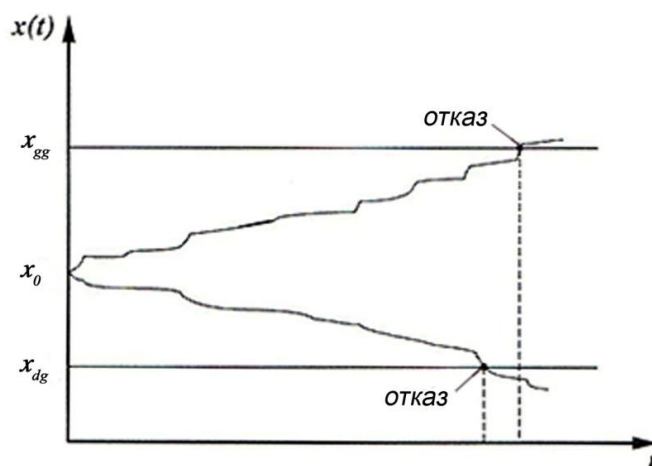
Отказ је један од основних појмова који фигуришу при разматрању поузданости и сигурности машинских и уопште техничких система.

Отказ објекта је догађај који има за последицу губитак радне способности. Под термином „догађај“ подразумева се динамичка промена стања система, што значи да појава отказа доводи до непланираног и непожељног стања система.

Отказ наступа када после извесног временског периода рада било који параметар функционисања достигне граничну вредност.

Време рада до отказа обухвата временски период исправног рада објекта до наступања отказа. Ово време је ефективно време функционисања објекта.

Отказ и време исправног рада могу се дефинисати посматрањем зависности карактеристичних параметара функционисања у функцији од времена, чија је илустрација дата на слици 2 [1].



Слика 2. Дијаграм зависности карактеристичног параметра функционисања x од времена t

Посматрани параметар функционисања на почетку рада система има вредност x_0 али у току времена (рада) он се мења. Ако у неком тренутку параметар функционисања достигне било горњу граничну вредност x_{gg} , или доњу граничну вредност x_{dd} , доћи ће до отказа система.

Гранично стање објекта представља оно стање при коме даљу експлоатацију објекта треба прекинути. Оно настаје када је даље економски неоправдано извршавати поправку објекта.

Радни век објекта је временски период који обухвата целокупно време експлоатације објекта, узимајући у обзир систем ремонта објекта.

5. ПОКАЗАТЕЉИ ИСПРАВНОГ РАДА

5.1 Вероватноћа исправног рада

Основни показатељ поузданости, представља вероватноћа исправног рада, која је позната и као вероватноћа безотказног рада [1]. Овај показатељ даје оцену вероватноће да у одређеном временском периоду неће доћи до отказа објекта, тј. да ће објекат исправно радити.

Време исправног рада до отказа је случајно променљива величина која се обележава са T . Вероватноћа да ће у неком одређеном временском периоду до времена t наступити отказ дефинисана је као:

$$P(T \leq t) = F(t), \quad t \geq 0. \quad (5.1)$$

Овде $F(t)$ представља функцију расподеле случајно променљиве T .

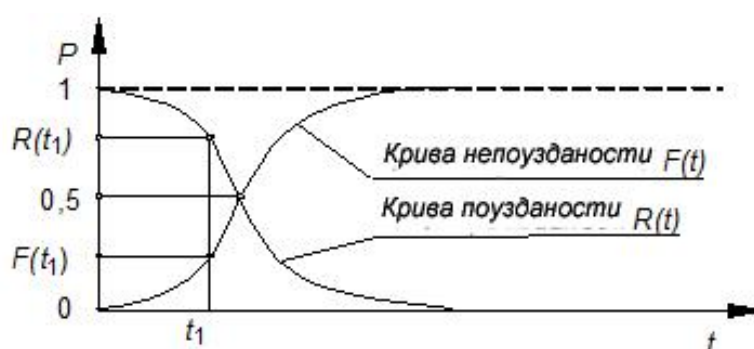
Вероватноћа да у одређеном временском периоду t неће наступити отказ се на основу теорије вероватноће дефинише као:

$$P(T > t) = 1 - F(t) = R(t). \quad (5.2)$$

Величина $R(t)$ је према томе вероватноћа исправног рада у одређеном временском периоду t .

На слици 3 [1] приказане су функционалне зависности $F(t)$ и $R(t)$. Крива $F(t)$ је позната као функција непоузданости, а крива $R(t)$ као функција поузданости. Величине $F(t_1)$ и $R(t_1)$ представљају вероватноће да ће за време t_1 наступити отказ, односно да неће наступити.

Показатељ вероватноће исправног рада $R(t)$ креће се у границама од 0 до 1. Када показатељ $R(t)$ има вредност 0 каже се да је објекат непоуздан, а када је $R(t) = 1$ објекат је сигуран.



Слика 3. Поузданост и непоузданост у функцији од времена

Вероватноћа исправног рада је везана за одређени временски период и показује колика је шанса објекта да задржи радну способност у том временском периоду. Допуштена вредност за показатељ $R(t)$ зависи у првом реду од степена опасности отказа. Што су последице отказа теже, гранична вредност показатеља вероватноће исправног рада треба да је већа.

Вероватноћа исправног рада се у пракси често одређује испитивањем статистичког скупа од N индентичних објеката, који имају функцију расподеле времена исправног рада до отказа $F(t)$. Нека је $N_s(t)$ случајна величина, која представља број објеката који исправно раде у моменту времена t . Математичко очекивање случајне величине $N_s(t)$ је:

$$M[N_s(t)] = N \cdot R(t) = n(t), \quad (5.3)$$

где је $n(t)$ - број објеката који исправно раде у моменту времена t .

На основу претходне једначине, вероватноћа исправног рада је:

$$R(t) = \frac{n(t)}{N}. \quad (5.4)$$

Тачност овог израза повећава се са повећањем броја чланова скупа N .

Према теорији вероватноће, случајна променљива T - време исправног рада има густину расподеле означену као $f(t)$, при чему је $t \geq 0$. На основу тога, функција расподеле случајне променљиве T је:

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt, \quad (5.5)$$

а вероватноћа исправног рада:

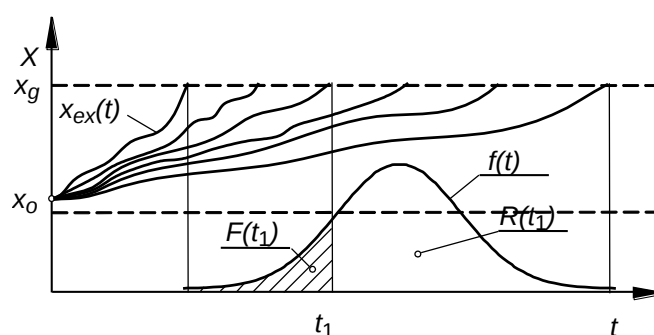
$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt = \int_t^{\infty} f(t) dt. \quad (5.6)$$

Изрази (5.5) и (5.6) се користе тако што се најпре, зависно од одређене проблематике, изабере облик функције густине расподеле $f(t)$. У ту сврху највише се користе експоненцијална, нормална и Вејбулова (Weibull) расподела.

За одређено време рада $t = t_1$ вероватноћа исправног рада је:

$$R(t = t_1) = \int_{t_1}^{\infty} f(t) dt, \quad (5.7)$$

што се може илустровати сликом 4 [1].



Слика 4. Поузданост и непоузданост у функцији од густине расподеле

На слици 4 илустрована је функција густине расподеле времена рада до отказа $f(t)$. Са X означена је променљива вредност параметра функционисања у току рада, а са x_g - гранична вредност параметра функционисања. Достицањем граничне вредности параметра функционисања у току рада наступа отказ. Промена параметра X је такође случајна функција. За неке екстремно тешке услове рада отказ ће најпре наступити, па је функција промене параметра функционисања приказана кривом $x_{ex}(t)$. Међутим, при неким другим условима рада промена параметра функционисања приказана је другим кривама, а откази ће у тим случајевима наступити касније. Вероватноћа исправног рада

за време $t = t_1$ је $R(t_1)$ и представљена је површином испод криве $f(t)$ у границама $t_1 < t < \infty$.

На основу израза (5.5), функција густине расподеле времена рада до отказа може се математички одредити преко функције расподеле времена рада до отказа, као њен први извод:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt}. \quad (5.8)$$

Пошто је $F(t) = 1 - R(t)$, онда је и:

$$f(t) = -\frac{dR(t)}{dt}. \quad (5.9)$$

Густина расподеле времена рада до отказа може се одредити и на основу посматрања статистичког скупа од N идентичних објеката. На основу израза (5.2) и (5.4) добија се:

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - \frac{n(t)}{N}, \quad (5.10)$$

па је:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{1}{N} \frac{dn(t)}{dt}, \quad (5.11)$$

или:

$$f(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{n(t) - n(t + \Delta t)}{N \cdot \Delta t}, \quad (5.12)$$

где је:

$n(t)$ - број исправних објеката у моменту времена t , а

$n(t + \Delta t)$ - број исправних објеката у моменту времена $t + \Delta t$. [1]

5.2 Интензитет отказа

Претпоставља се да се истовремено испитује n система [2]. После одређеног времена t , n_1 система нису отказали, а n_2 система су отказали при чему је $n_2 = n - n_1$. Према овоме, $R(t)$ се може изразити као:

$$R(t) = \frac{n_1(t)}{n} = \frac{n_1(t)}{n_1(t) + n_2(t)}. \quad (5.13)$$

Значи да ова једначина показује вероватноћу безотказног рада било ког од n система у току времена t , јер је она као што је речено функција времена. По логици ствари, јасно је да како t расте, све више и више система отказује што значи да ће поузданост опадати. Претходна једначина се може написати у следећем облику:

$$R(t) = \frac{n - n_2(t)}{n} = 1 - \frac{n_2(t)}{n}. \quad (5.14)$$

Лева и десна страна горње једначине се могу диференцирати па се добија следеће:

$$\frac{dR(t)}{dt} = \frac{d\left[1 - \frac{n_2(t)}{n}\right]}{dt} = -\frac{1}{n} \frac{dn_2(t)}{dt}, \quad (5.15)$$

где је n константно. На основу овог се добија израз за фреквенцију са којом систем отказује:

$$\frac{dn_2(t)}{dt} = -n \frac{dR(t)}{dt}. \quad (5.16)$$

Сада је могуће обе стране горње једначине поделити са $n_1(t)$:

$$\frac{1}{n_1(t)} \frac{dn_2(t)}{dt} = -\frac{n}{n_1(t)} \frac{dR(t)}{dt}. \quad (5.17)$$

