



УНИВЕРЗИТЕТ У НИШУ  
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ



**Саша М Петровић**

**РАЗВОЈ МОДЕЛА СИСТЕМА ОДРЖАВАЊА ПРИМЕНОМ СИМУЛАЦИЈЕ**

**ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА**

Ниш, 2019.



UNIVERSITY OF NIŠ  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING



**Saša Petrović, M. Sc. Mech. Eng.**

**DEVELOPMENT OF MODEL OF MAINTENANCE SYSTEM  
BY APPLYING SIMULATION**

DOCTORAL DISSERTATION

Niš, 2019.

*Овај рад посвећујем својој породици*

*I dedicate this work to my family*

## Подаци о докторској дисертацији

Ментор: Проф. др Пеђа Милосављевић, редовни професор, Универзитет у Нишу Машински факултет

Наслов: РАЗВОЈ МОДЕЛА СИСТЕМА ОДРЖАВАЊА ПРИМЕНОМ СИМУЛАЦИЈЕ

Резиме: *Предмет планираних истраживања односи се на развој и примену модела одржавања у слојеној организацији по нивоима, врстама опреме која се одржава и великом броју те опреме применом симулационог модела. Анализом литературе у овој области се види да је реч о недовољно истраженој области нарочито у Републици Србији али и у свету. Примена симулационе технике захтева висок ниво знања, што отежава њену ширу примену. Симулацијом је могуће моделирати временско трајање процеса и међусобне утицаје процеса и других фактора на процес. Такође, симулација се користи у репројектовању, односно реинжењерингу логистичких система и процеса, избору референтних вредности перформанси процеса/подпроцеса, одлучивању и самооцењивању. Могуће је користити симулациони модел и за предвиђање стања у будућности. Чак и када је релативно лако дефинисати модел, посебан је проблем одређење параметара модела, што је случај у симулацијама типа "discrete event simulation". Параметре за симулациони модел обезбеђује примена алата статистичке контроле процеса, који су сами по себи снажни и робусни алати за откривање расипања и губитака у процесу. Планирано истраживање има за циљ да омогући идентификацију критеријума за оптимизацију процеса одржавања.*

*Истраживање, развој и имплементација модела одржавања има корист за рационализацију ресурса одржавања, повећање нивоа расположивости опреме, а посредно очување животне средине, повећање енергетске ефикасности и побољшање система квалитета.*

Научна област: Машинско инжењерство

Научна дисциплина: Индустијски менаџмент

Кључне речи: систем одржавања, перформансе, симулациони модел, побољшање, процес

УДК: 658.58:519.876.5(043.3)

CERIF класификација: Т 210 Машинство, хидраулика, вакуумска технологија и акустички инжењеринг

Тип лиценце Креативне заједнице: CC BY-NC-ND

## Data on Doctoral Dissertation

Doctoral  
Supervisor:

PhD Peđa Milosavljević, full professor, University of Niš, Faculty of Mechanical engineering

Title:

DEVELOPMENT OF MODEL OF MAINTENANCE SYSTEM BY APPLYING SIMULATION

Abstract:

*The subject of the planned research is development and use of the maintenance model for complex hierarchical organization with heterogeneous equipment by applying simulation. With the literature analysis, it is found that such approach is rare and uncommon in World and especially in Serbia. Simulation methods are extremely demanding for usage because of nature of physical system who is to be modeled. All properties are to be taken into account like time, interconnections, different factors etc. Moreover, the simulation is a tool for evaluation, decision support and reengineering. Furthermore, the simulation is a tool for forecasting. Even though if the simulation model is easy for design, an extremely challenging task is how to provide parameters for discrete events simulation (DES). Statistical process control (SPC) methodology with well-defined tools is itself a robust instrument for process evaluation and improvement. But values obtained by SPC could be magnified in combination with DES.*

*Also, this research has a goal to find the best usable performance indicators. Research achievements could be better resource utilization, higher availability, lower maintenance cost and consequently better energy efficiency and the environment protection.*

Scientific  
Field:

Mechanical Engineering

Scientific  
Discipline:

Industrial management

Key Words:

maintenance system, performance, simulation, model, process improvement

UDC:

658.58:519.876.5(043.3)

CERIF  
Classification:

T210 Mechanical engineering, hydraulics, vacuum technology, vibration and acoustic engineering

Creative  
Commons  
License Type:

CC BY-NC-ND

## *Захвалност аутора*

Толико је било у животу ствари којих смо се бојали. А није требало. Требало је живети (Иво Андрић).

Кад се сва туђа светла погасе, кад останете сами са собом, празним листом папира, крупним идејама, а скромним могућностима да их изразите, кад схватите колико вам је дар ограничен и зависи више од туђег мишљења о њему него од ваших способности, кад вас стану мучити управо она питања за која сте веровали да сте их решили још у гимназији, где сте из матерњег језика трећину разреда снабдевали, у замену за недостижна математичка решења, набуситим поетским празнословљем, кад наједном више ништа не знате, онда схватате да је књига коју сада пишете, свака ваша књига, дакле, једновремено и прва и последња, да је, заправо – *једина*. А ту искуства нема. Има га, у ствари, али вам не помаже (Filip K. Dik).

Захваљујем се ментору проф. др Пеђи Милосављевићу зато што је имао стрпљења у раду са мном и на изванредној стратегији израде ове дисертације. Захваљујем се и комисији за оцену дисертације, на сугестијама и смерницама како да овај рад буде бољи. Др Јасмина Лозановић Шајић са Машинског факултета у Београду је била мој велики критичар и сарадник приликом великог броја заједнички објављених радова, па и њој дугујем велику захвалност. Моје колеге и сарадници на послу, помогли су ми такође, нарочито у делу преиспитивања концепта и вредности истраживања. Моји претпостављени имали су разумевање за мој рад и помогли су публикавање једног броја мојих радова.

Ужој и широј породици се посебно захваљујем, посебно јер су разумели да нисам увек могао да будем са њима када је требало.

У Нишу, \_\_\_\_\_ 2019. године.

*Саша Петровић*

# Развој модела система одржавања применом симулације

Оценити успешност неке организације или процеса је одговоран и захтеван задатак. Ако је потребно на основу те оцене извући закључак да ли је потребно предузети кораке за побољшање, поставља се питање како оценити један сложени систем, у овом случају систем одржавања. Многе технике се могу употребити за оцену успешности система. Прави је изазов и ризик, предузети мере ради побољшања а да нису сагледани сви релевантни фактори и међусобни односи утицајних фактора и чинилаца неког система. Зато је употреба модела који описује систем и симулациона техника погодна и научно утемељено решење за опис система, реконструкцију понашања, анализу понашања, одређивање доприноса различитих утицајних фактора и предвиђање будућег стања изванредна методологија за унапређење перформанси. Релативно је лако доћи до кредибилног модела који верно описује процес, док је за симулацију и експериментисање потребно имати показатеље, који описују законитости у стварној реализацији тог процеса. Анализа сложеног војног система одржавања, мерењем његових перформанси путем изабраних индикатора, моделовање система, одређивање законитости појава у систему, реконструкција понашања, анализа варијанти и унапређење је тема ове дисертације.

Кључне речи: систем одржавања, перформансе, симулациони модел, побољшање, процес.

„Art of the Possible is about reaching beyond today’s limitations to grasp previously unimagined heights of performance. It is about challenging each other to recognize opportunities, eliminate constraints, improve processes, and optimize resources to achieve world-record results. It isn’t about working harder, cutting corners or jeopardizing workplace safety; but about expanding our visions of what is truly possible and refusing to settle for marginal improvements”.

- Lt Gen Bruce A. Litchfield (ret.), the architect of the „Art of the Possible“ (AoP) leadership model and performance management system

# САДРЖАЈ

1. Увод .....	1
1.1. Општи део .....	1
1.2. Циљ и концепт истраживања.....	3
1.2.1. Мотивација и визија.....	3
1.2.2. Хипотезе.....	4
1.2.3. Циљ научног истраживања.....	4
1.2.4. Очекивани резултати научног истраживања .....	5
1.2.5. Примењене научне методе .....	6
1.3. Структура истраживања.....	7
2. Преглед истраживања и литературе .....	9
3. Развој одржавања .....	24
3.1. Одржавање: инжењерство и управљање .....	24
3.2. Одржавање: тренутно стање и трендови.....	31
3.3. Одржавање: савремени погледи.....	34
3.3.1. Врхунско управљање одржавањем (State of the Art).....	34
3.3.2. Интегрисани програми и процес планирања .....	35
3.3.3. Стратегије одржавања.....	37
3.3.4. Информациони системи одржавања и системи контроле одржавања .....	41
3.3.5. Врхунска технологија и утицај на одржавање .....	42
3.3.6. Прилагођавања и одрживост .....	44
3.3.7. Подршка одлучивању .....	44



3.3.8.	Развој нових примењених технологија .....	44
3.4.	Одржавање: Рекапитулација поглавља .....	45
3.4.1.	Појмовна одређења .....	45
3.4.2.	Развој средстава за рад и концепција одржавања .....	47
3.4.3.	Период 1945. – 1959. ....	48
3.4.4.	Период 1960. – 1969. ....	49
3.4.5.	Период од 1970. до данас .....	52
4.	Одржавање усмерено на поузданост .....	60
4.1.	Осврт на теорију поузданости .....	60
4.2.	Савремен приступ концепту одржавања према поузданости .....	63
4.2.1.	Одржавање према поузданости (RCM, Reliability Centered Maintenance) .....	63
4.2.2.	Развој ( <i>Background</i> ) .....	63
4.2.3.	Задатак RCM .....	64
4.2.4.	RCM процес и кораци имплементације .....	65
4.2.5.	Анализа базирана на приоритетима .....	65
4.2.6.	Имплементација и унапређење RCM концепта .....	66
4.2.7.	Добици од примене RCM-а .....	67
4.2.8.	Даљи развој RCM .....	67
4.2.9.	Проблеми имплементације побољшања (прави алат за прави посао) .....	68
5.	Војни системи одржавања - Систем одржавања у Војсци Србије .....	70
5.1.	Одржавање, нормативно уређење и организација .....	70
5.2.	Концепција сталног усавршавања система одржавања (СОД) .....	72
5.3.	Приступ усавршавању - репројектовању СОД .....	75
6.	Модел и вредновање успешности процеса одржавања .....	77

6.1.	Процес и Организација .....	77
6.1.1.	Моделовање пословног процеса, преглед и оквир .....	77
6.1.2.	Увод .....	77
6.1.3.	Предлог оквира и преглед литературе .....	78
6.1.4.	Опис најважнијих техника за моделовање процеса .....	78
6.1.5.	Опште методологије .....	81
6.2.	Организовање .....	81
6.3.	Продуктивност одржавања и мерење перформанси система одржавања .....	83
6.3.1.	Продуктивност одржавања .....	83
6.3.2.	Мерење перформанси и продуктивност одржавања .....	83
6.3.3.	Перформансе процеса одржавања .....	84
6.3.4.	Мерење продуктивности одржавања .....	85
6.3.5.	Стандарди за одређивање индикатора перформанси одржавања .....	89
7.	Анализа стабилности и способности процеса одржавања .....	94
7.1.	Квалитет као алат за побољшање процеса .....	94
7.2.	Мерења стабилности и способности система (анализа процеса одржавања) .....	98
7.3.	Анализа-дефинисање проблема .....	100
7.4.	Оцена стабилности и способности система .....	102
7.5.	Сопствено истраживање применом SPC стратегије .....	107
7.6.	Предлог побољшања .....	123
7.6.1.	Вишекритеријумска оптимизација .....	123
7.6.2.	Проблем оптимизације система одржавања .....	124
7.6.3.	Симулација као алат оптимизације .....	130

8.	Симулација.....	132
8.1.	Симулациони модел, теоретске основе .....	132
8.1.1.	Моделовање система.....	134
8.1.2.	Рачунарске симулације .....	135
8.1.3.	Симулације у области одбране (војне симулације) .....	136
8.1.4.	Раст примене симулација .....	136
8.1.5.	Предности и недостаци симулација .....	137
8.1.6.	Верификација и валидација модела.....	137
8.1.7.	Проблеми верификације и валидације .....	138
8.2.	Услови за примену симулације .....	140
8.3.	Опис програма Arena Simulation v.15 .....	144
8.4.	Креирање модела одржавања, развој и експериментисање.....	148
8.4.1.	Увод .....	148
8.4.2.	Елементарни модел – основни параметри .....	149
8.4.3.	Ентитети .....	149
8.4.4.	Ресурси .....	151
8.4.5.	Атрибути и варијабле.....	152
8.4.6.	Општа подешавања .....	152
8.4.7.	Моделовање .....	153
8.5.	Модел, симулација as-is и to-be.....	154
8.5.1.	Сопствено истраживање применом стратегије Симулациони експеримент .	155
8.5.2.	Стварни параметри модела.....	171
8.5.3.	Модел реалног система.....	175

8.5.4. Оптимизација.....	194
8.5.5. Валидација у контексту оперативне употребе модела .....	199
9. Закључак и правци даљих истраживања.....	213
9.1. Закључак.....	213
9.2. Правци даљих истраживања.....	214
9.3. Преглед научних доприноса у дисертацији .....	215
10. Литература .....	216
11. Биографија .....	225

# 1. Увод

## 1.1. Општи део

Од техничких система у експлоатацији се захтева задовољење постављених критеријума циља (ефективност, расположивост, готовост, итд.), а да при томе не угрожавају безбедност и здравље запослених као и околину. Важан сегмент у животном циклусу једног система представља процес његовог одржавања, с обзиром да је тај процес одговоран за временски најдужу фазу животног циклуса средства (експлоатација).

Извршење захтева који се постављају систему одржавања у највећем обиму се задовољавају правилном стратегијом одржавања и њеном применом. Такви захтеви су примарно детерминисани у фази дизајнирања, израде и експлоатације средстава. Највећи број акцидента код сложених техничких система који за последицу имају нежељени догађај, који доводе до смрти, нарушавања здравља, повреде, оштећења техничких система или других губитака, настаје због грешке у процесу експлоатације или у процесу одржавања опреме. Највећи број фактора у фази експлоатације који доводе до таквих ризика је везан за неадекватну стратегију одржавања. Стратегија директно утиче и на ефективност, расположивост и готовост, који у одређеним друштвеним делатностима јесу и доминантни критеријум способности организације или система.

Систем одржавања, с обзиром да је одговоран за временски најдужу фазу животног циклуса средства (експлоатација), преузима на себе и отклањање пропуста насталих у дизајну, производњи и употреби техничких система. Теорија одржавања техничких система као дисциплина широко је прихваћена у смислу објективне основе за решавање проблема отказа система. Задатак очувања исправности опреме представља одржање њене радне функције и способности остварења захтеваног учинка.

Лоше одржавање, лоше стратегије одржавања, како у појединачним случајевима тако и у организацијама у целини, осим што не обезбеђују функцију самог техничког система, изазивају велике директне и индиректне економске губитке, негативне социјалне ефекте и др.

Процес одржавања техничких система и данас је актуелан као предмет анализа, развоја и побољшања, при чему се кроз непрестано публикување радова стално предлажу нови приступи и све више је директно повезан са истраживањима, поступцима, методама и праксом која се везују за управљање квалитетом.

Квалитет је увек био интегрални део тј. својство производа и услуга. Као примарни задатак политике квалитета се јавља систематска редукација варијација кључних карактеристика производа (услуга). Приступ решавању проблема путем алата квалитета је популарна, ефикасна и економична метода.

Постоје успешни или мање успешни системи одржавања (СОД). Како је успешност динамичка категорија, мора се разматрати за садашњи тренутак и предвиђати за будућност.

Везано с тиме је и проблематика пројектовања, репројектовања, усавршавања и побољшања система одржавања стално актуелна. Анализа утицајних фактора који одређују систем одржавања је неодвојива од разматрања усавршавања система одржавања. Могућност квантификације утицајних фактора представља посебан квалитет с обзиром да омогућава примену прогностичких поступака. Квантификација се изводи путем стварања одговарајућих модела система одржавања који се користе за експериментисање. Многи аутори се слажу да не постоји једна и основна мера за успешност система одржавања, али да је могуће одредити показатеље успешности система одржавања, као и њихове минималне или максималне вредности, које треба постићи у усавршавању или функционисању система.

Усавршавање система одржавања је неопходно, јер се у противном стварају затворени системи у којима расте ентропија, па се систем дезорганизује и гаси (Станојевић и др., 2002.). Усавршавања диктирају технолошке промене, организационе промене, поремећаји у потражњи и измењени захтеви окружења. Усавршавање и развој система одржавања врши се у областима концепције (политике), технологије, организације, у једној од њих или комбиновано.

Проблем развојних промена у СОД је двојак. Први проблем је који од поступака усавршавања (корак по корак, усавршавање целине система или комбинација) применити, а други је у томе како доћи до квантитативних показатеља на основу којих ће се одабрати најбоља варијанта, гледано према одређеном скупу критеријума, без експеримента на самом систему и уз минималне трошкове истраживања.

С обзиром да се већина процеса који се одигравају у одржавању може описати случајним променљивима, да их често карактерише нестационарност, велики број лимитирајућих фактора и да треба уважавати специфична управљачка решења, најбољи начин за усавршавање СОД и у том смислу и за потребна изучавања (квантификације) је примена метода математичког моделовања и симулације. Симулације обезбеђују моделовање временског трајања процеса и међусобних утицаја процеса и других фактора на процес. Симулације се користе у репројектовању и других логистичких система и процеса, а користе се за избор референтних вредности перформанси процеса, одлучивање, самооцењивање и др.

Да би се систем усавршио, нужно је познавати његово тренутно стање односно његове перформансе. Анализа способности процеса или опреме се изводи са циљем оцене усаглашености параметара процеса или опреме (односно система) са захтевима дефинисаним стандардима, правилима и потребама. Анализа обезбеђује и идентификовање карактеристика процеса потребних за пројектовање мера и примену метода и техника унапређења квалитета. Перформансе се могу исказати на више начина, али је потребно да могу бити објективно измериве. Продуктивност као мера успешности одржавања је важно питање ефективности и ефикасности одржавања. С обзиром да је одржавање мултидисциплинарна област, са великим бројем улазних и излазних параметара, перформансе продуктивности одржавања се морају мерити свеобухватним приступом. Одржавање је велики финансијски издатак за многе компаније или организације. Мерење перформанси одржавања је постао суштински битан елемент стратешког размишљања. Исто се односи и на котинуирану контролу одржавања.

Квантификација показатеља успешности система одржавања се зато, као и поређење варијантних решења међу собом, првенствено заснива на методологији моделирања и симулације као, у овом случају, најпогоднијих квантитативних метода. Овај поступак представља врхунац и крај квантитативног дела поступка пројектовања/репројектовања. Да би се дошло до коначног технолошког и организационо управљачког решења, потребно је извршити комплексну анализу варијанти решења према задовољењу критеријума и показатеља успешности.

## 1.2. Циљ и концепт истраживања

### 1.2.1. Мотивација и визија

Одржавање је данас посвећено циљевима као што су подршка одрживом развоју друштва, укључујући еколошки аспект и енергетске уштеде, безбедност и економски аспект. Напредно одржавање има важну улогу у унапређењу конкурентности компанија. Технологија не може бити ефективна без напредног управљања. Поузданост машина, опреме и инструмената су фактори конкурентности, посебно у областима где су безбедност и расположивост важни. Аутоматизација и интегрисана производња су резултирали настанком великих техничких система који су тежи за контролу и управљање и много осетљивији на отказе са аспекта последица тих отказа.

Традиционално, произвођачи гарантују безотказни рад постројења, опреме или машина за одређени гарантни период. Данас је популарна метода „Планирање профита у животном веку“ (Life cycle profit planning) и базирана је на поузданости производа у целом животном веку. Статистички одређени интензитети отказа, расположивост и животни век производа се користе као аргументи конкурентности. Већа поузданост машина, опреме и постројења подразумева и мањи ризик за запослене и околину, такође и бољу контролу и мање трошкове опреме у животном веку. Зато су потребне и нове прецизне и убедљиве методе за специфицирање и контролу расположивости и поузданости опреме и машина. Поузданост је и аргумент надметања тј. продаје, када више производа слично или једнако врше функцију.

Област одржавања се интензивно усавршава, са специфичностима одређених индустријских области (ваздухопловство, енергетика, транспортна средства, производња нафте, рударство и др.). Велики број варијанти метода и приступа у одржавању говоре о сложености проблема и недостатку јединственог решења. Везано с тиме, предлажу се и многобројни приступи оптимизацији, било по критеријуму расположивости система, било по критеријуму цене или смањењу ризика. Ретки су, међутим, примери анализе и побољшања који узимају у обзир комплексан систем одржавања и углавном се фокусирају на специфичан вид опреме у једном постројењу. Под комплексним системом у овом случају се сматра систем одржавања који је хијерархијски организован, који је задужен за бригу о великом броју различитих техничких средстава. Такође, актуелна разматрања недовољно третирају ресурсе одржавања као што су људски ресурси, опрема, резервни делови и материјал.

Захваљујући развоју рачунарства (подразумевајући под тим снагу рачунара и комуникационе технологије) и комерцијалног софтвера, могуће је за стратешки ниво управљања одржавањем, дефинисати модел за оцену успешности одржавања путем изабраних индикатора. Добро развијени модел може се тада користити као алат за подршку одлучивању, као директан оптимизациони метод и као алат за предвиђање понашања система у будућности.

*Квалитет и новина овог истраживања је синергијска веза примене метода и алата Статистичке контроле процеса и симулационог модела. Помоћу Статистичке контроле процеса може се оценити способност и стабилност процеса. Након такве анализе одмах је могуће открити узроке варијација у процесу, али је дефинитивно већа вредност употребе симулационог експеримента за наставак процеса побољшања. Параметри и законитости појава измерени путем алата статистичке контроле процеса се даље користе за подешавање симулационог модела. Симулациони модел може ефикасно и*

*економично послужити као средство спознаје догађања у систему, али и као средство за директну оптимизацију без употребе комплексних и сложених метода формалне оптимизације а посебно напредних оптимизационих техника, јер је њихова примена сама по себи захтевна и комплексна.*

Широком анализом публикација, са тежиштем на радовима објављеним у последњих 15 година из области одржавања, сагледавају се актуелни трендови, достигнућа и области недовољно или делимично истражене. Даје се преглед развоја одржавања као темељ за откривање могућности унапређења и развоја нових методологија.

Опсег истраживачког проблема обухвата систем одржавања средстава у Војсци Србије, уз напомену да конкретни и стварни подаци не могу бити публиковани. Чињеница је да се развијени модел може користити без ограничења у осталим системима одржавања, а уз минималне модификације и за производне делатности, посебно масовну производњу техничких и других производа који се састоје од великог броја компоненти и где се за производњу користе ресурси (запослени, материјал, машине) и где је потребна синхронизација великог броја операција. Свакако да је могућа примена и за услужне делатности и све остале системе масовног опслуживања.

Значај истраживања се огледа у изналажењу метода за подршку руководству у доношењу одлука, путем потпуног и објективног сагледавања стања процеса одржавања, ефеката, продуктивности (ефикасност и ефективност) и могућности предвиђања понашања процеса одржавања у будућности, зато што се модел заснива на историјским подацима о понашању система, а непостојећи подаци се могу адекватно моделовати уз одређени степен поузданости. Такав приступ би могао да генерално обезбеди минимизацију настајања неприхватљивог стања опреме односно њихову дуготрајну нефункционалност, о чему на жалост постоје многобројни примери у Републици Србији (дијагностичка медицинска опрема, непоуздана опрема за производњу, неисправна транспортна средства и др.).

