

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: 126/2012

Софија М. Петровић

**Историјат развоја теорије поузданости
Завршни рад**

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Добривоје Ћатић - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада, на основу доступне литературе, кандидат треба да изврши систематизацију података везаних за историјски развој теорије поузданости. Пошто се ова научна дисциплина, између осталог, заснива не теорији вероватноће и математичкој статистици, неопходно је обрадити и развој метода и поступака који се користе при обради података у практичној примени. Посебно је интересно анализирати буран развој и практичну примену теорије поузданости код различитих техничких система у претходном веку.

Препоручена литература:

- [1] Историја поузданости, [http, kscsma.ksc.nasa.gov/Reliability/ Documents/History_of_Reliability.pdf](http://kscsma.ksc.nasa.gov/Reliability/Documents/History_of_Reliability.pdf), преузето: март.2015.
- [2] Поузданост техничких система, www.rgf.rs/predmet/RO/.../EiOGasS_5.pdf, преузето: март. 2015.

Крагујевац, 10. 03. 2014.

ментор:

Др Добривоје Татић, ред. проф.

РЕЗИМЕ

У оквиру рада извршено је прикупљање, систематизација и анализа података везаних за историјат развоја теорије поузданости. Описана је теорија поузданости а уз њу и гране науке на које се она наслања као што су теорија вероватноће и математичка статистика. Затим су у даљем раду хронолошки наведене све битне чињенице везане за ову област, од самих почетака поузданости као научне дисциплине као и разлози настајања ове релативно нове научне дисциплине. Такође су наведен и битни догађаји у историји који су само још више учврстили поузданост као научну дисциплину.

Кључне речи: поузданост, сигурност, поверење, теорија вероватноће, математичка статистика.

ABSTRACT

Data collection, analysis and systematization of knowledge related to the historical preview of the reliability have been given in this paper. The theory of reliability has been described here, as well as some branches of sciences to which it relies on, such as the theory of probability and mathematical statistics. Further on, all of the relevant facts which are connected to this field of study were given in chronological order, starting with the very beginnings of the reliability as a scientific discipline, as well as the reasons which led to formation of this relatively new scientific discipline. Likewise, here have been given some relevant historical events which have even more confirmed reliability as a scientific discipline.

Key words: reliability, safety, confidence, theory of probability, mathematical statistics.

САДРЖАЈ

1. УВОД.....	2
2. ТЕОРИЈА ПОУЗДАНОСТИ.....	4
3. ПОЈАМ ПОУЗДАНОСТИ СА ПОЧЕЦИМА У ПРАИСТОРИЈИ.....	6
4. УТИЦАЈ ТЕОРИЈА ВЕРОВАТНОЋЕ НА ЗАЧЕТАК НАУКЕ О ПОУЗДАНОСТИ.....	7
5. ИСТОРИЈАТ ПОУЗДАНОСТИ ДО ПЕДЕСЕТИХ ГОДИНА ДВАДЕСЕТОГ ВЕКА.....	11
5.1 Поузданост кроз научне дисциплине	11
5.2 Брз развој поузданости као научне дисциплине.....	12
6. ИСТОРИЈАТ ПОУЗДАНОСТИ У ПЕДЕСЕТИМ ГОДИНАМА ДВАДЕСЕТОГ ВЕКА	15
7. ИСТОРИЈАТ ПОУЗДАНОСТИ У ШЕЗДЕСЕТИМ ГОДИНАМА ДВАДЕСЕТОГ ВЕКА	18
8. ИСТОРИЈАТ ПОУЗДАНОСТИ У СЕДАМДЕСЕТИМ ГОДИНАМА ДВАДЕСЕТОГ ВЕКА	21
9. ИСТОРИЈАТ ПОУЗДАНОСТИ У ОСАМДЕСЕТИМ ГОДИНАМА ДВАДЕСЕТОГ ВЕКА...	24
10. ИСТОРИЈАТ ПОУЗДАНОСТИ КРАЈЕМ ДВАДЕСЕТОГ ВЕКА	27
11. ЗАКЉУЧАК.....	30
ЛИТЕРАТУРА.....	32

1.УВОД

У данашње време многи људи се баве стварањем различитих типова система, који су све више распрострањени у разним сферама наших живота. Системи, или разноврсни уређаји, су временом постајали све сложенији и захтевнији, а све у сврху олакшавања живота људи, односно подизања животног стандарда. Временом је човек развијао своје способности да осмисли системе који ће му олакшати живот. Почевши од давнина када су то били само алати којима је човек нешто разбијао или сакупљао, дошло се до данашњих времена када је човек развио толико разноврсних система који му могу олакшати живот као што су: аутомобили, компјутери, машине за разноврсне делатности и други системи који за њега обављају послове које је некада морао да обавља сам. Како се човек развијао, тако се развијала и наука која га прати у свим сферама његовог живота. Уз помоћ науке може се боље схватити у каквом окружењу се живи, које су све предности и недостаци нашег окружења и како могу да се искористе њена богатства с циљем олакшавања живота.

Временом се код човека јавља потреба за поверењем или поузданошћу. Стварајући свет око себе какав се данас може видети, јавила се потреба да све што се направи буде поуздано и да постоји поверење да ће одређени системи функционисати како је очекивано. Све већа сложеност система и све већи трошкови за њихов развој и експлоатацију у први план истичу поузданост као научну дисциплину. Ово откриће је значајно не само за професионалне наменске техничко-технолошке целине већ и за рад обичних кућних апарата, саобраћајних средстава, опреме и уређаја најшире примене, тако да може да се закључи да је врло важно да све што служи човеку ради без застоја, са што мање отказа, да уређаји и системи буду што мање ван функције, да им је расположивост за употребу током целог животног века што већа. То се не односи само на системе као целину, већ и на поједине саставне делове, подсклопове и склопове, дакле, на све елементе који утичу на функционисање система. Побољшање параметара сваког од њих, али и основних материјала и конструктивних карактеристика доприноси укупној поузданости система.

Експлоатациона поузданост има посебан значај у војним техничким системима. Због услова примене у борбеним дејствима, њихове сложености и цене, ови системи захтевају висок ниво поузданог рада и, што је најбитније, безбедан рад у што дужем временском трајању експлоатације. Постигнути високи параметри поузданости битно смањују трошкове одржавања, што је са становишта рационалности изузетно значајно. На тај начин питање које се у вези са поузданошћу често поставља је: „Да ли систем

може да испуни своју функцију уз прихватљиве трошкове?” и то поред функције као примарне, и трошкове одржавања током животног циклуса [1].

Током развијања поузданости развиле су се и посебне научне групе које је прате. То су, у првом реду, теорија поузданости и одговарајуће математичке методе. Оне омогућавају прорачуне поузданости елемената и склопова, испитивања са циљем добијања потребних информација за побољшање параметара поузданости, и израду препорука и мера за повећање поузданости у фази производње.

2. ТЕОРИЈА ПОУЗДАНОСТИ

Технички напредак наше цивилизације донео је доста промена и омогућио је стварање сложенијих система са високим захтевима у погледу радних и економских показатеља, што је захтевало да се већа пажња посвети њиховом квалитету, трајности и спремности да извршавају функцију за коју су намењени. Све ове промене су довеле до стварања једне нове научне гране, теорије поузданости.

Теорија поузданости је релативно млада наука у којој још увек има основних концепата и термина који немају универзалну дефиницију. У почетку је теорија поузданости имала значење да ће производ функционисати како се очекује у одређеном временском периоду [2]. Другачије речено, поузданост је способност објекта (компоненте, уређаја, система) да успешно обавља задату функцију, под одређеним условима, у датом временском интервалу.

Постоји више дефиниција поузданости, и оне гласе [1]:

- „Поузданост је вероватноћа да ће систем успешно вршити функцију критеријума у пројектованом времену рада и датим условима околине.”
- „Поузданост је способност техничког система да извршава захтевану функцију, под датим условима и у датим условима околине.”
- „Поузданост је способност средства да извршава захтеване функције у одређеним условима за одређени период времена. Поузданост средства за рад је мерило о коме је често могуће очекивати отказ средства у одређеним условима експлоатације.”

Дефиниција која најпотпуније објашњава шта је поузданост гласи [1]: „Поузданост је вероватноћа, на одређеном нивоу поверења, да ће систем успешно обавити функцију за коју је намењен, без отказа и унутар специфичних граница перформанси, узимајући у обзир претходно време коришћења система, у току специфичног времена трајања задатка, када се користи на прописани начин и у сврху за коју је намењен под специфицираним нивоима оптерећења”

Поузданост се може дефинисати на више начина, а суштина је да поузданост представља вероватноћу да ће систем успешно обавити задату функцију без отказа.

Није довољно само испитивати поузданост готовог система и њега побољшавати, потребно је водити рачуна и у самој фази пројектовања. Наиме, у фази пројектовања поузданост се утемељује, у фази израде обезбеђује а у процесу експлоатације реализује. То доводи до економске рачунице система. Самим тим што ће конструктор и технолог радити на повећању времена исправног рада, трајности и прилагођености условима експлоатације машинских система, довешће производ до још једног циља којем се тежи, а то је да уложена средства за повећање поузданости буду враћена кроз експлоатацију.

На поузданост система се може утицати при пројектовању, изради и експлоатацији, као што је даље наведено:

- 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 слично,
- при изради се на поузданост може утицати квалитетом израде делова, контролом производње, управљањем технолошког процеса и слично и
- при експлоатацији на поузданост утичу услови експлоатације, техничко одржавање, режим рада и слично.

Од савремених техничких система захтева се висок ниво поузданости, уз истовремено смањење трошкова и скраћење 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.

Теорија вероватноће је математичка дисциплина која се бави изучавањем случајних појава, то јест таквих емпиријских феномена чији исходи нису увек строго дефинисани. Основни модел у теорији вероватноће је експеримент помоћу кога се у природи и друштву врши проучавање везе између узрока и последице.