Из горње једначине се може дефинисати функција интензитета отказа $h(t)$:

$$h(t) = \frac{1}{n_1(t)} \frac{dn_2(t)}{dt} = -\frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt}. \quad (5.18)$$

Одавде се може добити општа формула за функцију поузданости $R(t)$. Може се написати да је:

$$\frac{dR(t)}{dt} = -h(t)dt, \quad (5.19)$$

односно:

$$\int_1^R \frac{dR(t)}{R(t)} = -\int_0^t h(t)dt, \quad (5.20)$$

односно:

$$\ln R(t) = -\int_0^t h(t)dt, \quad (5.21)$$

и коначно:

$$R(t) = e^{-\int_0^t h(t)dt}. \quad (5.22)$$

Претходна формула математички описује поузданост на најопштији начин и може се применити за било коју функцију интензитета отказа. Сада следи да се из једначине (5.2) заменом добија једначина (5.9):

Имајући у виду претходне изразе функција интензитета отказа може се написати у следећем облику:

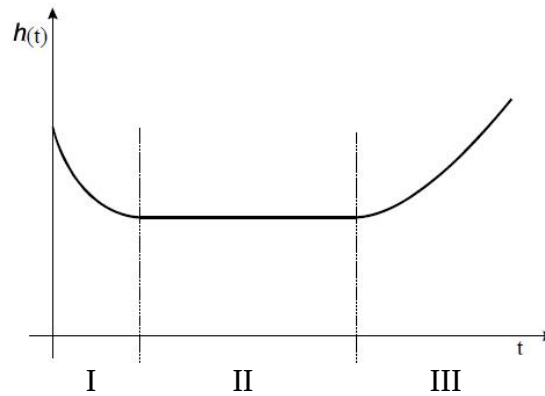
$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)}. \quad (5.23)$$

Значај ове функције је у томе што показује како се у току времена мења интензитет отказа неког система.

У почетку коришћења неког система обично се јавља већи број отказа који се могу приписати почетним слабостима или пропуштеним дефектима у току производње. Касније, ови такозвани рани откази уступају место отказима за које је тешко утврдити узрок настајања. То су такозвани случајни откази чије се време појављивања не може предвидети али зато се зна фреквенција појављивања отказа. Старењем система почињу да се јављају откази услед истрошености.

На слици 5 [2] су приказани периоди промене $h(t)$ за сва три интервала, а на слици 6 [2] приказани су облици функције густине расподеле отказа $f(t)$.

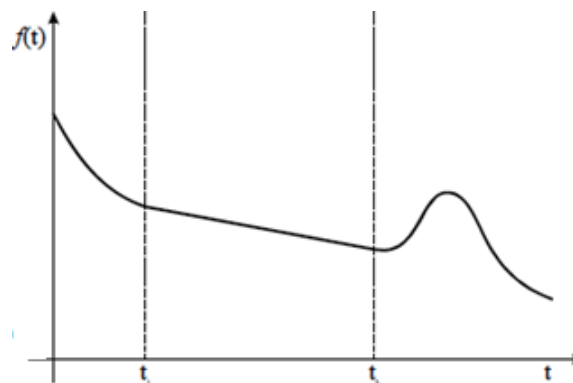
У периоду раних отказа (0 до t_1) $h(t)$ и $f(t)$ су опадајуће функције. За карактеристику случајних отказа (t_1 до t_2) приближно је константна вредност $h(t)$ и приближно експоненцијална функција $f(t)$ [2]. У периоду старења (t_2 до ∞) $h(t)$ је растућа функција, док $f(t)$ има један врх око кога се дешава највећи број отказа. Из овог разматрања може се видети да је функција $h(t)$ погоднија од $f(t)$ када се жели направити разлика између разних облика отказа.



Слика 5. График интензитета отказа

Са слике 5 се уочавају три карактеристична периода:

- I период представља подручје учесталих стања у отказу која се јављају у почетку рада система (период уходавања) изазваних грешкама у процесу пројектовања, изградње и постављања система [7];
- II период случајних стања у отказу – период нормалног рада система и
- III период већих учесталости стања у отказу изазваних процесом старења, замором материјала, појавом корозије, процесом интензивног хабања и сл.



Слика 6. График густине расподеле отказа

Искуство је показало да многи системи имају криву интензитета отказа како је већ показано на слици 5. Многи произвођачи опреме високе поузданости пуштају ту опрему да ради како би је довели на почетак интервала константних отказа. Тек онда је уграђују у неки систем.

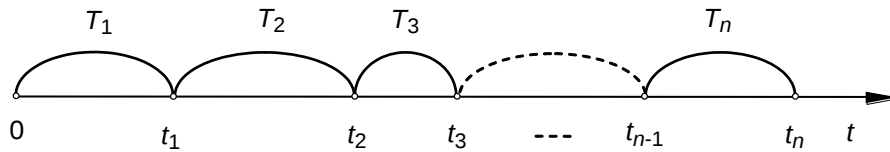
У пракси, многи системи имају континуално опадајућу и континуално растућу функцију интензитета отказа, па се на њих не може применити облик криве $h(t)$ са слике 5.

5.3 Параметар тока отказа

Показатељи, као што су вероватноћа исправног рада, средње време рада до отказа и интензитет отказа, односе се на необновљиве објекте или на обновљиве објекте када је у питању време исправног рада до првог отказа [1]. За обновљиве објекте, ради истраживања показатеља поузданости, примењује се тзв. теорија случајних токова. За

обновљиве објекте време рада до првог отказа, од првог до другог отказа, од другог до трећег и тако даље, може бити различито, што је последица застаревања објекта или измене услова експлоатације. Као што је време рада до отказа необновљивих објеката случајно променљива величина, тако су и времена рада до првог отказа обновљивих објеката, од првог до другог отказа, од другог до трећег итд., такође случајно променљиве величине. Најчешће се ова времена услед застаревања објекта или измене услова експлоатације, значајно разликују у односу на време рада објеката до првог отказа.

Нека објекат почиње да ради у моменту $t = 0$. После неког времена T_1 , које је случајно променљива величина, долази до првог отказа. Пошто се изврши поправка, односно обнављање његове радне способности, објекат поново ради у временском периоду T_2 до другог отказа итд. Овај процес шематски је приказан на слици 7 [1].



Слика 7. Графички приказ времена настајања отказа код обновљивих објеката

Моменти отказа, тј. моменти обнављања су: $t_1 = T_1$, $t_2 = T_1 + T_2$, $t_3 = T_1 + T_2 + T_3$, $t_n = T_1 + T_2 + T_3 + \dots + T_n$ и они образују случајан ток назван ток отказа.

Као карактеристика тока отказа користи се функција $\Omega(t)$ - средњи број отказа, која представља математичко очекивања броја отказа за време t :

$$\Omega(t) = M[M(t)], \quad (5.24)$$

где је $M(t)$ - случајна величина броја отказа до времена t .

У неком временском интервалу $(t, t + \Delta t)$ средњи број отказа објекта који се обнавља је:

$$M[M(t, t + \Delta t)] = M[M(t + \Delta t)] - M[M(t)] = \Omega(t + \Delta t) - \Omega(t), \quad (5.25)$$

где је $M(t, t + \Delta t)$ - број отказа за интервал времена $(t, t + \Delta t)$.

Параметар тока отказа карактерише интензитет тока отказа, односно средњи број отказа у јединици времена:

$$\omega(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{M[M(t, t + \Delta t)]}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Omega(t + \Delta t) - \Omega(t)}{\Delta t} = \frac{d}{dt} \Omega(t). \quad (5.26)$$

Средњи број отказа $\Omega(t)$ може се одредити посматрањем статистичког скупа од N објеката. Ако је $m_i(t)$ број отказа i -тог објекта за време t , онда је:

$$\Omega(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N m_i(t), \quad (5.27)$$

а параметар тока отказа је приближно:

$$\omega(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^N m_i(t + \Delta t) - \sum_{i=1}^N m_i(t)}{N \cdot \Delta t}, \quad (5.28)$$

где је $m_i(t + \Delta t)$ - број отказа i -тог објекта за временски период $(t + \Delta t)$.

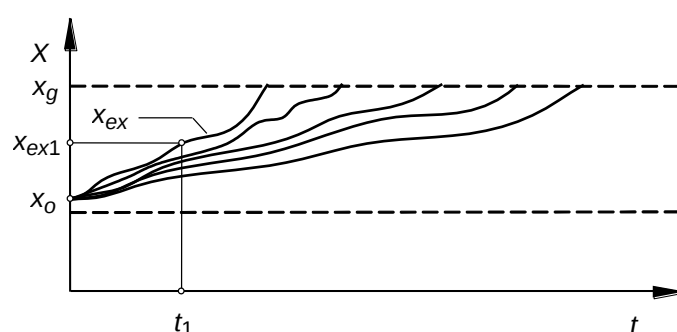
Показатељ параметра тока отказа $\omega(t)$ користи се за објекте код којих се откази лако отклањају и не доводе до значајних последица (на пример, замена резног алата при раду алатне машине и сл.). За овакве објекте $R(t) \rightarrow 0$. Параметар тока отказа се може сматрати реципрочно вредношћу средњег времена рада између отказа t_{sro} :

$$\omega(t) \approx \frac{1}{t_{sro}}. \quad (5.29)$$

Средње време рада између отказа је у ствари однос времена рада објекта без обзира на број обнављања и броја обнављања објекта.[1]

5.4 Временски променљив степен сигурности

При оцени исправности високо поузданих објеката, код којих вероватноћа исправног рада $R(t)$ тежи 1 или је $R(t) = 1$, може се увести степен сигурности $v(t)$ као временски променљива величина [1]. За дефинисање овог показатеља нека послужи слика 8 [1]. На тој слици представљене су могуће криве промена параметара функционисања X .



Слика 8. Криве промена параметара функционисања X

Ако у неком одређеном времену t_1 са сигурношћу не долази до појаве отказа, тј. $R(t) = 1$, онда ће параметер функционисања у најнеповољнијем случају, за екстремно тешке услове рада, достићи екстремну вредност x_{ex1} . Ако је допуштена гранична вредност тог параметра при којој наступа отказ x_g , онда је степен сигурности за време t_1 дефинисан као:

$$v(t = t_1) = \frac{x_g}{x_{ex1}} > 1. \quad (5.30)$$

Као што се види, степен сигурности у општем случају зависи од времена, јер се с временом мења и параметер функционисања. На основу тога може се увести тзв. брзина промене степена сигурности као:

$$v_v = \frac{dv(t)}{dt}, \quad (5.31)$$

која такође може бити третирана као посебан показатељ поузданости.

Степен сигурности је посебно актуелан за објекте код којих је отказ недопустив јер има катастрофалне последице, као што су разне хаварије опасне по људски живот и слично. У оваквим случајевима основни показатељ поузданости је степен сигурности, који показује колика је сигурност да до отказа неће доћи.