### **1.2.2. Хипотезе**

Основне хипотезе докторске дисертације су формулисане на следећи начин:

- Развијени модел система одржавања мора бити целовит и обухватити ресурсе одржавања, динамику захтева за одржавањем, динамику активности одржавања, просторни распоред објеката одржавања - опреме, те да верно описује процесе и стварни систем одржавања, базиран на подацима о историји одржавања;
- Модел за подршку у одлучивању представља средство за непосредну оптимизацију и предвиђање понашања система одржавања у будућности, односно понашање у случају поремећаја;
- Развијени модел има директан утицај на повећање степена коришћења ресурса, расположивости опреме и постизање циљева организације.

### **1.2.3. Циљ научног истраживања**

Научни циљ истраживања је успостављање теоријског оквира и модела за унапређење процеса одржавања техничких система у комплексној организацији са могућношћу генерализације.

Основни циљ истраживања је квалификација и квантификација успешности сложеног (и конкретног) система одржавања са развијеним симулационим моделом система, који верно описује процес, обезбеђује проверу алтернативних решења при доношењу одлука и



представља прогностички алат, док развијање универзалног модела унапређења одржавања („Измери, Моделирај-Симулирај, Унапреди, Предвиди“) представља општи циљ.

У односу на општи циљ, подциљеви (посебни циљеви) су: оптимизација процеса, повећање степена искоришћења ресурса, побољшање квалитета - расположивости опреме, смањење трошкова, оптимизација трајања производног циклуса - времена трајања одржавања. Такође, предложена решења која ће бити резултат ових истраживања треба да буду једноставна за примену, да имају универзални карактер, односно да су применљива за остале индустријске области и системе одржавања.

Из основног, општег и посебних циљева, индуковани су и следећи циљеви истраживања:

- Доказивање нужне повезаности процеса мерења перформанси (продуктивности) система одржавања и ефективности модела одржавања. Продуктивност одржавања је важно питање ефективности и ефикасности одржавања. С обзиром да је одржавање мултидисциплинарна област, са великим бројем улазних и излазних параметара, перформансе продуктивности одржавања морају се мерити свеобухватним приступом. Одржавање је велики финансијски издатак за многе компаније или организације. Мерење перформанси одржавања је постао *суштински битан елемент стратешког размисљања*. Исто се односи и на потпуну контролу одржавања, јер капитална постројења и опрема, као што су бродови, производна постројења, енергетска постројења, сложена медицинска опрема, системи оружја и др., неизоставно захтевају одржавање. Њихов животни век је дуг. Често, и поред појаве бољих и савременијих система, такви стари системи остају у употреби. Њихова замена није лака и једноставна из економских, политичких и других разлога. Капитална постројења и опрема, у овом контексту, подразумевају техничке системе који су веома важни за примарне процесе корисника, па њихов отказ или стање “у отказу“ испољава значајан негативни ефекат;
- Одређивање мере могуће примене и ограничења примене симулације на модел одржавања. Један од највреднијих аспеката примене симулације је чињеница да је могуће објаснити и разумети реалну појаву без скуких експеримената у лабораторији или на терену. Успешна, верификована и валидна симулација је способна да да довољно кредибилна решења (опис система, контрола понашања система и предикција понашања у будућности);
- Потврђивање верификације и валидације модела. Наука, индустрија и државна управа су посебно заинтересоване за валидацију модела. У тим круговима се у односу према моделу везују термини као што су: поузданост, кредибилитет, поверење, применљивост. Верификација и валидација модела као приступ, квантификују тачност и поверење закључивањем на основу упоређивања резултата модела и резултата добијених експериментом или на основу реалности;
- Потврђивање способности симулационе технике да буде директан оптимизациони алат.

Ово истраживање треба да омогући нови приступ управљању одржавањем у условима и извесности и неизвесности, применом апликативних софтверских решења која омогућавају напредно управљање у реалном времену, чиме се непрекидно врши рационализација и повећава ефикасност, као и предвиђање понашања система у будућности.

#### 1.2.4. Очекивани резултати научног истраживања

Планирана реализација истраживања омогућава идентификацију и проверу кључних критеријума, истраживање узрочно-последичне везе између вредности критеријума и алтернатива и дефинисање модела који ће омогућити сагледавање понашања система одржавања, његово побољшање и оптимално одлучивање. Истраживање, развој и имплементација модела одржавања директно доприноси одржању стабилности

организације за чије потребе се одржавање изводи и реализује. Интеграцијом пројектованог модела са савременим концептима одржавања могуће је постићи синергијске ефекте у побољшању укупне ефикасности организације. Модел се може лако прилагодити најсавременијим приступима у одржавању, као што је на пример одржавање према стању мерењем параметара стања опреме.

Предмет планираних истраживања односи се на развој и примену модела одржавања у сложеној организацији по нивоима, врстама опреме која се одржава и великом броју опреме применом симулационог модела. Анализом литературе у овој области се види да је реч о недовољно истраженој области, нарочито у Републици Србији, али и у свету. Примена симулационе технике захтева висок ниво знања, што отежава њену ширу примену. Симулацијом је могуће моделовати временско трајање процеса и међусобне утицаје процеса и других фактора на процес.

Могуће је користити симулациони модел и за предвиђање стања у будућности. Чак и када је релативно лако дефинисати модел, посебан је проблем одређење параметара модела, што је случај у симулацијама типа „*discrete event simulation*“. Параметре за симулациони модел обезбеђује примена алата Статистичке контроле процеса, који су сами по себи снажни и робусни алати за откривање расипања и губитака у процесу. Планирано истраживање треба да омогући идентификацију критеријума за оптимизацију процеса одржавања.

Истраживање, развој и имплементација модела одржавања треба да допринесу рационализацији употребе ресурса одржавања, повећању нивоа расположивости опреме, а посредно очувању животне средине и енергетске ефикасности и побољшању квалитета процеса одржавања.

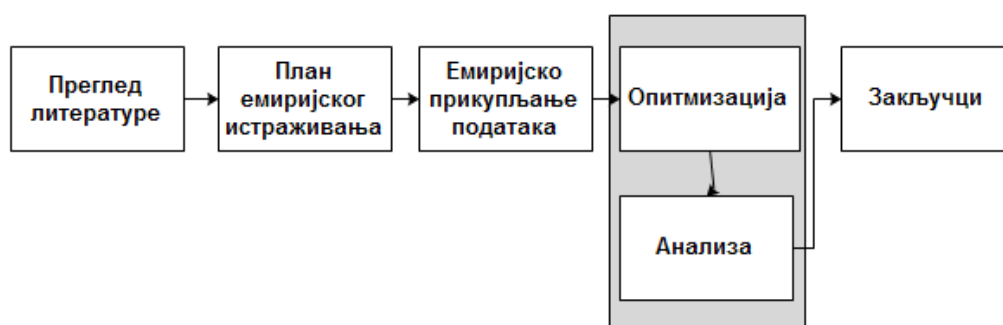
### 1.2.5. Примењене научне методе

Мултидисциплинирани проблем захтева и адекватан приступ за његово превазилажење. Имајући у виду метод и организацију научно истраживачког рада, докторска дисертација биће реализована коришћењем:

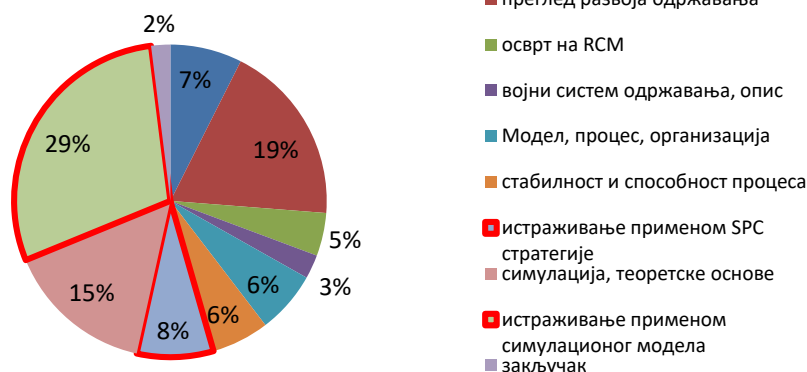
- **Метода теоријске анализе** (проучавање теоријских сазнања и најновијих емпиријских налаза у вези са предметом истраживања);
- **Дескриптивно-аналитичке методе** (анализа, синтеза, индукција, дедукција и генерализација);
- **Квантитативних метода** (статистичке методе, статистичка контрола процеса, математичко програмирање, дијаграм тока и оптимизација);
- **Методe за прикупљање и анализу података** (испитивање, посматрање, експеримент, студија случаја);
- **Метода моделовања** (као теоријско-емпиријска метода, у чијој основи су методе типологизације (сваки модел је представљање типичног), апстракција и конкретизација; Моделовањем, моделом и моделним експериментом могу се процеси и појаве описивати, типологизовати, откривати, објашњавати и прогнозировать);
- **Симулације** (као облик квазиэксперимента, облик модалног експеримента и изванредан реконструктивни и прогностички инструмент);
- **Каузалне методе** (откривање узрочно-последичних веза анализираних перформанси);
- **Компаративне методе** (упоређивање добијених резултата о анализираним процесима у односу на сличне приступе);
- **Анализе садржаја докумената или проучавање докумената.**

### 1.3. Структура истраживања

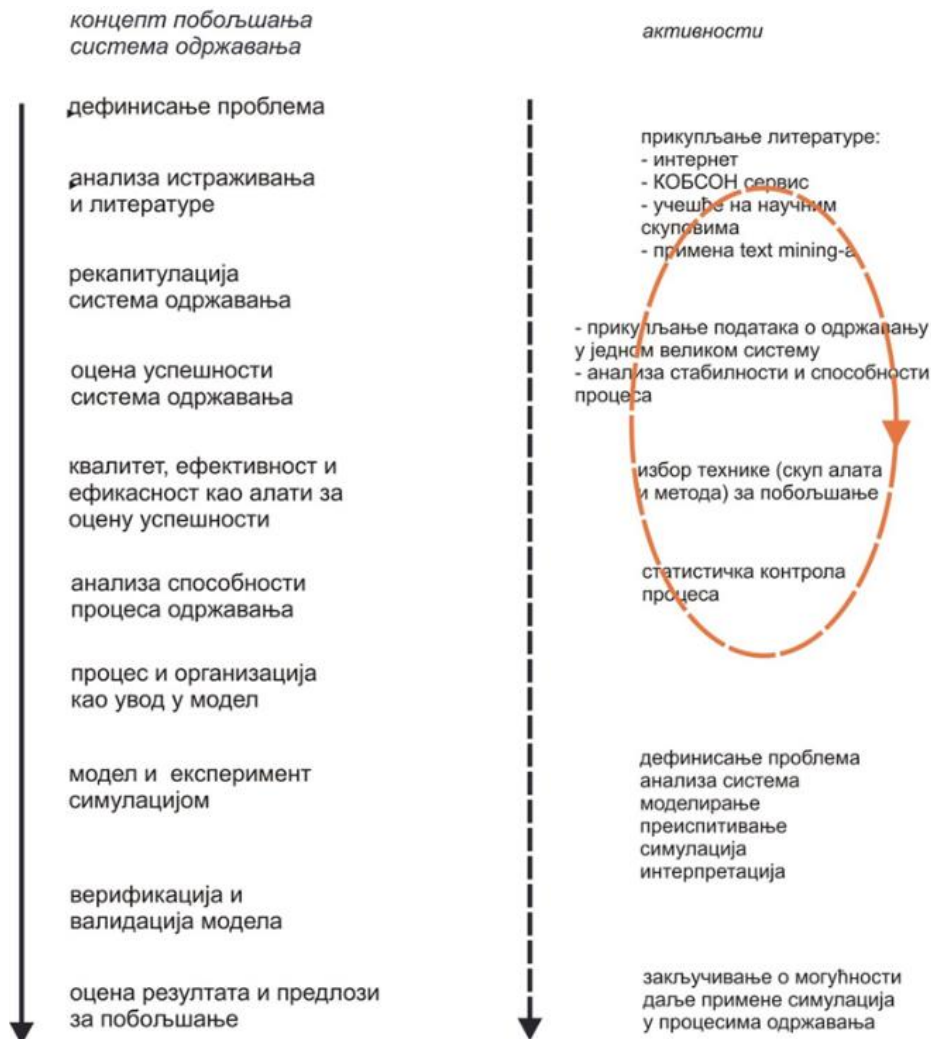
Дефинисањем почетних претпоставки и одређењем да се примени стратешки поглед на проблем одржавања са циљем побољшања процеса, у прегледу досадашњих истраживања дат је преглед најновијих теоријских и практичних приступа у одржавању. Тиме се доказује научно утемељење, релевантност и актуелност истраживања. Даље, у ширем обиму је дат преглед развоја одржавања са описом конкретних система одржавања који је предмет истраживања и унапређења. Моделовању система и концепту мерења перформанси система одржавања посвећено је посебно поглавље, кроз приказ тренутног стања у области. Следи анализа стабилности и способности система одржавања и прва фаза истраживања применом стратегије "статистичка контрола процеса" у којој су квантификоване појаве, законитости појава и донет закључак о нужности унапређења. Следеће поглавље је посвећено симулацији. Прво су детаљно дате теоријске основе за примену и преглед релевантне праксе. У другој фази истраживања, обухваћеној у овом поглављу, приказан је развијени модел који описује систем одржавања. Помоћу симулационог експеримента извршена је реконструкција процеса, испитане су варијанте када се мењају вредности чинилаца и фактора реалног система, извршена је оптимизација и верификација примене модела. У закључку су дате препоруке за даљу примену развијене методологије и правци даљих истраживања. Структура истраживања и истраживачког процеса је приказана на сликама 1 и 2. Развијена општа методологија за унапређење процеса одржавања је дата на слици 3.



Квантитативна структура рада

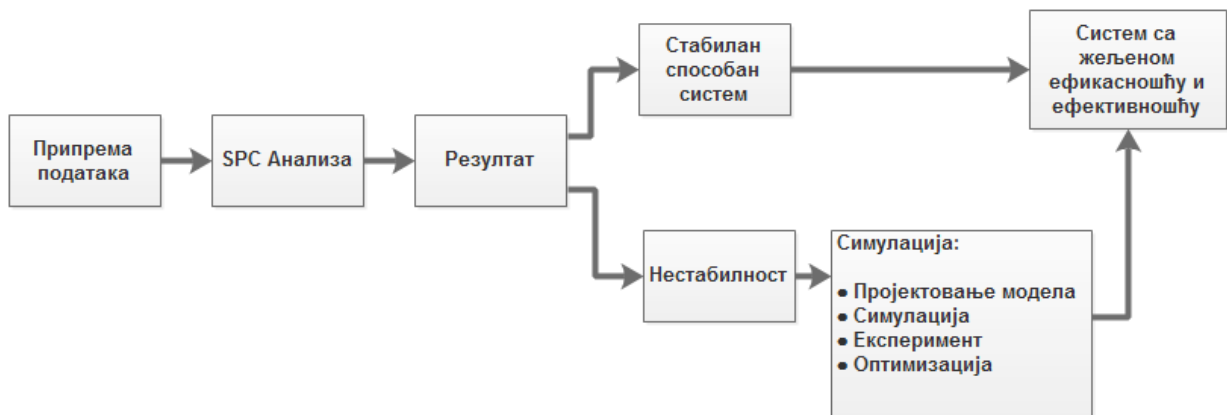


Слика 1. Процес истраживања (Puurinen et al., 2014.) и квантитативна структура



- резултат (очекивање)
1. повећање нивоа расположивости опреме
  2. максимално искоришћење ресурса: капацитет радне снаге

Слика 2. Општа структура рада



Слика 3. Методологија за унапређење процеса одржавања

## 2. Преглед истраживања и литературе

Сваки вид истраживања захтева прикупљање и анализу обимне литературе. Извори литературе су различити. Савремено доба је омогућило неслућене ресурсе по овом питању. Чињеница је ипак да је то и својеврстан проблем, јер велика количина информација не може бити обрађена и да се могу пропустити односно не уочити важни радови и резултати који су већ публиковани и слично.

Преглед досадашњих и актуелних истраживања је захтеван задатак. Оно има за циљ да докаже релевантност и актуелност сопственог истраживања. Постоје три основна проблема у анализи расположиве и доступне литературе. Први је обим расположиве литературе, па се поставља проблем како изабрати само меродаван део из расположивог скупа. Други је проблем што део литературе, нарочито оне која се публикује у водећим светским часописима и издавачким кућама треба платити, што повећава трошкове истраживања. Трећи проблем је што постоји могућност да се пропусти одређена релевантна литература (стручни рад). Основни извор литературе која је коришћена у овом истраживању су Интернет и КОБСОН сервис Народне библиотеке Србије. У овом поглављу даје се преглед дела коришћене литературе.

Као и у свакој дисциплини успостављеној на темељима технологије и науке, студија одржавања почиње са дефиницијом одржавања. Одржавање се дефинише као скуп техничких и сродних управљачких активности изведених ради спречавања кварова или поправке неисправне компоненте машине, уређаја или софтвера. У инжењерској арени, одржавање није "Свети грал" и оно је оријентисано да спречи отказе или елиминира последице отказа насупрот другим гранама, које користе најновија достигнућа за дизајн нових производа или услуга. Ипак, одржавање је све више посвећено нумеричким анализама, вероватноћи отказа, смањењу трошкова и ризика, и на крају, управљању ресурсима.

Према раду (Јовановић, 2006.), налазимо се у ери четврте генерације система одржавања. По исказаној анализи, у времену од 1930.-2000. г. развијене су три генерације одржавања, које су у основи промениле приступ од корективног одржавања, преко превентивног одржавања до агресивних (непрекидно усавршавање опреме, нпр. „ТРМ“) приступа у одржавању. У четвртој генерацији, која према ауторима почиње око 2000. године, од одржавања се захтева максимизација ефикасности и ефективности, да има својства *Lean* одржавања, да је интегрисано у систем организације/предузећа и да користи системе за надзор и дијагностику на даљину. Свакако, и четврта генерација наставља да користи тековине претходне генерације, а то су: висок квалитет као мера пословног процеса, примена експертних система, дигитални приручници, примена система за рачунарско управљање одржавањем (*CMMS*), еколошки захтеви, *Six Sigma* пракса, одржавање оријентисано на поузданост, одржавање према стању, тотално продуктивно одржавање, употреба рачунарских система за планирање ресурса система укључујући и одржавање и др. Једно од најважнијих својства, осим поменутих, у системима одржавања четврте генерације је повезивање *CMMS* и географских информационих система (*GIS*). Истоветан приступ даје и (Dunn, 2009.), уз навођење значаја увођења концепта управљања ризиком у одржавању. Такође, даје се мишљење да је будућност одржавања у елиминацији отказа

уместо у превенцији отказа и предвиђању отказа. Од менаџмента одржавања се захтева примена системског и организационог приступа у одржавању.

У раду (Адамовић и Радовановић, 2008.), аутори користећи термин *методе одржавања*, класификују исте на корективно, превентивно и комбиновано одржавање. Одржавање према стању као облик превентивног одржавања се обезбеђује преко контроле одређених техничких параметара на основу којих се доносе одлуке о одржавању. Уводећи концепт техничке дијагностике, одржавање према стању се класификује у две групе: са контролом параметара и са контролом нивоа поузданости. Други модел, са контролом нивоа поузданости, подразумева „да се саставни делови система користе без ограничења међуремонтног ресурса уз извршење неопходних активности одржавања при отклањању насталих отказа, док се стварни ниво поузданости налази у границама утврђених норми; ако дође до одступања, предузимају се мере за повишење нивоа поузданости појединих саставних делова система“.

(Garg and Deshmukh, 2006.) у раду „*Maintenance management: literature review and directions*“ (142 референци) дају преглед истраживања у управљању одржавањем. Обухваћена су подручја: оптимизациони модели одржавања, технике одржавања, планирање одржавања, мерење перформанси одржавања, информациони системи одржавања и политике одржавања. У области оптимизација, констатује се прелазак са квалитативних приступа (тотално продуктивно одржавање, енг. *TPM*, одржавање оријентисано на поузданост, енг. *RCM*) на квантитативне (детерминистички и стохастички модели). Политике одржавања, осим стандардних, разматрају и следеће: *Computerized maintenance management systems (CMMS)* као концепт, *Reliability centered maintenance-RCM* интегрисан са *CMMS*, *Maintenance outsourcing*, *Effectiveness centered maintenance* (у основи концепт оријентисан на квалитет, *TPM* у комбинацији са *RCM*), *Strategic maintenance management*, *Risk-based maintenance*. Кроз процес планирања одржавања настоји се да се реши проблем прецизне координације шест елемената: људски ресурси за одржавање, алат, делови и материјал, приступ објекту одржавања (опрема, машина и др.), информације потребне за извршење посла, потребне дозволе (администрација). У делу који третира перформансе одржавања, разматрају се технике и методе за оцену успешности одржавања. Констатује се растућа улога ИТ и примене информационих система у одржавању. У области политике одржавања констатује се раст примене система за подршку у одлучивању.

(Адамовић и др., 2008.) у делу *Менаџмент индустријског одржавања*, дају приказ теорије организације одржавања, менаџмента одржавања, методологије одржавања, аутоматизације одржавања (ИТ) и реинжењеринга одржавања.

(Mobleу, 2004.) у делу под називом *MAINTENANCE FUNDAMENTALS* кроз систематски приступ даје приказ улоге и значаја одржавања. За успешно одржавање потребни су одређени услови. Организација одржавања се врши према потребама шире организације. Програми одржавања се изводе према технолошким, организационим и финансијским критеријумима. Управљању и мерењу перформанси одржавања посвећено је посебно поглавље. Кроз посебне додатке и поглавља дате су специфичности одржавања за одређене врсте опреме, нарочито из машинске области (вратила, ротори, пумпе, компресори, мењачи, трансмисије и др.).

(Starr et al., 2010.) дају приказ савремених трендова у одржавању. Износе тврдњу да је важна поузданост и расположивост система и процеса, а не поједине компоненте. Нове технологије имају одлучујући утицај на успешно одржавање. Свеобухватни приступ одржавању подразумева примену неколико методологија одржавања као што су *Reliability Centred Maintenance*, *Total Productive Maintenance*, *Total Quality Maintenance*, *Lean Maintenance* и друге. Анализирајући више варијанти, са њиховим предностима и мананама, *Condition-based Maintenance* сматрају једном од најнапреднијих методологија за највећи број области одржавања. Информациони системи су неопходни за пуну контролу

одржавања и анализу записа о одржавању. ИТ, сензори и савремени портабл-инструменти омогућавају прелазак на напредне методологије одржавања и прилагођавање (Customisation) одржавања специфичним областима.

(Gulati, 2013.) у делу *Maintenance and Reliability Best Practices* даје модерну визију најбоље праксе одржавања и поузданости. Кроз разматрање више питања, од дефиниције одржавања, праксе одржавања, теорије поузданости, пословне културе и лидерства (визија, мисија и циљеви), планирање одржавања, управљање материјалом, управљање радном снагом, мерење перформанси одржавања, одржавање у којем учествују корисници/оператори, оптимизације одржавања до методологија одржавања и унапређења одржавања, даје се приказ најбоље праксе у одржавању.

(Mobley et al., 2008.) у делу *MAINTENANCE ENGINEERING HANDBOOK* дају приказ организације и управљања функцијом одржавања. Наводе све савремене приступе одржавању. Посебна пажња је посвећена алатима и техникама за анализу одржавања. Детаљно се образлаже приступ одржавању различитих постројења и опреме (механичка опрема, електрична опрема, производна постројења и др.). Дат је преглед напредних дијагностичких инструмената. Проблемима корозије и подмазивања посвећена су посебна поглавља.

(Borris, 2006.) у основи даје детаљан приказ *Total Productive Maintenance (TPM)* приступа одржавању уз напомену да уз *Reliability Centered Maintenance (RCM)* приступ чине два и даље водећа приступа у одржавању. Овим је дат концептуални приступ континуалног усавршавања система одржавања кроз наведене приступе одржавању, укључујући и *Lean* приступ. Модели и технике за решавање проблема чине посебно поглавље. *Lean* приступ је детаљно приказан у раду (Mostafa et al., 2015.) *Lean thinking for a maintenance process*.