На исход експеримента обично утиче више услова. Ако се експеримент понавља много пута под истим комплексом услова, појављује се одређена законитост у скупу исхода. Теорија вероватноће се бави тим законитостима увођењем одређене квантитативне мере у облику реалног ненегативног броја – вероватноће, којим се процењује могућност, односно немогућност наступања исхода [3].

Математичка статистика се бави проучавањем скупова са великим бројем елемената, који су једнородни у односу на једно или више заједничких квалитативних или квантитативних својстава. Како индивидуални случајеви могу показивати мања или већа одступања од просечног или типичног, неопходно је да се посматрају у великом броју, у маси, да би се открило оно што је њима опште и законито - јер се законитост испољава у маси [4].

Ове математичке дисциплине су омогућиле разраду специјалних метода прорачуна основних показатеља поузданости.

3. ПОЈАМ ПОУЗДАНОСТИ СА ПОЧЕЦИМА У ПРАИСТОРИЈИ

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. г. п.н.е.), Старом царству Египта (3000 - 2000. г. п.н.е.), и другим старим цивилизацијама, бавили проучавањем нечега што би личило на модерну теорију поузданости. Тачније речено, за сада не постоје докази о постојању директних утицаја ових старих цивилизација на стварање модерне науке о поузданости.

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 п.н.е., када је халдејски инжењер Гудеа на камену плочу угравирао план тврђаве.

Реченица која је пронађена на глиненој плочици у архивама фирме „Синови Мурасу” из Нипура у Индији, која датира из тридесет пете године владавине Артаксереса I, 429. године п.н.е., 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. 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” [5].

Писани докази о употреби техничких цртежа сежу до само 30. године п.н.е. када је Витрувиус, римски архитекта, писао студије о архитектури. 1849. године, 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 [5].

4. УТИЦАЈ ТЕОРИЈА ВЕРОВАТНОЋЕ НА ЗАЧЕТАК НАУКЕ О ПОУЗДАНОСТИ

Све до нашег времена погрешно је преношено мишљење да је теорија вероватноће настала у 17. веку, када су Ферма и Паскал почели да изучавају игре на срећу. Први радови тих европских математичара, али и Кардана у 16. веку, који су садржали основне идеје теорије вероватноће који су се тад појавили били су у вези са одређивањем шанси добитка у играма на срећу. Сасвим се логично поставља питање зашто игре на срећу, које су постојале хиљаду и више година раније, нису подстакле појаву и развој теорије вероватноће и пре средине 17. века. Између Паскала и Ферме почела је 1654. године преписка о низу задатака, међу којима се нашао и задатак о подели улога приликом прекида игре. Многи аутори придају изузетан значај поводу ове преписке и појави саме теорије вероватноће [6].

Савремени историчари не поричу значај утицаја игара на срећу на развој теорије вероватноће, али истичу да су задаци и проблеми, који су извршили основни утицај на њену појаву и развој, поникли при обради статистичких података и резултата у различитим наукама.

Следећа етапа се везује за Јакоба Бернулија. Треба истаћи да је у историјско-математичкој литаратури улога Паскала и Ферме у стварању теорије вероватноће преувеличана, а да се Хајгенсу придаје другостепени значај. Међутим, његова књига *О рачуну у хазардним играма* је прва књига о теорији вероватноће која је до појаве радова Јакоба Бернулија имала велики значај за развој ове теорије. Наиме, 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.

У даљем раду приказани су подаци из живота и рада научника који су својим радовима доприносили развоју теорије вероватноће.



Ћироламо Кардано (*Girolamo Cardano*, 1501-1576) био је 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. По сопственим речима, провео је много времена играјући шах и хазардне игре и као колатерални производ те његове страсти појавила се *Књига о игри коцком*, која је садржала зачетке теорије вероватноће.

Књига је написана 1526. године, а штампана је тек 1663. године. Кардано је написао велики број књига. Рукописе, који су чинили преко 120 књига, спалио је, очекујући хапшење. Неке од њих су објављене за његовог живота. Тек у 19. веку, математичари су одали дужно признање Кардану за његове значајне резултате [7].



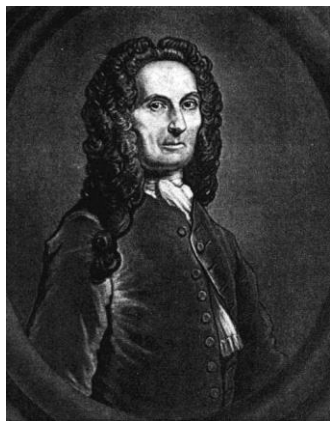
Блез Паскал (*Blaise Pascal*, 1623-1662) био је француски математичар, физичар и филозоф. Паскал је одмалена показивао интересовање за науку, па је већ са осамнаест година конструисао прву математичку машину, механички сабирач, како би помогао свом оцу у пословању. Пратећи друге радове, Паскал са шеснаест година пише расправу о конусним пресецима – *Essai sur les coniques*. Иако је већи део изгубљен, важан део тог рада је сачуван, и познат је као Паскалова теорема. Паскалов рад је био толико зрело написан да је Декарт, када је видео рукопис, одбио да поверује да дело није заслуга његовог оца. Паскал 1650. године напушта свет науке и окреће се религији, односно, како је он написао, „разматрању величине и мистерије човека”. Паскалу у част је име добила јединица за притисак ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ N} / \text{m}^2$). Пре Паскала нико од математичара није рачунао вероватноће догађаја на начин на који се то и сада ради [8].



Пјер де Ферма (*Pierre de Fermat*, 1601-1665) био је француски правник и математичар. Бавио се теоријом бројева, геометријом, алгебром и теоријом вероватноће. Још као студент показивао је несумњиви таленат за математику истакавши се 1629. године својом рестаурацијом Аполонијевог дела лат. *Plane loci* (у слободном преводу *Значајне тачке у равни*). Био је један од зачетника диференцијалног рачуна са својим методом проналажења највећих и најмањих ордината кривих линија, аналогним тада још непознатом диференцијалном рачуну. Можда су још значајнија његова бриљантна истраживања у теорији бројева. Такође су битни његови доприноси аналитичкој геометрији и вероватноћи. Његова преписка са Блезом Паскалом је основ теорије вероватноће [9].



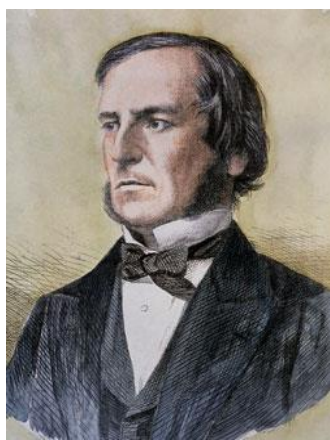
Јакоб Бернули (*Jacob Bernoulli*, 1654-1705) био је швајцарски математичар. Његов допринос математици обухвата развој анализе бесконачно малих величина, теорије редова, варијационог рачуна и теорије вероватноће. У теорији вероватноће Јакоб Бернули је доказао један специјалан случај закона великих бројева и конструисао модел за описивање низа независних експеримената, такозвана Бернулијева, или биномна шема. Његов докторат *Умеће погађања* (*Ars Conjectandi*) је био преломна тачка у развоју теорије вероватноће. Објављен је 1713. године, осам година након његове смрти. Први је применио рачунање интеграла. Назив интеграл увео је касније Лајбниц [10].



Абрахам де Моавр (*Abraham de Moivre*, 1667-1754) био је 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. Познат је по „Моавровој формули”, која повезује комплексне бројеве и тригонометрију и по раду на „нормалној дистрибуцији” и „теорији случаја”. Године 1697. изабран је као члан Научне академије (*Royal Society*) у Лондону. Године 1718., Де Моавр је написао књигу о теорији вероватноће названој *Доктрина среће* (*The Doctrine of Chances*)[11].



Пјер Симон Лаплас (*Pierre-Simon, Marquis de Laplace*, 1749-1827), био је француски математичар, физичар и астроном који је поставио завршни камен математичке астрономије сумирајући, проширујући и систематизујући радове својих претходника Паскала, Ферме и Бернулија у делу од пет томова *Небеска механика* (*Mécanique Céleste*) објављиваних у периоду од 1799. до 1825. године. Ово ремек-дело превело је геометријске студије са механике, коју је користио Исак Њутн, на студије засноване на рачуну, познате као физичка механика. Доказао је теорему која се назива Моавр-Лапласова теорема, а коју је заправо открио Леонард Ојлер. Увео је и појам математичког очекивања [12].



Џорџ Бул (*George Boole*, 1815-1864) био је енглески математичар и филозоф и оснивач математичке логики. Такође се бавио и теоријом вероватноће. Његово највеће достигнуће је било увођење у математику и логику појма алгебре Була. Због значаја тог термина као и његове примене у информатици и математичкој логици Бул се сматра за једног од твораца тих области науке. Булово најважније дело било је *Истраживање закона мисли на коме се заснива математичка теорија логики и вероватноће*, објављено 1854. године. Бул је пришао логици на нов начин, сажимајући је у просту алгебру, претварајући логику у математику. То је алгебарска структура која сажима основу операција И (AND), ИЛИ (OR), НЕ (NOT), као и скуповних операција као што су унија, пресек и комплемент [13].



Андреј Николајевич Колмогоров (*Андрей Николаевич Колмогоров*, 1903-1987) био је 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). Особито су значајни његови резултати у теорији вероватноће, којој је поставио аксиоматске основе (Колмогоровљев аксиом, 1933. године). Бавио се проблематиком наставе математике,

написао је велики број чланака за Бољшају Советскају Енциклопедију. Био је члан Руске академије наука од 1939. године [14].