Овде треба посебно напоменути да се у класичним прорачунима машинских делова и конструкција користи степен сигурности, при чему се он не третира као величина зависна од времена. Међутим, коришћењем метода тзв. вероватносних прорачуна, које се развијају у последње време, може се извршити дубља анализа конструкција усвајајући да је степен сигурности променљива случајна величина.[1]

5.5 Процена показатеља исправног рада

Скуп поузданости, квалитета и безбедносних података су корисни само ако се анализирају на ефикасан начин [8]. Тачније, постоје одређене карактеристике података које помажу да се опише природа датог скупа података, чинећи решења боље повезаним. Овај део представља низ статистичких мера које се сматрају корисним за поузданост, квалитет, сигурност, итд.

За утврђивања теоријског закона расподеле времена рада до отказа, потребно је да се одреде бројне карактеристике статистичког скупа података и процењене вредности потпуних карактеристика. На основу вредности и међусобних односа израчунатих параметара и графика процењених вредности потпуних карактеристика, добија се читав низ информација о могућем теоријском моделу расподеле, који се може користити за апроксимацију емпиријске расподеле.

5.5.1 Бројне карактеристике времена рада до отказа

Параметар, који представља центар растурања случајне променљиве, а има највећи практичан значај за утврђивање теоријског закона расподеле је математичко очекивање, које се назива и средњом вредношћу случајне променљиве, медијана и мода [8].

Од друге групе параметара, која карактерише растурање случајне променљиве, као што су варијациони интервал вредности, средње апсолутно одступање, дисперзија, стандардно одступање и коефицијент варијације, најчешће се користи стандардно одступање за утврђивање закона расподеле.

Трећу групу параметара чине коефицијенти асиметрије и ексеса. Изрази за бројне карактеристике случајне променљиве времена рада до отказа T , изведени су на основу израза за карактеристике произвољне континуалне случајне променљиве X .

Разни облици закона расподеле као што су функција расподеле, низ расподеле, густина расподеле, за дискретне и непрекидне случајне величине представљају неке функције које потпуно описују случајну величину.

Бројни параметри називају се бројним карактеристикама случајне променљиве (параметри расподеле).

Бројне карактеристике случајне променљиве играју веома важну улогу у теорији вероватноће. Често се проблеми решавају само операцијама са бројним карактеристикама, а да се о законима расподеле и не води рачуна. Нарочито је значајна особина да, уколико се у некој појави јавља више случајних величина, од којих свака има извесни утицај на исход појаве, тада закон расподеле резултујуће случајне величине не зависи од закона расподеле појединих случајних величина, тако да није потребно да се знају закони расподеле појединачних случајних величина. На основу бројних карактеристика тих величина, знајући да ће се резултантни утицај понашати по тзв. нормалном закону расподеле, могуће је одредити његове параметре.

Често случајна величина не мора да се опише у потпуности, као ни да се одреде закони њене расподеле. Довољно је знати неки бројни параметар, који у одређеном степену карактерише суштинске особине расподеле случајне променљиве. На пример, од интереса је бројни параметар који показује неку средњу вредност око које се групишу могуће вредности случајне променљиве, или параметар који показује степен растурања вредности случајне величине у односу на средњу вредност.

Једна од најважнијих бројних карактеристика случајне величине, која даје неку средњу вредности случајне величине, назива се математичко очекивање или средња вредност случајне величине. Ова карактеристика описује положај случајне величине на бројној оси.

Математичко очекивање $M[X] = m_x$ дискретне случајне величине X , која може да добије вредност $x_1, x_2, \dots, x_n$ са одговарајућим вероватноћама $p_1, p_2, \dots, p_n$, дефинисано је изразом:

$$M[X] = m_x = \frac{x_1 p_1 + x_2 p_2 + \dots + x_n p_n}{p_1 + p_2 + \dots + p_n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i p_i}{\sum_{i=1}^n p_i}. \quad (5.32)$$

Како је:

$$\sum_{i=1}^n p_i = 1, \quad (5.33)$$

добија се за m_x израз:

$$m_x = \sum_{i=1}^n x_i p_i. \quad (5.34)$$

Случајна величина X , чија је функција расподеле $F(x)$, има математичко очекивање у виду Стилтјесовог (Stieltjes) интеграла:

$$m_x = \int_{-\infty}^{\infty} x dF(x). \quad (5.35)$$

Види се да постоји аналогија између израза (5.33) и (5.35). Уместо прекидне вредности случајне променљиве x_i , узима се непрекидна вредност x , уместо вероватноће појединих вредности x_i долази елемент вероватноће $f(x)dx$, а уместо збира интеграл. Треба имати у виду да егзистенција вредности m_x зависи од егзистенције израза (5.33) односно (5.35).

Осим карактеристика положаја (средњих вредности), које представљају типичне вредности случајне величине, употребљавају се карактеристике расподеле вредности случајне променљиве око средњих вредности. Ове бројне карактеристике називају се моменти по аналогији са моментима из механике. Најчешће се користе централни моменти, који се дефинишу преко централне случајне величине X_c :

$$X_c = X - m_x. \quad (5.36)$$

Централни моменти k -тог степена дискретне случајне величине X назива се математичко очекивање k -тог степена одговарајуће центриране случајне величине:

$$M[(X - m_x)^k] = m_k = \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^k p_i. \quad (5.37)$$

За непрекидну случајну величину X , одговарајући централни моменат k -тог реда може да се напише у облику:

$$m_k = \int_{-\infty}^{\infty} (x - m_x)^k f(x) dx. \quad (5.38)$$

Од централних момената, од посебног је интереса други централни моменат, који се још назива и дисперзијом случајне величине X . За дискретну случајну величину, дисперзија D_x је дата изразом:

$$D_x = m_2 = \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2 p_i = \sum_{i=1}^n x_i^2 p_i - m_x^2, \quad (5.39)$$

а за непрекидну:

$$D_x = m_2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - m_x)^2 f(x) dx. \quad (5.40)$$

Дисперзија је карактеристика растурања вредности случајне променљиве око њеног математичког очекивања. Уколико је мања величина дисперзије, утолико је већи проценат вредности случајне величине из области која непосредно окружује математичко очекивање.

Уместо дисперзије D_x , која има размеру квадрата случајне променљиве, често је погодније да се користи величина која има размеру саме случајне променљиве. Та величина се назива средње квадратно одступање или стандардно одступање и обележава се са:

$$\sigma_x = \sqrt{D_x}. \quad (5.41)$$

• **Средње време рада до отказа** представља математичко очекивање случајне променљиве времена рада до отказа T . Означава се са $M(T)$ или t_{sr} . За статистички скуп података о вредностима случајне променљиве T , средње време рада до отказа представља аритметичку средину расположивих вредности случајне променљиве:

$$t_{sr} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n t_i, \quad (5.42)$$

где је:

n - случајне променљиве број вредности,

t_i - i -та вредност случајне променљиве (i -то време рада до отказа).

Ако су вредности случајне променљиве T груписане по интервалима, за израчунавање средњег времена рада до отказа користи се израз:

$$t_{sr} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^z m_i \cdot t_i, \quad (5.43)$$

где је:

n – број вредности случајне променљиве,

z - број интервала у којима су груписане вредности,

m_i - број вредности случајне променљиве (учесталост) у i -том интервалу и

t_i - средина i -тог интервала.

• **Медијана**, неког скупа вредности података распоређених у одређеном низу представља средњу вредност или просек две средње вредности [8, 9]. По дефиницији, представља вредност случајне променљиве, чија је кумулативна вероватноћа реализације 0,5. Означава се са M_e или t_{50} . Индекс у другој ознаци представља кумулативну вероватноћу реализације у процентима. За континуалну случајну променљиву T , која је дефинисана густином расподеле $f(t)$, медијана се одређује из израза:

$$F(M_e) = F(t_{50}) = \int_{-\infty}^{t_{50}} f(t) dt = 0,5. \quad (5.44)$$

Ако је понашање отказа представљено преко функције густине $f(t)$, онда се медијана дели на површине испод функције $f(t)$, на два једнака дела према једначини (5.5). Једна велика предност медијане у односу на средње време рада до отказа t_{sr} , јесте да је неосетљива на екстремне вредности. Кратко или дуго време отказу не може да помери медијану.

За непаран број података у статистичком скупу вредности случајне променљиве, медијана је једнака бројној вредности средњег резултата у растућем низу, а за паран број података, аритметичкој средини средња два резултата.

Ако су вредности случајне променљиве времена рада до отказа објекта груписане по интервалима са одговарајућим фреквенцијама $m_1, m_2, \dots, m_z$, формирају се суме:

$$m_1, m_1 + m_2, m_1 + m_2 + m_3, \dots$$

док се не наиђе на суме фреквенција отказа које задовољавају услов:

$$m_1 + m_2 + \dots + m_{k-1} \leq \frac{n}{2} < m_1 + m_2 + \dots + m_k. \quad (5.45)$$

На овај начин, одређен је интервал k у коме се налази централни резултат или резултати код парног броја објеката.

Након тога, медијана се добија из израза:

$$t_{50} = L + \Delta t \cdot \frac{ng(k) - \frac{n}{2}}{m_k}, \quad (5.46)$$

где је:

L - лева граница k -тог интервала,

Δt - ширина интервала,

$ng(k)$ - број радно способних (исправних) објеката на почетку k -тог интервала,

n - број вредности случајне променљиве и

m_k - број објеката који су отказали у k -том интервалу.

Геометријски, медијана представља тачку на апсцисној оси ($m = m_{50}$), одакле полази вертикална линија која дели хистограм густине расподеле на два дела са једнаким површинама.

Пример:

Ако се претпостави да следећи скуп бројева представља отказе опреме у току 9 месеци у експлоатацији [9]:

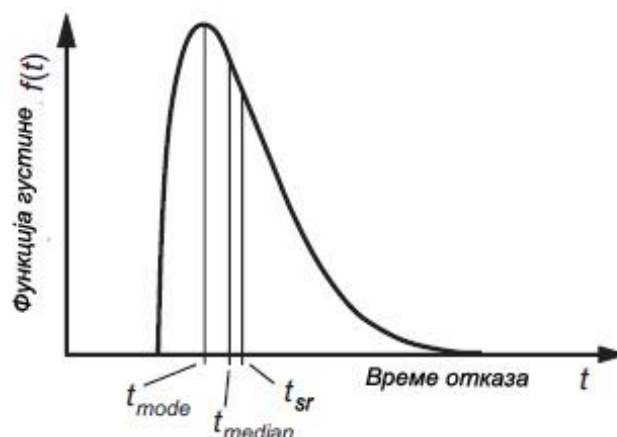
10, 14, 16, 20, 21, 24, 25, 28 и 30

Средња вредност наведеног скупа бројева је 21. Дакле, то је медијана за тај скуп.