(Kelly, 2006.) у делу *Maintenance Systems and Documentation* осим описа како треба успешно организовати одржавање у спрези са циљевима организације, посебну пажњу посвећује контроли залиха резервних делова као једног од најзначајнијих ресурса одржавања. Такође, детаљно су образложени циљеви и обрасци вођења документације или записа о одржавању.

(Ahmad and Kamaruddin, 2012.) у раду *An overview of time-based and condition-based maintenance in industrial application* (160 референци) дају преглед превентивног одржавања и одржавања базираног на стању у пракси.

(Muller et al., 2009.) у раду који приказује преглед и истраживања одржавања према концепту *e-maintenance*, закључују да концепт представља интеграцију информационо комуникационих технологија и политике одржавања (методе) и планова (структурирани скуп задатака и активности) одржавања. Е-maintenance може да се сматра: а) стратегијом (задаци се дефинишу применом ИТ средстава на основу снимљених података о стању опреме у реалном времену, а уједно се врши управљање одржавањем); б) планом; в) типом одржавања (модерни надзорни системи помажу код одлучивања шта и када треба одржавати); г) подршком одржавању (Web сервиси, комуникација техничара и експерата и др.). Из овог концепта проистичу унапређења одржавања кроз: 1) унапређење типа или стратегије одржавања (*Remote Maintenance, Cooperative/Collaborative Maintenance, Immediate/on-line Maintenance, Predictive Maintenance*); 2) унапређење подршке одржавању (*Fault/failure Analysis, Maintenance Documentation/record, After-sales Services*); и 3) унапређење активности у одржавању (*Fault Diagnosis/localization, Repair/rebuilding, Modification/improvement-knowledge Capitalization and Management*). Концепт прати и низ изазова, због више фактора, посебно због недостатка стандардизације, али је ипак развијено или је у фази развоја више платформи које треба да потпуно подрже примену концепта (ENIGMA, CASIP, ICASAME, Remote Data Sentinel, INTERMOR, INID, IPDSS, WSDF, MRPOS, PROTEUS, TELMA и др.). Потпуна примена овог концепта се сматра револуционарном променом у одржавању. Нешто другачији приступ одређивања е-maintenance је дат у (Kajko-Mattsson et. al., 2010.) уз сличан закључак да је е-maintenance

мултидисциплинарна област базирана на одржавању и информационо комуникационим технологијама. Према (Jantunen et al., 2011.) примена овог концепта је у почетној развојној фази (Infant stage).

(Ab-Samat and Kamaruddin, 2014.) у раду *Opportunistic Maintenance (OM) as a new Advancement in Maintenance Approaches: A review* (89 референци), дају преглед развоја и примене тзв. *Opportunistic Maintenance* приступа у одржавању. Један од мотива да се примени овај приступ је што се према ауторима повезује са оптимизацијама у одржавању. У основи приступа је, да када се морају предузети радње одржавања (поправка, замена) на некој компоненти система, користи се прилика да се предузму радње и на осталим сродним компонентама (преглед, поправка или замена). Циљ приступа је максимизирање расположивости опреме и минимизација трошкова одржавања. Неки аутори овај приступ називају и оптимално одржавање. Другим речима, када се истовремено комбинују акције корективног и превентивног одржавања, може да се превентивно делује на отказе, а опрема се ређе подвргава одржавању. Аутори констатују да тек у последњој декади, овај приступ може бити примењен у пуном формату. Најпре, јер су створени услови да се систематски могу прикупљати информације о систему (ИТ технологије). Као друго, на основу тих информација, могуће је препланирање радова одржавања, израда програма одржавања (које компоненте у које време и шта се ради) и израда плана одржавања који се ставља у дејство било када кад се деси прилика односно настане квар (отказ) на некој компоненти. Кључно је ипак да је у суштини то комбинација превентивног и корективног одржавања које се спроводе истовремено. Зато се понекад овај приступ назива и *потенцијално одржавање*. Констатују се и недостаци приступа. Систем са пуно компоненти није лако прегледати у тренутку кад је покварена само нека компонента, планирање одржавања је отежано (ако су у тренутку корективног одржавања превентивно прегледане неке друге компоненте, када и како планирати њихов поновни преглед, итд.) и др. Једно од решења, тј. могућности примене, је дат у раду (Kooschaki et al., 2012.) који на релативно простом трокомпонентном систему комбинује одржавање према стању и ОМ уз напомену да приступ ОМ мора да се усавршава и да је ефикасан у специфичним условима.

(Roy et. al., 2016.) у раду *Continuous Maintenance and the Future - Foundations an Technological Challenges*, разматрају проблем одржавања тзв. *Long Life* производа, што је према сложености техничких система илустровано на слици 4.

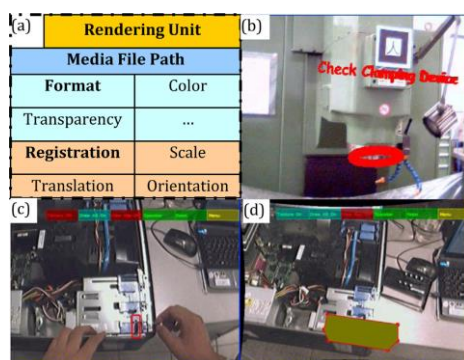


Слика 4. Нивои концепта „Continuous maintenance“ (Roy et. al., 2016.)



Израз „Continuous Maintenance“ аутори користе да опишу такво одржавање које је задужено за бригу о вредној опреми која је дизајнирана за дугу употребу. Нове технологије које доприносе овом концепту су *Additive Manufacturing Technologies*, *Industry 4.0* и *Internet of Things (IoT)*. Концепт је базиран на шест области знања: механизми деградације компоненти опреме, механизми поправки, мониторинг стања, дијагностика и прогностика стања опреме, аутономно одржавање (оператори и одржаваоци раде заједно, али има и значај да је опрема способна да се самопоправи, тзв. *Self-healing*, као и да оправку могу да изврше роботи), застаривање опреме и интегрисано планирање. Кључне технологије које обезбеђују примену овог концепта су: „*Non-destructive Evaluation (NDE) for Degradation Assessment*“ (ултразвучно тестирање, рентгенско снимање, термографија и др.), технологије оправки, прогностика, „*Self-healing and Self-repair Technologies*“, „*Remote Maintenance*“, „*Digital Maintenance-Repair Overhaul (MRO)*“, „*Big Data*“ и визуелизација активности одржавања (нпр. употреба „*Augmented Reality*“) у сврхе планирања и обуке механичара и техничара.

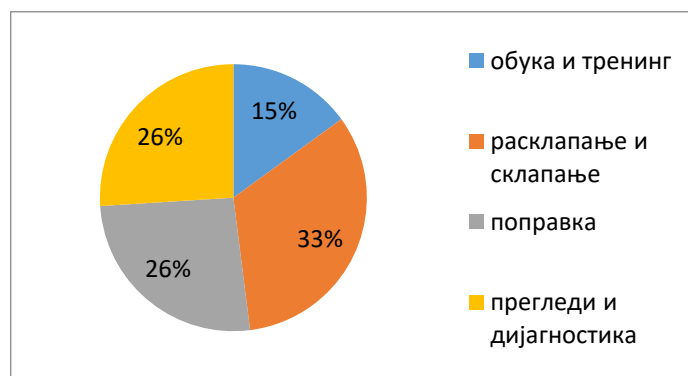
(Ong and Zhu, 2013.) описују концепт „*Augmented Reality (AR)-проширена стварност*“ у одржавању, који се састоји у примени информационих технологија за подршку и комуникацију између техничара одржавања и експерта, односно за побољшање активности одржавања, што је илустровано сликом 5. С обзиром да је Augmented Reality (AR) екстензија концепта "*Virtual reality (VR)-виртуелна стварност*", њихова примена у одржавању се преплиће и непрестано развија. Од примене VR у одржавању се очекује да омогући основу за анализу одржавања (приступачност, прегледност, безбедност) још у фази развоја производа (Zhou et al., 2015.).



Слика 5. Могућности концепта „проширена стварност“ (Ong and Zhu, 2013.)

(Zhou et al., 2015.) дају приказ значаја виртуелне реалности у одржавању.

(Palmarini et al, 2018.) дају детаљнију слику примене концепта „Augmented Reality (AR)“ у одржавању (слика 6).



Слика 6. Примена „проширене стварности“ у одржавању (Palmarini et al, 2018)

Концепт се описује кроз: *области примене* (авијација, постројења, механички системи, потрошачки производи, нуклеарна индустрија), *операције одржавања* (расклапање/склапање, поправке, дијагностика, тренинг, илустровано сликом 6), *хардвер* (уређаји погодни за примену концепта), *методе интеракције* (начин комуникације са корисником).

У раду (Palem, 2013.), са циљем примене у одржавању према стању, разматра се проблем коришћења великог броја података које генеришу сензори уграђени у опрему. Закључује се да нове јефтине технологије сензора и комуникација, уз алате за обраду података обезбеђују услове за примену овакве врсте превентивног одржавања.

(Јеремић и др., 2007.) приказују разматрање могућих опасности и последица у случају примене неадекватног одржавања. Препоручује се проактивни приступ одржавању, јер у пракси 10% узрочника отказа одговорно за више од 90% проблема. Стратегија одржавања мора да води рачуна о трошковима одржавања. Савремене стратегије одржавања подразумевају примену напредних метода и алата (термографија, вибродијагностика и др.).

(Петровић и др., 2013.) у раду *Анализа рада система одржавања применом теорије масовног опслуживања (ТМО)*, анализирају успешност система одржавања применом ТМО на узорку специјалних возила. У раду се решава конфликт броја захтева (улаз у систем одржавања) и капацитета канала за опслуживање. Значај рада се огледа у концептуалном приступу, где се погодним генерализацијама и апроксимацијама сагледава понашање система одржавања, врши моделовање и оптимизација броја канала за опслуживање а на основу чега проистиче универзалност могуће примене. Са друге стране, не постоји још увек решење проблема незадовољења захтева услед других фактора, као што су стање опреме за рад, расположивост кадра и резервних делова и материјала који стратешки утичу на рад „сервисних канала“.

Теорија поузданости и даље има велики значај у одржавању, додуше са различитим интензитетом примене у пракси одржавања. Аутори (Nakagawa, 2008.; Smith, 2011.; Birolini, 2014.; Taylor and Ranganathan, 2014.) уз приказ добро познате теорије представљају и примену напредних статистичких метода, тестова и анализа важних за област теорије поузданости. (Taylor and Ranganathan, 2014.) у делу *DESIGNING HIGH AVAILABILITY SYSTEMS: DESIGN FOR SIX SIGMA AND CLASSICAL RELIABILITY TECHNIQUES WITH PRACTICAL REAL-LIFE EXAMPLES* комбинују теорију поузданости и алате квалитета са демонстрацијом на практичним примерима.

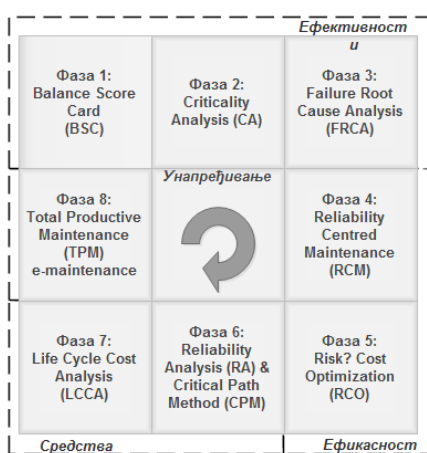
(Покорни, 2011.) износи важност примене теорије поузданости у пракси одржавања. Констатује одређене недостатке прикупљања података о отказима, коришћење претпостављених интензитета отказа из разних приручника и предлаже ширу примену физике отказа у анализи поузданости. Констатује важно место поузданости човека и поузданости софтвера у све сложенијим техничким системима.

(Bagavathiappan et al., 2013.) у раду *Infrared thermography for condition monitoring - A review* (228 референци) дају детаљну представу о примени термографије у процесима контроле стања техничких и других система као једне од највреднијих не-деструктивних метода евалуације стања опреме. Дат је преглед и осталих најбитнијих „*NDT techniques*“ техника.

(Marquez et al., 2009.) предлажу оквир/модел за избор политике одржавања. Процес почиње од дефинисања циљева одржавања. Из циља одржавања проистичу даље планови одржавања. Успешност одржавања се оцењује кроз ефективност и ефикасност. Као динамички систем, и одржавање захтева непрекидно оцењивање и усавршавање. Дат је модел и скуп техника за управљање одржавањем, слике 7 и 8.



Слика 7. Модел управљања одржавањем



Слика 8. Технике управљања одржавањем

(Rastegari and Salonen, 2013.) предлажу концепт одређивања стратегије одржавања у систему. Полази се од стратешких циљева организације. Одатле проистичу циљеви одржавања, на основу којих се дефинише стратегија одржавања. Овај рад је значајан јер констатује да термин *стратегија одржавања* нема јединствено значење у пракси и може да подразумева: концепцијски избор између корективног, превентивног и одржавања према стању; приступ одржавању кроз комбинацију корективног, планског одржавања, периодичних инспекција и унапређење опреме у времену, а све у складу са врстом опреме; концепцију постизања циљева организације; начин трансформисања пословних циљева у циљеве одржавања.

(Parida and Kumar, 2009.) приказују поступак и методологију за оцену успешности система одржавања кроз мерење перформанси. Продуктивност одржавања као комбинована мера ефективности и ефикасности одржавања мора бити позната, јер је то основни показатељ на основу којег се доносе одлуке о успешности односно врше побољшања или корените измене система. Перформансе се мере преко изабраних индикатора који су изведени из задатака организације.

Мерење перформанси система одржавања је једна од значајнијих области у истраживању одржавања. У радовима (Parida et al., 2015.) *Performance Measurement and Management for Maintenance: a Literature Review* (185 референци), (Kumar et al., 2013.) *Maintenance Performance Metrics: a State-of-the-Art Review* (150 референци) и (Samat et. al., 2011.) *Maintenance Performance Measurement: A Review* (51 референца) је дат приказ и значај мерења перформанси одржавања. Квалитативна и квантитативна слика успешности

одржавања је алат стратешког руководства. Мерење перформанси је скуп активности којима се квантификују ефикасност и ефективност активности. Перформансе се мере преко индикатора, најчешће подељених у групе: кључни индикатори перформанси и индикатори перформанси. Конкретни индикатори могу бити дефинисани стандардом или од стране корисника, а репрезентују финансијске ефекте, расположивост опреме, стопу производње, искоришћење ресурса, MTBF, MTTR, итд. Перформансе се посматрају у три категорије, зависно од циља који се посматра. Те категорије су: мера ефикасности опреме, цена перформанси и перформансе процеса. Иако су дати прегледи оквира за примену система за мерење перформанси, констатује се да се мало пажње посвећује дизајнирању таквих система, да су многи од предложених оквира „површни“, да развијени модели не уважавају комплексност сложених реалних система и да заправо будућа истраживања треба да дају одговоре на питања како мапирати процес одржавања, како сакупљати записе о одржавању на основу којих могу да се одреде и измере перформансе. Тренд представљају и истраживања са циљем повећања расположивости опреме и искоришћења капацитета.

Проблем оптимизације одржавања спада у најзначајније области академског истраживања и индустријске праксе. Постоји велики број публикација из ове области. У радовима (Dekker, 1996.; Vasili et. al., 2011. и Ding et. al., 2015.) приказан је детаљан преглед методологија и најчешће примењиваних алата и оптимизационих алгоритама. Упоредјујући радове (Dekker, 1996.) *Applications of Maintenance Optimization Models: a Review and Analysis* (132 референци) и (Ding et. al., 2015.) *Maintenance Policy Optimization-Literature Review and Directions* (156 референци), констатује се у оба рада да постоји јаз између академских истраживања и индустријске праксе у одржавању на пољу оптимизација, односно теоретска разматрања не налазе ширу примену у пракси. Велики број варијација одржавања не обезбеђује јединствене оптимизационе моделе. Напредак ИТ а посебно наменског софтвера омогућава лакшу примену оптимизационих алгоритама, али се констатује проблем квалитета и поузданости података (историја одржавања) који су потребни за примену алгоритама. (Ding et. al., 2015.) констатују важност примењених истраживања у овој области, са закључком да оптимизационе политике морају да имају следећа својства: ефективност, флексибилност и лакоћу и погодност за примену. Посебан значај у овој области придаје се симулационим методама где се издвајају радови (Alabdulkarim et al., 2013.) *Applications of Simulation in Maintenance Research* (149 референци) и (Alrabghi and Tiwari, 2016.) *A Novel Framework for Simulation Based Optimization of Maintenance Systems*. Генерални приступ о оптимизацији путем симулација је дат у раду (Xu et al., 2015.) *Simulation Optimization: A Review and Exploration in the New Era of Cloud Computing and Big Data* (169 референци). У делу (Onwubolu and Babu, 2008.) *New Optimization Techniques in Engineering*, аутори дају преглед и водич за примену оптимизационих техника у инжењерству. С обзиром да исходиште оптимизација лежи у области операционих истраживања, од значаја су дела из ове области (Hillier и Lieberman, 2001., Murthy, 2007., Kumar and Suresh, 2009.).

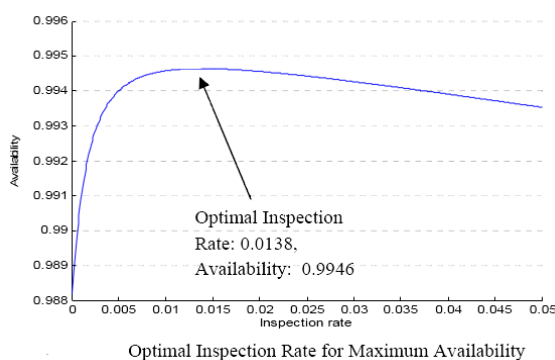
Класичан оптимизациони проблем састоји се од налажења минимума/максимума функције под дефинисаним специфичним условима (Rao, 2009.). Оптимизација води до оптималног, јединственог решења док симулација обезбеђује анализу различитих варијанти решења у процесу одлучивања (Peito et al., 2011). Математички опис система одржавања је могућ само уз значајна упрошћавања реалног система, и не може довољно добро да опише реалан и сложен систем (Guizzi et al., 2009.). Концепт оптимизације путем симулација бави се проблемом налажења оптималног решења проблема описаног симулационим моделом. За изналажење оптималног решења развијени су бројни алгоритми за примену код симулација случајних догађаја (Xu et al., 2015.). Природа стохастичких симулација одређује специфичне технике за оптимизацију. Симулациони модел је скоро увек у форми која не обезбеђује алгебарску форму проблема (Amaran et al., 2016.). Оптимизација путем симулација подразумева тражење посебног скупа улазних параметара (контролних

варијабли) симулације са циљем минимизирања/максимизирања циља који је функција излазних параметара симулације. Као и код обичног оптимизационог проблема, проблем оптимизације путем симулације је дефинисан улазним и излазним варијаблама, циљном функцијом и ограничењима (Hrčka et al., 2014.; Alrabghi et al., 2016.). У оптимизацијама путем симулација уобичајено се користе тзв. апроксимативни алгоритми (Rajurohit et al., 2017.). Ефикасност и тачност ових алгоритама је висока и обезбеђује изналажење решења код веома сложених проблема (Vazan et al., 2012.; Boussaïd et al., 2013).

Политика квалитета у одржавању и приступ са аспекта пословног процеса има све ширу примену. Приступ са аспекта квалитета је настојање да се направи искорак из уобичајене праксе вредновања одржавања ка објективном и независном приступу. (Maletić et al., 2014a) у раду *The Impact of Quality Management Orientation on Maintenance Performance* истичу значај организационе културе на перформансе одржавања. (Taher et al., 2014.) у раду *Integration of Business and Technical Aspects of Reliability and Maintenance* предлаже специфичан концепт одржавања под називом *Business Oriented Reliability-Based Maintenance (BORM)*. Са аспекта менаџмента одржавања, значајан је рад (Abreu et al., 2013.) *Business Processes Improvement on Maintenance Management a Case Study*. Технике моделовања пословног процеса, које се могу користити и за процес одржавања, описане су у радовима (Vasilecas et al., 2013.) *Business Process Modelling and Simulation* и (Nagm-Aldeen et al., 2015.) *A Literature Review of Business Process Modeling Techniques*. Модели процеса имају велику улогу у оцени процеса и примени напредних симулационих експеримената. (Mitra, 2008.) у делу *Fundamentals of Quality Control and Improvement* разматра и оцену квалитета процеса одржавања применом контролних дијаграма.

Посебна је вредност савремених истраживања која су обухваћена кроз дисертације. Из ширег скупа може се издвојити неколико важних радова.

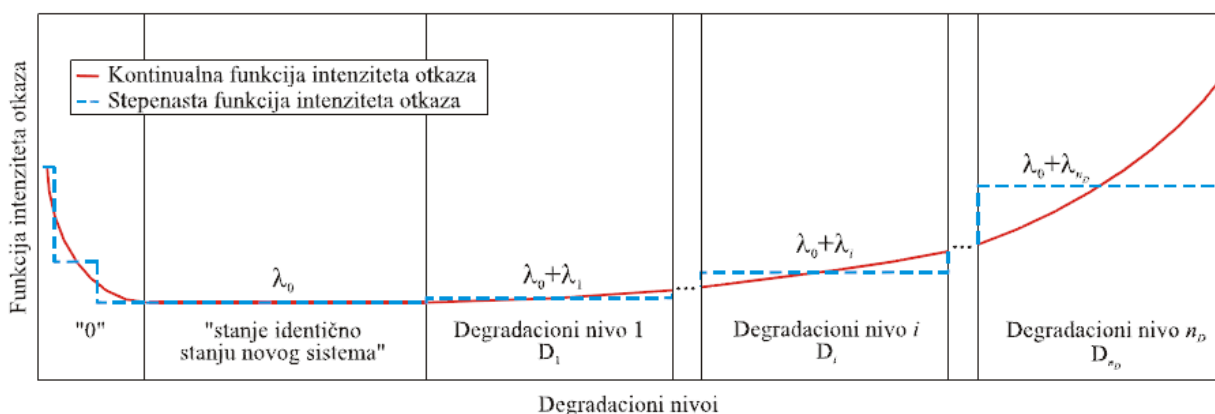
(Ge, 2010.) у раду „*MAINTENANCE OPTIMIZATION FOR SUBSTATIONS WITH AGING EQUIPMENT*“ приказује модеран приступ унапређењу одржавања. Значај рада се огледа у демонстрацији примене Semi-Markov процеса и модела за опис старења опреме (deteriorations), отказа, ефеката одржавања (расположивост), цене одржавања и др. Оптимизација по критеријумима расположивост и цена је извршена применом *Particle Swarm Optimization* алгоритма, на проблему одржавања електричне опреме (дистрибуција електричне енергије). Резултати предложеног концепта су приказани кроз студију случаја. Иако рад представља врхунски приступ у области одржавања и његовог побољшања, може се поставити питање у смислу да у коначном, када резултат оптимизације буде предлог оптималних интервала одржавања и расположивости опреме, расположивост (*availability*) је у границама  $0,992 \pm 0,003$  (*inspection rate*, интервал одржавања-инспекције је  $1/\lambda$  што је у овом примеру  $1/0.0138$  око 72 дана), па је питање шта је оптимални резултат (*optimal inspection*) ако је расположивост већа од 0,99 (слика 9).