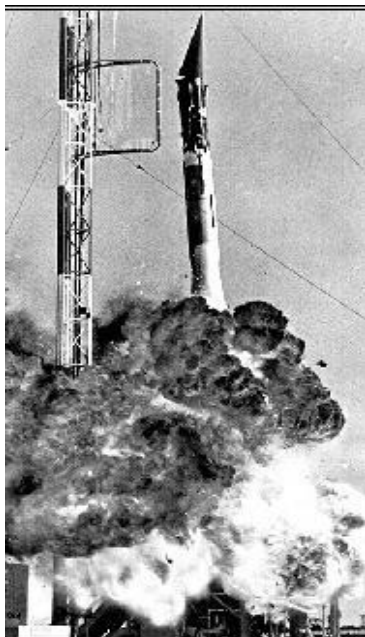
Сви ови догађаји и научници су довели до стварања могућности да се реше проблеми који се јављају приликом рада одређених система везаних за поузданост тих система. Све ове значајне личности као и њихова достигнућа значајно су допринели стварању једне нове научне дисциплине, поузданости, тако да се може рећи да су ови научници започели развој поузданости или дали идеје о решавању проблема који се јављају у поузданости.

5. ИСТОРИЈАТ ПОУЗДАНОСТИ ДО ПЕДЕСЕТИХ ГОДИНА ДВАДЕСЕТОГ ВЕКА

5.1 Поузданост кроз научне дисциплине

Поузданост је популаран концепт који се почео употребљавати 1816. године. Реч „поузданост” је први пут споменуо песник и критичар Самуел Тејлор Колериџ (*Samuel Taylor Coleridge*). Статистички гледано, поузданост је целина групе мерења или мерни инструмент, који се често користи да опише тестирање. У том смислу тест се сматра поуздарим ако добијемо исти резултат више пута. На пример, ако је тест намењен за оцењивање особине (као што је интровертност), онда сваки пут када се тест подлаже субјекту, резултати треба да буду приближно исти.

У психологији, поузданост се односи на конзистентност или постојаност мере. Стога, пре Другог светског рата, поузданост као реч је значила поверљивост или понављање. Садашња употреба речи је поновно дефинисана од стране америчке војске 1940. године и еволуирала је до данас. У почетку је имала значење да ће производ радити како је очекивано. Садашње значење подразумева низ додатних својстава која обухватају производе, сервисне апликације, софтверске програме или људску делатност. Ова својства сада прожимају сваки аспект нашег садашњег технолошког света.



Што се тиче психичког ефекта који непоузданост може да има, треба се сетити два неуспела лансирања америчког сателита Вангард 1 (*Vanguard 1* је први сателит из серије Вангард, који је полетео у свемир 1958. године и још кружи око Земље), која су претходила неуспешном лансирању, приказаном на слици 1, у журби да се што пре парира Совјетском Савезу, који је лансирао сателит Спутњик 1 (*Спутник 1*, је први вештачки сателит који је избачен у орбиту 1957. године). Американци су пренебрегли детаљније разматрање поузданости Вангарда 1 што им се касније дуго светило по питању престижа.

Слика 1 - Вангард 1 (неуспели покушај лансирања, где је ракета експлодирала при самом полетању)

У тржишној производњи психолошки ефекти непоузданости могу имати велике последице на промет и поверење потрошача. Најзад, можда најнеповољнији ефекат непоузданости огледа се у националној безбедности, која у техничком смислу зависи од националних богатстава, индустријског потенцијала, нивоа војне технологије, борбене готовости и војног буџета.

Поузданост има велики утицај на последње две ставке. Она не утиче директно на ниво војне технологије, иако њене методологије убрзавају напредак у том правцу. Међутим, поузданост директно утиче на борбену готовост. Када се говори о броју топова, броју ракета, и тако даље, мисли се на њихов физички, а не на њихов ефективни број. Тако на пример, ако је поузданост неког система наоружања 50%, онда је ефективни број оваквих расположивих система једнак највише једној половини стварног броја тих система. Када се ова чињеница не би узимала у обзир, то би значило да се сматра да је поузданост ових система 100%, иако је стварна ситуација другачија. Закључак који из овога може да се извуче јесте да се мора знати ниво поузданости ако постоји жеља за планирањем у смислу ефективног а не физичког броја. Тако се дошло до открића да преко 50% укупне електронске опреме припремљене за Други светски рат није било у функцији јер на њих није било примењено тестирање нити испитивање било какве поузданости.

У електроници, значење поузданости се није значајно мењало све до проналаска сијалице, телефона и производње и дистрибуције наизменичне струје. Рана примена поузданости је започета процесом откривања телеграфа. То је био систем са батеријом који се састоји од једноставног одашиљача и пријемника повезаних жицом. Главни недостатак је могла бити покидана жица или недовољан напон. Од 1915. године, почео је да се користи радио са неколико електронских цеви.

Аутомобили су се нашли у све чешћој употреби већ до 1920. године и могу да се користе у представљању механичких примена поузданости. 1920. године, др Валтер А. Шухарт (*Walter Andrew Shewhart*, 1891-1967) у Бел лабораторијама (Bell Labs) је промовисао побољшање поузданости производа кроз коришћење статистичке контроле квалитета. Валтер Шухарт је био инжењер, научник и филозоф који је био упознат са достигнућима научног управљања организацијом. Проблем који га је посебно занимао био је проблем обухваћене варијације, отпадака и шкарта у процесу производње. Шухарт је осмислио оригиналну верзију статистичке контроле квалитета за серијску производњу сложених централних телефонских станица и телефонских апарата [15].

У двадесетом веку, паралелно са развијањем поузданости производа, развијала се и статистика у двадесетом веку. Статистика као средство за мерење ће постати нераздвајни део поузданости. Са ове тачке гледишта, произвођачи су и даље били одговорни за поузданост и поправку. Нису се улагала средства за спречавање грешака пре пуштања производа у употребу.

5.2 Брз развој поузданости као научне дисциплине

Почетак брзог развоја поузданости као научне дисциплине везује се за тридесете године прошлог века, када је почео и нагли развој ваздухопловне индустрије. 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.

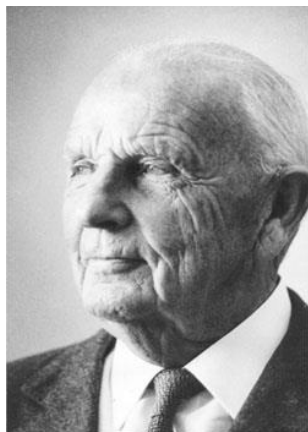
Џон фон Нојман (*Margittai Neumann Janos Lajos*, 1903-1957) и други научници, истих тридесетих година двадесетог века, су доказали да поузданост не представља границу величине и сложености система, односно да је могуће изградити систем било које величине и сложености и било које поузданости. Нојман је био мађарско-амерички математичар и научник који је дао допринос квантној физици, функционалној анализи, теорији скупова, топологији, информатици, економији, нумеричкој анализи, хидродинамици, статистици, као и многим другим математичким пољима, као један од историјски истакнутих математичара. Написао је и објавио 150 радова, од тога, 60 радова из чисте математике, 20 радова из физике и 60 радова из примењене математике. Развио је и теорију о структури људског мозга пре него што је преминуо. Његово интересовање било је веома широко [16].

Током двадесетих и тридесетих година двадесетог века, Фредерик Тејлор (*Frederick Winslow Taylor*, 1865-1915) био је амерички инжењер механике који је тежио побољшању индустријске ефикасности, и радио на томе да се производи учине поузданијим а процес производње ефикаснијим, и први је одвојио инжењерство од управљања и контроле [17].

Чарлс Линдберг (*Charles Lindberg*) је тврдио да ће деветоцилиндрични мотор летелице 1927 (*1927 Transatlantic Flight*) бити у стању да ради 40 непрекидних сати без отказа. Он је био амерички пилот, и први човек који је самостално прелетео Атлантски океан. Лет авионом *Дух Сент Луиса* (*The Spirit of St. Louis*) од Њујорка до Париза 21. и 22. маја 1927. године трајао је 33 сата и 30 минута [18].



Слика 2 – Чарлс Линдберг испред „Духа Сент Луиса”



Током овог периода **Валоди Вејбул** (*Ernst Hjalmar Waloddi Weibull*, 1887-1979) је радио у Шведској и истраживао замор материјала, и створио је теоријски модел, који носи његово име. 1939. године објавио је рад на тему *Вејбулова расподела* (*Weibull distribution*) у области теорије вероватноће и статистике. Он је објавио многа истраживања на тему јачине материјала и пукотина приликом замора материјала, на тему лежајева, и наравно, на тему *Вејбулова расподела*, као и једну књигу о анализи замора 1961. године.

Истражујући динамичку издржљивост материјала, овај шведски научник обавио је низ истраживања. Када је извршио

статистичку анализу добијених резултата, увидео је да се нормална расподела не може користити за моделирање статистичког обележја. Уопштавањем експоненцијалне расподеле, и прилагођавањем математичког модела емпиријској расподели, Вејбул је дошао до нове расподеле која сада носи његово име [19].

Тридесетих година Росен и Рамлер (*Rosin, Rammler*) су истраживали сличне теоријске моделе којима се описује финоћа угља. Објавили су *Росен-Рамлерову расподелу* (*Rosin-Rammler distribution*), која представља математичку форму Вејбуловог теоријског модела, и која се примењује у анализи величине честица.

До 1940. године, поузданост као дисциплина у инжењерству није постојала. Други светски рат је довео до увођења многих нових електронских уређаја које је користила војска. То су електронски прекидачи, преносни радио, радарски и електронски детонатори, као и електронски рачунари који су се појавили током рата, али су комплетирани тек након завршетка рата. На почетку рата, откривено је да преко 50% укупне електронске опреме припремљене за рат није било у функцији.

За развитак поузданости у овом периоду допринело је тестирање нових материјала и замора материјала. М. А. Минер (*M.A. Miner*) објавио је значајан рад под називом *Збирни недостаци замора* 1945. године у часопису „Америчко удружење инжењера механике” (*American Society of Mechanical Engineers, - ASME*), професионалном удружењу које се, како сами кажу, бави промовисањем уметности, науке, и праксе мултидисциплинарног инжењерства и примењених наука широм света. Мало после Минера, Бенџамин Епстајн (*Benjamin Epstein*) је објавио рад *Статистички аспекти проблема лома* у Часопису примењене физике у фебруару 1948. године.