• **Мода** се дефинише као вредност случајне променљиве, за коју график густине расподеле има максимум [8, 9]. Ово је вредност која се највише пута јавља у неком скупу података. Дакле, мода t_{mode} се може израчунати помоћу функцију густине $f(t)$: t_{mode} одговара време отказу када је функција густине максимална.

$$f'(t_{modal}) = 0. \quad (5.47)$$

Мода игра веома важну улогу у теорији вероватноће. Ако је неки процес завршен, може се очекивати да ће већина делова отказати при вредности моде. Мере централне тенденције средња вредност, медијана и мода нису једнаке међу собом у заједничким асиметричним расподелама, што се може видети на слици 9 [9].



Слика 9. Средње време рада до отказа, медијана и мода за леву асиметричну расподелу

Један статистички скуп може да има једну или више мода. Исто тако може да се деси да мода не постоји.

Ако су статистички подаци о времену рада до отказа распоређени у класе, онда се мода израчунава из израза:

$$M_o = L + \Delta t \cdot \frac{\Delta_1}{\Delta_1 + \Delta_2}, \quad (5.48)$$

где је:

L – доња граница k -тог интервала са највећом фреквенцијом случајне променљиве m_k ,

Δt – ширина интервала,

Δ_1 – разлика између фреквенција случајне променљиве k -тог и $k-1$ интервала и

Δ_2 – разлика између фреквенција случајне променљиве k -тог и $k+1$ интервала.

Треба напоменути да мода у неком скупу бројева (података) може да не постоји, или ако постоји, она не мора бити јединствена. Следећи примери потврђују ове чињенице [9]:

Пример 1.

Одељење одржавања у фабрици је одговорано за обављање успешног рада једног броја инжењерских система. Бројеви месечних отказа у вези са овим системима током 12-то месечног периода били су следећи:

15, 7, 9, 10, 15, 20, 25, 18, 15, 5, 4 и 14

Мода за овај скуп података је број 15 јер се он највише пута јавља током периода од 12 месеци.

Пример 2.

Ако се претпостави да је као и у примеру 1, број месечних отказа насталих током 12-то месечног периода следећи:

4, 9, 11, 13, 14, 16, 18, 20, 21, 24, 25 и 26

Може се видети да у овом скупу података не постоји мода.

Пример 3.

Као и у примеру 1. прати се број месечних отказа за период од 12 месеци, подаци су следећи:

3, 5, 3, 8, 9, 12, 8, 13, 14, 16, 21 и 25

Скуп ових података има две моде и то 3 и 8, тако да је ово бимодални скуп података. То значи да скуп ових података нема јединствену моду.

• **Варијациони интервал** је корисна мера варијације или одступања неког скупа података вредности и представља разлику између најмањих и највећих вредности у том скупу [6, 8]. Вредности случајне променљиве времена рада до отказа:

$$R = t_{\max} - t_{\min}, \quad (5.49)$$

Ова врло једноставна карактеристика растурања случајне променљиве одређује интервал вредности, али не приказује и сам карактер растурања случајне променљиве око центра растурања.

Пример

Треба пронаћи варијациони интервал у скупу података који је дат у примеру за медијану [9]. Испитивањем низа података из претходног примера, закључује се да су најмања и највећа вредност 10 и 30. Према томе, опсег овог скупа износи:

$$R = \text{највећа вредност} - \text{најмања вредност} = 30 - 10 = 20,$$

где је R варијациони интервал (ранг, опсег). То значи да је опсег за овај скуп података 20.

• **Средње апсолутно одступање.** За скуп вредности случајне променљиве T : $t_1, t_2, \dots, t_n$, средње апсолутно одступање дефинише се као [8]:

$$\bar{\theta}_t = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n |t_i - t_{sr}|, \quad (5.50)$$

где је n – укупан број вредности случајне променљиве.

Ако су вредности случајне променљиве T груписане у z интервала са фреквенцијама $m_1, m_2, \dots, m_z$, при чему је $\sum_{i=1}^z m_i = n$, средње апсолутно одступање се добија из израза:

$$\bar{\theta}_t = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^z |t_i - t_{sr}| \cdot m_i, \quad (5.51)$$

где је t_i – средина i -тог интервала.

• **Дисперзија (варијанса)**, као мера растурања случајне променљиве, има највећи теоријски и практични значај. За случајну променљиву време рада до отказа дисперзија представља математичко очекивање квадрата одступања случајне променљиве T од $M(T)$:

$$D(T) = M[T - M(T)]^2. \quad (5.52)$$

Ако је познат закон расподеле случајне променљиве T , дисперзија се одређује из израза:

$$D(T) = \int_{-\infty}^{\infty} [t - M(T)]^2 \cdot f(t) \cdot dt. \quad (5.53)$$

За статистички скуп података о вредностима случајне променљиве T , дисперзија се израчунава коришћењем израза:

$$D(T) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (t_i - t_{sr})^2 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n t_i^2 - t_{sr}^2. \quad (5.54)$$

Ако су вредности случајне променљиве груписане по интервалима, дисперзија је једнака:

$$D(T) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^z (t_i - t_{sr})^2 \cdot m_i . \quad (5.55)$$

Значење коришћених ознака већ је дато уз израз (5.35).

За број објеката у узорку $n \leq 30$, дисперзија се дефинише тако што се у изразу (5.44) уместо n у имениоцу стави $n - 1$. Тако добијена вредност дисперзије боље репрезентује дисперзију основне популације из које је узорак узет. За вредности $n > 30$, практично нема разлике између ове две дефиниције.

• **Стандардно одступање** се дефинише као позитиван квадратни корен из дисперзије:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^z (t_i - t_{sr})^2 \cdot m_i} . \quad (5.56)$$

Ово је вероватно најчешће коришћена мера дисперзије података за дати скуп података који се односе на математичку средину. Изражава се у истим мерним јединицама као и случајна променљива. Све што је речено за дисперзију у вези груписања вредности случајне променљиве по интервалима, важи и за стандардно одступање.

• **Коефицијент варијације** представља релативну меру одступања случајне променљиве. Дефинише се као однос стандардног одступања и средње вредности:

$$K_v = \frac{\sigma}{t_{sr}} . \quad (5.57)$$

Пошто се стандардно одступање и средња вредност случајне променљиве изражавају у истим јединицама, коефицијент варијације омогућава поређење растурања расподела различитих случајних променљивих.

• **Коефицијент асиметрије** се користи као погодно средство за меру асиметрије емпиријске расподеле. За расподелу случајне променљиве дефинише се изразом:

$$K_A = \frac{\mu_3}{\sigma^3} , \quad (5.58)$$

где је:

μ_3 - трећи централни момент, а

σ - стандардно одступање случајне променљиве.

За дискретан скуп вредности произвољне случајне променљиве X , трећи централни момент се израчунава из изрази:

$$\mu_3 = \sum_{i=1}^n [x_i - M(X)]^3 \cdot p_i , \quad (5.59)$$

где је p_i - вероватноћа појављивања вредности x_i .

Код симетричних расподела, коефицијент асиметрије има вредност $K_A = 0$. У том случају карактеристике центра растурања, на пример случајне променљиве T , имају вредност $t_{sr} = t_{50} = M_o$. Са повећањем апсолутне вредности коефицијента асиметрије, повећава се и асиметричност расподеле.

На слици 10 [8] дати су облици графика и однос карактеристика центра растурања за, под а), случај када коефицијент асиметрије има позитивну вредност (позитивна

асиметрија) и под б), случај када коефицијент асиметрије има негативну вредност (негативна асиметрија).

Као што се са слике може видети, за расподеле са позитивном асиметријом важи однос $M_o < t_{50} < t_{sr}$, а за расподеле са негативном асиметријом $M_o > t_{50} > t_{sr}$.

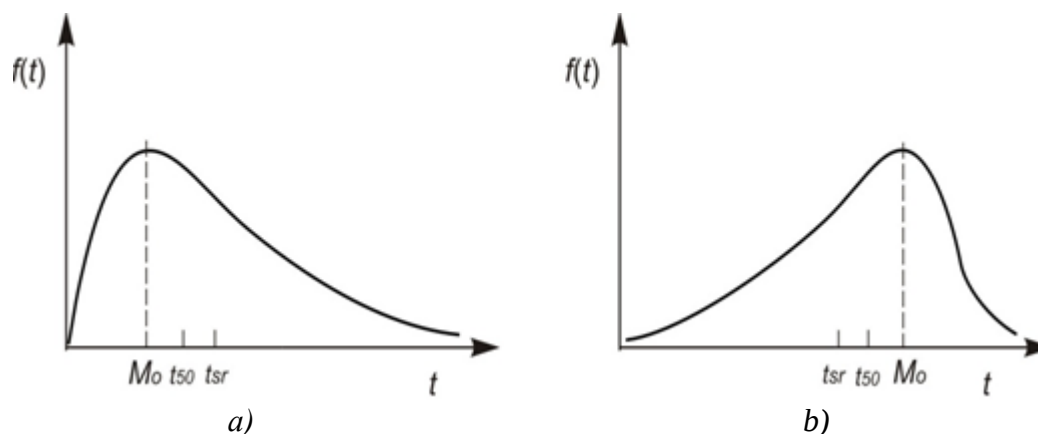
Одређивање трећег централног момента статистичког скупа података о вредностима континуалне случајне променљиве времена рада до отказа T , врши се на основу израза (5.51 и 5.52). При томе, треба узети у обзир да ли су вредности груписане по интервалима или не.

Уколико нису груписане по интервалима користи се израз (5.51)

$$\mu_3 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (t_i - t_{sr})^3, \quad (5.60)$$

у колико јесу користи се израз 3.19

$$\mu_3 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^z (t_i - t_{sr})^3 \cdot m_i. \quad (5.61)$$



Слика 10. Илустрације графика функција густине расподеле са
а) позитивном асиметријом и б) негативном асиметријом

Класификација асиметрије расподела врши се на основу апсолутне вредности коефицијента асиметрије. При томе, усвојено је следеће правило:

- ако је $0 \leq |K_A| < 0,1$ нема асиметрије,
- ако је $0,1 \leq |K_A| < 0,25$ асиметрија је мала,
- ако је $0,25 \leq |K_A| < 0,5$ асиметрија је средња и
- ако је $0,5 \leq |K_A|$ асиметрија је изразита.

• **Коефицијент спљоштености (ексцеса)** расподеле случајне променљиве дефинише се изразом:

$$K_E = \frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3, \quad (5.62)$$

где је:

μ_4 - четврти централни момент, а

σ - стандардно одступање од случајне променљиве.