Слика 9. Илустрација дијаграма расположивости, оригинална слика из (Ge,2010)

(Alrabghi, 2015.) у раду SIMULATION-BASED OPTIMISATION OF COMPLEX MAINTENANCE SYSTEMS предлаже оквир за оптимизацију процеса одржавања путем симулација. Једна од важнијих констатација је да модели одржавања често занемарују битне факторе који значајно утичу на процес, нарочито фактори који се уопштено могу назвати логистика одржавања. Посебно се истиче занемаривање утицаја људских капацитета и обезбеђење резервних делова и материјала. Аутор даље износи, на основу широке анализе објављених публикација, да без обзира на тренд раста примене симулација (посебно "discrete event simulation-DES") у области оптимизације одржавања, да досадашњи радови не обухватају довољно реалне проблеме, да су предложени модели одржавања сувише једноставни и да се односе на једну врсту опреме. Такође, аутор наводи да у досадашњим истраживањима доминирају оптимизације према једном критеријуму у односу на вишекритеријумске. Веома мало пажње се посвећује и упоређивању перформанси примењених оптимизационих алгоритама. Другим речима, мало пажње се посвећује оптимизацији система одржавања. За превазилажење наведеног проблема, аутор је навео кораке који као универзални обезбеђују примену оптимизација путем симулација у одржавању и то: 1) идентификација тренутне праксе и проблема у оптимизацији путем симулација, 2) дефинисање варијабли, ограничења и циљева оптимизације, 3) дефинисање захтева према концепту оптимизације путем симулација, 4) развој оквира за оптимизацију путем симулација (циљ оптимизације, проблем оптимизације, алгоритам оптимизације, параметри симулације, интерпретација резултата), 5) моделовање комплексног система одржавања укључујући и стратегију одржавања путем DES и 6) валидација предложеног оквира путем студије случаја у пракси.

У раду (Петровић, 2013.) *Вишекритеријумска оптимизација процеса одржавања техничких система применом вероватносних метода и вештачке интелигенције* је приказан логистички приступ концепту управљања одржавањем техничких система према критеријумима максималне расположивости и минималних трошкова животног циклуса. Искорак у односу на до тада развијене моделе вишекритеријумске оптимизације је што је успешно превазиђен проблем нестационарности система, у овом случају заменом континуалне функције интензитета отказа степенастом функцијом (слика 10), што је у ствари реалнија слика стварног понашања техничког система.



Слика 10. Промена функције интензитета отказа, (Petrović, 2013.)

За моделовање деградације система и превентивног и корективног одржавања употребљени су Марковљеви модели. Аутор је такође извршио поређење више оптимизационих алгоритама.

У раду (Милошевић, 2015.) *Модели обезбеђења поузданости сложених постројења у термоелектранама* аутор износи став да „Методолошки посматрано, развој модела за обезбеђење поузданости сложених постројења треба да буде конципиран на такав начин да се понуђена општа решења могу применити на било које сличне техничке системе али уз

уважавање специфичности које се односе на конкретна постројења путем одабира правих вредности параметара модела. Модели су резултат различитих метода и полазних претпоставки које се користе емпиријским подацима ради избора параметара коначних решења која обезбеђују највећу поузданост и доношење релевантних одлука о акцијама одржавања.“ Симулације механизма отказивања су остварене путем псеудо случајних, тј. применом *Monte Carlo* методе. Рад је значајан са аспекта примене класичне теорије поузданости на унапређење система одржавања путем контроле поузданости.

(Вујановић, 2013.) у раду *Прилог развоју управљања процесом одржавања возних паркова*, истиче важност концепта *Одржавање засновано на процесу*. За ефикасно управљање процесом одржавања користи се вредновање релевантних показатеља чије се вредности периодично прорачунавају и упоређују са дефинисаним граничним вредностима. Према резултатима упоређивања спроводе се одређене управљачке одлуке. Комбинованом употребом DEMATEL и ANP метода рачунају су тежински фактори одабраних показатеља управљања. Уколико су остварене вредности показатеља боље или једнаке граничним вредностима, утврђују се нове побољшане граничне вредности за показатеље управљања. Уколико је остварена вредност једног од показатеља лошија од његове граничне вредности, примењују се одређене мере побољшања на оперативном, тактичком и стратешком нивоу управљања.

(Радоњић, 2015.) у раду *Детерминисање модела технологије одржавања радио-релејних уређаја са аспекта унапређења технолошких програма* демонстрира свеобухватни приступ за дефинисање политике, организације и технологије одржавања конкретног техничког система. Као алгоритам, модел је универзалан и савремен. Посебна вредност рада је приказана комбинована употреба метода вишекритеријумске анализе за разматрање и усвајање најбоље од више варијанти одржавања и то: PROMETHEE II и метода аналитичких хијерархијских процеса (АНП). Такође, важан део истраживања је модел унапређења уређаја уградњом савременијих подсистема, где је извршена свеобухватна анализа поузданости компоненти и целог система, чиме је доказана вредност унапређења.

У раду (Радовановић, 2011.) *Методологије одржавања са аспекта њихове примене у индустрији*, аутор у делу теоријских истраживања даје детаљан преглед теорије и праксе одржавања у индустрији. Широком и свеобухватним истраживањем сагледана је пракса одржавања у више предузећа у Србији. Пун значај се придаје примени ИТ и е-одржавању у најопштијем смислу, а посебно у делу дијагностике и надзора параметара стања опреме, па аутор уводи нов концепт одржавања *Дијагностичко одржавање*.

На сликама 11 и 12 је дат графички преглед коришћених референци по години објављивања и према областима истраживања.



Слика 11. Преглед броја референци по години објављивања



*Слика 12. Преглед броја референци по областима*

У табелама 1 до 3 је дат преглед литературе која представља почетни скуп литературе коришћен у овој дисертацији.

Табела 1. Књиге, зборници радова

	наслов	издавач	референца	година
теорија одржавања	Maintenance fundamentals 2nd edition	Elsevier	ISBN: 0-7506-7798-8	2004
	Engineering maintenance: a modern approach	CRC Press	ISBN 1-58716-142-7	2002
	Total productive maintenance	McGraw-Hill	ISBN 0-07-146733-5	2006
	Maintenance engineering handbook	McGraw-Hill	ISBN 0-07-154646-4	2008
	Maintenance and Reliability Best Practices	Industrial Press	ISBN 978-0-8311-3434-1	2013
	Reliability Engineering	Springer	ISBN 978-3-642-39534-5	2014
	DESIGNING HIGH AVAILABILITY SYSTEMS	Wiley	ISBN 9781118551127	2014
	Complex System maintenance Handbook, Maintenance: An Evolutionary Perspective	Springer	ISBN 978-1-84800-010-0	2008
	RELIABILITY, MAINTAINABILITY AND RISK	Elsevier	ISBN 978-0-08-096902-2	2011
	Održavanje tehničkih sistema	iipp, Beograd	ISBN 86-84231-13-9	2006
	Menadžment i inženjering u održavanju	iipp, Beograd	ISBN 86-84231-03-01	2004
	E-maintenance, chapter: Maintenance Today and Future Trends	Springer	ISBN 978-1-84996-204-9	2010
	инжењерство	Diagnostics of mobile work machines	JULKAISIJA – UTGIVARE	ISBN 951–38–6799–4
Intelligent fault diagnosis for engineering systems		John Wiley & Sons	ISBN 978-0-0471-72999-0	2006
An Introduction to Knowledge Engineering		Springer	ISBN 978-1-84628-475-5	2007
Логистика, контрола процеса	Lean Six Sigma logistics	J. Ross Publishing	ISBN 1-932159-36-3	2005
	Comprehensive Logistics	Springer	ISBN 978-3-642-24366-0	2012
	Business Analysis	John Wiley & Sons	ISBN 978-1-118-07600-2	2012



Зборници Научних скупова и конференција	Quantitative Methods in Supply Chain Management	Springer	ISBN 978-0-85729-765-5	2012
	Introduction to engineering statistics and six sigma: statistical quality control and design of experiments and systems	Springer	ISBN 978-1-85233-955-5	2006
	Statistical Process Control	Butterworth-Heinemann	ISBN 0 7506 5766 9	2003
	Održavanje mašina i opreme OMO (Srbija, region)			
	Euromaintenance (EU)			
	Maintenance Performance Measurement and Management MPMM (EU)			
	Organizacija i tehnologija održavanja OTO (Hrvatska)			
	Održavanje (Zenica, BiH)			
	OTEH Srbija			
	DQM Srbija			
SYMOPIS (Srbija)				
MECHANICAL ENGINEERING IN XXI CENTURY (Srbija, Niš)				

Табела 2. Докторске дисертације

	наслов	место	година	значај
1	Прилог развоју управљања процесом одржавања возних паркова	Саобраћајни факултет у Београду	2013.	Модел унапређења процеса одржавања са провером на 16 возила
2	Интегрисани модел управљања просторно дислоцираним предузећима	Машински факултет у Београду	2016.	Управљање просторно разуђеним системом
3	Планирање процеса имплементације ERP-а у производним предузећима	Машински факултет у Београду	2016.	Имплементација ERP, Risk Based maintenance, „не постоји јасно упутство за мерење KPI“
4	Примена T <sup>2</sup> контролних дијаграма и скривених Марковљевих модела на предиктивно одржавање техничких система	Електротехнички факултет у Београду	2016.	Иновативна техника предиктивног одржавања, Статистичка контрола процеса, контролни дијаграми, на моделу система за млевење угља у ТЕ Костолац
5	Методе одржавања и њихов утицај на поузданост сложених машина на површинским коповима	Технички факултет „Михајло Пупин“ Зрењанин	2016.	Усавршени програм одржавања машина у РТБ Бор, одржавање на бази стања
6	Модели дијагностике стања и њихов утицај на поузданост моторних возила	Технички факултет „Михајло Пупин“ Зрењанин	2015.	Модел дијагностике стања, техничка дијагностика, на возном парку 6 предузећа, на примеру 2 возила; универзални модел
7	Утицај појава механичких осцилација на сигурност функционисања склопова у систему преноса снаге текстилних машина	Технички факултет „Михајло Пупин“ Зрењанин	2006.	Функција система, одређивање поузданости, превентивно одржавање, на моделу склопова текстилних машина (пределица)
8	Динамичко моделовање и симулација превентивних експлоатационих активности у анализи поузданости електричне опреме	Факултет техничких наука у Чачку	2016.	Симулације и моделовање прорачуна одређивања поузданости електричне опреме и превентивно одржавање

9	Детерминисање модела технологије одржавања радио релејних уређаја са аспекта унапређења технолошких програма	Факултет техничких наука у Чачку	2015.	Одређивање модела одржавања савремених војних комуникационих система, повећање ефикасности одржавања
10	On Improvement Of Maintenance Function	School of Industrial Engineering and Management, Royal Institute of Technology Sweden	2015.	Вредновање успешности система одржавања, методологије побољшања
11	Knowledge based architecture for integrated condition based maintenance of engineering systems	Georgia Institute of Technology	2007.	Методе примене одржавања базираног на стању опреме
12	Модели пројектовања поузданости машина и њихов утицај на процес експлоатације	Технички факултет „Михајло Пупин“ Зрењанин	2012.	Пројектовање поузданости машина, САД алати, виртуално моделовање
13	Методологија одржавања са аспекта њихове примене у индустрији	Технички факултет „Михајло Пупин“ Зрењанин	2011.	Анализа методологија одржавања, увођење методологије Дијагностичко одржавање, дугорочно праћење стања и перформанси успеха
14	Моделирање процеса одржавања техничких система на концепту тоталног продуктивног одржавања	Машински факултет у Нишу	2005.	Тотално продуктивно одржавање, модел на предузећу Ј.К.П. "Градска топлана"-Ниш

Табела 3. Научно стручни радови

	naziv	časopis	godina
1	Design Support for Maintenance Tasks using TRIZ	Procedia CIRP 39 ( 2016 ) 67 – 72	2016.
2	A proactive decision making framework for condition-based maintenance	Industrial Management & Data Systems, Vol. 115 Iss 7, 2015	2015.
3	Maintenance policy optimization-literature review and directions	Int J Adv Manuf Technol (2015) 76	2015.
4	What is Middle Maintenance Policy?	QREI,DOI: 10.1002/qre.1944, 2015	2015.
5	Opportunistic maintenance (OM) as a new advancement in maintenance approaches	JQME Vol. 20, No. 2, 2014	2014.
6	Annual maintenance budget estimation for a plant system	JQME Vol. 20, No. 2, 2014	2014.
7	Application of data mining in a maintenance system for failure prediction	Safety, Reliability and Risk Analysis Taylor & Francis, 2014, ISBN 978-1-138-00123-7	2014.
8	The impact of quality management orientation on maintenance performance	IJPR, Vol. 52, No. 6,2014	2014.
9	Maintenance: From Total Productive Maintenance to World Class Maintenance	IJSRR 2013, 2(1)	2013.
10	Optimal joint maintenance and operation policies to maximize overall systems effectiveness	IJPR, Vol. 51, No. 5, 2013	2013.
11	Condition based maintenance in the context of opportunistic maintenance	IJPR Vol. 50, No. 23, 2012	2012.

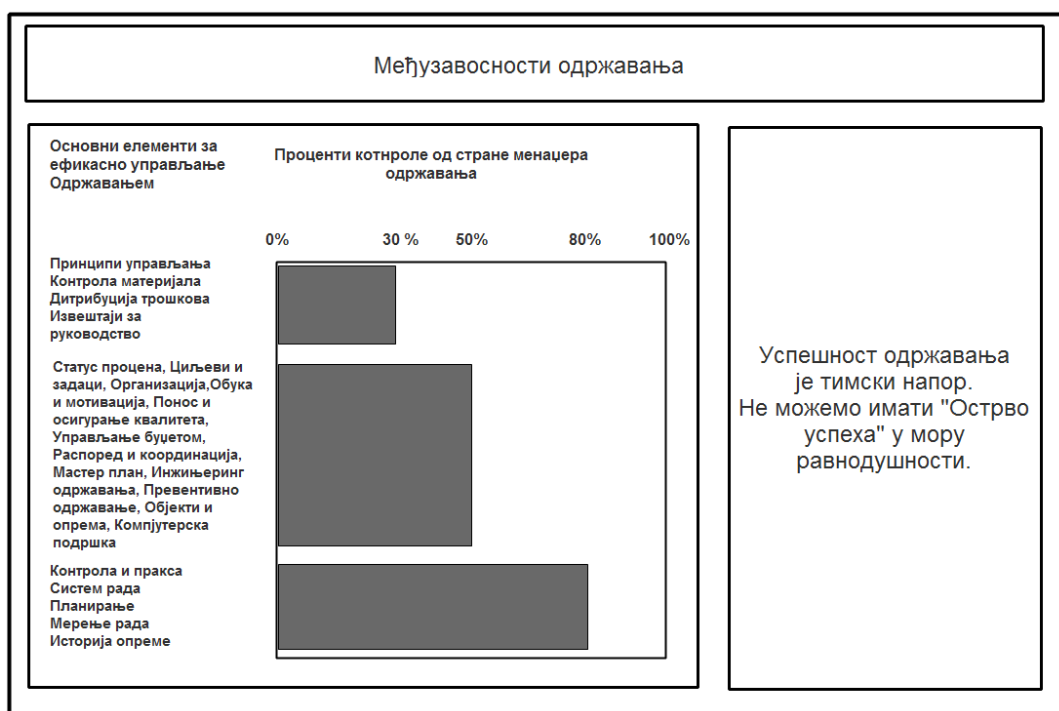
12	Diagnosing Maintenance System Problems: Theory and a Case Study	QREI, DOI: 10.1002/qre.1459, 2012	2012.
13	TOWARDS A MAINTENANCE SEMANTIC ARCHITECTURE	"World Congress of Engineering Asset Management WCEAM'09., Athènes : Greece (2009)"	2009.
14	Maintenance management: literature review and directions	JQME Vol. 12 No. 3, 2006	2006.
15	THE EVOLUTION OF MAINTENANCE PRACTICES	www.lifetime-reliability.com, pristupljeno 2014	2014.
16	Performance measurement and management for maintenance: a literature review	JQME Vol 21, Iss 1	2015.
17	Exploring the performance effects of performance measurement system use in maintenance process	JQME Vol 20, Iss 4	2014.
18	Applications of Simulation in Maintenance Research	World Journal of Modelling and Simulation Vol. 9 (2013) No.1	2013.
19	A novel framework for simulation based optimization of maintenance systems	Int simul model 15 (2016)	2016.

### 3. Развој одржавања

#### 3.1. Одржавање: инжењерство и управљање

Као и код било које дисциплине изграђене на темељима науке и технологије, проучавање одржавања почиње са дефиницијом одржавања. Одржавање није само превентивно одржавање. Одржавање није подмазивање. Нити је одржавање једноставно напор да се поправи неисправан део неке машине, мада је то често ако не и доминантна активност одржавања. У много позитивнијем смислу, одржавање је наука, јер се извршење одржавања ослања, пре или касније, на већину или на све науке. То је уметност, јер наизглед идентични проблеми у одржавању редовно захтевају и добијају различит приступ и због тога што неки менаџери, супервизори и техничари за одржавање приказују већу способност за то него што су други приказали или остварили. То је и филозофија јер је дисциплина која се може применити интензивно, скромније, или уопште не, у зависности од широког спектра варијабли (CIBSE Guide, 2008.; Mobley et. al., 2008., Pintelon and Parodi-Herz, 2008.).

Због интегрисане природе пословања и управљања постројењем, организацијом, фабриком и сл., одржавање по правилу не може да контролише своју судбину у целости. Уместо тога, одржавање зависи од осталих функција постројења или организације и примењене културе пословања (слика 13).



Слика 13. Окружење система одржавања (Mobley et. al., 2008.)

Постоји скоро бесконачан број организационих структура у употреби. Организацију чине људи са задатком да заједно раде. Добра организација је ефективна када људи раде конструктивно и заједно са заједничким циљем. Организација одржавања мора бити успостављена са циљем да задовољи захтеве основне организације. Делотворна организација одржавања мора бити организована да обезбеди различите нивое одржавања према врсти рада. Као минимум, организација одржавања мора бити конфигурисана тако да обезбеди ефикасну, квалитетну подршку за три велике радне класификације или врсте одржавања: хитне поправке, превентивно одржавање и периодични ремонт.

Тешко је замислити време када опрема није одржавана (Borris, 2006.). Без одговарајућег знања, обуке и опреме, одржавање по правилу не функционише добро. У многим организацијама одржавање је слабо управљано и препуштено је извршиоцима одржавања да бирају које послове желе да реализују базирано на личном искуству.

Одржавање није најгламурознији аспект инжењерства и много тога у одржавању је усмерено на спречавање отказа него на стварање неке нове, опипљиве вредности. Одржавање, међутим, је одавно постала све више аналитички и нумерички заснована дисциплина, укључујући и бављење вероватноћом отказа, управљањем ресурсима, утврђивањем редундантности у оквиру система и минимизирањем ризика сваке врсте (Mobleу et. Al., 2008.). Управљање одржавањем може садржати више од контроле активности везаних за сваку поједину врсту опреме и може се разматрати у ширем смислу под аспектима „технички“ и „контролни“. Технички аспект укључује одређивање шта, како и кад се одржава; идентификовање проблема и њихових узрока; праћење ефеката; припрему и анализу записа о одржавању; осигурање да изабрана техника одржавања постиже дефинисане циљеве. Контролни аспект је усмерен постизању циља одржавања уз најмање трошкове и обично обухвата: управљање ресурсима одржавања (људски ресурси, опрема, делови); логистику одржавања; дефинисање приоритета; координисање активности. Овај аспект може имати и шире значење што обухвата: дефинисање буџета, праћење трошкова, прикупљање података у циљу одлучивања.

Одржавање се може поделити у две опште, широке категорије: непланско и планско (слика 14) или се подела врши према врсти акције, политике и концепције (табела 4).



Слика 14. Категорије одржавања

Табела 4. Подела одржавања према типу акције, политике и концепције (Taher et al., 2014.)

акције	корективне/ реактивне	предиктивне, превентивне и проактивне	
политике	Одржавање по отказу (Failure based maintenance-FBM)	Одржавање елиминацијом отказа путем редирајна опреме (Design-out maintenance DOM)	Одржавање базирано на времену (Time based maintenance-TMB)
		Одржавање базирано на стању (Condition based maintenance - CBM)	Опортуно одржавање (Opportunity based maintenance - OBM)
концепти	Одржавање оријентисано на поузданост (Reliability centered maintenance-RCM) Тотално продуктивно одржавање (Total productive maintenance-TPM) Одржавање према ризику (Risk based maintenance-RBM) Одржавање применом информационих технологија за управљање (Computerized maintenance management system-CMMS) Одржавање према цени животног века (Life Cycle costing-LCC)		

У непланском одржавању не постоји план који се следи и активности се врше као реакција на насталу ситуацију, а често постоји продужено чекање на поправку (веће од технолошког времена оправке), фрустрација корисника и губитак контроле у основном процесу. Непланско одржавање сугерише и да корисник опреме нема одговорност због насталог отказа и неминовне последице отказа. Постоји ризик по оператора, опрему, околину.

Планско одржавање је организовано, контролисано и следи препознатљиве процедуре. Може имати различите форме као што су:

- *Превентивно одржавање*: одржавање које се спроводи у дефинисаним интервалима или другим прописаним критеријумима са циљем да се редукује вероватноћа отказа;
- *„Corrective (or ‘reactive’) Maintenance“*: Корективно или реактивно одржавање-акције одржавања се спроводе након појаве отказа са циљем да се опрема или постројење доведе у стање да поново врши своју функцију;
- *„Immediate Maintenance“*: Непосредно одржавање - неопходно због непредвиђеног квара или оштећења и потребе да се одмах успостави радни режим опреме;
- *„Scheduled Maintenance“*: Превентивно одржавање по разрађеном временском плану, броју радних операција или времену рада опреме;
- *„Opportunity Maintenance“*: Опортуно одржавање - активности одржавања се спроводе када су могуће и унутар лимита одређених од стране корисника;
- *Одржавање према стању опреме („Condition-based Maintenance“)*: акције одржавања се спроводе према трендовима стања опреме на основу периодичног или континуалног праћења стања опреме као што су опште карактеристике опреме или неки специфичан параметар опреме (нпр. вибрације лежајева и температура мотора);
- *Одржавање усмерено на поузданост („Reliability-centered Maintenance“)* базира се на оперативним захтевима опреме у односу на информације о поузданости;

- *Business-focused ('Risk-based') Maintenance*: приоритизација одржавања према кључним пословним активностима узимајући у обзир пословне ризике, перформансе инсталиране опреме, са циљем да се оптимизују укупне пословне активности;
- *Ради до отказа („Run to Failure“)* - последице отказа су такве да постројење или опрема могу радити све до појаве отказа, тј. нема озбиљних губитака, не постоје ризици по људе и опрему.

Који год општи план одржавања да се примени, он се састоји од комбинације наведених метода. Која ће се метода применити зависи од великог броја фактора. Одлука треба да се заснива на процени и жељеним циљевима. Затим се морају размотрити расположиви ресурси у смислу рада, материјала и објеката. Све наведено би требало да обезбеди рационалну основу за израду програма планског одржавања.

Политика одржавања за неко постројење или опрему је јединствена, али се често може генерално примењивати политика према сличности опреме. Нека од наведених питања могу да помогну у формулацији политике одржавања:

1. Које су последице квара?
2. Како постројење или опрема отказују?
3. Каква је вероватноћа отказа?
4. Постоје ли резервни системи у приправности?
5. Какав ниво употребе опреме је предвиђен?
6. Који тип одржавања је предвиђен за опрему?
7. Који ниво техничке експертизе ће бити доступан и како ће бити организована?
8. Да ли ће резервни делови бити доступни на лицу места?
9. Да ли се опрема купује или изнајмљује?
10. Да ли су прописани стандарди за одржавање?
11. Да ли је обезбеђена сва техничка документација?
12. Који финансијски ресурси ће бити расположиви одржавању?