У војсци поузданост се при испитивањима у том периоду још увек махом примењивала на електронске цеви, без обзира да ли су се користиле у радарским системима или другим електронским уређајима. Ови системи су се показали проблематичним и скупим током рата. Након рата, процењено је да половина опреме коришћене на бродовима није функционисала. Електронске цеви су један од основних проблема који се јављао у овим системима. Ударање опреме или уклањање цеви и поновно инсталирање су била два главна начина да се поправи електронски систем који је отказао. Војска није имала средстава за поправку опреме тако да је половина њихове опреме била нефункционална.

Трошкови би били огромни да у наредном периоду, тачније 1948. године, Институт инжењера електротехнике и електронике (*IEEE*) није формирао „Друштво које се бави поузданошћу” (*The Reliability Society*), чији је председник био Ричард Ролман (*Richard Rollman*). Такође, те исте 1948. године, З.В. Бирнбаум (*Zygmunt Wilhelm Birnbaum, 1903-2000*) је основао „Лабораторију статистичких истраживања” (*Laboratory of Statistical Research*) на Универзитету у Сијетлу у држави Вашингтон који је, кроз своју дугу сарадњу са „Поморском канцеларијом за истраживања” (*Office of Naval Research*), служио за јачање и ширење употребе статистике. Бирнбаум је био пољско-амерички математичар и статистичар који је допринео функционалној анализи, непараметарском тестирању и процени, вероватноћи неједнакости, као и теорији вероватноће [20].

То је била база за почетак даљег развоја поузданости као научне дисциплине. Други светски рат је био окидач да се схвати колико је поузданост значајна за рад сваког система. Захваљујући овим догађајима постепено се развијала идеја да се поузданост сврста у научне дисциплине, и да јој се да одређени значај за који се постепено бори и данас.

6. ИСТОРИЈАТ ПОУЗДАНОСТИ У ПЕДЕСЕТИМ ГОДИНАМА ДВАДЕСЕТОГ ВЕКА

Почетком педесетих година проблем поузданости је дефинисан и решења су предложена како у војне тако и у комерцијалне сврхе. У то време постојали су рачунари који су користили UNIVAC I компјутере (*Universal Automatic Computer*, први рачунар за пословне намене) и попуњавали су читаве просторије, користили су снагу у киловатима и имали су 1024 бита меморије, али престајали су са радом на сваких сат времена. 1951. године основан је Центар за ваздухопловни развој у Риму (*Rome Air Development Center - RADC*).



Слика 3. UNIVAC I, компјутер са пропратним компонентама из RADC-а

Исте године, Валоди Вејбул је објавио свој први рад под називом „Функција статистичке дистрибуције у широкој примени” (*A Statistical Distribution Function of Wide Applicability*) [19].

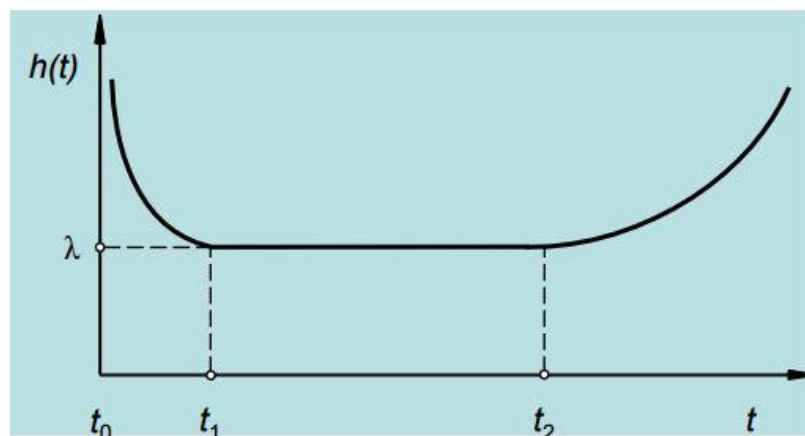
Педесетих година, покренута је студијска група у оквиру војске. Ова група се звала Саветодавна група за поузданост електронске опреме, (*Advisory Group on the Reliability of Electronic Equipment*, - AGREE). До 1952. године ова група је препоручила следеће три ставке за стварање поузданих система:

1. од добављача се тражи већа конзистентност и да се развију боље компоненте;
2. војска би требало да установи квалитет и поузданост потражње за добављаче компоненти;
3. требало би да се скупе стварни радни подаци за компоненте не би ли се установио корен узрочника проблема.

AGREE група је имала тежак задатак јер је међу првима покренула питање решавања проблема поузданости одређених система из разлога што је у самом почетку поузданост скуп процес који захтева организовано и ефикасно планирање, испитивање, и извештавање без могућности „да се докаже”, то јест да покаже своју вредност у односу на оно што је уложено. Међутим, после почетног периода улагања, достигнута виша поузданост и економски би се исплатила јер би били спречени многи откази који би се вероватно догодили и проузроковали велике материјалне и друге губитке. Зато је обавеза техничког и управљачког кадра у привредним организацијама да поседују теоријска и практична знања из подручја поузданости како би били у бољој ситуацији да утичу и поправе такво стање, што је ова група покренула и остварила.

Педесетих година двадесетог века покренуте су многе конференције са фокусом на неке важне теме везане за поузданост. 1955. године започета је и конференција на тему електричних контаката и конектора која је ставила акценат на физичке особине система и помогла разумевању отказа механизма, као и поузданости тих система.

1957. године представљен је крајњи извештај од стране AGREE комитета, који је закључио следеће. Чињеница је да већина радио-система који садрже електронске цеви прати криву интезитета отказа, тј. криву каде, која је приказана на слици 4.



Слика 4. Крива интезитета отказа (крива каде)

Било је лако да се развију заменљиви модели електронских цеви, касније названи Стандардни електронски модели (*Standard Electronic Modules*, - SEM), с циљем да се брзо поправи систем који је отказао, а они су наглашавали мере делова и склопова. Даље препоруке су укључивале вршење формалних демонстративних тестова за статистичку поузданост производа. Такође је било препоручено вршење дужих и оштријих тестова за рад производа у срединама повишених и снижених температура и вибрација. Ово је постало познато као AGREE тестирање, које се касније претворило у Војни стандард 781 (*Military Standard 781*). Последња ставка коју је представио AGREE извештај је заправо класична дефиниција поузданости. У извештају је наведено да дефиниција гласи: „производ који врши одређену функцију под датим условима у одређеном временском периоду без отказа је поузданост”.

Постоји још један други већи извештај о „Предвиђању поузданости” (*Predicting Reliability*) из 1957. године који је написао Роберт Ласер (*Robert Lusser*) у коме је он нагласио да 60% отказа једног војног ракетног система произилази из његових компонената. Он је такође приказао да тренутне методе одређивања квалитета и поузданости за електронске компоненте нису довољно адекватне и да је потребно још истраживања. *Компанија ваздухопловни радио* (*Aeronautical Radio, Incorporated*, -

ARINC) је компанија која је основана 1929. године и која је била главни добављач транспортних комуникација и решења за инжењерске системе за осам индустрија: авијацију, аеродроме, одбрану, владу, здравство, мреже, безбедност, и транспорт, и која је поставила процесе побољшања код произвођача електронских цеви.

Ова деценија завршава тако што је Радио Корпорација Америке (*Radio Corporation of America*, - RCA) објавила информације о интензитетима отказа неких војних компонената у публикацији TR1100, „Анализа поузданости замора код електронске опреме” (*„Reliability Stress Analysis for Electronic Equipment”*, објављена у новембру 1956. године) која је представљала изведен рачун интензитета отказа компонената. Римски ваздушни развојни центар (*Rome Air Development Center*, - RADC, који се од 1991. године зове Римска лабораторија, или Rome Laboratory) се надовезао на ову публикацију и то је потом из „RADC Приручника поузданости” из октобра 1959. године постало основа за Војни приручник 217 (*Military Handbook 217*, или MIL-HDBK-217) [21].

Ова деценија се завршила са доста активности и обећања, многи радови су били објављивани на конференцијама, што је показало раст интересовања на овом пољу. Завршницу овог периода представља историја поузданости до 1959. године коју је саставио и објавио Рајерсон (*C.M. Ryerson*).

7. ИСТОРИЈАТ ПОУЗДАНОСТИ У ШЕЗДЕСЕТИМ ГОДИНАМА ДВАДЕСЕТОГ ВЕКА

Шездесете године двадесетог века су освануле са неколико значајних догађаја. RADC је започео проматрање физичких особина система приликом отказа на Конференцији Електронике (*Electronics Conference*) коју је спонзорисао Институт технологије Илиноис (*Illinois Institute of Technology*, - ИИТ).

Све веће ангажовање у истраживању свемира ће створити NASA-у 1958. године. После неколико неуспешних мисија у првим годинама рада, долазе до закључка да је поузданост јако битан фактор и постају водећа сила за побољшавање поузданости компонената и система.

Ричард Нелсон (*Richard Nelson*) из RADC-а је написао документ „Потврда процедура квалитета и поузданости за монолитна микрокола” (*„Quality and Reliability Assurance Procedures for Monolithic Microcircuits”*), што ће касније постати Војни стандард 883 (Mil-Std 883, или *Military Standard 883*) и Војна спецификација за микрокола 38510 (Mil-M-38510). Војни стандард 883 установљује једнообразне методе, контроле и процедуре за тестирање микроелектронских уређаја подесних за употребу у војним и атмосферско-космичким електронским системима [22]. Војна спецификација за микрокола 38510 је спецификација која одређује опште захтеве за монолитна, вишечипна и хибридна микрокола и захтеве потврде квалитета и поузданости који се морају испунити у набавци микрокола [23].