Четврти централни момент дискретног скупа вредности произвољне случајне променљиве X добија се из израза:

$$\mu_4 = \sum_{i=1}^n [x_i - M(x)]^4 \cdot p_i, \quad (5.63)$$

где је p_i - вероватноћа појављивања вредности x_i .

Сплљоштеност расподеле је пропорционална парним моментима, тј. што је она већа утолико се и они повећавају. На слици 11 [8] дати су графици густина расподела за различите вредности коефицијента спљоштености.

За нормалну расподелу $K_E = 0$. Ако је $K_E > 0$, онда је спљоштеност криве расподеле мања од нормалне, а ако је $K_E < 0$, онда је спљоштеност криве расподеле већа од нормалне.

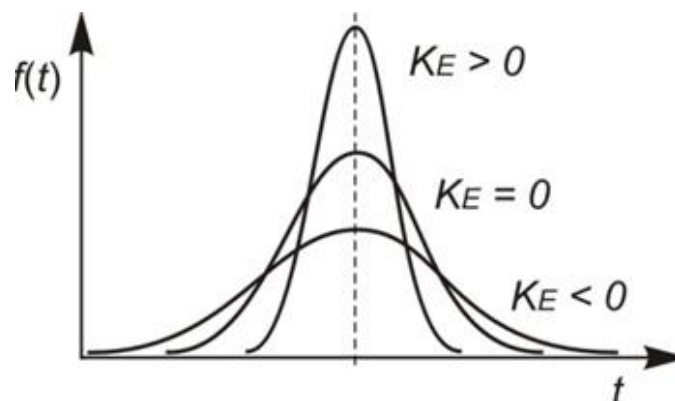
Одређивање четвртог централног момента статистичког скупа података о вредностима континуалне случајне променљиве времена рада до отказа T , може да се изврши на сличан начин као код коефицијента асиметрије. Полазећи од израза (5.63), ако вредности случајне променљиве нису груписане по интервалима, четврти централни момент је једнак:

$$\mu_4 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (t_i - t_{sr})^4. \quad (5.64)$$

У супротном, ако су вредности случајне променљиве груписане по интервалима, израз за четврти централни момент гласи:

$$\mu_4 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^z (t_i - t_{sr})^4 \cdot m_i. \quad (5.65)$$

Значење коришћених ознака је већ дато уз изразе за средње време рада до отказа.



Слика 11. Сплљоштеност расподела у функцији од коефицијента K_E

6. ПОКАЗАТЕЉИ ТРАЈНОСТИ

Основни показатељ трајности објекта је време исправног рада до отказа T . Време исправног рада је случајна величина која зависи од развоја процеса губитка радне способности [1]. Време исправног рада T као случајна величина се карактерише неким законом расподеле $F(t)$, при чему је густина те расподеле описана функцијом $f(t)$.

Важан показатељ трајности је радни век објекта T_v који представља укупно време рада објекта до достизања граничног стања, при коме се не врши даље обнављање радне способности објекта. За необновљиве објекте радни век се поклапа са временом исправног рада до првог отказа T . Радни век је у општем случају случајна величина.

Један од бројних показатеља трајности је средње време исправног рада, који је познат као средње време рада до првог отказа. Средње време исправног рада T_{sr} у ствари представља математичко очекивање случајно променљиве величине T - времена исправног рада до отказа.

Очекивано време безотказног рада дефинише се на основу следеће једначине:

$$T_{SR} = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt. \quad (6.1)$$

$MTBF$ - Средње време између отказа, код производа који се могу поправити, ово представља средње време за које ће систем радити до следећег отказа [10].

Стопа отказа - број отказа у зависности од параметра мерења. Параметар може бити временски (на пример, отказ машине у смени), циклуса оптерећења, број удара, или низ других утицаја.

$MTTF$ или $MTFF$ - средње време до првог отказа. Ова се мера примењује на системе који не могу поправити током коришћења.

$MTTR$ - Средње време до поправке. Просечно време протекло између отказа јединице и њене поправке и враћања у функцију.

Расположивост – време у коме систем исправно ради. Она је једино релевантна за системе који могу да се поправе. Распоживост је дата једначином:

$$Raspoloživost = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}. \quad (6.2)$$

Ако се систем који се испитује обнавља одржавањем или поправкама, тј. у случају такозваних поправљивих система, очекивано време безотказног рада је познато под називом средње време између отказа ($MTBF$ – Mean Time Between Failure). При томе је јасно да се полази од претпоставке да је понашање поправљеног система у погледу интензитета отказа исто као код новог система. Код такозваних непоправљивих система говори се о средњем времену до првог отказа, или једноставно о средњем времену до отказа ($MTTF$ – Mean Time To Failure). Величине $MTBF$ тј. $MTTF$ треба увек користити када је специфицирана функција густине отказа, јер ниво поузданости који се може приписати одређеној вредности $MTBF$ тј. $MTTF$ зависи од облика те функције. Ако се посматра n система који се испитују, при чему се бележе времена рада између отказа $t_1, t_2, \dots, t_n$ онда ће $MTBF$ бити:

$$MTBF = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i. \quad (6.3)$$

За објекте код којих постоје потребе за високом поузданошћу, унапред се прописује вредност показатеља вероватноће исправног рада и тада је [1]:

$$R(t = t_{\gamma}) = \frac{\gamma}{100}, \quad (6.4)$$

где је:

γ - вредност вероватноће исправног рада у процентима, а
 t_{γ} - гама процентни ресурс.

Гама процентни ресурс t_{γ} представља бројни показатељ трајности. Он показује да γ процената објеката треба да има време исправног рада не мање од t_{γ} . Проценат γ прописом је дефинисана величина у зависности од захтеване трајности објекта. На пример, уколико је $\gamma = 95\%$ онда се ради о 95% ресурсу, односно о томе да ће после одређеног времена t_{γ} отказати мање од 5% објеката.

За објекте, код којих отказ не узрокује катастрофалне последице и где не постоји потреба за високом поузданошћу, прописује се тзв. препоручени ресурс објекта t_r који најчешће представља време од почетка експлоатације до планираног ремонта. Показатељ трајности t_r говори о времену експлоатације после кога се објекат мора подврћи ремонту или се заменити. С тим у вези треба знати да се у машинству већина објеката замењује или ремонтује према плановима ремонта и опслуживања пре него што дође до отказа.

Под појмом “рок служења” објекта подразумева се временски период који обухвата календарско време експлоатације, узимајући у обзир систем поправки, односно укључујући и време прекида у раду, тј. време застоја услед поправки и време чекања када објекат не ради због непотпуне искоришћености капацитета.

7. ПОКАЗАТЕЉИ ТЕХНИЧКОГ ОДРЖАВАЊА

Са аспекта поузданости, поред показатеља исправности и трајности, у пракси значајну улогу имају и показатељи техничког одржавања. Једно од значајних својстава објекта је погодност одржавања, које показује колико је лако извести техничко опслуживање и ремонт објекта [1].

Одржавање техничких система (машина и уређаја), односно средстава за рад, као функција и део процеса производње заузима данас важно место у производном систему сваке компаније [11]. На развој одржавања утицао је брз индустријски напредак, као и стални пораст аутоматизације и повезаности средстава за рад, затим нагли пораст фиксних трошкова у односу на променљиве. Одржавање се дефинише као стална контрола над свим средствима за рад, као и вршење одређених поправки и превентивних радњи, чији је циљ, стално, функционално оспособљавање и чување производне опреме, постројења и других машина и уређаја. Појам одржавања долази уз сваки појам производње одређених добара. Током времена и употребе долази до старења материјала и средстава за рад, смањује се технолошка ефикасност, а долази и до евидентног технолошког застаревања. Средства се током времена троше и смањује им се радна способност. Средства за рад су подложна отказима, ломовима и оштећењима, па се појављују прекиди у раду. То узрокује појаву трошкова због замене и поправке делова, али и трошкове због застоја у процесу производње. Основни циљеви који треба да се постигну процесом одржавања су:

1. минимизирање трошкова због застоја у раду услед непланираних отказа на средствима за рад;
2. спречавање, односно успоравање застаревања средстава за рад, које настаје као последица лошег квалитета производа и шкарта;
3. смањивање трошкова рада и материјала у производњи, који настају услед повећаних отказа и застоја у процесу рада и
4. пружање организоване помоћи свуда где је потребно одржавање и управљање средствима за рад.

Одржавање према поузданости (ОПП) је методологија заснована на поставкама теорије поузданости и системским наукама у целини [11]. Основни циљеви и методе методологије ОПП су:

- обезбеђење поузданости и безбедности постројења, односно објекта који се одржава на нивоу који одговара његовим уграђеним својствима (односи се на успешност конструкције и квалитета израде);
- у случају појаве отказа или било какве функционалне грешке, враћање постројења на претходни ниво поузданости и безбедности;
- добијање информација нужних за побољшање конструкције, односно за побољшање оних елемената чија је инхерентна поузданост недовољна и
- остваривање свих оних задатака уз што мање трошкове, подразумевајући и трошкове одржавања и трошкове последица отказа које се не могу отклонити.

У основи овог прилаза је детаљно изучавање отказа и других појава у животу техничког система, тако да се поступци одржавања садржајно и термински усклађују са

стварним потребама. Другим речима, по методологији ОПП одржавање почива на познавању карактеристика поузданости, на бази којих се стално, током рада техничког система врше прогнозе будућих стања, односно предвиђа појава отказа. Доносе се одлуке о поступцима превентивног одржавања које треба спровести у одређеним тренуцима времена, како би се спречила изненадна појава отказа, а тиме и одговарајући застоји и додатни трошкови. У овом оквиру се анализирају и поступци корективног одржавања, и то како они за којима се укаже потреба током превентивних прегледа стања, тако и они који морају да се обаве због појаве отказа између прописаних, односно редовних дијагностичких контрола стања система.

Суштина овог прилаза може добро да се сагледа из предлога препорука за формирање програма одржавања према методологији ОПП, коју припрема међународни стандард ИЕС [12]. У овом документу се истиче да планирање и реализација одржавања у овом случају треба да укључи:

- прикупљање и компилацију података значајних за формирање програма одржавања;
- детаљно упознавање, односно дефинисање техничког система и подсистема (делова) у његовом саставу, посебно са становишта међусобних веза, граничних услова и ограничења;
- потпуно дефинисање функције циља техничког система и свих његових подсистема;
- идентификацију функционално значајних подсистема и делова, чији отказ онемогућава испуњење функције циља;
- детаљну анализу и идентификацију отказа функционално значајних подсистема и делова применом метода “Анализа начина и последица отказа” или Failure Modes and Effect Analysis (FMEA);
- предвиђање вероватноће појаве отказа значајних подсистема и делова;
- оцену критичности отказа функционално значајних делова применом методе “стабла одлучивања” и
- дефинисање адекватних и ефективних поступака одржавања или, евентуално, предузимање других мера које могу да спрече или смање вероватноћу појаве отказа значајних подсистема и делова.