Следећа листа набраја чиниоце који се морају узети у обзир код успостављања система планског одржавања:

1. Регистар опреме (the Asset Register);
2. Политика одржавања прописана за сваку врсту опреме;
3. Посао који треба обавити за сваку врсту опреме (одржавање);
4. Потребни људски ресурси за одржавање;
5. Потребни материјал и делови за одржавање;
6. Када и како често радови одржавања треба да се врше (the Maintenance Program)?
7. Како ће се управљати системом одржавања?
8. Како ће резултати бити записани, коришћени и анализирани?

На оперативном нивоу, стратегија одржавања подразумева побољшање економичности основног процеса организације и ефикасности организације одржавања. Ово може захтевати промену културе у коришћењу традиционалног приступа као што су активности одржавања на основу времена до одржавања који је повезан са основним стањима опреме и фокусом на пословне циљеве организације и могућим последицама ако дође до отказа.

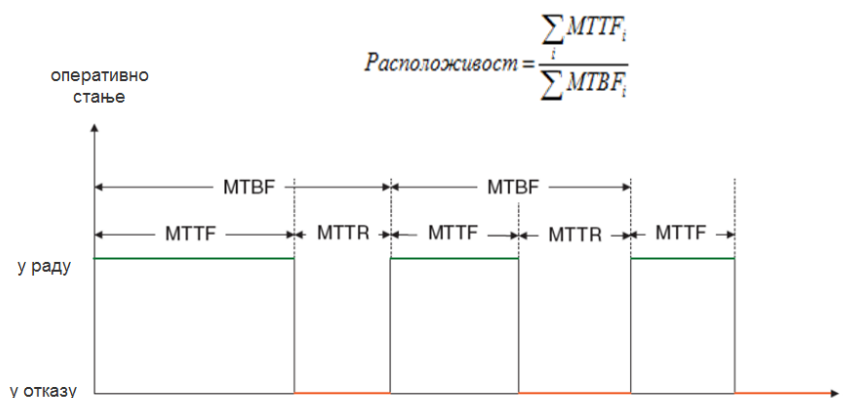
Технологије надзора стања и експертски системи помажу оваквом приступу. Режим одржавања захтева комбинацију горе поменутих приступа (метода) у одржавању, а добра комбинације представља приближавање оптималном приступу.

Контролисање одржавања је непрекидна активност. То је процес сталног праћења система одржавања и његових перформанси у односу на унапред постављене циљеве, и извештавање о перформансама онима који су одговорни за управљање функцијама. Ако перформансе не остварују постављене циљеве, потребне су промене режима одржавања са циљем да исправе сва одступања. Систем управљања квалитетом за функцију одржавања може дефинисати улоге и одговорности и утврдити процедуре и формате извештавања, чиме помаже конзистентну и ефективну контролу.

Контролисање одржавања обично захтева два нивоа провере:

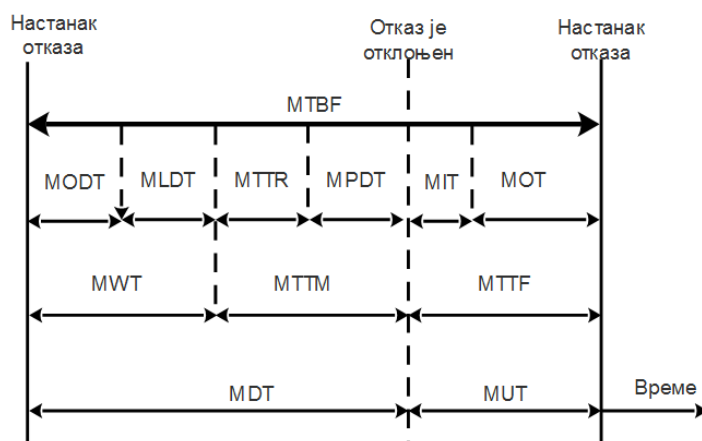
1. Проверу система чиме се контролишу формалне процедуре које чине режим одржавања (процедуре планирања, управљачке процедуре, процедуре чувања записа) са циљем задовољења циљева организације;
2. Проверу перформанси одржавања са циљем оцене перформанси и њихово поређење са жељеним вредностима (цена, време опреме ван функције, време реакције, итд.).

У процени сваке стратегије одржавања потребно је имати податке о интензитету отказа и времену трајања оправки. Ако добри и конзистентни подаци нису доступни за критичне системе током значајног периода, онда је планирано превентивно одржавање избор политике одржавања. Подаци треба да буду у форми (MTTR, Mean Time to Repair, средње време поправке) и (MTBF, Mean Time Between Failure, средње време између отказа). Такви подаци се користе да се генерише податак о расположивости опреме. Сакупљање и надзор података о MTTR и MTBF су део добре организације одржавања. Ипак, ови подаци често недостају, због непостојања одлучности да се прикупљају или незнања извршиоца одржавања како се то ради. Ефективна контрола распона периода у превентивном планском одржавању зато није могућа (када не постоје ови подаци). Графичка интерпретација вредности MTTR и MTBF на временској скали је дата на сликама 15 и 16 (значење ознака на слици 16: MTBF средње време између отказа, MODT средње оперативно време, MLDT средње време логистичког застоја, MTTR средње време поправке, MPDT средње време застоја због превентивног одржавања, MIT средње време празног хода, MOT средње оперативно време, MWT средње време чекања, MTTM средње време одржавања, MTTF средње време до отказа, MDT средње време застоја, MUT средње време у раду.



Слика 15. Однос MTTR и MTBF, преузето из (Taylor and Ranganathan, 2014.)





Слика 16. Дефиниција MTBF

Постројења и опрема захтевају одржавање у свом животном веку (Arts and Basten, 2016.). Прелазак у стање „у отказу“, односно искључивање, врши се ради одржавања према плану одржавања или у случају отказа. С обзиром да се сложени технички систем састоји од великог броја компоненти и подсистема који захтевају различите политике одржавања, важно је применити координисани програм одржавања који узима у обзир све компоненте и подсистеме према критеријумима као што су нпр. минимална цена одржавања и минимално време у застоју. Политике одржавања појединачних компоненти и подсистема развијају се декадама уназад и постижу скоро оптималне критеријуме. Проблем је што се такве независне политике могу тешко применити на један сложен технички систем, односно веома је тешко применити их координисано (интервали, методе снимања параметара и дијагностике, проблем приступачности компонентама и др.). Примера ради, један од проблема је како ускладити политику периодичног (планског) одржавања и одржавања према стању, где се при том јављају и случајни откази у већој или мањој мери.

Капитална постројења и опрема, као што су бродови, производна постројења, енергетска постројења, сложена медицинска опрема, системи оружја и друго, неизоставно захтевају одржавање. Њихов животни век је дуг. Често, и поред појаве бољих и савременијих система, такви стари системи остају у употреби. Њихова замена није лака и једноставна из економских, политичких, људских (степен образовања) и других разлога. Капитална постројења и опрема, у овом контексту, подразумевају техничке системе који су веома важни за примарне процесе корисника, па њихов отказ или стање „у отказу“ испољавају значајан негативни ефекат. Из тог разлога, власници-корисници предузимају превентивно одржавање у циљу спречавања појава отказа и спречавања непланских искључивања (тренутно искључивање - прекид рада или искључивање из употребе до предузимања превентивне акције) због одржавања. Циљ наведених превентивних акција одржавања је минимизирати отказе и корективно одржавање. Таква политика има предности јер омогућава искључивање система када то највише одговара кориснику, према разним критеријумима. Значајно је и што могу да се избегну негативне појаве које једна неисправна компонента система може да изазове на другим потпуно исправним, а што захтева додатне ресурсе за довођење система у исправно стање. На крају, превентивно одржавање има предности над корективним, зато што акције одржавања могу да се групишу у програме одржавања.

Историјски гледано, периодично одржавање према одређеном броју часова рада, календарских дана, радних циклуса или према неком другом критеријуму употребе који се може избројати - измерити је преовладавајући начин дефинисања периода или интервала одржавања. Такви модели развијају се још од 1960. године. Одржавање према стању постаје популарно због могућности лаког и релативно јефтиног начина мерења - утврђивања стања

компоненти техничког система захваљујући модерној технологији сензора. Примери могуће употребе су мерење концентрације металних честица у уљу, амплитуде вибрација, температурна стања компоненти и др. Зависно од компоненте и услова или стања које се „снимају“, сензори се инсталишу и подешавају да „снимају“ стање у континуитету или периодично. Надзор („снимање“) стања компоненти није увек могућ (цена, технологија), па у пракси остаје потреба и за планским превентивним (периодичним) одржавањем. Без обзира на све, корективне акције такође не могу бити искључене. То значи да су у пракси потребна најмање три наведена приступа.

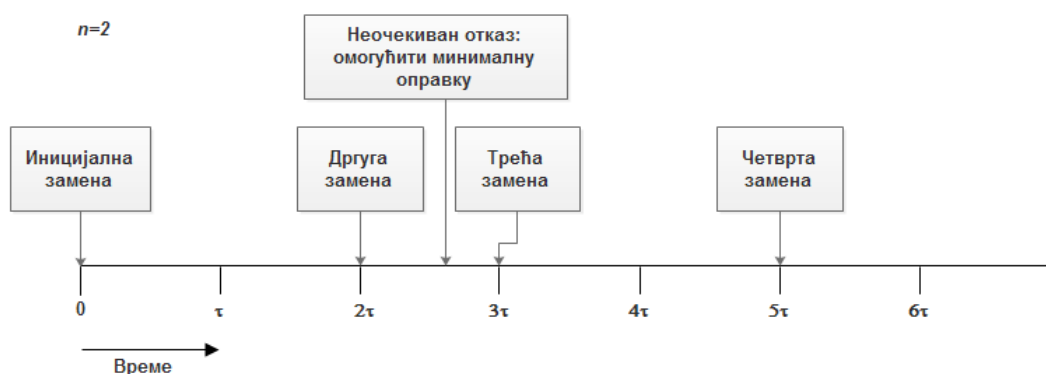
У процесу одржавања, технички систем мора бити искључен или привремено „избачен“ из употребе. Ако би се применила оптимална политика одржавања за сваку поједину компоненту, то би захтевало сувише често или често искључивање система ради предузимања акција периодичног (планског) одржавања. Осим што би се такав приступ одразио на цену одржавања, планирање таквог програма би било захтевно и компликовано што се односи и на непосредну организацију одржавања и технологију одржавања. Може се само замислити негативан утицај ако би било потребно сувише често прекидати рад неког производног или енергетског постројења или ако би неко средство захтевало често коришћење инфраструктуре за одржавање (радионице) - проблем су и цена транспорта, манипулације, припреме и организације радног места и алата, вођење документације и др. Зато се у највећем броју случаја програм одржавања организује и реализује за цео технички систем, водећи рачуна о специфичностима система и критеријумима ризика, могућим последицама отказа и захтевима за расположивошћу. Многи аутори наводе да су основни принципи при дефинисању програма одржавања: минимизација времена искључивања („у отказу“) због планског и непланског (откази) одржавања и цена одржавања. Дакле, циљ таквог програма одржавања је да у времену планског „искључивања“ буду предузете све потребне акције одржавања, инспекције и/или замене компоненти техничког система. У том скупу акција одржавања треба предузети све могуће мере како би се до следеће акције планског одржавања минимизовао број отказа и потреба за корективним акцијама одржавања. Ретко се ипак говори да овакав систем чак и да је екстремно ефикасан представља скупо решење и да има оправдање само код техничких система где отказ изазива хаварију у смислу губитка живота, инцидента или акцидента, односно директно угрожава здравље и живот људи или наноси штету природи.

Одређивање временског интервала (периода)  $t$ , за оптимални програм одржавања техничког система који се састоји од више компоненти и које захтевају различите политике одржавања (пример: периодично-планско одржавање и одржавање према стању) је проблем вишекритеријумске оптимизације.

Један од начина је да се анализира технички систем који се састоји од две компоненте (две различите политике одржавања), а да се онда проблем и решење генерализују на комплетан (сложен) систем. За обе компоненте се тражи одређивање временског интервала (периода)  $t$  када се систем подвргава планском (периодичном) одржавању. Због утицаја односно неминовне појаве отказа који захтевају непланско (корективно) одржавање постоје два приступа: први који подразумева да се у случају отказа предузму све потребне акције одржавања и систем комплетно оправи на нивоу компоненте и система и други који подразумева да се предузму само минималне акције одржавања (поправке). Други приступ аутори сматрају реалним, јер комплетна оправка (први приступ) захтева дуго време за оправку и то додатно у односу на време планског одржавања и у тренутку између интервала планског одржавања. Ово је посебно важно и реално за војне техничке системе у класичним војним мисијама (кризе, ратови, интензивно ангажовање опреме, када ресурси за одржавање нису близу опреме или чак нису уопште расположиви) или када, на пример, брод није у луци. Постоје и многобројни други примери. У првом приступу, под минималном оправком се подразумева да се неисправна компонента доведе у стање (*failure rate*) какво је било пре појаве отказа, дакле не да се доведе у стање „као ново“. У првом наредном термину

планског одржавања она ће бити замењена или поправљена да буде у стању „као ново“. Зависно од интензитета отказа, генерално, неисправне компоненте се мењају у тренутку  $nt$ ,  $n=1,2,3,\dots$  (слика 17).

Циљ планског одржавања је откривање наступајућег отказа и замена (оправка) компоненте. Како се реални технички систем састоји од више различитих компоненти, политика одржавања система (превентивно, корективно, СВМ) се не заснива и не дефинише искључиво према појединим компонентама, већ се врши груписање више различитих компоненти ради одржавања истовремено. Концепције одржавања решавају проблем применом правила одлучивања.



Слика 17. Време замене дела

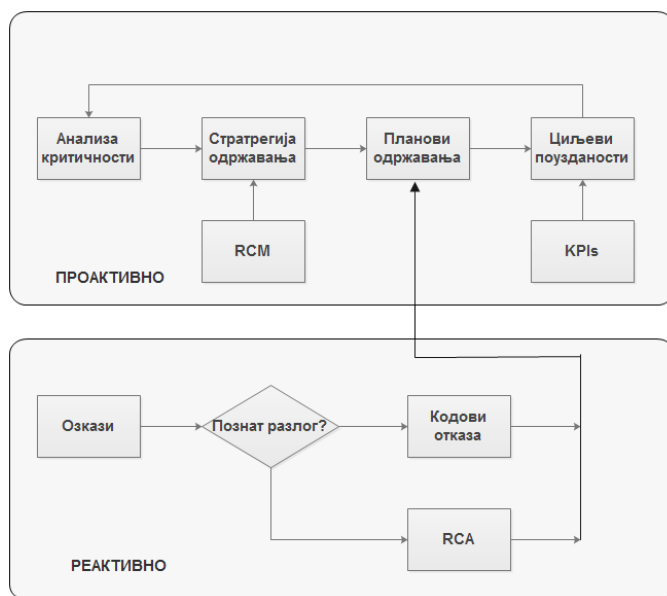
Разлог груписања више различитих компоненти ради одржавања је њихова зависност у систему. Постоје следеће зависности: економске (истовремено одржавање две различите компоненте је јефтиније од збира појединачних одржавања), структурне (за одржавање неке компоненте потребно је демонтирати неке друге и сл.) и случајне (деградација једне компоненте је повезана са деградацијом неке друге, односно стање једне компоненте има утицај на неку другу). Приступ са минималним одржавањем између два интервала планског одржавања има два недостатка: први, није познато ни гарантовано да ли ће „минимално“ поправљена компонента издржати – исправно функционисати до најмање следећег планираног (тренутка) одржавања и други, да ли је развијена технологија одржавања и обезбеђена логистика одржавања, да се у периоду (тренутку) планског одржавања оптимално гледајући замене/поправе све компоненте на граници отказа. И нека ограничења као што су реално окружење система одржавања (фактори), проблем синхронизације акција одржавања за скуп техничких система (више система), географски распоред опреме, планирање и организација одржавања појачавају овај проблем.

### 3.2. Одржавање: тренутно стање и трендови

Каже се да је се у протеклих 40 година индустријско одржавање променило, можда више него било која управљачка (*Management*) дисциплина (Starr et al., 2010.). Комплетно техничко и методолошко поље се мењало током времена. Одавно одржавање није ограничено на оправку опреме која је отказала, већ је окренуто и ка одрживом развоју друштва, безбедности запослених и опреме, заштити околине, енергетској ефикасности и финансијским аспектима пословања.

Усталило се мишљење, чак и фраза, да одржавање није једноставни потрошач ресурса компаније, већ је без сумње развијена свест да је оно критичан фактор конкурентности, успешности и опстанка (Роџер et al., 2013.). Многи аутори наводе *John Moubray*-а, аутора књиге *Reliability-centered Maintenance (1997.)*, као родоначелника модерног приступа одржавању који у поменутом делу описује еволутивни развој одржавања у последњих 60-

так година. Међутим од 1997. године до данас огроман је напредак у технологијама, организацијама, окружењу и ИТ технологијама. У најкраћем, дело описује одржавање до Другог светског рата, када је опрема била једноставна и робусна, те се брига о њој сводила на редовно чишћење и подмазивање. Други светски рат означава настанак друге генерације одржавања. Осим што машине и опрема постају сложенији, нараста њихова разноврсност, а карактеристична је и све већа механизација рада. Поузданост машина и опреме постаје врло важна, а руководство компанија је заинтересованије за избегавање престанка рада опреме због отказа. Таква посвећеност је довела до закључка и потребе да се на отказе делује превентивно, што је довело до развоја концепта превентивног одржавања. У 1960.-тим годинама је редовна пракса да се опрема и машине периодично искључују ради одржавања у одређеним временским интервалима, а једна важна последица тога је енормно нарастање трошкова одржавања. То је проузроковало настојања да се одржавање „стави под контролу“, па је све до данас ефикасно и ефективно управљање одржавањем неизбежан услов успешне организације. Још један важан проблем се појавио са напретком и развојем технологија и нових производа. То је трка у капиталним инвестицијама и замени опреме, што се карактерише веома високом ценом. Зато остаје потреба да се постојећа опрема максимално искористи у дизајнираном животном веку. Према наведеном аутору, трећа генерација одржавања настаје 1970.-тих. Карактерише се настојањима да се минимизује планско време искључивања опреме и машина због одржавања, а непланско искључивање се сматра неуспехом. Концепт „*Just in Time*“ у производњи којим се настоји да се залихе сировина сведу на минимум је врло осетљив на непланска искључења опреме. Аутоматизација опреме и система повећава значај поузданости, откази нису пожељни у широком пољу индустрије и услуга (производња енергије, обрада података, телекомуникације, ваздушни саобраћај и др.). У сусрет очекивањима повећане поузданости опреме развијале су се и нове технике. На пример: *Reliability-centered Maintenance (RCM)*, *Root Cause Analysis (RCA)*, *FMEA* и др. ИТ развој је омогућио иновације у одржавању, а најважније су предиктивно одржавање, дијагностика на даљину, експертски системи одржавања и др. Осим изазова да се науче и прихвате нове технологије, технике и методологије у одржавању, један од највећих изазова за одржавање је како оно треба да постигне и допринесе циљевима шире организације којој припада. Потребно је имати јасну слику односа цена/бенефит код сваке од алтернатива у одржавању. Тако је покрет од одржавања по отказу дошао до проактивног одржавања - превенције отказа на првом месту или у најмању руку минимизације последице отказа.



Слика 18. „Perfect world“ у одржавању

Аутор Jose Baptista (Starr et al., 2010.) сматра да је одговор у тзв. „*Perfect world*“ у одржавању (слика 18). То је стање када се тим за одржавање највише времена бави проактивно, односно нема ситуација хитног реаговања у одржавању, нема хаваријских кварова и сл., нема прекорачења буџета за одржавање, стање опреме није изговор остатку организације за евентуални неуспех, запослени који извршавају задатке одржавања нису "стресирани". До њега се долази тако што се снимају откази и додељује им се знак (код) ради даље анализе. Ако се не знају узроци отказа, посебном анализом се морају установити (нпр. *Root Cause Analysis (RCA)*). Циљ је да се такви откази у будућности не дешавају. Тиме се решава проблем одржавања по отказу. За проактивно одржавање, комплетна опрема и машине се са производно-функционалног аспекта категоришу према значају у три групе (хијерархијска нивоа). Даље се анализира критичност отказа по напред наведеним нивоима по критеријумима као што су: безбедност, екологија, продуктивност, квалитет, цена. Када се овако дефинише критичност, погодном методом (нпр. *RCM - Reliability-Centered Maintenance analysis*) - дефинише се стратегија одржавања. Затим се план одржавања разрађује у *CMMS (Computerized Maintenance Management System)* окружењу и извршава према томе. Перформансе постројења (машине, опрема) се надзиру и контролишу преко различитих индикатора (*OEE-overall equipment effectiveness, availability, MTBF, Maintenance Costs*, итд.). Временом, за сваки отказ који утиче на перформансе постројења се тражи одговор зашто постојећи план одржавања није у стању да избегне такав квар или минимизује последице. Одговор утиче на дораду плана одржавања. Када се овакав систем успостави (слика 18), константна побољшања имају стабилишући ефекат и откази се начелно смањују. Наравно да овај концепт није ограничен на класична, стационарна постројења, већ има универзално значење када се говори о одржавању. Без обзира на изнето, чак и данас, са аспекта одржавања, различити индустријски комплекси се различито понашају. Захтеви поузданости, расположивости и планирање животног циклуса опреме у нуклеарним постројењима, као стандард број 1 у одржавању, имају своју примену у ваздухопловству, док остале индустријске гране немају фокус као ове две гране. Аспекти безбедности и анализа ризика су популарни приступи у хемијској и петрохемијској индустрији. У индустријским гранама где је отказ прихватљив све док је време оправке кратко, „време опреме у раду“ је важније од поузданости. Из свега наведеног, аутор Jose Baptista (Starr et al., 2010.) износи став да је будућност одржавања у појави нових модела као што је „*Customization*“ одржавања према специфичним областима делатности и потребама „потрошача“. Један добар пример је *Интегрисани сервис ротирајуће опреме*. Кроз уговор (*Performance-based Contracts*), испорука, уградња, подмазивање, вибродијагностика и услужно одржавање омогућавају руководству постројења да се фокусира на главне пословне процесе без бриге да управљају одржавањем. Одржавање треба да допринесе одрживости постројења и да одржи опрему у исправном стању што дуже уз прихватљиве трошкове укључујући и енергетску ефикасност и да одложи тренутак капиталног инвестирања - замене опреме. Нови тренд у одржавању је и примена система за подршку одлучивању. Многе одлуке у одржавању које обухватају ризик, цену, запослене и друго се доносе на бази непотпуних података и такви системи треба то да спрече. Решење се заснива на тзв. „*Data Fusion Methodology*“ где се систематизују и обједињују информације из више извора и обухватају податке о надзору опреме (*Condition Monitoring*), историју индикатора одржавања (*Performance Indicators*), финансијске показатеље, податке о акцијама одржавања и др. Развој других алата, чак и оних који су развијени за друге потребе, доприноси индустријском одржавању. Ту као најважније спадају следеће технологије: *Wireless Sensors*, минијатуризација, *Micro-electro-mechanical Systems (MEMS)* и *Disruptive Technologies (Nanotechnology, Self-healing Components and the Pervasive Sensing Concept)*. *Wireless Sensors* се користе за надзор и дијагностику са могућностима континуалног праћења стања и мањом ценом у односу на модерне портабл инструменте. Минијатуризација (рачунари, оптичке технологије и др.) даје такође свој допринос технологији одржавања.