Са појавом малих преносних радио-транзистора почели су се све више користити полупроводници. Индустрија нуклеарне енергије је у том тренутку историје била у све већем успону. Захтеви војних постројења за применом пројектила у авионима, хеликоптерима и подморницама привукли су разноврсне технологије.

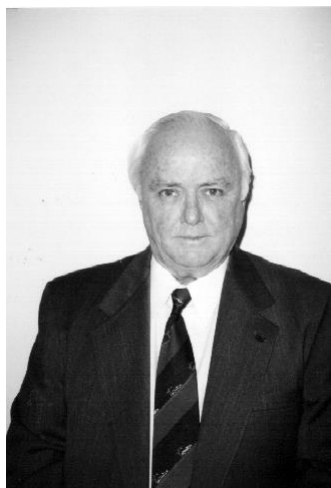
Током ове деценије доста људи је почело да користи и доприноси расту и развоју Вејбулове расподеле, честој употреби Вејбуловог графика и ширењу Вејбулове расподеле и примене анализа. Неки од ових људи који су потпомогли развоју Вејбулових теорија ће овде бити поменути.



Доријан Шајнин (*Dorian Shainin*, 1914-2000) био је утицајни амерички консултант за квалитет, инжењер ваздухопловства, аутор, професор универзитета, и био је најпознатији по својим доприносима на пољима решавања индустријских проблема, производне поузданости и инжењеринга квалитета. Написао је један од првих приручника о Вејбулу у касним педесетим годинама двадесетог века. У то време Ленард Џонсон (*Leonard Johnson*) и Џенерал Моторс (*General Motors*) су помогли развоју метода графика предлагајући средње низове [24].



Професор Гамбел (*Emil Julius Gumbel*, 1891–1966), био је немачки математичар и политички писац који је био од изузетне важности за развој теорије екстремних вредности. Написао је важну књигу на тему *Статистика екстрема* (*Statistics of Extremes*) и произвео је и анализирао расподелу вероватноће која је у његову част постала позната као Гамбелова расподела. Показао је да је Вејбулова расподела заправо Расподела трећег типа најниже екстремне вредности (*Type III Smallest Extreme Value distribution*). Ово је расподела која описује ситуацију најслабије карике. Утврдио је да Вејбулова расподела ради са веома малим бројем узорака, да су потребне само две или три неуспеле инжењерске анализе. Ово се користило за испитивање безбедности у ваздухопловству као и у тестирању са малим бројем узорака (на пример, за статистичку веродостојност, потребно је више узорака). У компанији Прат и Витни (*Pratt & Whitney*, или P&W) вршено је извођење закључака из неуспелих анализа, тестирање дизајна и разноврсних метода. У исто време и многи други научници су испитивали ову област и осмислили неке од метода анализе. Тим методама су превазиђени многи недостаци у количини података који су потребни [25].



Доктор Роберт Абернати (*Dr. Robert Abernethy*, рођен 1940. године), је стручњак у развоју млазних мотора за авионе, као и светски вођа у истраживању Вејбулове расподеле и аутор стандардне референце за Вејбулову расподелу под називом *Нови Вејбулов уџбеник* (*The New Weibull Handbook*) у којем су смештене и анализе других аутора. Овај уџбеник је светски водећи приручник анализе метода које се служе Вејбуловом, Нормалном, Експоненцијалном, Логнормалном, Каплан-Мејеровом и другим типовима расподела [26]. Абернати је изванредан инжењер и статистичар. Добитник је многих стипендија и створио је многе патенте. Пензионисао се из Прата и Витнија након тридесет и две године рада за њих. Као један од пионира њихове компаније развио је велики број примена, метода анализе и корекција Вејбулове расподеле [27].

1963. године Вејбул је био вандредни професор на Колумбија универзитету и тамо је радио са професорима Гамбелом и Фројденталом (*Hans Freudenthal*) на Институту за проучавање замора и поузданости (*Institute for the Study of Fatigue and Reliability*). Док је радио као консултант за Лабораторију материјала ваздушних снага САД-а (*US Air Force Materials Laboratory*), објавио је књигу о материјалима и тестирању замора 1961. године. Касније је прешао да ради за Војску САД-а за коју је објављивао извештаје током седамдесетих година двадесетог века.

Требало би да се помене још неколико кључних датума и догађаја из ове деценије. 1962. године Додсон (*D.A. Dodson*) и Хауард (*B.T. Howard*) из Бел лабораторија објавили су рад о отказима приликом старења код полупроводничких уређаја („*High Stress Aging to Failure of Semiconductor Devices*”) на Расправама седмог националног симпозијума за поузданост и контролу квалитета (*Proceeding of the 7th National Symposium of Reliability and Quality Control*). Овај рад оправдава Арениусов модел за полупроводнике. Многи други радови са ове конференције изучавали су и друге компоненте за побољшање поузданости. До 1967. године ова конференција је

преименована у Синпозијум о физичким особинама поузданости (*Reliability Physics Symposium, RPS*), где је реч „Интернационалан” додата називу неколико година касније.

Заправо је 1962. година кључна година, заједно са првим издањем Војног приручника 217 од стране Морнарице. Већ тада су постојале две главне гране проучавања поузданости. Једна од ових грана је настала за потребе истраге отказа, а друга ради предвиђања отказа. Ова деценија ставља тачку на досадашње студије, обзиром на то да је већ у то време силикон као материјал постао доминантан у многим индустријама као и у проучавању поузданости. Већ у ово време су дефинисани одређени стандарди. У многим индустријама су такође били дефинисани нови стандарди који су постављали одређене стандарде како за произвођаче тако и за добављаче.

Широм света, у разним земљама, професионалци су започињали да истражују поузданост и да учествују са својим радовима на конференцијама. Ова деценија завршава слетањем људи на Месец што је показало колико је далеко напредовала поузданост за само десет година. Већ тада је била препозната и проучавана поузданост људи, што је резултирало у Свејновим (*A.D. Swain*) радом о Техникама предвиђања стопе грешака код људи (*THERP, The Techniques for Human Error Rate Prediction*). 1969. године Бирнбаум и Сондерс су описали модел расподеле који би могао да се изведе из процеса физичких особина код замора где би раст пукотина проузроковао отказ. Ово је било важно за нове моделе расподеле који су описивали процесе деградације.

8. ИСТОРИЈАТ ПОУЗДАНОСТИ У СЕДАМДЕСЕТИМ ГОДИНАМА ДВАДЕСЕТОГ ВЕКА

Током читаве деценије седамдесетих година двадесетог века, рад на поузданости је настављен широм различитих поља. У овој деценији се повећала употреба и разноврсност интегралних кола. Биполарна, NMOS кола (*N-type Metal-Oxide-Semiconductor*, технолошка генерација интегралних кола, створена седамдесетих година двадесетог века) и CMOS кола (*Complementary metal-oxide-semiconductor*, -Технологија комплементарног метал-оксид-полупроводника) су била развијана невероватном брзином. Пасивне компоненте које су већ биле обрађене на Интернационалном симпозијуму о физичким особинама поузданости, су почеле да се обрађују и на другом симпозијуму. Симпозијуму о технологијама кондензатора и отпорника (*CARTS, Capacitor and Resistor Technology Symposium*), где је настављено унапређивање свих изолованих компоненти. Сер Дејвид Кокс (*Sir David Cox*) предлаже 1971. године модел пропорционалних вероватноћа (релативних ризика), што је непараметарска стопа отказа функција пратећих варијабли (фактора који пропорционално мењају стопе отказа). Биостатистичари усвајају овај модел за тестирање хипотеза о факторима.

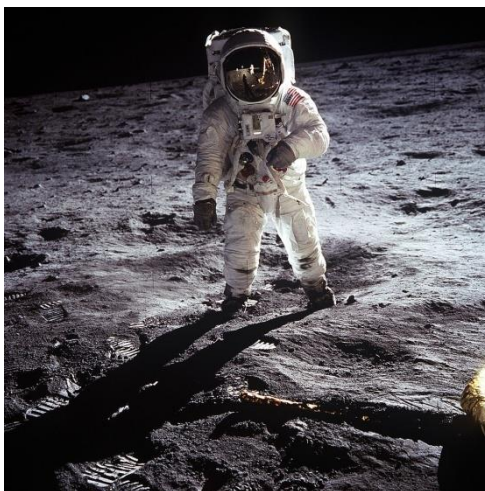
Средином деценије Хаким (*Hakim*) и Рајх (*Reich*) су објавили детаљан рад о евалуацији пластичних учаурених транзистора и интегралних кола основаним на подацима са терена. Вероватно су два најзапамћенија рада о поузданости из ове деценије били рад о мањим стопама грешака узрокованим алфа честицама који су написали Вудс и Меј (*Woods and May*) и рад о убрзаним тестирањима интегралних кола са активацијом енергије израчунатим за разноврсне отказе механизма које је написао Д.С. Пек (*D.S. Peck*). До краја ове деценије у Беловим комуникационим истраживањима (*BELLCORE, Bell Communications Research*) су скупљали комерцијалне податке са терена тежећи да постигну не више од два сата отказа у радном веку система дугом четрдесет година. Ови подаци су постали основа Берколове методологије предвиђања поузданости.

Морнаричка материјална команда (*The Navy Material Command*) је довела 1973. године из Националне ваздухопловне и свемирске администрације (*NASA, National Aeronautics and Space Administration*) Вилиса Вилугбија (*Willis Willoughby, 1927-1998*) да помогне унапређењу војне поузданости разноврсних платформи. Током свемирског програма „Аполо” (*Apollo space program*) Вилугби је био одговоран за то да свемирске летелице раде поуздано током целог свог пута ка Месецу и назад.

Поведени успехом „Меркури” и „Демини” програма, покренут је програм „Аполо” са циљем да се истражи Месец, али не и да се човек пошаље на Месец. Смернице „Аполо” програма су радикално измењене за време председника Џона Кенедија, када је он 25. маја 1961. године објавио да САД желе послати човека на

Месец и потом да га и успешно врате на Земљу, а и као годину до које би то Американци постигли узео је 1970. годину. Тако је Аполо постао програм који ће послати човека на Месец. Пројекат „Џемини” је недуго затим започет и за време тог програма креиране су технике које су омогућиле безбедно извршавање мисије „Аполо”.