Уз позив на теорију поузданости и посебно на методе анализе отказа које се у овој дисциплини користе, потребно је да се нешто више пажње укаже анализама процеса одлучивања о одржавању. У начелу, анализе могућих одлука о одржавању треба да се врше са становишта критичности појединих отказа. То значи да најпре треба проценити када и шта треба урадити да би се спречила појава критичних отказа, а тиме и спречиле, односно свеле на најмање вероватноће последице ових отказа.

Ове процене и анализе могу да се спроводе на разне начине. Међународни ИЕС документ, препоручује “Метод стабла одлучивања”, поступак који се и иначе радо примењује за решавање оваквих и сличних задатака. Анализа стабла одлучивања је поступак који је методолошки у суштини аналоган поступцима анализе стабла отказа, широко коришћеним у изучавањима поузданости. То је једна логичка процедура, која се алгоритамски и графички спроводи у виду стабла.

Реч је, заправо, о логици тражења одговора на питања која одлучујуће одређују потребе одржавања, тј. која упућују на дефинисање поступака одржавања помоћу којих се могу остварити постављени задаци и циљеви. Ова метода захтева снажну информатичку подршку, богате базе података о свим перформансама поузданости, расположивости и другим својствима система.

Одржавање по овом методу тражи велика средства, снажне рачунаре и високо софистициране софтвере. Зато се ова метода користи само тамо где је то посебно

важно, за одржавање система високе сложености, велике одговорности и великих ризика од последица изненадних отказа (термоенергетска и процесна постројења, системи у ваздушном саобраћају и одбрани, системи телекомуникација и др.).

Од времена застоја највише зависи погодност ремонта. Време застоја дефинише се као време када објекат није у функцији услед отказа и оно се састоји од времена откривања узрока отказа, времена потребног за ремонт, губитка времена на организационе мере и времена достављања резервних делова. Погодност ремонта може се бројно одредити као вероватноћа да неисправност објекта буде отклоњена за одређено време. Као функција времена, вероватноћа успостављања радне способности одређује се преко теорије вероватноће трајности неисправног стања објекта.

За оцену поузданости обновљивих објеката често се користи показатељ назван коефицијентом готовости објекта [1]. Он представља вероватноћу да објекат исправно ради у било ком моменту времена његовог непосредног коришћења. При томе, узима се у обзир само време рада и време застоја, а не и време када се објекат не користи, односно тзв. време чекања:

$$K_G = \frac{\text{Vreme rada}}{\text{Vreme rada} + \text{Vreme zastoja}}. \quad (7.1)$$

Општији показатељ од коефицијента готовости је коефицијент експлоатационе готовости:

$$K_{Ge} = \frac{\text{Vreme rada} + \text{Vreme čekanja}}{\text{Vreme rada} + \text{Vreme čekanja} + \text{Vreme zastoja}}. \quad (7.2)$$

Ужи показатељ од коефицијента готовости је коефицијент сопствене готовост:

$$K_{Gs} = \frac{\text{Vreme rada}}{\text{Vreme rada} + \text{Vreme remonta}}. \quad (7.3)$$

Овај показатељ представља вероватноћу да објекат исправно ради у било ком моменту времена, при идеалној организацији ремонта. У овом случају сматра се да нема губитака у смислу обезбеђивања резервних делова, као и организацији ремонта, тако да губици времена везани за поступак одржавања теже нули.

У ову групу показатеља може се убројати и тзв. коефицијент техничког искоришћења машине или уређаја и он се практично може одредити као:

$$K_{ti} = \frac{\text{Vreme rada}}{\text{Vreme rada} + \text{Vreme čekanja} + \text{Vreme zastoja}}, \quad (7.4)$$

и указује на податак искоришћености објекта у укупном календарском времену експлоатације.

7.1 Одржавање и поузданост

Одржавање, поузданост и трошкови су веома значајни и сви су међузависни [6]. Циљ је пројектовати систем, тако да су расположивост и трошкови оптимизовани. Једностран приступ често није довољан за постизање овог циља. У принципу, овај циљ је оптимално пројектовање система, како би се постигла најбоља могућа равнотежа између расположивости и трошкова.

Израз "трошкови одржавања" је добио на важности током последњих неколико година. Трошкови који настану у току читавог радног века планираног техничког система могу много утицати на потребне одлуке о инвестирању. Информације о

поузданости и планираним методама одржавања током радног века су неопходне за прогнозу трошкова животног циклуса.

Одржавање указује на методе за утврђивање и процену тренутног стања, као и за очување и поновно успостављање номиналног статуса објеката, машина и компонената.

Методе одржавања се могу поделити на превентивне и корективне методе. Те методе укључују услугу, контролу, ремонт и поправку. Стратегијом одржавања се одређују контролни интервали, обим услуга, приоритети поправке и неопходна средства за поправку у виду резервних делова и потребне радне снаге.

За обезбеђење одржавања, потребно је имати при руци неопходне резервне делове у потребној количини и квалитету по захтеву логистике. Ово укључује логистичке послове као што су транспорт и ефикасно складиштење. Слично као поузданост и расположивост, погодност одржавања се може описати као вероватноћа. Основни циљ општег одржавања је да се достигне потребна расположивост или да се одржава на свом садашњем нивоу.

Методе одржавања могу се разликовати као методе за превентивно одржавање, за корективно одржавање и за условно одржавање.

Превентивно одржавање се бави методама одржавања које се спроводе превентивно тј, на одређено време или периодично након одређеног броја оперативних сати. Методе превентивног одржавања омогућавају одређивање и процену тренутног стања, као и очување номиналног статуса објеката, машина и компонената.

Методе превентивног одржавања обухватају:

- сервис: методе за очување номиналног статуса, на пример чишћење, пуњење мазива и расхладних медијума, подешавање, калибрисање;
- контрола: методе за одређивање и процену тренутног стања, на пример контрола хабања, корозије, напрслина, несигурних спојева, повремено или континуално мерење и анализу;
- ремонт: демонтажа појединих компоненти, склопова или елемената и уколико је потребно, замена делова, склопова и компоненти.

Методе превентивног одржавања се најчешће спроводе без разматрања тренутног стања машине. Превентивни рад је рад који се обавља на машини, иако тренутно не постоји технички поремећај. Сврха превентивног одржавања је да се избегну откази проузроковани хабањем, старењем, корозијом и нечистоћама, као и да се спречи било какав ефекат отказа који би могао настати због тих околности. Превентивно одржавање се може назвати и одржавањем из предострожности.

Условно одржавање нема прецизне интервале прегледа и ремонта и на тај начин не укључује периодичну обнову потпуно функционалних компонената и склопова. Осим тога, смањење расположивости може да се избегне, ако се превентивно одржавање спроводи сувише често. Са сталним или периодичним контролама и посматрањима одређених вредности елемената, склопова и компоненти и услед промене неке вредности, могуће је одредити хабање током рада. Ова мерења, запажања и оцене су позната као праћење стања. Уз праћење стања могуће је смањити трошкове поправки и одржавања, без угрожавања поузданости и сигурности производа.

Циљ условног одржавања је да се планирају и спроводе методе одржавања оптимално у погледу времена, квалитета и трошкова. Са овом стратегијом одржавања интензивна контрола критичних компоненти и опреме у току рада се спроводи нпр. са аутоматским мерним уређајима. Дакле, могуће је предвидети када може настати отказ. Са оваквим предвиђањима захтеване методе одржавања могу бити примењене, на пример, за замену делова, пре него што дође до отказа.

Примена условног одржавања је погодна за системе и компоненте за које могу да се мере оперативни услови и врше прегледи током рада [6]. Технике испитивања условног одржавања обухватају, између осталог:

- термографичко испитивање,
- тестови материјала без разарања,
- анализа уља и
- анализа вибрација.

Методe корективног одржавања су потребне за парцијалне и укупне отказе објеката, уређаја и компоненти. Такве методе служе за поновно успостављање номиналног стања. Треба напоменути да методе превентивног одржавања као што су контроле укључују корективно одржавање.

Ако је присутан само један ниво одржавања, методе корективног одржавања се могу поделити на следеће појединачне методе:

- одређивање узрока отказа,
- обавештавање надлежног особља задуженог за одржавање,
- долазак особља на место отказа,
- припрема алата и мерних уређаја за тест контроле,
- локализација отказа на нивоу уређаја или компонената,
- демонтажа оштећеног дела,
- припрема потребних резервних делова,
- замена неисправних делова,
- подешавање, калибрација и испитивање рементованог уређаја,
- укључивање поправљеног уређаја у склоп и
- функционални тест комплетног објекта.

Слично као и код превентивних метода одржавања, ова метода захтева одређену количину времена, људи и материјала. Збир времена које је потребно за сваку појединачну метод даје укупно изгубљено време.

Ако се користи неколико нивоа одржавања, неисправни уређаји биће замењени новим и тако ће се добити потпуно функционални уређаји. Неисправан уређај улази у циклус одржавања. Тиме се, време застоја и поправке смањује, али се тиме не смањује време укупног одржавања. Одлучујући критеријуми за одређивање нивоа поправки су утицај на расположивост и на могућност поправљивости.

Одређивање приоритета поправке се установљује тиме која је компонента система важнија. Значај компоненти је дефинисан од стране пројектанта система. Економски гледано, најзначајнија компонента је компонента чији неуспех доводи до највећих трошкова.

8. ЕКОНОМСКИ ПОКАЗАТЕЉИ ПОУЗДАНОСТИ

Произвођач је до сада разматрао само трошкове квалитета производње. За корисника, укупни трошкови поседовања опреме, у посматраном тренутку, обухватају трошкове набавке, трошкове функционисања и трошкове одржавања исправног стања, а они су подједнако релевантни за оцену поузданости [13]. Укупни трошкови који су настали у периоду од набавка опреме се често називају трошкова животног циклуса. Они се могу поделити на:

- трошкови набавке - капитални трошкови плус трошкови инсталације, превоза, итд;
- трошкови коришћења - трошкови превентивног и корективног одржавања и модификације;
- оперативни трошкови - трошкови материјала и енергије;
- административни трошкови - трошкови прикупљања података, евидентирања и формирање документације.