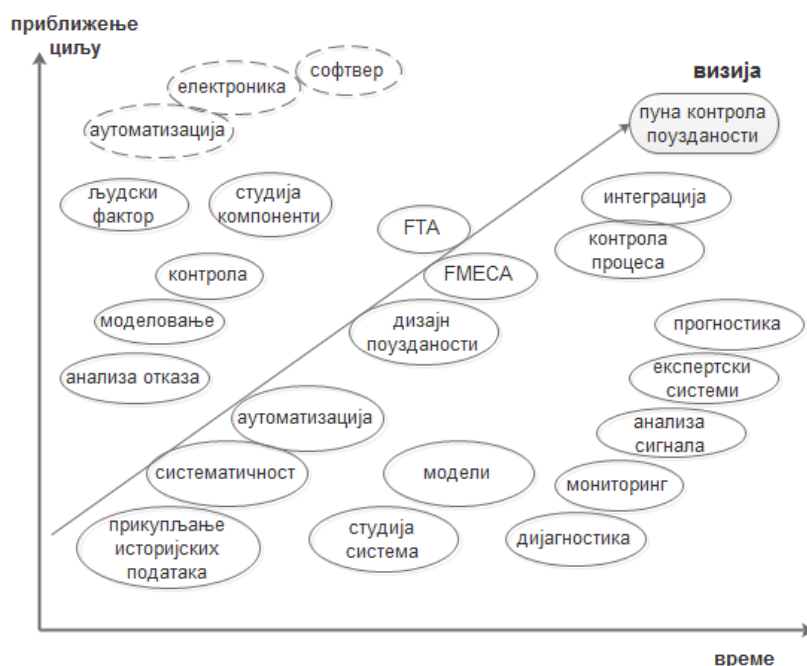
### 3.3. Одржавање: савремени погледи

#### 3.3.1. Врхунско управљање одржавањем (State of the Art)

Одржавање је данас посвећено циљевима као што су подршка одрживом развоју друштва, укључујући еколошки аспект и енергетске уштеде, безбедност и економски аспект (Starr et al., 2010.). Напредно одржавање има важну улогу у унапређењу конкурентности компанија. Технологија не може бити ефективна без напредног управљања. Поузданост машина, опреме и инструмената су фактори конкурентности, посебно у областима где су безбедност и расположивост важни. Аутоматизација и интегрисана производња су резултирали настанком великих техничких система који су тежи за контролу и управљање и много осетљивији на отказе са аспекта последица тих отказа.

Поузданост, расположивост и планирање животног века су прво разрађени и експлоатисани као ефикасни показатељи стања опреме у нуклеарној индустрији. Авио индустрија је следила и дорадила концепт, обезбеђујући поузданост дуплирањем кључних функционалних склопова. Анализе ризика и безбедности уведене у хемијској индустрији су се прошириле и на друге области.

Постојеће методологије (слика 19) није лако увести или применити као универзално решење, као на пример у металској и другим индустријским гранама где је расположивост чешће важан критеријум од поузданости. Другим речима, важнији је критеријум „време у отказу“ од мале вероватноће отказа. Отказ је прихватљив ако је време поправке кратко и технички систем није дуго у стању отказа. Способност система одржавања да реагује у случајевима отказа је тада његово важно својство.



Слика 19. Технике контроле поузданости

Традиционално, произвођачи гарантују безотказни рад постројења, опреме или машина за одређени гарантни период. Данас је популарна метода Планирање профита у животном веку (*Life Cycle Profit Planning*) и базирана је на поузданости производа у целом животном веку. Статистички одређени интензитети отказа, расположивост и животни век производа се користе као аргументи конкурентности. Већа поузданост машина, опреме и постројења

подразумева и мањи ризик за запослене и околину, такође и бољу контролу и мање трошкове опреме у животном веку. Зато су потребне и нове прецизне и убедљиве методе за специфицирање и контролу поузданости. Поузданост је и аргумент надметања тј. продаје, када више производа слично или једнако врше функцију.

Методе дизајнирања производа оријентисане су на оптимизацију функције, а пажња ка поузданости и расположивости се даје од случаја до случаја, односно мало у односу на оптимизацију перформанси производа. Различите технологије и методологије производње добара захтевају и другачији приступ поузданости и расположивости. Фински институт *Technical Research Centre of Finland – VTT* је развио методологију (слика 20) свеобухватног приступа захтевима поузданости и расположивости.



Слика 20. Свеобухватни приступ унапређењу поузданости и расположивости опреме према *Technical Research Centre of Finland*

Методама базираним на контроли ризика најпре се идентификују елементи техничког система али и људи - оператери (корисници), који у случају отказа могу да узрокују катастрофалне последице. Онда се идентификују критични делови, прорачунава се вероватноћа отказа система и прорачунава се животни век система. Трошкови употребе се статистички прорачунавају алатима и техникама контроле поузданости. Након идентификације делова система који захтевају побољшање - унапређење, одговарајућа техника се тражи међу алатима контроле отказа механичких делова, електронских делова, софтвера и контроле људских грешака. Када је идентификована критична функција врши се анализа оперативности компоненте и предлаже се унапређење које мора бити упоредиво са старим решењем. На крају се предлажу мере за унапређење стања, као што су замена компоненте новом - унапређеном, усавршени дизајн производа, мониторинг стања, аутоматска дијагностика, инспекције, тестови и упутства за одржавање. Излаз из холистичког приступа је препорука за унапређење заједно са проценом ефеката на ризик, вероватноћу отказа и животни век.

### 3.3.2. Интегрисани програми и процес планирања

Холистички (свеобухватни) концепт одржавања се развио уназад 20-так година (Bousdekis et al., 2015.). Као што је већ речено, лидери у организацији одржавања са аспекта

поузданости су нуклеарна постројења и авио индустрија. Међутим, међународна конкуренција и напредак у областима производних технологија су довели до настанка палете интегрисаних и свеобухватних процеса планирања у одржавању. Ти програми и процеси обухватају *Reliability Centered Maintenance*, *Total Productive Maintenance*, *Total Quality Maintenance*, *Lean Maintenance* и многе друге. Циљ тих интегрисаних приступа је план одржавања усклађен са стратегијом одржавања (Ruiz et al., 2013., Takata et al., 2004.).

#### *Reliability centered maintenance (RCM)*

Reliability centered maintenance (RCM) је високо структурирани метод за планирање одржавања, развијен у индустрији авио транспорта и касније прихваћен у више индустријских области и војном одржавању (Moubray, 2001.). Метод рашчлањује постројење (машину) на систематичан начин ради анализе конструкције користећи методу FMEA у циљу да се идентификују важне компоненте и начини отказа. Тада се одабира одговарајући поступак (акција) одржавања за сваку од тих компоненти, са циљем да се елиминишу откази. За примену методе су потребне колекције података о отказима. Иако један од најпопуларнијих, метод има и неке недостатке:

- Подаци о отказима (*Failure Data*) се тешко обезбеђују, често због тога што се витални делови мењају периодично пре настанка отказа у циљу избегавања отказа који могу имати значајне последице (хемијска индустрија и сл.);
- Поузданост често није главни фокус, производна постројења се често фокусирају на расположивост;
- RCM не може да максимално искористи технологију техника мониторинга стања.

#### *Total Productive Maintenance (TPM)*

Total Productive Maintenance (TPM) има за циљ да максимизује ефективност опреме. Састоји се од палете метода које ефективно побољшавају поузданост, квалитет и производњу. TPM настоји да унапреди компанију кроз унапређење постројења и људских ресурса и да промени корпоративну културу. Културолошке промене спадају међу најтежима и примењују се кроз рад у малим групама, значајним улогама оператора на машинама у програму одржавања и подршци организационог дела задуженог за одржавање (Willmot, McCarthy, 2000.).

Основна снага TPM-а је циклус побољшања или *Deming циклус* (Plan-Do-Check-Act). Док се тај циклус користи у случају када се деси отказ, много економичније је контролисати стање машине (опреме) и превентивно деловати на отказ или производњу лоших делова (производа). TPM захтева да оператор на машини (опреми) врши одређене акције и активности одржавања, као нпр. чишћење, подмазивање, подешавање и извештавање о уоченим променама стања машине. Ипак, те активности не могу спречити све могуће облике отказа. Свој допринос ту дају системи, односно уграђени или преносиви инструменти који оператору пружају веће могућности да уочи ненормално понашање опреме.

#### *Total Quality Maintenance*

Total Quality Maintenance (TQM), слично као TPM, као главну снагу концепта има циклус унапређења. Акција унапређења стања може да се опише као акција која се предузима у раној фази, односно чим се уоче значајне девијације у стању опреме или процеса. Око 99% механичких отказа се може предвидети на основу индикатора који указују на промену стања (Al-Najjar, 2001.). Технике мониторинга стања се посебно развијају и разрађују.

TQM подразумева континуално одржавање и унапређење техничке и економске ефективности производног процеса и његових елемената. То није само алат да служи и одржава опрему (машине, постројења); то је алат који се бави одржањем квалитета свих чинилаца производног процеса. Улога TQM је према томе:



- Мониторинг и контрола девијација у процесу, радним условима, квалитету производа и цени производа (производње);
- Откривање узрока отказа, механизма њиховог настанка и развоја и потенцијалних отказа са циљем да се спречи или умањи деградирање перформанси машине (опреме), пре него што испоље утицај на производни процес и особине производа;
- Предузимање акције или активности да би се машина или процес или појединачни део вратили у стање „as good as new“.

Све наведено се предузима као континуално редуковање трошкова по јединици производа. Отказ је дефинисан као смањење (нестанак) способности компоненте (машине) да врши захтевану функцију, што се дефинише кроз способност машине (постројења) да врши основну функцију, цену производње, квалитет производа или безбедност персонала и опреме.

### 3.3.3. Стратегије одржавања

У одржавању су у 21. веку испробане разне варијанте стратегија одржавања. Постигнута је сагласност да је одржавање једна од кључних функција компаније јер се основни процеси заснивају на употреби машина, опреме и постројења. У формулацији плана одржавања, циљ је да се минимизују оперативни трошкови и трошкови одржавања. Организација одржавања се базира на потребама основног пословног процеса (његовог континуитета), отказима који се јављају, расположивости људских ресурса и резервних делова. Планирање и управљање одржавањем има за циљ да усагласи ресурсе одржавања (извршиоци, алат и опрема, резервни делови) и очекивано оптерећење одржавања. Менаџерима одржавања су на располагању различите стратегије одржавања. Најбоља политика (*State of the Art*) користи комбинацију одржавања по отказу, временски базирано одржавање, *Design out*, одржавање према стању и тзв. „Opportunity Maintenance“. Традиционално, почетак активности (акција) одржавања је појава отказа или временски базиран превентивни план одржавања. Одржавање према стању (CBM) је усавршени (напредни) метод превенције отказа базиран на детекцији промена перформанси машина и опреме.

#### *Одржавање по отказу - (Run to Failure)*

Одржавање по отказу (*Run to Failure, Breakdown Maintenance-BDM*) је одржавање које се предузима тек када настане отказ на машини или опреми. До тада се не предузимају акције одржавања. То је прихватљиво када су последице отказа мале, односно када није важно колико дуго траје оправка и колико кошта. Понекад, отказ није могуће предвидети употребом инструмената или анализе. Ова стратегија се често користи на неприкладан начин. Код појаве отказа, циљ одржавања је да се машина или опрема што пре врати у стање да може да обавља захтевану функцију.

Предности ове стратегије су:

- Једноставно планирање одржавања – организација одржавања само треба да буде способна да реагује у случају настанка отказа;
- Планирање рада (план одржавања) се не врши, ради се тек по настанку отказа.

Недостаци ове стратегије су:

- Отказ се може десити у незгодно време;
- Отказ компоненте може остати непримећен све док не откаже већи-важнији склоп;
- Може доћи до скувих и опасних последица отказа;
- Тимови за одржавање и залихе делова морају бити у сталној приправности;
- Морају постојати значајне залихе резервних делова.

### *Временски базирано одржавање - (Time Based Maintenance)*

У планском (временски базираном) одржавању – превентивном одржавању (PPM) одржавање се планира унапред како би се избегли откази. Овај концепт је развијен средином 20-тог века и фокусира се на избегавање отказа кроз замену компоненти и делова након одређеног времена (циклички). Подразумева се да је животни век машине кроз компоненте предвидљив, а одржавање се заснива на времену рада (број часова рада, број радних циклуса и сл.) или на основу календарског циклуса времена. Врши се замена поједине компоненте или склопа. Овај начин одржавања је погодан у случајевима када се деградација карактеристика машине понавља, тј. где постоје процеси који су константни у смислу деградације својства машине.

Предности ове стратегије су:

- Ефективније искоришћавање времена рада машине;
- Резервни делови се планирају унапред, по потреби.

Недостаци ове стратегије су:

- Машина (постројење) не мора да западне у стање отказа између интервала одржавања (експлоатациони или временски ресурс) - ово је поготово карактеристично код сложених система;
- Откази се и даље могу десити у било ком тренутку;
- Метода зависи од статистичке анализе; у многим случајевима одговарајући исправни подаци о отказима нису присутни;
- Систем можда не захтева одржавање - резервни делови и радна снага се непотребно користе, а систем није у употреби док траје одржавање;
- Честа демонтажа и монтажа делова може изазвати додатне отказе.

PPM захтева замену или поправку у тачно одређено време рада (календар), независно од стања опреме или машине. Временски период одржавања се рачуна према временском или радном ресурсу. Компоненте се мењају за неко фиксно време (т) или приликом отказа шта год се прво догоди.

Време за извршење одржавања у PPM-у прорачунава се тако да се минимизирају укупни трошкови. Постоје многе апликације које се користе за прорачун и оптимизацију модела одржавања. Ови модели узимају у обзир особине 4 фактора од утицаја а то су: опрема, услови и окружење одржавања, захтеви расположивости опреме и типови и врста процедура у одржавању.

PPM ради добро подразумевајући да је прихваћена чињеница да ће се неки откази ипак догодити. Већина отказа ће бити спречена пре него што се догоде, али ће се неки ипак догодити због реалних непредвидљивих отказа у животном веку машине и њених компоненти које је краће од интервала одржавања. Најефикаснија употреба временски заснованог PPM-а ће бити у опреми која има веома предвидљив животни циклус. Типичне PPM активности су дате у табели 5.

Табела 5. Типичне активности превентивног одржавања

типичне активности
визуелни и слушни прегледи
подмазивање
подешавања
провера електричних спојева
провера перформанси
чишћења
замена делова у интервалима (филтери, каишеви, заптивачи...)

Често најједноставнији и јефтин метод провере и чишћења не врши се исправно, зато што се тај посао сматра неинтересантним и сматра се неважним. Многи задаци провере не контролишу праве перформансе компоненти.

Неки откази се дешавају без обзира на постављени програм РРМ из различитих разлога. Некад је активност одржавања неодговарајућа (нпр. замени се исправан лежај врхунског квалитета лежајем мањег квалитета). Неке активности одржавања могу проузроковати штету оштећењем заптивног материјала и сл. омогућивши тако да прљавштина уђе у чисте компоненте.

#### *Opportunity Maintenance*

Екстензију одржавања базираног на времену (РРМ) представља тзв. *Opportunity Maintenance* односно планирање одржавања према шансама за успех. Наиме, проблем РРМ расте код техничких система који се крећу (све врсте возила) или постројења која непрекидно раде (производња челика, хемијска постројења, нуклеарне електране). Сви ти системи се због одржавања морају привремено искључити - ставити ван употребе. Проблем планирања је да се припреми све што је потребно урадити пре искључивања опреме - постројења, шта урадити док су системи искључени и шта урадити након поновног укључивања опреме - постројења. Статистички подаци се користе да би се утврдило шта се ради код актуелног искључења а шта код следећег. Ова техника је нашла велику примену у одржавању ваздухопловне технике. У случајевима непланског искључивања опреме (отказ) могу да се предузму акције планирање према методологији РМ, с тиме да се онда интервал до следећег одржавања временски помера за касније.

#### *Одржавање према стању - Condition Based Maintenance (CBM)*

Напредни план одржавања обезбеђује избегавање (минимизацију) отказа откривањем ране фазе отказа преко погодних метода, техника и технологија. СВМ иницира одржавање када се примети пропадање (смањење) одређене функционалне карактеристике опреме (машине). Дакле суштина је у познавању стварног стања машине. Компонента или машина се замењује или поправља чим праћена вредност параметра који описује стање машине „изађе“ (превазиђе) из нормалне вредности. СВМ комбинује предности осталих стратегија и има следећа својства:

- Планирање оправки је оптимално;
- Избегавају се откази који проузрокују озбиљне застоје или последице;
- Интензитет отказа је смањен, што повећава поузданост и продуктивност;
- Избегава се непотребан рад, тимови за одржавање су мали али са потребним вештинама.

Могуће је спречити непотребно одржавање (гашење опреме у планским интервалима) и непотребну замену делова (само по статистичким показатељима у нпр. РРМ концепту). Препоруке произвођача за одржавање не узимају увек у обзир оптерећење машине и радне услове. Сувише често расклапање машина и опреме због одржавања може бити узрок отказа.

Почетак активности одржавања у СВМ-у је измерени параметар који је меродаван за стање машине. То може бити индикатор перформанси, дијагностичко мерење које указује на губитак својстава неке компоненте. Додатне информације су расположиве из система надзора и контроле опреме (машине) који се врши преко инсталираних сензора. Технике надзора стања су даљи развој техника дијагностике стања. Међу три опште присутне методе за наведене потребе спадају: термална анализа, анализа радних флуида и виброанализа, али постоје и многе специфичне за одређене области.

Важно је рећи да је СВМ приступ окренут конкретном постројењу а не као генерално решење за приступ одржавању. Неке технике СВМ-а су веома скупе и није оправдано примењивати их без Cost/Benefit анализе, односно користити их као општи приступ у одржавању. СВМ технике се бирају према одређеном техничком систему, односно да реше одређени проблем, што значи да нису решење свих проблема. Често се у неком сложеном систему СВМ примењује само код „критичних“ подсистема, односно код оних који директно утичу на безбедност, који су велике вредности и који утичу на губитке у производњи/услугама.

Анализом историје отказа идентификују се делови опреме и постројења који су одговорни за недовољну поузданост и расположивост. До аналогних показатеља се долази и анализом одржавања кроз идентификацију задатака и активности на које се троши највише времена и других ресурса одржавања. Ако је мониторинг стања лоше подешен и дефинисан, изненадни показатељи (порасти, пад) вредности параметара који се прате могу утицати на доношење одлука о одржавању или непотребну замену делова, чиме се поништавају опште предности СВМ -а.

Концепт СВМ-а се може проширити, кроз примену даљих поступака на евалуацији отказа и начина настанка отказа. Тим начином мониторинга компоненти машине повећавају се могућности откривања девијација стања машине и квалитета производа у раној фази (отказа). То захтева да је однос параметара и промена стања машине и коначног квалитета производа јасно и прецизно дефинисан. Такав концепт се може описати у два нивоа:

- *Proactive Maintenance*: детекција и корекција узрока отказа (нпр. неодговарајуће средство за подмазивање, лоша конструкција, прегревања, ...);
- *Predictive Maintenance (PdM)*: надзор симптома који указују на стање опреме, што се примењује када постоје процеси отказивања, али није могуће кориговати - уклонити узроке отказа.

Примена СВМ може довести до значајних уштеда у цени производње, повећању квалитета производа, повећању профита и др.

### Закључак

Описане су најважније стратегије у одржавању које се данас примењују, укључујући и нека од њихових ограничења. Дobar (или најбољи) план одржавања комбинује све описане стратегије, уважавајући њихова најбоља својства за конкретан предмет одржавања. То у ствари значи да се поменуте стратегије примењују тамо где је то примерено. Постоје и другачије поделе односно стратегије, политике и концепције одржавања, назване према томе ко и како их је први применио или дефинисао, али у суштини оне представљају

комбинацију горе поменутих стратегија. Као примери могу да се наведу: *Integrated Logistics Support*, *Теротехнологија* и др.

### 3.3.4. Информациони системи одржавања и системи контроле одржавања

Одржавање може да се посматра и као управљачки алат. Информациони системи (ИС) одржавања су се појавили као једноставни графички дијаграми и табеле са пратећим регистром машина (опреме). У великим компанијама са применом рачунара се почело одавно у циљу праћења инвентара. Следили су процеси вођења евиденције рада - контрола рада и историја рада опреме. СВМ захтева посебно развијен систем евиденција и велике количине података у циљу екстракције информација и за подршку у одлучивању. Рани компјутеризовани системи су били фокусирани на планирање рада (*Job Scheduling*), управљање ресурсима и опремом. СВМ системи су утицали на развој софистицираних алата са могућностима као што су складиштење велике количине података и интерпретација података (приказ индикатора стања, и сл.). Интеграција која је обухватила техничке податке и управљачке податке довела је до значајних унапређења процеса одржавања уз велике уштеде и повећање поузданости и расположивости (табела 6).

Табела 6. Својства ИС одржавања

Својство система одржавања	Основно својство	Екстензије СВМ
модуларна структура	+	
регистар опреме	+	
каталог послова/упутства	+	
планирање рада	+	
залихе резервних делова	+	
генерисање извештаја	+	
историја рада опреме	+	
опрема са дефинисаним мерним тачкама		+
дефинисани параметри стања опреме		+
сакупљање података		+
комуникације		+
дијагностика и трендови		+

Хетерогеност начина приступа одржавању доводи и до хетерогености софтверских решења за подршку системима одржавања. Пројекат *MIMOSA - Machinery Information Management Open System Alliance* (Alanen et al., 2006.) је допринео стандардизацији података одржавања. Системима одржавања данас на располагању стоје многа решења за подршку управљању, од једноставних и лаких за примену до комплексних, који обухватају управљање пословањем целог предузећа/система.

## *Ограничења ширења интегрисаних система*

Одржавање се и данас третира на различите начине, а врло често као пратећа функција или активност основној делатности компаније/организације. Зато сложени софтверски системи за комплетно управљање предузећем/организацијом имају посебан модул за одржавање. Осим тога, интегрисани систем одржавања је веома сложен и комплексан за имплементацију. Одржавање захтева често податке који су само њему потребни. Зато су најчешће подаци потребни одржавању и подаци које захтева топ менаџмент организације (кључни пословни процеси и индикатори) неповезани. Чак и системи контроле и надзора система у производњи често нису повезани са одржавањем. Техничка решења и развој информационих и комуникационих технологија која су нестандардизована, али што је важније све брже застаревају, су још један разлог постојања овог проблема. Осим тога, сви информациони системи сами по себи захтевају одржавање и имају знатну цену одржавања.

### **3.3.5. Врхунска технологија и утицај на одржавање**

#### *Рачунарски системи*

Рачунарски системи се данас нормално користе у свим пословним процесима, па тако и у одржавању. Прихватљива цена и универзалност рачунара (информационих технологија), омогућили су њихову примену у одржавању, било као општи алат за рад, било као специјализовани (колекције каталога, CMMS решења, базе података - складишта и управљање залихама делова, општа комуникација и др.). Све више се користе мобилни уређаји, са могућностима интернет конекције.

Кључно својство функције одржавања је компатибилност. У прошлости су чињене грешке због настојања да се изабере софтверски и хардверски системи за потребе одржавања који ће задовољити технички део система и управљачки део система одржавања. Данас је постављен захтев да IT решење за потребе одржавања мора да подржи и технички и управљачки део. Примера ради, за капитална постројења и опрему који су дизајнирани да раде декадама, потребан је IT алат који ће све то време пратити систем кроз записе о раду, отказима, операцијама одржавања, управљати залихама резервних и делова и др. Уз свесност да се IT технологије непрекидно усавршавају (а стара решења застаревају), суштинска предност могућности интерконекције IT опреме је да се корисници могу фокусирати на основну функцију, тј. пословни процес. На пример, понуђач алата за надзор опреме путем праћења вибрација не мора да брине о дизајну хардвера и рачунарске платформе која ће користити његову опрему, јер је IT решењима обезбеђена интероперабилност и интерконекција. Даље, умрежавање је обезбедило нове приступе (*State of the Art*) у одржавању који се називају е-одржавање. И питања заштите и безбедности података који се шаљу на даљину или складиште у WEB окружењу се данас веома успешно решава модерним системима енкрипције.