После осам година пробних мисија, где су се десиле прве људске жртве у мисији Аполо 1 као и мисија кружења летелице око Месеца у „Аполу 8”, „Аполо” програм достиже циљ са мисијом „Аполо 11” када су астронаути Нил Армстронг и Баз Олдрин слетели на Месечеву површину 20. јула 1969. године и безбедно се вратили на Земљу 24. јула. Армстронгове прве речи после силаска из летелице су „Ово је мали корак за човека, али велики за човечанство”. Само је дванаест астронаута слетело на Месец, када је програм „Аполо” угашен у децембру 1972. године [28].



Слика 5. Баз Олдрин шета површином Месеца током мисије „Аполо 11”

Долазећи у Морнарицу, Вилугби је био одлучан у томе да помогне у спречавању непоузданости. Инсистирао је на томе да сви уговори садрже спецификације поузданости и одрживости а не само потраживања перформанси. Вилугбијеви напори су били успешни јер је нападао основе и радио на широком пољу. Вејн Тастин (Wayne Tustin) кредитује Вилугбија код наглашавања температурних циклуса и случајних вибрација што је касније постало Тестирање проверавања напора животне средине (ESS, *Environmental stress screening*). Ово је 1979. године било објављено као Морнарички документ Р-9492. Касније Вилугби је са Тастином 1984. године објавио књигу о Случајним вибрацијама. После тога заменио је старије процедуре квалитета са програмом „Најбоље морнаричке производне праксе” (*Navy Best Manufacturing Practice*).



У то време је био изумљен микрокомпјутер што је направило промене у електроници, док је величина RAM меморије расла великом брзином. Смањили су се величина и цена електронских калкулатора који су већ до 1980. године постали ривали по капацитету првим компјутерима са електронским цевима.

Слика 6. HP-35, први научни џепни калкулатор (из 1972. године)

Војни стандард (Military Standard) 1629 о FMEA методи (*Failure Mode and Effect Analysis*) је био објављен 1974. године. За анализу ризика производа и процеса највише је примењивана FMEA метода. FMEA метода има јако дуге традицију која као да временом добија све више на значају. Њен назив упућује на анализу значаја који отказ функције може имати, али се овде не ради само о анализи последица тог отказа. Временом су се две методе усталичиле као незаобилазне у ауто индустрији, FMEA дизајна и FMEA процеса.

FMEA анализа је једна од метода превентивног управљања квалитетом. Уз њену помоћ могуће је анализирати вероватноћу настанка грешака и њихов утицај и то већ у раним фазама развоја производног процеса чиме се омогућава раније побољшање нивоа квалитета. FMEA се може дефинисати као систематична група активности усмерених ка:

- препознавању и оцени потенцијалних грешака на производу или процесу, те последица грешака,
- идентификацији акција којима би се елиминисали или смањили догађаји који су узрок појаве грешака,
- усклађивању планираног и реализованог,
- смањењу трошкова грешака и
- оптимизацији производне стратегије.

FMEA анализа се примењује у случају развоја нових процеса, нових производа, измењених процеса, одступања од захтеваног квалитета, сталног побољшања квалитета, промене окружења. У литератури је могуће пронаћи две методологије које се делимично преклапају, а то су:

- FMEA - Анализа могућих грешака и ефеката грешака (*Failure Mode and Effect Analysis*);
- FMESA - Анализа могућих грешака, њихових ефеката и учесталости појављивања грешака (*Failure Mode, Effect and Criticality Analysis*) [29].

Дакле, FMEA анализа пружа одговоре на питања које се све грешке на производу или процесу могу појавити и које су њихове последице на предузеће и околину, а FMESA анализа даје одговоре на питања које се све грешке на производу или процесу могу појавити, које су њихове последице на предузеће и околину и која је вероватноћа да ће се појавити. Из наведеног можемо закључити да је FMESA анализа надоградња на FMEA анализу.

Од стране Морнарице су у овој области били признати инжењерство људских фактора и поузданост људских перформанси. Они су 1977. године водили револуционарни рад написавши „Кориснички приручник система предвиђања поузданости људи” (*Human Reliability Prediction System User's Manual*). Америчко ратно ваздухопловство је овоме допринело са Аскрен-Регулински (*Askren-Regulinski*) експоненцијалним моделима за људску поузданост. NASA је у дизајнирању и развијању свемирских летелица направила велике потезе као што су одрживост простора, безбедност система уверљивост квалитета, људски фактори и уверљивост софтвера. Како се технологија брзо развијала, поузданост се проширила на бројне нове области.

9. ИСТОРИЈАТ ПОУЗДАНОСТИ У ОСАМДЕСЕТИМ ГОДИНАМА ДВАДЕСЕТОГ ВЕКА

Осамдесете године двадесетог века представљају деценију великих промена. Почели су се користити полупроводници у свим телевизорима. Све више су се почели користити полупроводници и у аутомобилима, као и разни микрокомпјутери испод хаубе и на контролној табли. Развијени су и електронски контролори за велике клима уређаје, какве су тад имале и микроталасне пећнице и разни други кућни апарати. Започета је и примена електронике код комуникационих система с циљем да се замене старији преносни механички системи. У Белкору су издали и прву Методологију предвиђања потрошача за телекомуникације, а у Друштву аутомобилских инжењера (SAE, *Society of Automotive Engineers*) су развили сличан документ под називом „SAE870050” за примену у аутомобилској индустрији. Природа ових предвиђања се развила током ове деценије и постало је очигледно да сложеност матрица није једини фактор који је био кључан за стопе отказа.

Кам Вонг (*Kam Wong*) је објавио рад у коме је испитивао криву каде. Током ове деценије, стопа отказа многих компоненти је спала за фактор од 10. Софтвер је постао важан за поузданост система; ова дисциплина се брзо развијала са радом у RADC-у, чланком из 1984. године „Историја поузданости софтвера” (*History of Software Reliability*) Мартина Шумана (*Martin Shooman*) и књигом *Поузданост софтвера – мере, предвиђања, примена* (*Software Reliability – Measurement, Prediction, Application*) коју је написао Џон Мјуза и други аутори (*John D. Musa et.al*).

Комплексни поправљиви системи које контролише софтвер су почели да користе доступност као меру успеха. Поправке „у лету”, или брзе поправке које имају за циљ да помогну систему да настави да ради, биле су прихватљиве. Поузданост система је развила моделе као што је Основни Мјуза модел (*Musa Basic model*) који предвиђа број пропуштених грешака у софтверу који би могли да остану у коду.

Морнарички центар копнених снага (*The Naval Surface Warfare Center*) је издао 1983. године „Статистичко моделирање и процену поузданости функција за софтвер”, (*S.M.E.R.F.S, Statistical Modeling and Estimation of Reliability Functions for Software*) за евалуацију поузданости софтвера. Развој у статистици је направио утицај на поузданост. Вилијам Микер (*William Meeker*), Џералд Хан (*Gerald Hahn*), Ричард Барлоу (*Richard Barlow*) и Френк Прошен (*Frank Proschan*) допринели су развоју модела за хабање, деградацију и поузданост система.

Значајнији догађај ове деценије била је све већа доминација CMOS процеса у многим дигиталним функцијама интегралних кола. Биполарне технологије, PMOS и NMOS су отказивали у већини примена већ до краја ове деценије. CMOS је имао бројне предности као што су мала снага и поузданост. Веома брза примена и велика снага су још увек биле доминантне код Биполарних технологија. На Универзитету Аризона (*University of Arizona*) под др Димитријем Кечејоуглом (*Dr. Dimitri Kececioglu*) Програм

поузданости (Reliability Program) је одбио бројне људе за које се испоставило да су имали кључне улоге у разноврсним индустријама.

РС (*Personal Computer*, Персонални рачунар), постао је доминантан као средство за мерење и контролу. Ово је наглашавало могућност постојања припремљених програма за израчунавање поузданости. Тако би, до краја деценије, програми могли бити купљени за извођење FMEA метода, FTA метода, предвиђања поузданости, блок дијаграма и Вејбулове расподеле.

Катастрофа свејс-шатла „Чаленџер” (*Space Shuttle Challenger disaster*) је проузроковала да људи застану и реевалуирају како они процењују ризике. Овај један догађај је изродио поновну процену метода вероватноће. Катастрофа свемирског шатла Чаленџер се догодила 28. јануара 1986. године када је свејс-шатл „Чаленџер” (на мисији *STS-51-L*) експлодирао након 73 секунде лета, што је довело до смрти свих седам чланова посаде. Шатл се распао изнад Атлантског океана источно од обале Флориде у 11:38 часова (16:38 по гриничком времену).

Распад целог шатла је почео пошто је кружни гумени затварач на десној ракети-носачу на чврсто гориво отказао након полетања. Отказивање затварача је изазвало рупу на споју ракете-носача коју је затварала, што је омогућило врелом гасу под притиском да исцури и оштети оближни држач ракете и спољашњи резервоар за гориво. Ово је довело до одвајања десне ракете-носача и пуцања спољашњег резервоара. Аеродинамичке силе су у тренутку разнеле шатл. Одељак за посаду и многи други делови шатла су касније извучени са дна океана после дуге операције потраге и вађења. Иако тачна времена смрти посаде нису позната, зна се да је неколико чланова посаде преживело првобитни распад шатла. Међутим, шатл није имао систем за евакуацију и удар одељка за посаду у површину океана је био превише насилан да би се могао преживети.

Шатл никад није био предвиђен да се лансира при толико ниским температурама. Кружни затварачи, као и многе друге критичне компоненте, нису тестиране како би се дали закључци о успешном лансирању при таквим условима. Као резултат катастрофе, Америчко ратно ваздухопловство је одустало од својих планова да користи шатлове за тајна лансирања војних сателита из ваздухопловне базе Ванденберг у Калифорнији и уместо њих се одлучило за ракете Титан IV [30].