Пракса идентификације трошкова квалитета није нова, иако је то везано само за веома велике организације које прикупљају и анализирају овај веома значајан део свог пословања [13]. Покушаји да подесе нивои буџета за различите елементе трошкова квалитета су још ређи. То је штета, јер допринос једне активност на послу се на крају мери у финансијском смислу и активностима квалитета, али изузетак нису ни поузданост и одржавање. Ако су трошкови отказа и поправке исказани и компаративни са трошковима побољшања, онда се морају уложити већи напори од стране инжењерског менаџмента. Већа разумевање доводи до расподеле додатних средстава. Тражење квалитета и поузданости ради њих самих нема оправдања за улагање рада, постројења и материјала.

Анализа трошкова квалитета подразумева издвајање различитих ставки са рачуна и њихово груписање на три поделе:

- превентивни трошкови - трошкови спречавања отказа,
- трошкови оцењивања - трошкови који се односе на мерење и
- трошкови отказа - трошкови који су настали као резултат губитка функције, дорада, отказа, итд

Трошкови одржавања су утолико већи, уколико је поузданост мања међутим, продајна цена обично расте са поузданошћу, или са репутацијом коју конструктор има у вези са поузданошћу својих производа [14]. Стога, минимални трошкови поседовања одговарају обично некој поузданости што се налази између врло високе, која се скупо плаћа, и неке осредње, која се понекад прихвата код јефтинијих производа.

Са гледишта конструктора, трошкови враћања производа са тржишта зависе од његове поузданости. Наиме, повећање поузданости често захтева инвестиције и додатне издатке, али ови трошкови могу бити компензовани смањењем трошкова сервисирања производа у гарантном року. Разматрање трошкова враћања производа са тржишта у функцији поузданости представља саставни део анализе вредности. Корисна маржа, која се односи на дати производ, а представља разлику продајне цене и трошкова враћања, мења се у зависности од поузданости. При развоју новог производа конструктор може да бира ниво поузданости који му доноси максимални профит. То

није тако једноставно, јер мора да узме у обзир да се у зависности од поузданости и цене, мења и обим продаје. У вези претходног морају се истаћи два важна запажања:

- економски оптимум, који одређује конструктор, не поклапа се обавезно са корисниковим оптимумом и
- развој технике и технологије често омогућује побољшање поузданости без повећања трошкова.

Уочено је да повећање исправног рада и трајности машинских система захтева повећање материјалних трошкова израде, док се трошкови ремонта и техничког одржавања сразмерно са улагањима смањују. Може се закључити да је поузданост машинских система директно повезана са економским условима.

Као економски показатељ поузданости K_e може се сматрати однос збира трошкова израде и експлоатације објекта и трајност експлоатације објекта [1]:

$$K_e = \frac{Q_i + Q_e}{t_e}, \quad (8.1)$$

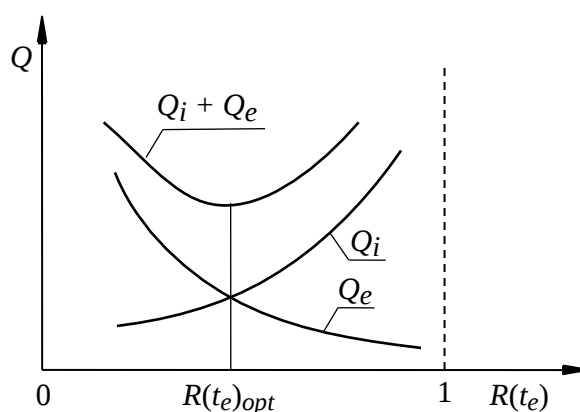
где су:

Q_i - трошкови израде новог објекта који у ширем смислу обухватају трошкове пројектовања, израде, испитивања, транспорта на место рада и слично,

Q_e - трошкови експлоатације који обухватају трошкове техничког опслуживања, ремонта и остале трошкове за одржавање радне способности објекта и

t_e - период експлоатације објекта.

Са економске тачке гледишта оптимални ниво поузданости машинских система произилази из најповољнијих односа трошкова израде и трошкова експлоатације. Ако су приоритет захтеви за већом вероватноћом безотказног рада машинских система, произилази да се морају повећати трошкови израде Q_i , али зато ће у току експлоатације бити значајно смањени трошкови. На слици 12 [1], шематски је приказана зависност трошкова израде Q_i и трошкова експлоатације Q_e од вероватноће исправног рада $R(t = t_e)$ за укупно време експлоатације. За минималне вредности функције $Q_i + Q_e$ добија се оптимална вредност вероватноће исправног рада $R(t_e)_{opt}$.

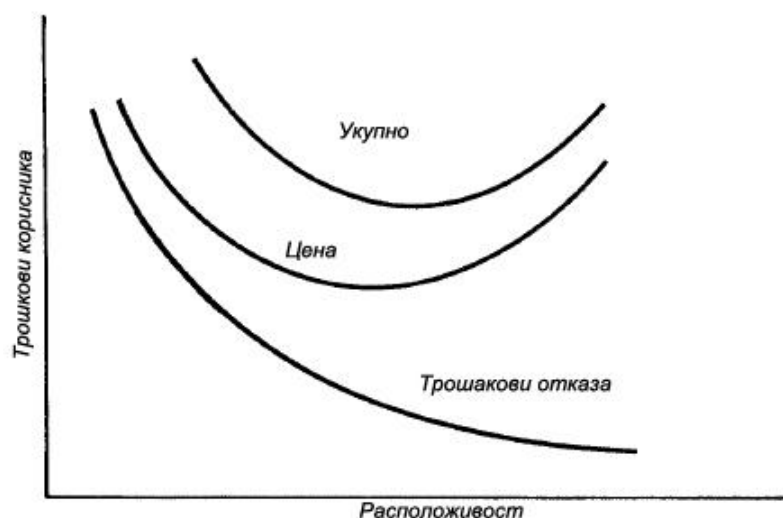


Слика 12. Трошкови у функцији од поузданости

Трошкови животног века ће јасно бити смањени ако се побољша поузданост, погодност одржавања и безбедност, али ће бити повећани за активности које су потребне да се они остваре [13]. Тежи се да се пронађе оптималан скуп параметара који умањују укупне трошкове. Овај концепт је илустрован на сликама 12 и 13. Свака крива

представља цену расположивости. Слика 12 показује општи однос између расположивости и цене. Трошкови производње који садрже трошкове пројектовања, набавке и израде расту са повећањем расположивости. С друге стране, расту трошкови после продаје који се односе на трошкове гаранције, редизајна, испоруке, а такође и губитка угледа због пада расположивости. Укупни трошкови у једном тренутку имају минималну цену за оптималну расположивост. Цена ће бити у складу са овим трошковима.

Гледајући, криву цена / расположивост на графику, на слици 13 [13], где се укључују и кориснички трошкови као што су губитци и расходи, због отказа, који падају на терет корисника. Резултујућа крива такође показује оптималну расположивост која даје минималну цену. Такви дијаграми служе само да илуструју филозофију којом су трошкови умањени као резултат тежње за побољшањем поузданости и одржавања, а чија је уштеда већа од почетних расхода.



Слика 13. Однос цене и трошкови коришћења

Постоји много фактора који утичу на решења поузданости, као што су безбедност, тежина, расположиви простор итд., али са тачке гледишта трошкова, трошкови пораста поузданости нису увек оправдани. Трошкови спровођења РАМС-цикла се обично бити мањи у поређењу са потенцијалним уштедама у безбедности или животном циклусу. Скраћеница РАМС се често користи као скраћеница за поузданост, расположивост, одржавање и безбедност-интегритет (RAMS - reliability, availability, maintainability and safety-integrity). Оправдање трошкова може се наћи за реализацију РАМС активности. У том случају трошкови следећих активности треба да се упореде, ради поређења са предвиђеном штедњом. Трошкови реализације РАМС активности (нпр. ресурси) ће зависити од сложености опреме.

8.1 Цена и сигурност

Када се оцени да је вероватноћа ризичног догађаја извесна, неминовно је размотрити трошкове различитих мера које се могу предузети како би се смањио тај ризик [13]. Уколико је ризик по живот толико висок, онда се он мора смањити као приоритетан, односно морају се задовољити законске мере и обавезе, тако да је еко-

номски значај мали или потпуно без значаја јер опрема и постројења морају да буду безбедна или у супротном затворена.

Ако се опасност по живот сматра довољно малом, онда смањење ризика за дате трошкове може да се анализира да ли је та потрошња оправдана. У овом тренутку концепт ALARP (As Low As Reasonably Practicable) што значи "тако ниско, а тако корисно" постаје битан да би се средства употребила на најефикаснији начин. Ризик се дефинише као ALARP уколико је смањење ризика занемарљиво у односу на трошкове спречавања тог ризика. Проблем је у томе што се речи "безначајни" и "не исплативи трошкови" не могу мерљиво дефинисати. Један од приступа је да се размотре ризици које друштво сматра да су прихватљиви и за повољне и неповољне ситуације.

Спорни параметар је цена очувања живота. Ово је вредност за рангирање евентуалних расхода како би се применила средства на најефикаснији начин у области смањења ризика. Свака техника која ставља људски живот на цену је потенцијално незахвална и тиме често наилази на отпор. Не треба га, у сваком случају, користити као једини критеријум за одлучивање о трошковима.

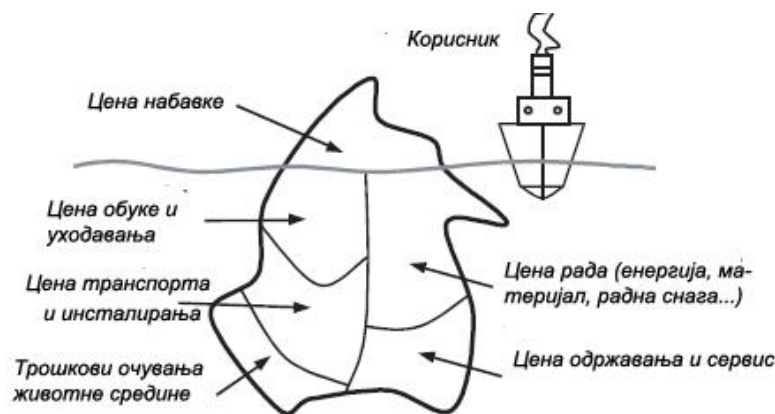
8.2 Трошкови одржавања

Квалитет машинских система обично зависи од тога колико се времена утроши на тестирање као и које се методе тестирања притом користе. С једне стране, ако се више времена проведе у тестирању, онда више грешака може бити уклоњено, што доводи до поузданог система, међутим, цена тестирања тог система ће се такође повећати. С друге стране, ако је време тестирања прекратко, цена система може да се смањи, али тада купци преузимају већи ризик јер купују непоуздан систем. Ово ће повећати трошкове током фазе експлоатације, јер је много скупље да се поправи грешка у току експлоатације него у фази тестирања. Зато је важно да се одреди када је најпогодније да се заврши тестирање и да се систем пусти у рад.