#### *Мерна опрема и сервис*

Надзор и праћење стања машине и опреме као метода, користи палету метода за процену стања машина, опреме и процеса. Мониторинг параметара процеса често је најбољи показатељ стања машине и индикатор перформанси као што је притисак (у неком делу), потрошња енергије и др. Нажалост, робусне машине могу компензовати многе унутрашње проблеме и имати потребне перформансе све до настанка отказа и зато су потребне софистициране методе избора параметара за надзор стања.

Анализа вибрација се користи за мерење убрзања, брзине и помераја покретних механичких делова, компоненти, често непосредно али и индиректно преко приступа некој тачки на

спољашњем делу машине, без прекидања основног процеса рада машине. Сигнал добијен непосредним мерењем вибрација се процесуира (анализира) на неколико начина: општи ниво вибрација (ради поређења са нивоом код познатих отказа); анализа фреквентног спектра; емисија високих фреквенција ротационих делова.

Емисија звука се мери непосредно по простирању кроз структуру или простирање звука кроз ваздух, чиме се детектују појаве које указују на познате или могуће отказе. Звук може бити индикатор развоја отказа или индикатор непосредног настанка отказа.

Мониторингом температуре се мери температура на стратешки одређеним местима машине и опреме са циљем идентификације потенцијалног отказа. Анализа инфрацрвеног зрачења указује на температурна стања у одређеној зони машине. Опрема за мерење ради у реалном времену, промене се одмах региструју, па се динамичне промене могу одмах анализирати. Ова методологија се често назива и *термографијом*. Анализа уља и радних флуида је врло популарна техника која детектује ненормалан прираст нечистоћа у флуиду или ненормално смањење функционалних карактеристика флуида, што представља директан показатељ потенцијалног отказа односно евентуалног системског проблема. Нарочито се експлоатише код спороходних машина и опреме где је анализа вибрација мање ефективна. Помоћу различитих метода мерења електромагнетног флукса, ултразвучних метода и др., врши се детекција ломова.

### *Преносни инструменти*

Већина процеса мерења користи непосредно мерење неког параметра машине. У индустријском окружењу приступ већем броју инструмената (различити инструменти) и изворима напајања увек је била ограничен, а коришћење преносних уређаја већих габарита (покретна колица и ормари) више се не примењује. Јасно је колика је корист од малих уређаја са самосталним напајањем. Преносивост је релативна ствар: уређај који је претежак за ношење може се искористити на начин да се погодним начином приближи до мерног места. Преносни уређаји уопштено говорећи имају велики распон основних функција. „*Tranducer*“ мора бити довољно мали да би се могао носити и да има капацитет батерија за неколико сати рада. Најједноставнији инструменти имају једноставне дисплеје, али је потребно да самостално или уз одређени додатак могу процесуирати измерени сигнал, запамтити измерени резултат у локалној меморији и пренети га на РС. Комуникација може укључивати жично или бежично повезивање у различитим стандардима. Постоје инструменти са великом снагом обраде измерених сигнала и обраде података. Оваква разноликост платформи значи да могу наћи примену у различитим пољима науке, медицине, инжењерства и др. Обрада параметара може бити повезана директно са системом надзора и управљања тако да они (преносни инструменти) служе да омогуће мерења које не може извршити уграђен систем у машину/опрему.

Многи параметри који служе за надзор стања нису обухваћени уграђеним системом машине, зато су и потребни портабл инструменти за прикупљање података. Сирови измерени сигнал се постпроцесуира различитим методама, што служи дијагностици стања.

### *Лабораторијски сервис*

Одржавање користи услуге експерата и лабораторија. Ово из разлога што није увек могуће развити јефтин и преносни инструмент. Неки инструменти не могу бити реализовани као портабл. Цена коришћења лабораторијских услуга може имати смисла ако се упореди са ценом набавке инструмента и ангажованог особља. Извештаји из лабораторија се шаљу електронским путем и формат података извештаја се директно може користити за потребе одржавања (анализа и оцена стања опреме). У овом смислу пројекат MIMOSA (<http://www.mimosa.org>) се сматра посебно важним.

### 3.3.6. Прилагођавања и одрживост

Одржавање опреме је скупа активност. Осим цене, односно расхода, компанија има и проблем да обезбеди потребну стручност и знање запослених које се бави одржавањем. Технолошки напредак, а последично и потребе за обнављањем опреме, захтевају различите стратегије управљања компанијом. Супротстављени су захтеви да се постојећа опрема што дуже користи и експлоатише и жеља за поседовањем најбоље расположиве опреме. Није тајна да произвођачи опреме и машина велики део прихода остварују путем продаје резервних делова и услуга одржавања. Даље, посебно скупу и вредну опрему није лако заменити (нпр. трговачки бродови). Производи и машине нису стандардизовани, односно постоји велики број произвођача (нпр. аутомобили). Та разноликост усложњава проблем одржавања опреме и машина. Посебно важан проблем је старост опреме где су матични произвођачи престали да производе резервне делове.

Из свега наведеног, многи корисници опреме и машина се одлучују да изнајмљују опрему где је цена изнајмљивања уједно и цена исправног рада. Компанија се онда фокусира на свој основни процес, а одржавање препушта својеврсном *Outsourcing*-у. Посебни сервиси и службе одржавања захваљујући значајно напредовали ИТ технологијама и транспортним средствима могу брзо да реагују у случају потребе.

Специјализоване вештине и знања су такође на високој цени, па се зато власници или изнајмљивачи опреме одлучују да их набаве по потреби, а не да их стално држе у компанији. *E-Maintenance* приступ даје овоме пуну подршку.

### 3.3.7. Подршка одлучивању

У (индустријском) одржавању одлучивање је још увек у рукама човека. Одлуке које се доносе утичу на могуће ризике, трошкове, запослене и даље се заснивају на углавном непотпуним или недовољним информацијама (подацима). Технички подаци о стању машине и процењеном веку рада морају бити комбиновани у процесу одлучивања са ризиком и ценом, и у динамичком окружењу одлуке би требало да доведу до дугорочног профита и минималног ризика и максималне поузданости. Одлуке се дакле доносе према ризицима, цени, лимитираним ресурсима, физичким ограничењима и правним ограничењима, због често конфликтних захтева (проблема који се морају превазићи). Системи за подршку у одлучивању, базирани на интеграцији разноврсних информација (*Data Fusion Methodology*), треба да послуже као асистент човеку приликом доношења одлуке.

Према нивоима руковођења и одлучивања нарочито је изражен проблем одлучивања на *Top-level* нивоу, јер се заснива на подацима нижег нивоа управљања, где се мноштво података мора превести у информацију, што захтева комбиновање знања и употребе (измерених) података-информација.

### 3.3.8. Развој нових примењених технологија

Одржавање користи многе технолошке напретке који су иницијално развијени за друге потребе.

#### *Wireless sensors*

Бежична комуникација се развија експоненцијално у многим пољима електронике и доноси неке фундаменталне предности наспрам класичне жичне комуникације. Цена таквих

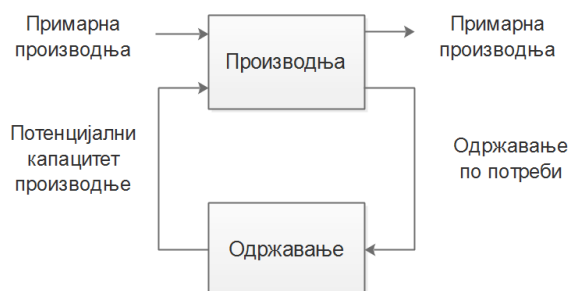


уређаја је врло прихватљива. Бежични надзор стања опреме је зато данас врло прихваћен метод у одржавању (Palem, 2013., Wang et al., 2004.).

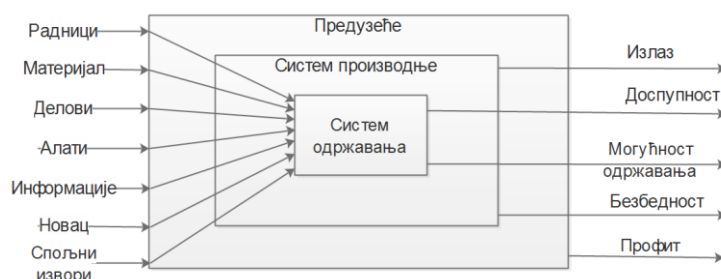
### 3.4. Одржавање: Рекапитулација поглавља

#### 3.4.1. Појмовна одређења

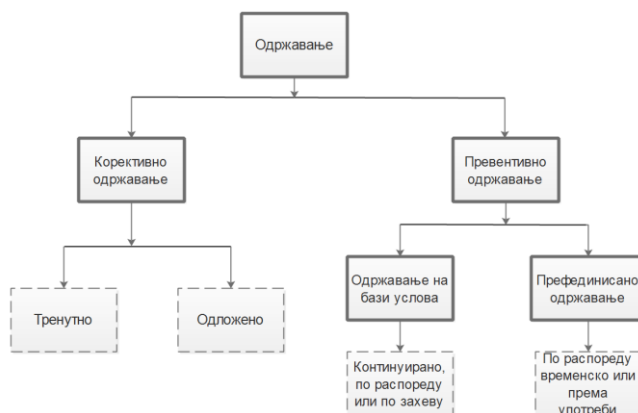
**Одржавање** је комбинација свих техничких и административних поступака, укључујући и надзор активности, са циљем да се систем задржи или врати у стање у коме може извршити потребне функције. Одржавање представља скуп организованих активности које се реализују како би технички систем био у најбољем оперативном стању уз минимум трошкова. Место и улога одржавања у систему (нпр. производном) су илустровани сликама 21-23.



Слика 21. Општа функција одржавања



Слика 22. Одржавање у окружењу предузећа и утицајни фактори



Слика 23. Одржавање према стандарду SS-EN 13306

Варијанта система одржавања (СОд), одређена концепцијом, организацијом и карактером поступака одржавања, као и односом између појединих нивоа на којима се врши одржавање, назива се **стратегија одржавања**.

Стратегија одржавања је дакле варијанта СОд која садржи јасно дефинисане: концепцију, организацију, технологију и односе између нивоа у процесу одржавања. Појам стратегија одржавања одговара појму **политика одржавања**.

Под **концепцијом (концептом) одржавања** подразумевају се начела по којима се доносе одлуке о свим битним елементима за спровођење поступака одржавања, у односу на њихов садржај и време („шта и кад се ради“). У пракси се користи и термин **методологија одржавања**, што је у ствари детаљно разрађена концепција са дефинисаним циљем, а неке од методологија су:

- Одржавање према поузданости, интегрална логистичка подршка;
- Тотално продуктивно одржавање, предиктивно одржавање;
- Одржавање према ризику, светска класа одржавања и др.

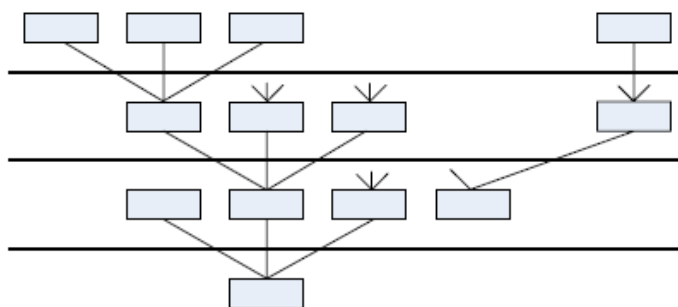
Концепција одржавања је дакле једно од најважнијих обележја сваке стратегије одржавања, односно сваког система одржавања. Од концепцијских решења у великој мери зависи и укупни квалитет одржавања.

Велики број могућих концепција процеса одржавања своди се у суштини на две основне концепције одржавања, као и једне која произилази из претходне две:

- Концепција корективног одржавања;
- Концепција превентивног одржавања; и
- Концепција комбинованог одржавања (корективно-превентивног одржавања).

Концепција превентивног одржавања тражи да се поступци одржавања спроводе пре него што дође до појаве отказа, док је систем у стању у раду. Поступци превентивног одржавања имају задатак да спрече или одложе појаву отказа. Концепција корективног одржавања тражи да се поступци одржавања спроводе само ако до отказа дође. Поступци корективног одржавања поправљају систем и обављају се искључиво само ако се систем налази у стању у отказу. Ове две концепције одржавања су у ствари различите варијанте комбинованог одржавања.

**Организација одржавања**, подразумева линијску или сложену (слика 24), хијерархијску структуру – сваки виши ниво опслужује један или више нижих нивоа. Користи се за техничке системе који се производе у већим серијама или групама.



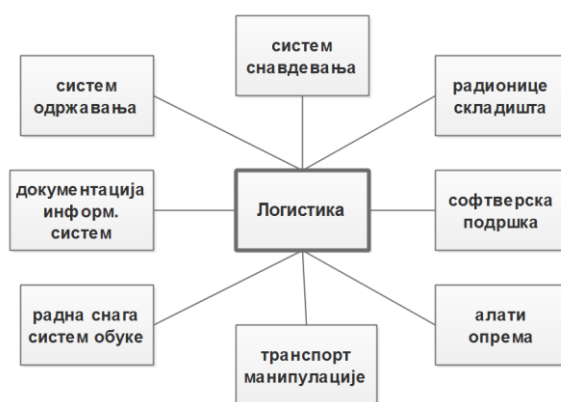
Слика 24. Начелна схема хијерархијског система одржавања

Трећи ослонац СОД, односно трећи елемент стратегије (политике) одржавања је **технологија одржавања**. У инжењерству одржавања под технологијом одржавања подразумева се начин обављања поступака одржавања.

Технологија одржавања, према начелу „шта и како се ради?“, треба да пружи одговоре на неколико конкретних питања:

- Како треба обавити појединачне поступке одржавања?
- Које алате користити приликом извођења захвата?
- Који редослед операција одржавања треба применити?
- Које стручне ресурсе треба користити приликом спровођења поступака одржавања?
- Како и када вршити проверу квалитета спроведеног одржавања?

Одржавање захтева постојање складне интеграције својих елемената, односно захтева опсежну логистику (слика 25).



Слика 25. Схема логистике одржавања

### 3.4.2. Развој средстава за рад и концепција одржавања

Од момента када је почео развој и изградња материјалних добара: кућа, бродова, пољопривредних оруђа и др., може се говорити о присутности потреба за одржавањем. Материјална добра, у периоду пре индустријске револуције, су била једноставне конструкције, често предимензионисана, са дуготрајним периодом хабања (трошења) што је омогућавало предвиђање појаве отказа. Уопштено говорећи, материјална добра су била поседована, експлоатисана и одржавана као појединачна добра. Одржавање је, тада, било неопходно, али није постојала потреба за менаџментом одржавања. У току индустријске револуције у фабрикама је инсталирано много различитих машина, са основним циљем обезбеђења планиране производње.

На почетку двадесетог века долази до развоја великих и сложених фабрика, које настају у циљу задовољења потреба масовне производње. Технологије се посложњавају, а долази до промена социјалног и политичког окружења. Фабрике исказују повећане потребе за одржавањем, често са потребом ангажовања различитих струка, што изискује потребе развоја менаџмента у одржавању.

Након другог светског рата, менаџмент одржавања се развија као помоћна служба на ниском организационом нивоу, у оквиру техничког сектора без, у већини случајева, високо образованих кадрова. У том периоду, уобичајена политика одржавања је: пусти да ради док не откаже, а онда замени (независно од рутинског подмазивања, прегледа, подешавања). Таква политика је била оправдана и задовољавала је потребе, из разлога што су фабрике

биле предимензионисане (са значајном резервом у капацитету) и још увек не сувише комплексне. Менаџмент, који је преузео бригу о одржавању, је био оријентисан на производњу, тако да се према одржавању односило као према нужном злу.

### 3.4.3. Период 1945. – 1959.

Значај одржавања за профитабилност компаније и њену сигурност постаје све очигледнији непосредно након Другог светског рата и током педесетих година. Велики производни процеси подразумевају високе основне трошкове, као и потребу за високом расположивошћу, често у дужем временском периоду рада. У том периоду се јављају нови прилази:

#### а) Превентивно одржавање

Основни напредак методологије менаџмента одржавања у том периоду је усвајање политике превентивног одржавања. Превентивно одржавање је дефинисано од стране Mc Bradја и Кега као „...проналажење и исправљање било ког стања, које може да изазове отказ машине, пре него што до отказа дође...“. Исти аутори су приказали и типичне превентивне шеме одржавања, које се базирају на следећим елементима:

- Периодичним прегледима машина, других добара и објеката, при чему је учестаност прегледа одређивана на бази искуства или, у случају нове опреме, на основу препорука произвођача (док се довољно искуства не прикупи); и
- Извештавању о ломовима и отказима машина, али се они нису анализирали ради спровођења корективних (превентивно - накнадних) интервенција одржавања, којима би се спречило поновно отказивање, услед истог узрока.

Концепт PERA (*Planning and Engineering for Repairs and Alterations*) – систем превентивног одржавања, је заснован на сличним идејама прилагођеним потребама појединих индустрија у Великој Британији, а данас се користи у америчкој морнарици приликом одржавања носача авиона и подморница. Овај систем одржавања је имао доста успеха, пошто се базирао на једноставним рутинским прегледима: погледај, послушни, осети, омириши и сл. Ово је и један од основних разлога зашто се систем (додуше у модификованом и унапређеном облику) задржао до данашњих дана у америчкој морнарици. Неке индустрије, као нпр. производња енергије, прилагодили су политику превентивног одржавања потребама детаљних прегледа у фиксним временским интервалима.

Политика се заснивала на дијаграму "интензитета отказа" из *Теорије поузданости*, односно, на детаљном прегледу опреме, пре него што велики број саставних делова дође у фазу интензивног хабања или замора материјала. Велики број аутора превео је ову идеју у *Модел одлуке усмерен ка одређивању оптималног нивоа превентивног одржавања*. Многе компаније су прикупљале податке у времену, како о отказима тако и о трошковима одржавања, са циљем оптимизације периода превентивних интервенција. Главни менаџери производње, понекад на основу озбиљних разлога, а често на основу простог расуђивања или интуиције, су закључивали да политика превентивних замена након истека фиксног временског интервала (ресурса) није оправдана.

#### б) Планско одржавање

Поступак превентивног одржавања је уведен као део система *Планског одржавања*, у коме се интервенције одржавања (превентивне и накнадне) планирају пре него што дође до потребе за њиховим спровођењем. PERA (као систем превентивног одржавања, укључен у планско одржавање) плански систем одржавања се заснивао на једноставној ручно вођеној документацији (карте машина, термин план превентивних интервенција, карте отказа система, као историја о понашању система у времену експлоатације и радни налози)

усмереној на покривање свих интервенција одржавања, које се изводе унутар појединих струковних група одржавалаца. Веће компаније, поготово оне са централизованим одржавањем, уводиле су поступке централног планирања и терминирања. Већи нагласак је дат на управљање резервним деловима и алатима, као делу планског одржавања. ICI (*Institute of Chemical Industry*) је увео методе и технике мерења рада у одржавању, назване *Аналитичким проценама*. Технике су коришћене за одређивање стандардних времена појединих активности у одржавању пре њиховог извршења. Ово је омогућавало боље планирање интервенција одржавања и контролу ефикасности њиховог извршења. Техника је примењивана на времена извршења активности и захтевала је висок ниво сарадње одељења за планирање интервенција и извршилаца у одржавању. Релативно мало напора је било уложено у оцену и управљање ефективношћу функције одржавања. Као мера успешности одржавања посматрају се индикатори перформанси.

#### 3.4.4. Период 1960. – 1969.

Значајно за овај период је даље снижавање директних трошкова одржавања, помоћу побољшања ефикасности рада. То је посебно обухватило примене технике изучавања рада у функцији одржавања.

##### а) Студија рада у одржавању

Примена методе студија рада као помоћи при изналажењу решења у одржавању огледа се у облику скупа питања која олакшавају доношење одлуке при корективним (измене у конструкцији) интервенцијама одржавања. Питања се односе на три основна аспекта проблема:

- Елиминисање функције (система, подсистема, склопа, дела);
- Алтернативне могућности извршења функције; и
- Унапређење постојеће функције.

Повишење продуктивности је истраживано кроз побољшавање процеса планирања и управљања интервенцијама одржавања, као и употребом напреднијих поступака за мерење ефикасности рада. Више поступака за мерење рада у одржавању, које су биле у употреби презентовао је и А. Kelly. Можда најчешће коришћена техника је компаративне процене, која се заснивала на подацима мерења рада из Универзалног стандарда за одржавање (*Universal Maintenance Standards (UMS)*, према *Engineering Maintenance Management, 1994, ISBN 0-8247-9247-5*).

##### б) Људски фактори у одржавању (бихејвиоризам)

У периоду 50-тих до 60-тих година поново се у менаџменту јавља интерес за људски фактор. Поузданост се могла повисити кроз побољшања у области пројектовања послова, партиципације радника и филозофије менаџмента, у смеру:

- Замена детаљних инструкција појашњавањем циљева;
- Повишења активности при планирању, организовању, руковођењу и контролисању, као основним менаџерским процесима;
- Проучавања организације рада и покушаја да се тако осмисли, да омогући више задовољавање људских потреба;
- Замена контролних активности наглашавањем улоге менаџера, као помоћи и подршке развоју способности; и
- Постављање организације за изградњу основе ефективних радних тимова.

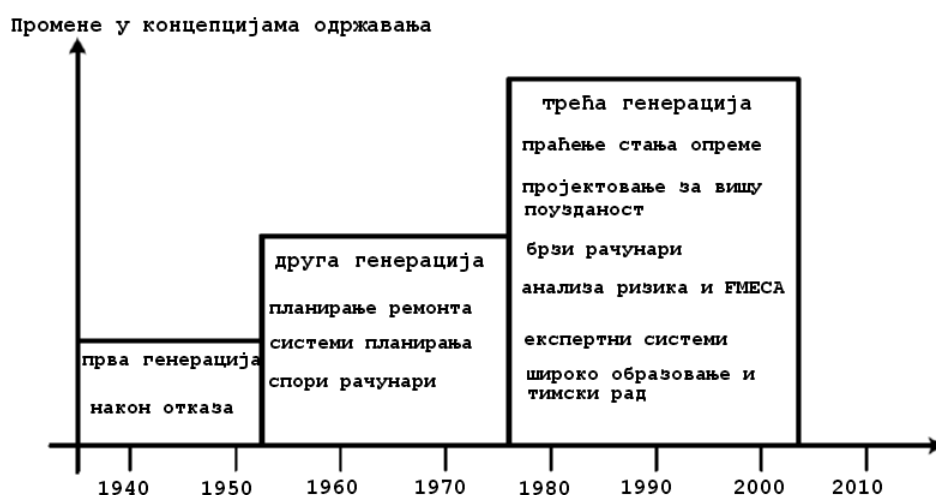
##### в) Одржавање усмерено на поузданост (*Reliability Centered Maintenance -RCM*)

Године 1960. су спроведена истраживања од стране FAA (*Federal Aviation Agency*) у САД са циљем да установе ефективност ремонта авиона у фиксним временским интервалима. Резултат истраживања су два открића:

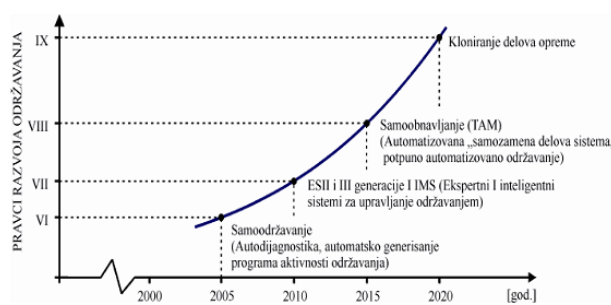
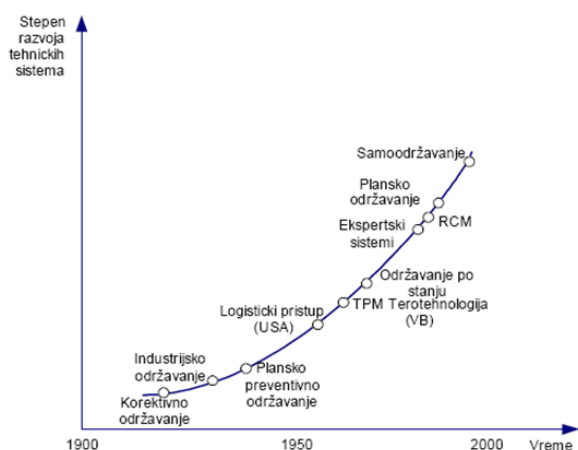
- Планирани ремонт је имао мале ефекте на укупну поузданост сложених компоненти, осим ако компонента има доминантан отказ услед хабања; и
- Постоје многе компоненте за које не постоје ефективни и ефикасни начини превентивног одржавања.