Слика 7. Експлозија свемирског шатла Чаленџер 1986. године

Исте те године догодила се још једна катастрофа, Чернобилска катастрофа, у Украјини. Чернобилска катастрофа је нуклеарна несрећа која се догодила 26. априла 1986. године у Нуклеарној електрани „Лењин” у близини града Припјат у Украјини. Сматра се да је то највећа еколошка катастрофа у историји нуклеарне енергије.

Електрана се састојала од четири реактора, где је сваки реактор производио 1 гигават електричне енергије, а сва четири реактора су заједно производили око 10% укупне електричне енергије трошене у Украјини. Прва експлозија на четвртм реактору је проузроковала даље експлозије које су праћене ослобађањем велике количине радиоактивног отпада у атмосферу. Радиоактивни облаци прекрили су готово целу Европу. Из те области је евакуисано преко 100 000 становника. Припјат је данас напуштен и налази се у центру забрањене зоне.

Експлозија се десила на четвртм реактору Нуклеарне електране „Лењин”, у 01:23 часова по московском времену 26. априла 1986. године. Главни узрок несреће је пре свега недовољно испитана технологија овог типа реактора и његова нестабилност при ниској снази реактора, али такође не треба занемарити ни људски фактор, лоше управљање и недовољно искуство оператера реактора. Те вечери, када се догодила несрећа, предвиђена је реализација експеримента на реактору [31].



Слика 8. Чернобил након експлозије, 1986. године

Пејсмејкери и имплантабилни инфузиони уређаји су били у све чешћој употреби и биомедицинске компаније су убрзо почеле да усвајају процесе високе поузданости које је развијала Војска. Истраживачки центар „Дејвид Тејлор” (*David Taylor Research Center*) у Кардероку у држави Мериленд (*Carderock Maryland*) је 1988. године израдио приручник о поузданости процедура предвиђања за механичку опрему на „Eagle” технологији (*Eagle Technology*). Он се обично звао Кардероков приручник (*The Carderock Handbook*) и био је издаван од стране Морнарице 1992. године под називом „NSWC 92/L01”.

Свеукупно, осамдесете године двадесетог века показале су напредак у поузданости кроз бројна поља, од војне до аутомобилске и од телекомуникационе до биомедицинске индустрије. RADC је објавио свој први „Приручник о поузданости” (*Reliability Tool Kit*) који је деведесетих година двадесетог века допуњен за примене код Комерцијалних „производа са полице” (*COTS, Commercial off-the-shelf*). Велика побољшања квалитета која је проузроковала конкуренција са Далеког Истока је резултирала са много бољим компонентама до краја ове деценије.

10. ИСТОРИЈАТ ПОУЗДАНОСТИ КРАЈЕМ ДВАДЕСЕТОГ ВЕКА

Већ до почетка деведесетих година двадесетог века стопа раста и развоја интегралних кола се брзо увећавала. Нове компаније су стварале нова специјализована кола и Галијум арсенид (*Gallium Arsenide, GaAs*, једињење елемента галијума и арсеника. Он је III/V полупроводник, и користи се у производњи уређаја као што су интегрисана кола микроталасне фреквенције, монолитна микроталасна интегрисана кола, инфрацрвена светлећих диода, ласерских диода, соларних ћелија и оптичких прозора.), је изникао као ривал силикону у многим применама. Употреба десктоп микрокомпјутера (*Stand alone microcomputers*) је била честа и РС тржиште је помогло да се сачува употреба интегралних кола, пратећи Муров закон (*Moore's Law*), која се дуплирала на око сваких осамнаест месеци. Убрзо је постало јасно да велика потражња за комерцијалним компонентама често захтева поузданост и квалитет какав су имале специјално тестиране мале серије војних верзија.

Почетком ове деценије потражња за комерцијалним „производима са полице” је била у успону. Са завршетком Хладног рата, војна поузданост се брзо променила. Употреба Војног приручника 217 је завршена 1991. године. Нова истраживања су развила моделе стопе отказа базиране на унутрашњим дефектима који су заменили неке стопе отказа базиране на комплексности које су доминирале од шездесетих до осамдесетих година двадесетог века. Ове радове је водила RCA (што је нови назив за RADC) што је резултирало са увођењем PRISM, новог приступа у предвиђању. То је нови софтверски алат који повезује неколико алата у методологију обимног системског предвиђања поузданости [32]. Раст поузданости за компоненте је постао признат у овом документу.

Многе војне спецификације су постале застареле и често су биле усвајане нове комерцијалне праксе. Еволуција интернета је створила нове разноврсне изазове за поузданост. Доступност брзине мреже постала је битан фактор у потражњи очекиваних перформанси код телекомуникација. Ова деценија је поставила захтеве за новим приступима од којих је неке иницирала војска.

У Сематеку (*Sematech*) су 1992. године. издали „Водич за поузданост опреме” (*Guidelines for Equipment Reliability*). У Удружењу инжењера за аутомобиле (*SAE, Society of Automotive Engineers*) су издали 1993. године „Приручник о поузданости за производњу опреме”. Ово је пратило издавање часописа о поузданости 1994. године од стране комитета SAE (*Reliability, Maintainability, Supportability, and Logistics Division*, - Одељење за поузданост, одрживост, подршку и логистику).

Ричард Седлон (*Richard Sadlon*) из RCA је саставио те исте године приручник за механичке примене у поузданости. Војска је започела „Пројекат физичких особина отказа електронске опреме” (*The Electronic Equipment Physics of Failure Project*) и укључио се као део тог процеса у Центру за инжењерство напредног животног циклуса

Универзитета Мериленд (*University of Maryland CALCE center*) под вођством др. Мајкла Пекта (*Dr. Michael Pecht*).

Што се софтвера тиче генерисан је Модел могућности и завршености (*CMM, The Capability Maturity Model*). Компаније које су биле на највишем нивоу овог модела су сматране за оне које имају најмање преосталих грешака. RCA је 1996. године издала шестоделни „Нацрт за успостављање ефективних програма поузданости” (*Blueprint for Establishing Effective Reliability Programs*).

Интернет је показао да један једини модел софтвера не може бити довољан за широк распон свих његових могућих примена у свету која сада укључују и бежичну (*wireless*) конекцију. Били су захтевани нови приступи као што су рефлектовање софтвера (*software mirroring*), градациона надоградња софтвера (*rolling upgrades*), замена софтвера у току рада рачунара (*hot swapping*), аутоматско поправљање (*self-healing*) и промена архитектуре софтвера (*architecture changes*).

Нове могућности за обуку и нове књиге за поузданост су постале доступне за стручњаке. Америчко удружење за квалитет (*American Society for Quality, - ASQ*) је направило велику надоградњу на свој тест професионалне сертификације не би ли ишли у корак са очигледним променама. Стандард ISO 9000 је додао мере поузданости као део дизајна и развоја својих сертификација. Развијане су процене и предвиђања за процесе обнављања 1999. године за непараметарске максимуме вероватноће стопе отказа базиране на пошиљкама и повраћајима производа.

Крај века је донео „Проблем 2000. године” за софтвер (*Year 2000 problem*, познат и као *Y2K problem*). Наиме, програмери су ову годину представљали са две уместо са четири цифре, што је стварало проблеме јер често 2000. година није могла да се разликује од 1900. године. То је наравно стварало проблеме у читању датума двадесетог века као што су :

- нетачно приказивање датума;
- погрешно ређање аутоматски запамћених података и стварних догађаја.

Овај проблем је решен доношењем DISC PD2000-1 стандарда од стране Британског института за стандарде (*British Standards Institute, BSI*) који 1997. године дефинише „Слагање Захтева за 2000. годину” (*Year 2000 Conformity requirements*), који приказује четири правила за правилно читавање датума чија је главна порука да век у који спада година мора на неки начин бити наглашен или подразумеван и да се 2000. година мора сматрати за преступну годину [33].

Експанзија Светске мреже (*world-wide-web*) је створила нове изазове за безбедност и поверење. Системи информација базираних на интернету су постали честа појава али нису били сигурни због честог такозваног „хаковања”. Тако је проширена употреба интернета на складиштење и премештање информација постала проблем. Стари проблем који је представљао премало поузданих информација је сада замењен новијим проблемом где постоји превише информација сумњиве вредности и порекла. Проблеми поузданости код потрошача су се сада односили на податке и могли су бити разматрани „онлајн” (*online*, бити повезан на интернет мрежу), у реалном времену. Панели дискусија су постали начин да се добију одговори на питања или да се нађу важни извори. Обуке су почеле да се обављају преко „вебинара” (*webinars*, онлајн семинари), пре него у учионицама или радионицама, лицем у лице. Осигурање, банкарство, тражење посла, новине, часописи, музика, спортски догађаји су постали свима доступни преко интернет мреже и могли су бити праћени у реалном времену или „скинути”, то јест „преузети” (*downloaded*) са интернета.

Нове технологије, као што су микро-електронско-механички системи (*micro-electro mechanical systems, MEMS*), ручни GPS уређаји и преносни уређаји, који су сви

спајали мобилне телефоне и компјутере, сада заједно представљају изазов у одржавању поузданости. Време за развој производа је наставило да се скраћује кроз деведесете године двадесетог века, и оно што се раније производило у року од три године сада је могло да се произведе за само осамнаест месеци. Ово је значило да средства и задаци поузданости морају бити још више повезани за саме процесе развоја производа. Потрошачи су постали свеснији пропуста поузданости и тога колико ће их то коштати. На пример, код једног мобилног телефона је створена лоша репутација, што је проузроковало да његова производња убрзо престане, када је примећена стопа отказа од 14% у првој години рада. На много начина поузданост је постала део свакодневног живота и очекивања потрошача.