Поузданост, погодност одржавања и доступност имају велики утицај на трошкове који се јављају приликом употребе производа [6]. У циљу процене трошкова коришћења и остварења профита неопходно је разматрање трошкова са аспекта метода поузданости. Поједини трошкови одржавања, који су директно под утицајем израде система су трошкови поузданости и трошкови одржавања.

Временски распон од идеје за развој неког система, производње и употребе до краја коришћења тог производа карактерише се као животног века производа или рок трајања. За то време, трошкови се стално акумулирају, и то директно (тј. у виду оперативних трошкова) или индиректно (тј. трошкови експлоатације надмашују набавну цену). Збир ових трошкова је познат као трошкови одржавања, који укључују све трошкове које корисник производа има због трошкова набавке, као и трошкове настале током коришћења производа (постројење, машина, уређаја итд.) током животног века тог производа.

Основни критеријум купаца за куповину је често само набавна цена. Међутим, са овим ставом неки корисници су претрпели "бродолом". Проблеми настали кроз трошкове одржавања су представљени у виду трошковног леденог брега, на слици 14 [6]. Трошкови одржавања се састоје од трошкова набавке, неподвижених трошкова, трошкови експлоатације, трошкови одржавања и разни други трошкови.



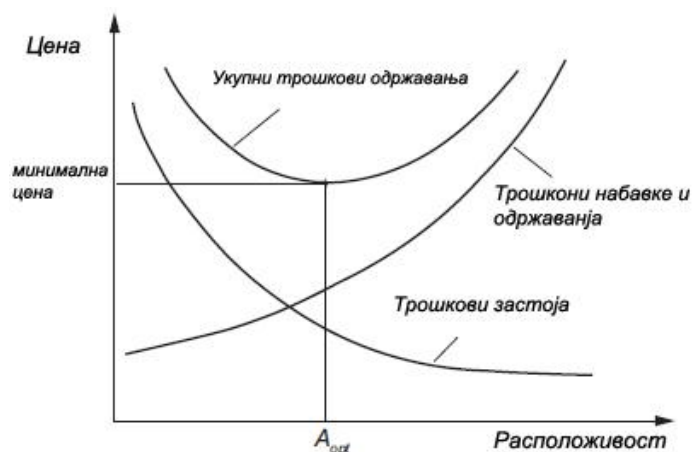
Слика 14. Ледени брег трошкова одржавања са становишта корисника

Током периода коришћења машине јављају се оперативни трошкови и трошкови одржавања, који се непрестано повећавају све до краја животног века производа, чиме играју значајну улогу у инвестиционим трошковима. Циљ оптималног смањења трошкова је минимизирање трошкова одржавања насталих током коришћења производа. Често, корисник не зна где леже највећи узрочници трошкова одржавања. Трошкови одржавања су веома зависни од променљивих фактора и то од поузданости и одржавања.

Цена отказа обухвата трошкове изазване грешкама у фази израде услед нерасположивости објекта [6]. Код објеката код којих је од значаја безбедност, трошкови могу настати у случају посредне штете.

Нерасположивост производа може значајно утицати на његове трошкове одржавања. Дакле, расположивост производа мора бити оптимизирана у циљу постизања најниже вредности трошкова одржавања. Висока поузданост и погодност одржавања брзо доводе до повећања продајних цена. Исто тако, што је боље формирана организација одржавања, самим тим су већи трошкови одржавања. Велика улагања у одржавање и поузданост доводе до повећања расположивости. Истовремено, трошкови настали услед застоја опадају са повећањем расположивости

Збир трошкова набавке и одржавања, заједно са трошковима изгубљеног времена дају одређену расположивост и у тачки A_{opt} су постигнути најнижи трошкови одржавања, а достигнута је оптимална расположивост, слика 15 [6].



Слика 15. Однос између расположивости и трошкова одржавања

9. ЗАКЉУЧАК

У сложеним системима поузданост првенствено зависи од механичких карактеристика система и саставних елемената, што се манифестује кроз показатеље поузданости као што су интензитет отказа, показатељ техничког одржавања, могућност поправке, показатеље исправног рада и слично.

Један од основних проблема повишења конкурентности савремених техничких система на светском тржишту јесте обезбеђење високог нивоа њихове поузданости у експлоатацији. Концепт поузданости заступљен је у свим периодима развоја и коришћења система, тј. у току читавог животног циклуса система. Код многих видова технике, нпр. откази доводе до обезвређивања укупног претходног рада, неопходности понављања решавања проблема и застоја у раду сложених аутоматизованих система. Све ово проузрокује значајно повећање трошкова експлоатације таквих система. Изостанак адекватног разматрања поузданости има последице изражене огромним материјалним губицима и успоравање технолошког напретка на разним нивоима организовања људског друштва.

Интезивни развој теорије поузданости и њене примене у пракси, започео је са развојем авио индустрије. Посебан значај добила је развојем свемирске технологије која је захтевала висок степен безотказног рада. Интензивном производњом аутомобила и других средстава масовне потрошње довело је до изражаја разматрања економског фактора у циљу оптимизације поузданости производа и система.

Поступци испитивања за оцену поузданости система имају посебан значај јер они, с једне стране, представљају јединствене изворе полазних података који се користе за аналитички прорачун или стохастичко моделирање.

Оцена поузданости система може бити реализована на два начина: организацијом специјалних испитивања или експлоатационим посматрањима. Полазећи од постављеног циља да производ треба да задовољи функцију којој је намењен у дефинисаним условима околине, уз најекономичнији утрошак материјала и највиши степен поузданости, долази се до закључка да је анализа поузданости неопходна за добијање квалитетног производа.

Последице неразумевања поузданости су огромни материјални губици и успоравање технолошког напретка у многим виталним областима.

На поузданост неког производа може се утицати у процесу конструисања и пројектовања, у процесу израде и на крају у процесу експлоатације производа. Потреба за планирањем поузданости се све више намеће. Цена непоузданости не представља само цену производа који је отказао, већ укључује и последице које је тај отказ произвео. Сви произвођачи морају производити поуздане системе и развијати адекватан систем одржавања, који ће кориснику обезбедити минималне трошкове коришћења, да би остали конкурентни на слободном тржишту. Поузданост система директно утиче на трошкове животног циклуса. Зато захтев за поузданошћу система и компоненти никада није био већи, посебно међу организацијама које имају за циљ виши степен конкурентности на слободном тржишту.

Теорија поузданости треба да постане оруђе које ће омогућити пројектанту да на основу познавања техничког састава машинских система, предвиди његово понашање и открије она специфична подручја где поузданост, расположивост и сигурност могу бити повећани, а ризик смањен на технички и економски прихватљив начин.

Праћење и мерење параметара поузданости од пресудног је значаја за благовремено откривање недостатака код машинских система. На тај начин добија се информација за предузимање мера одржавања, у циљу отклањања и предупредивања узрока.

Поузданост је веома сложен појам, и представља једну од најважнијих карактеристика система. Да би се одредили параметри поузданости, потребно је добро познавање система. Поузданост битно зависи од стохастичких процеса, тако да се одабир њених показатеља врши на основу вероватноће појаве неког догађаја. Избор показатеља поузданости се врши по диференцијалној и интегралној шеми.

У диференцијалној шеми се прво решава каква својства треба да имају показатељи поузданости, а потом према одређеним нормама се установљавају конкретни показатељи. У интегралној шеми, установљава се списак свих могућих показатеља поузданости, без њиховог разликовања по својствима. Оптимално решење се добија искључењем показатеља, који нису подложни нормирању, а према изабраним критеријумима.

Основни задатак у функцији пројектовања, производње и одржавања јесте да се поузданост и расположивост машинских система подигне и одржава на високом нивоу. То се постиже ако се анализи и праћењу параметара поузданости придаје дужна пажња користећи све расположиве податке функције машинског система.

Без обзира на изузетан значај поузданости машинских система у нашој земљи нема довољно литературе као ни искуства у пројектовању, праћењу и анализи поузданости како у развоју тако и у експлоатацији. Стручњаци који се баве изучавањем и применом поузданости углавном су ослоњени на искуства и литературу страних аутора, првенствено из области авио и свемирске технологије. У нашој земљи теорија поузданости се углавном изучава на универзитетима и то у Београду, Крагујевцу и Нишу. С обзиром на значај ове области веома мали број људи је упућен у теорију и практичну примену поузданости.

Развој привреде и индустрије у нашој земљи условиће у наредном периоду да приоритет развоја и производње буде заснован на теорији и примени поузданости. Тако би се добили производи који могу да буду конкурентни са домаћим и иностраним производима који су конкурентни на нашем тржишту. Једино примена науке може обезбедити квалитетан, поуздан и уз то економски повољан производ.

10. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Јовичић С., Основи поузданости машинских конструкција, Научна књига, Београд, 1990.
- [2] Рамовић Р., Поузданост система електронских, телекомуникационих и информационаих, Београд, 2005.
- [3] Историја теорије вероватноће, <http://www.gimbl.com/cyt/wiki/index.php>, преузето 8.09.2013.
- [4] Поузданост техничких система, www.rgf.rs/predmet/RO/.../EiOGasS_5.pdf, преузето 8.09.2013.
- [5] Стојановић Р., Теорија поузданости и одржавање бродских система, Котор, 2009.
- [6] Bertsche B., Reliability in Automotive and Mechanical Engineering, VDI-Buch Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [7] Вероватноћа појава основних стања система, <http://puns.on.neobee.net/skripta.pdf>, преузето 8.09.2013.
- [8] Ћатић Д., Развој и примена теорије поузданости, монографија, Крагујевац, 2005.
- [9] Dhillon B., Reliability, Quality, and Safety for Engineers, CRC Press, 2005 by CRC Press
- [10] Pyzdek T., Quality Engineering Handbook, New York, 2003.
- [11] Одржавање техничких система, [http://www.rgf.rs/predmet/RO/VII semestar/ Eksploatacija i održavanje gasovodnih sistema/ Predavanja/ EiOGasS_4.pdf](http://www.rgf.rs/predmet/RO/VII%20semestar/Eksploatacija%20i%20odrzavanje%20gasovodnih%20sistema/Predavanja/EiOGasS_4.pdf), преузето 6.09.2013.
- [12] Адамовић Ж., Менаџмент индустријског одржавања, Зрењанин, 2008.
- [13] Smith D., Reliability, Maintainability and Risk, Oxford, Auckland, Boston, Johannesburg, Melbourne, New Delhi, Sixth edition, 2001.
- [14] Лазаревић П., Поузданост – фактор квалитета завистан од времена, Фестивал квалитета, Крагујевац, 2006.