11. ЗАКЉУЧАК

У уводном делу овог рада је описана теорија поузданости, а уз њу и гране науке на које се она наслања, међу којима су наведене теорија вероватноће и математичка статистика, као и начин на који су то оне утицале на сам настанак теорије поузданости као научне дисциплине. Дат је и осврт на неке податке, почев од периода праисторије који су битни за схватање људске природе, која стално тежи за напретком а самим тим и за сигурношћу у свакодневном животу.

Многи научници, као што су Блез Паскал, Пјер де Ферма, Ђироламо Кардано, Јакоб Бернули, и многи други који су спомињани у овом раду, знатно су утицали на теорију вероватноће, што је јако битно, јер је у том делу рада указано на то колико су утицали на подизање свести о испитивању вероватноће у разним сферама, а самим тим су и помогли даљем развоју теорије поузданости. Може се закључити да су они и сами зачетници ове нове научне дисциплине, поузданости, или су евентуално дали идеје за које ће се у будућности испоставити да су биле добар темељ за надоградњу те дисциплине.

Поузданост се као научна дисциплина тек касније појављује, тако да је било потребно да се пропрати пут поузданости кроз разне научне дисциплине у којима је она била незаобилазни фактор. Уследио је и брз успон поузданости у првој половини двадесетог века, што нас доводи до одређених података који су у то време постигли велики успех. Као пример можемо узети први лет човека преко Атлантског океана где се поузданост јавља као кључан фактор за тај подухват. У исто време појављују се научници који су имали кључни утицај на поузданост. Међу тим научницима истиче се Валоди Вејбул, који је осмислио Вејбулову расподелу, која је и данас незаобилазна ставка у изучавању поузданости. Ратна дејства током Другог светског рата су имала важан психолошки утицај на схватање важности поузданости, као и да се преко чињенице да је током рата скоро 50% опреме било нефункционално није могло прећи. Већ тада су почела озбиљнија испитивања и озбиљније праћење поузданости као научне дисциплине.

Током педесетих година двадесетог века, поузданост већ засигурно улази у свакодневну употребу како код војске, тако и у комерцијалне сврхе. Појављују се први рачунари који су били јасан знак напретка технике.

У даљем раду се истиче чињеница да су шездесетих година двадесетог века објављени први уџбеници који су обрађивали тему поузданости, као и одређени научници који су проширивали сазнања на ову тему. NASA, која је основана 1958. године, после неколико неуспелих мисија долази до сазнања да поузданост има пресудни утицај за успешност мисија. Организоване су и многобројне конференције које су имале пресудни значај у стварању разних стандарда, а све у сврху повећања поузданости. Тада се појављује и Војни приручник 217, и већ тада се долази до јасног одвајања две гране поузданости. Једна од ових грана је настала за потребе анализе

отказа, а друга ради предвиђања отказа. Ова деценија завршава се слетањем људи на Месец што је показало колико је далеко напредовала дисциплина поузданости за само десет година.

За време седамдесетих година двадесетог века појављују се микрокомпјутери што је створило бројне промене у електроници. Написан је и Војни стандард 1629 о FMEA методи која је била и остала јако битна за анализу отказа и његово откривање.

Осамдесете године двадесетог века представљају деценију великих промена. У овој деценији су се десиле две велике катастрофе као што су катастрофа спејс-шатла Чаленџер у коме је погинуло свих седморо чланова посаде и експлозија четвртог реактора Нуклеарне електране „Лењин”, где су размере штете биле неизмерне, које нам без сумње указују на размере штете до којих се може доћи уколико се не испитају сви фактори и не направи прорачун поузданост свих елемената који су укључени у неки систем. Током година, многи стручњаци су проучавали различите пропусте у дизајну, и закључили да не може бити много разлога за отказе производа у распону од једноставног отказа до катастрофе. Свеукупно, осамдесете године двадесетог века показале су напредак у поузданости кроз бројна поља, од војне до аутомобилске и од телекомуникационе до биомедицинске индустрије, али и колико поузданост може штетно утицати на нашу околину.

У производњу и експлоатацију уводи се једно од квантитативних обележја квалитета производа – поузданост, и установљава се да ли је нађена најекономичнија равнотежа између трошкова и погодности почетног дизајна, развоја и производње, што је почетком деведесетих година двадесетог века све више занимало произвођаче али и потрошаче. Почетком ове деценије потражња за комерцијалним „производима са полице” је била у успону. Поузданост као научна дисциплина достиже експанзију у свим гранама производње разноврсних система. Њена примена је ескалирала појавом интернета, а самим тим доступношћу информација, тако да је сада омогућен приступ многобројним информацијама што од произвођача захтева непрекоран рад система.

Без сумње, теорија поузданости сложена је научна дисциплина повезана с физиком, хемијом, електротехником, машинством, економијом и тако даље. 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 од великог утицаја.

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. Теорија поузданости се такође бави и проблемима припреме, транспорта, прихватања и употребе производа или система са сврхом осигуравања максималне делотворности, као и развојем општих метода процењивања поузданости и расположивости. Теорија поузданости се бави и проучавањем 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.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Вујановић Н.: Теорија поузданости техничких система, Војноиздавачки новински центар, Београд, 1990.
- [2] Историја поузданости, http://kscsma.ksc.nasa.gov/Reliability/Documents/History_of_Reliability.pdf, преузето: март 2015.
- [3] Вероватноћа, <http://starisajt.elfak.ni.ac.rs/.../matematika-odabrana-poglavlja/verovatnoca.pdf>, преузето: април 2015.
- [4] Статистика, <http://starisajt.elfak.ni.ac.rs/.../matematika-odabrana-poglavlja/statistika.pdf>, преузето: април 2015.
- [5] Поузданост техничких система, www.rgf.rs/predmet/RO/.../EiOGasS_5.pdf, преузето: март 2015.
- [6] Вукадиновић С.: Елементи теорије вероватноће и математичке статистике, НИП „Привредни преглед”, Београд, 1990.
- [7] Chisholm, Hugh: „*Cardan, Girolamo*”. *Encyclopedia Britannica* (11th ed.). Cambridge University Press. 1911.
- [8] Adamson, Donald: *Blaise Pascal: Mathematician, Physicist, and Thinker about God*. Macmillan Press Ltd., London, 1995.
- [9] Pierre de Fermat, <http://www-gap.dcs.st-and.ac.uk/~history/Printonly/Fermat.html>, преузето: фебруар 2016.
- [10] Jacob Bernoulli, http://www-gap.dcs.st-and.ac.uk/~history/Biographies/Bernoulli_Jacob.html, преузето: фебруар 2016.
- [11] Abraham de Moivre, http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/De_Moivre.html, преузето: фебруар 2016.
- [12] Pierre-Simon, Marquis de Laplace, http://www.1911encyclopedia.org/Pierre_Simon,_Marquis_De_Laplace, преузето: август 2015.
- [13] George Boole, <http://www.smh.com.au/technology/.../who-is-george-boole-the-mathematician-behind-the-gkofyg.html#ixzz3qIcv6ii2>, преузето: фебруар 2016.
- [14] Андрей Николаевич Колмогоров, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0315086083900010>, преузето: фебруар 2016.
- [15] Walter Andrew Shewhart, http://web.it.nctu.edu.tw/qtqm/qtqmindex/CFP_QTQM_ASPC_Shewhart.pdf, преузето: фебруар 2016.
- [16] Margittai Neumann Janos Lajos, http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Von_Neumann.html, преузето: фебруар 2016.

- [17] Frederick Winslow Taylor, <http://www.units.miamioh.edu/technologyandhumanities/taylor.htm>, преузето: фебруар 2016.
- [18] Charles Lindberg, <http://www.charleslindbergh.com/timeline/index.asp>, преузето: фебруар 2016.
- [19] Ernst Hjalmar Waloddi Weibull, http://www.barringer1.com/weibull_bio.htm, преузето: фебруар 2016.
- [20] Zygmunt Wilhelm Birnbaum, <http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Birnbaum.html>, преузето: фебруар 2016.
- [21] Military Handbook 217, <http://www.electronics-cooling.com/1996/01/why-the-traditional-reliability-prediction-models-do-not-work-is-there-an-alternative/>, преузето: фебруар 2016.
- [22] Military Standard 883, <https://en.wikipedia.org/wiki/MIL-STD-883>, преузето: фебруар 2016.
- [23] Military Standard 38510, <http://snebulos.mit.edu/projects/reference/MIL-STD/MIL-M-38510-RevJ.pdf>, преузето: фебруар 2016.
- [24] Dorian Shainin, <http://www.barringer1.com/pdf/Chpt1-5th-edition.pdf>, преузето: фебруар 2016.
- [25] Emil Julius Gumbel, <http://www.barringer1.com/pdf/Chpt1-5th-edition.pdf>, преузето: фебруар 2016.
- [26] The New Weibull Handbook, <http://www.amazon.com/The-Weibull-Handbook-Robert-Abernethy/dp/0965306208>, преузето: фебруар 2016.
- [27] Weibullnews, <http://www.weibullnews.com/bio-bob.html>, преузето: фебруар 2016.
- [28] Apollo program summary report, <http://www.hq.nasa.gov/alsj/APSR-JSC-09423.pdf>, преузето: март 2016.
- [29] Управљање квалитетом, <http://www.efbl.org/upload/257273-menadment-kvaliteta-vjebe-broj-9-2014-12-26.pdf>, преузето: март 2016.
- [30] NASA - STS-51L Mission Profile, http://www.nasa.gov/mission_pages/shuttle/shuttlemissions/archives/sts-51L.html, преузето: април 2016.
- [31] Preface: The Chernobyl Accident, <http://chernobyl.info/en-US/Home/History-of-Chernobyl-Disaster/The-Accident.aspx>, преузето: април 2016.
- [32] PRISM, <http://www.reliability-safety-software.com/products/prism/>, преузето: мај 2016.
- [33] A Definition of Year 2000 Conformity pequirements, <http://parsifal.membrane.com/y2k/pd2000-4.htm>, преузето: мај 2016.