Ова истраживања су утицала на постављање концепта RCM, који је доживео даљи развој у периоду 60-тих до 70-тих година.

Суштина су превентивни - периодични прегледи и замена делова (и материјала). Том приликом се одбацује потенцијално дуг преостали употребљиви век дела. Зачеци RCM се јављају половином XX века и током развоја основа RCM, прошло се кроз три фазе (слика 26 и 27).



Слика 26. Промене у концепцијама одржавања



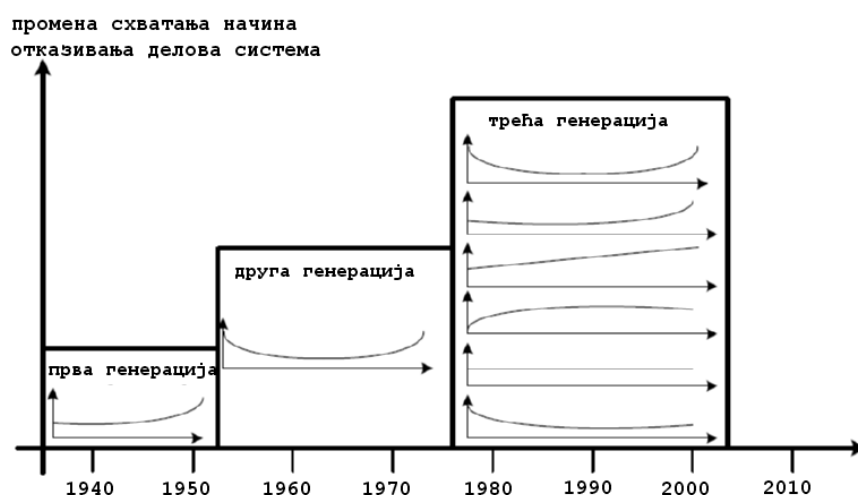
Слика 8.4. Предviđanje развоја одржавања у будућности<sup>118</sup>  
ES-Expert Systems, IMS-Intelligent Maintenance Systems, TAM-Total Automated Maintenance

Слика 27. Карактеристике система одржавања (Радовановић, 2011.)

Прва фаза обухвата период до другог светског рата у коме индустрија није била високо механизована, тако да откази опреме нису били значајни. У тој фази менаџери нису давали посебан приоритет превенцији отказа. У исто време опрема је била предимензионисана, врло поуздана и била је лака за оправљање. Није било потребе за систематским одржавањем, осим чишћења, подмазивања и опслуживања. Потреба за обученошћу одржавалаца је била знатно нижа него у каснијим фазама.

Друга фаза је започела драматичним променама у другом светском рату, порастом захтева за различитим добрима и наглим порастом механизације, односно све бројније и све сложеније машине изазивају све оштрије изражене појаве отказа. Рађа се идеја да се откази могу спречити превенцијом и јавља се концепт превентивног одржавања. У шездесетим се овај концепт огледа у примени превентивног одржавања у фиксним интервалима - одржавање по унапред утврђеном ресурсу: сати рада, пређени километри, циклуси функционисања, мото часови, итд. Трошкови одржавања расту рапидно у односу на остале експлоатационе трошкове, што доводи до развоја система планирања и управљања одржавањем.

Трећа фаза почиње средином 70-тих година и окарактерисана је порастом очекивања од одржавања и појавом нових истраживања и нових техника одржавања. Док се у претходној фази, од одржавања очекивало да снизи трошкове, повиси расположивост постројења и продужи животни век опреме, сада се од одржавања очекује да, поред ранијих очекивања, испуни и захтеве за повишењем сигурности опреме за руковооце том опремом, али и за околину, повишењем поузданости опреме, повишењем квалитета производа (снижавањем негативног утицаја неисправне – дотрајале опреме на квалитет производа) и повишењем ефективности инвестиција у одржавање (снижавањем трошкова, а повишење ефеката који су последица спровођења интервенција одржавања). Током ове фазе развоја одржавања, спроведена су многобројна истраживања, чији је резултат био сазнање да нису сви елементи подложни раније прихваћеном типу промене интензитета отказа, познатом као „крива каде”, него постоји шест различитих типова те промене, што је приказано на слици 28.



Слика 28. Промена схватања начина отказивања делова система

Из наведеног разматрања је очигледно да није могуће заменом „дотрајалог” дела елиминисати отказе. Стога RCM разматра три начина планирања и терминирања активности одржавања:

- Активности планиране / терминирани на основу стања елемента;
- Активности обнављања (поправљања) делова, које су планиране / терминирани на основу неког ресурса (време рада, пређени километри, тона обрађене сировине); и
- Активности замене делова планиране / терминирани на основу неког ресурса.

Последње две групе активности се разликују само по акцији која се спроводи, док се планирање врши на идентичан начин и ове активности су исте оне које су биле спровођене на основу предвиђања појаве отказа помоћу „дијаграма каде”. Новину представљају активности које спадају у прву групу. То су активности које су планиране на основу

стварног стања елемента. Уколико је елемент исправан, односно не показује знаке развијања процеса који ће довести до отказа, тај елемент се оставља да и даље врши своју функцију. Уколико се неком дијагностичком методом установи да је отпочео процес настанка отказа, могуће је „предвидети” колико времена ће проћи док тај елемент не откаже и планирати одговарајућу активност одржавања пре тог термина.

Шта треба урадити, ако не може да се пронађе погодна превентивна активност? Постоје случајеви када није могуће пронаћи одговарајућу активност која ће спречити појаву отказа и тада је потребно спровести економску анализу: да ли је економски исплативо пустити да елемент откаже и затим га заменити или је потребно урадити нешто да би отказ имао, што је могуће, блаже последице. RCM је дефинисао четири групе последица отказа и у зависности од групе којој припадају последице неког отказа, тражи се могућност деловања на неки отказ, односно његове узроке и последице. Уколико се ради о скривеном отказу, потребно је дефинисати активности откривања отказа (ове активности су широко у употреби у војсци, али се користе и у функцијама противпожарне заштите). Ако се ради о отказу са последицама по безбедност радника или околине, корисно је спроводити само оне активности које умањују или елиминишу последице отказа. Уколико таква активност не постоји, посматрани елемент је потребно поново пројектовати или је потребно променити цео процес у којем учествује тај елемент. Код отказа који имају последице само по питању производње, препоручљиво је вршити превентивне интервенције само када су укупни трошкови тих превентивних интервенција нижи од трошкова који настају отказом тог елемента. Идентична је ситуација и са отказима који немају директног утицаја на производњу. У оба случаја, ако није могуће пронаћи такву превентивну активност која ће снизити укупне трошкове, потребно је пустити да тај елемент откаже и након тога га мењати. Изузетак је ситуација када су трошкови који настају услед отказа изузетно високи и тада се препоручује спровођење реконструкције елемента или целог система.

#### г) Операциона истраживања у одржавању

У 60-тим годинама прошлог века је дошло до значајније примене метода и техника операционих истраживања (*Operations Research*) у одржавању. Основна подручја примене су била статистичко/трошковно моделовање, симулациони модели, теорија одлучивања, линеарно програмирање за планирање превентивних активности одржавања, затим примена системског мишљења за постављање модела релација између функције одржавања, производње и пројектовања. Међутим, ово последње је било врло сложено за математичко моделовање.

#### д) Поузданост и погодност за одржавање

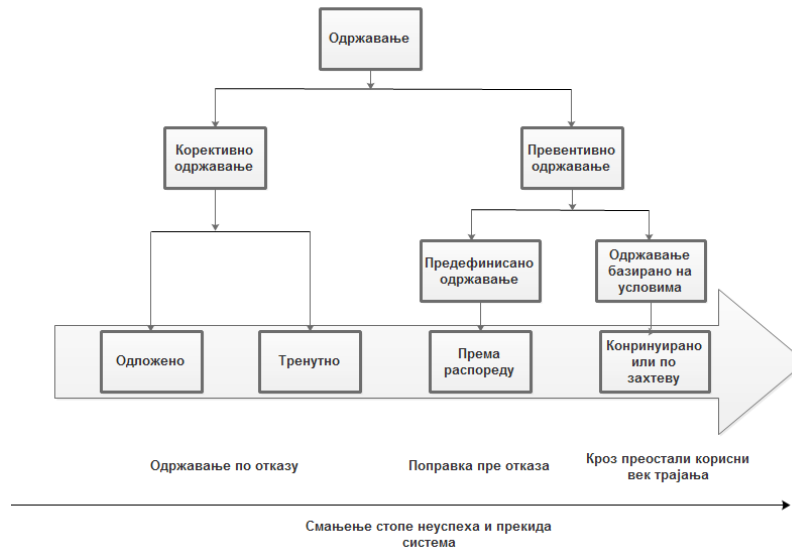
Почетком 60-тих година прошлог века, примена поузданости и погодности за одржавање је била усмерена на свемирску и нуклеарну индустрију. Неколико година касније је у Великој Британији формиран SRS (*Systems Reliability Service*), који је имао за циљ продубљивање ових истраживања и њихову примену на остале индустрије.

### 3.4.5. Период од 1970. до данас

#### а) Одржавање по стању (*Condition Based Maintenance - CBM*)

Овај концепт је дефинисан као „...извођење регуларних упоредних мерења погодних параметара који утичу на промену услова понашања компоненте, подсистема или система. Показатељ промене може бити екстраполиран и тада указује на могуће будуће трендове понашања...“. У општем разврставању одржавања према томе када се акције одржавања врше, место одржавања по стању је приказано на слици 29.





Слика 29. Одржавање по стању као одржавање базирано на условима (Saxena, 2007.)

Циљеви политике надзора стања су:

- Минимизација ризика појаве неочекиваних (изненадних) отказа;
- Предвиђање већине активности одржавања у одређеном времену у циљу одржавања задатог нивоа поузданости; и
- Дијагностификовање стања посматране компоненте, подскопа или склопа и прописивање активности одржавања које треба спровести да би се опрема задржала на задатом (потребном) нивоу поузданости.

#### б) Теротехнологија

Седамдесетих година, по налогу Британског министарства за технологију, израђене су студије чији је основни циљ био анализа функције одржавања у индустрији Велике Британије. На основу резултата тих студија, Руководећи Комитет (*Steering Committee –UK National Organization for Maintenance*) је публикувао закључке (1972. године) којима је утемељио принципе *теротехнологије*. Основне појмове, карактеристике и поступак изградње детаљно је обрађен и британским националним стандардом (BS 3811 и др.). Детаљнија разрада концепта теротехнологије (*Terotechnology - TT*) је спроведена од 1972. до 1975. године.

Теротехнологија, односно, технологија одржавања највећим обимом се бави проблемима одржавања техничких система, а њени основни принципи су најшире прихваћени првенствено у индустрији развијених земаља.

Такође, према BS 3811 (*British Standards*), то је комбинација руководећих, финансијских, инжењерских и других активности, примењених на физичка добра ради постизања економичности трошкова њиховог радног века, односно животног циклуса, при чему се узима у обзир поузданост и могућност одржавања машина, реконструкција и отпис.

Одржавање се дефинише као комбинација свих техничких и одговарајућих управљачких поступака, који имају за циљ да се елемент задржи или врати у стање у коме може да врши пројектовану функцију.

#### в) Интегрална логистичка подршка (*Integral Logistic Support - ILS*)

Концепт ILS је уско повезан са концептом теротехнологије, а утемељивач је др Benjamin Blanchard.

Интегрална логистичка подршка (ИЛП) је управљачка функција која треба да обезбеди почетно планирање, постављање и управљање са циљем да се крајњем кориснику обезбеди средство за рад које ће бити технички и економски подржано (потпомогнуто и обезбеђено свим ресурсима) у току одређеног животног циклуса.

ИЛП је у уској вези са трошковима животног циклуса производа (средства) који представљају укупне трошкове производа (ресурса) у свим животним фазама (слика 30).

Елементи ИЛП су:

- Опрема (алати, прибори);
- Резервни делови;
- Људски ресурси и обука;
- Технички подаци и документација;
- Објекти и инфраструктура;
- Транспорт и руковање материјалом;
- Планирање одржавања.

#### г) Тотално продуктивно одржавање (*Total Productive Maintenance - TPM*)

Сама реч „тотално“ у називу ове концепције сугерише свеобухватност, што и јесте основна њена карактеристика. Концепција посматра производни систем као целину, а такође посматра технолошке системе кроз цео њихов животно век и, као циљ поставља оптимизацију трошкова и искоришћења технолошких система на нивоу целог животног века. Концепт TPM је развијен од стране Seiichi Nakajime (тада је био копредседник Јапанског института за одржавање постројења) током 70-тих и 80-тих година у Јапану. Концепт се и даље развија (Kumar and Kapil, 2013.).

#### д) Одржавање у СИМ окружењу (*Computer Integrated Manufacturing - CIM*)

Концепт одржавања у СИМ окружењу је развијен озбиљније током 90-тих година прошлог века. Његов даљи развој се тек очекује. Са развојем технолошких (обрадних) система се, дакле, развијала теорија и пракса одржавања, односно концепти одржавања.

#### ђ) Светска класа одржавања (*WCMM – World Class Maintenance Management*)

Теру Wireman, аутор књиге (*World Class Maintenance Management*) која је промовисала овај приступ управљању одржавањем, је дефинисао главне области функције одржавања, као и принципе које је неопходно поштовати уколико се тежи успешном одржавању. Ово има за последицу да овај концепт превазилази границе једног концепта и приближава се филозофији успешног одржавања, која, захваљујући дефинисаним принципима, нуди оквирна решења и за проблеме који ће тек да се појаве.

#### е) Предиктивно одржавање (*Predictive Maintenance- PdM*)

Термин предиктивно одржавање је новијег датума, а суштина предиктивног одржавања је праћење стања делова опреме помоћу дијагностичких метода, односно, СВМ - *Condition Based Maintenance*.

ж) Управљање одржавањем усмерено ка профиту целог предузећа (*Profit Centered Maintenance –PCM*)

Дуго је одржавање посматрано само као функција предузећа која троши новац, а тек недавно се појавило мишљење да је циљ одржавања идентичан циљу производње: максимални профит предузећа. Стога се од одржавања очекује да омогући производњи да ради са исправним машинама, машинама које омогућују производњу оном тачношћу за коју су и пројектоване, машинама које ће имати минимум застоја, које ће имати ниске трошкове експлоатације и одржавања итд.

з) Одржавање оријентисано на пословне резултате (*Business Centered Maintenance –BCM*)

*Business Centered Maintenance* је концепција одржавања која је настала крајем XX века. Како је данас тешко развити неки револуционарно нов поступак, и овај концепт користи неке познате технике и концепције (нпр. RCM), али му је полазна основа специфична. Полазну тачку концепције представљају циљеви које је неко предузеће дефинисало. Дакле, најзад се прецизно дефинише да и предузеће и одржавање имају исте циљеве, те се тако у самом почетку елиминише сукоб на релацији производња – одржавање (одржавање је заинтересовано да заустави машину да би спровело неку интервенцију, а производња захтева да та машина настави са радом, како би био остварен план производње и производња тада оптужује одржавање да ради против интереса предузећа).

и) Проактивно одржавање (*Proactive Maintenance -PaM*)

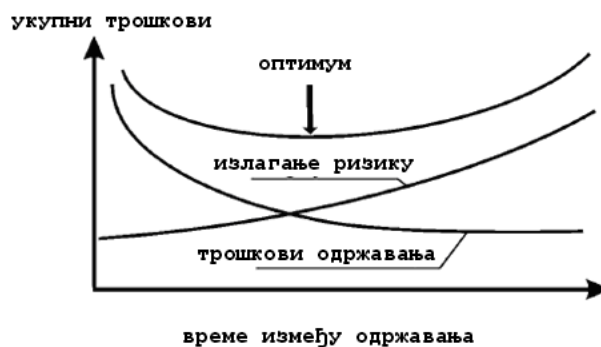
Проактивно одржавање је најновији тренд у одржавању, чије је зачетке могуће уочити почетком последње декаде XX века. Суштина овог приступа одржавању је спровођење анализе узрока настанка отказа све до проналажења основног узрока, који представља неку појаву за коју је немогуће пронаћи узрок на нижем нивоу декомпозиције. Након проналажења основног узрока отказа, следи поступак дефинисања активности која ће елиминисати настајање уочене појаве и на тај начин елиминисати појаву отказа.

Концепт проактивног одржавања се релативно скоро појавио у индустријској пракси. Проактивни приступ проблему одржавања техничких система базиран је на сталном праћењу и контроли основних узрочника отказа и активностима на њиховом елиминисању или значајном смањењу негативног дејства.

Проактивни концепт не прихвата отказ као нормално и могуће стање, већ се спроводи низ адекватних мера да до отказа уопште не дође. Једноставно речено тежи се да сваки технички систем „води здрав живот“ и да му се на тај начин максимално продужи век експлоатације. Основни принцип у проактивном одржавању је идентификација и елиминација узрочника отказа.

Искуство је показало да и поред великог броја могућих узрочника само је неколико њих одговорно за највећи део проблема (прихваћено је да је само 10% свих могућих узрочника отказа одговорно за више од 90% проблема). Код овакве стратегије одржавања је скоро у потпуности елиминисано угрожавање безбедности и здравља радника као и радне околине, односно обезбеђен је максимални ефекат у погледу квалитета радног места и радне околине.

Код дефинисања стратегије одржавања увек треба водити рачуна о оптималним трошковима, узимајући при томе у обзир и ризик. Тако је на пример оптимални интервал за спровођење превентивних активности одржавања онај при коме су трошкови одржавања минимални (слика 30).



Слика 30. Оптимизација трошкова одржавања

Укупни трошкови представљају суму трошкова одржавања и трошкова услед настанка опасног догађаја због присутног ризика. Директни трошкови одржавања се смањују са повећањем временског интервала између превентивних активности, али се истовремено повећава ризик настанка догађаја са високом материјалном штетом и негативним утицајем на здравље и безбедност људи као и радну околину.

На данашњем нивоу развоја, дефинисање стратегије одржавања сложених техничких система се фокусира на развој и имплементацију савремених технологија које треба да омогуће прогнозу преосталог расположивог радног ресурса и припадајућег нивоа ризика. Полазни основ за ово је дефинисање критичних структурних компоненти и механизма који доводи до њихове деградације.

Ово подразумева креирање временског сценарија код којег се предвиђа понашање структурних компонената на основу претходног квантифицирања релевантних нерегуларности које угрожавају обављање функције техничког система и негативно се манифестују на квалитет радног места и радне околине. Менаџери у одржавању на садашњем нивоу развоја технике и технологије могу да доносе одлуке на бази дефинисаног степена деградације техничког система и у највећем броју случајева да веома тачно процењују преостали расположиви ресурс (прогнозирање). Полаз за ово је идентификација и разумевање нерегуларности у техничком систему као индикатора који служе за мапирање потенцијалних оштећења у процесу деградације компонената техничких система. При томе механизам деградације резултира физичким оштећењем а степен деградације је у корелацији са интензитетом нерегуларности.

У том смислу, дефинисана и имплементирана стратегија одржавања постаје један од кључних фактора у процесу увођења интегрисаног система управљања квалитетом обзиром на јасно издиференциран утицај на све виталне сегменте пословања, укључујући и безбедност и заштиту здравља радника и заштиту животне средине. Полазећи од искустава развијених земаља, као сет најефикаснијих превентивних и проактивних мера усмерених ка раном уочавању симптома отказа, односно елиминисању њихових узрочника, намећу се различите методе техничке дијагностике и примена савремених дијагностичких инструмената и процедура у свакодневној индустријској пракси. Осим директног утицаја на подизање ефикасности, расположивости и готовости техничких система и смањивању трошкова одржавања, њихова примена доводи и до значајног смањења великог броја фактора ризика по безбедност и здравље запослених, односно до подизања нивоа квалитета на радном месту и у радној околини.

ј) Одржавање са минимумом потребних ресурса (*LM – Lean Maintenance*)

Циљ комплетне *Lean* филозофије (примењује се и у производњи, пружању услуга) је остваривати све боље и боље резултате са смањењем коришћених ресурса. Тако се од одржавања захтева да детаљно проучи све своје активности, производни процес и средства

за производњу, како би било у стању да смањи све своје непотребне трошкове и да унапреди резултате свог рада (Mostafa et al., 2015.).

Термин „Lean” се преводи као мршав, танак, економичан, сиромашан и слично. Ово значи да се термин „Lean Maintenance” може превести као „танко одржавање”, „мршаво одржавање”, „економично одржавање”. Ни један од наведених термина не одсликава суштину концепције, тако да је боље користити термини „одржавање са минимумом ресурса“ или оригинални енглески назив.

Одржавање са минимумом ресурса је очекивана степенница развоја одржавања у условима производње са минимумом ресурса (*Lean Manufacturing – Toyota Way of Production*), која представља унапређење *Just-In-Time* концепта производње. Основни циљ LM је готово потпуно елиминисање отказа (приближно 100% време у раду), уз снижавање трошкова одржавања за око 50%, а понекад је тај проценат и већи. Ово се постиже константним надзором производних погона и анализом извршених мерења и прикупљених података. На основу овог се пројектују поступци који елиминишу (заустављају) иницијалну појаву који води ка отказу. Све ово постаје много јасније ако се погледа једна од многобројних дефиниција LM (дефиницију је дао Ricky Smith из *Life Cycle Engineering, Charleston, Sacramento, USA*):

„LM представља проактивне активности одржавања, које обухватају активности које су планиране и терминирани у складу са TPM, користећи стратегије одржавања развијене на основама RCM, које спроводе тимови аутономног одржавања заједно са специјалистима различитих области одржавања, на основу самоиницијативно дефинисаних потреба и циљева, уз употребу 5S процеса, недељних „Kaizen“ акција за унапређење, користећи CMMS (*Computerized Maintenance Management System* – систем рачунаром подржаног управљања одржавањем) или EAM (*Enterprise Asset Management* – рачунаром подржан систем за управљање опремом током целог њеног животног века, на нивоу целог предузећа). Ове активности су подржане дистрибуираним складиштем резервних делова који обезбеђују резервне делове у складу са *Just-In-Time* концептом, а који управљају резервним деловима уз помоћ тима инжењера који су експерти у области одржавања и поузданости и оспособљени за RCFA (*Root Cause Failure Analysis* – анализа основног узрока отказа), анализу отказаних делова, анализу ефикасности и ефикасности поступака одржавања, анализу предиктивног одржавања и анализу и одређивање тренда резултата добијених путем CBM (*Condition Based Maintenance* – одржавање по стању).“

LM сврстава све отказе у три групе:

- Оперативни откази (откази који настају услед грешке оператера на машини или услед погрешно дефинисане технологије производње);
- Откази индуковани активностима одржавања (погрешно дефинисане превентивне интервенције, погрешно спроведене интервенције); и
- Откази услед хроничних проблема у функционисању машина (трење, хабање, замор материјала, односно откази условљени топлотом, вибрацијама, оксидацијом, пробојем изолације, корозија, продор нечистоће у било коју радну течност, продор воде, киселине или агресивног средства за чишћење).

Из ове поделе је очигледно да се одржавање мора сконцентрисати на активности које елиминишу сваку од наведених група отказа, а то су: обука производних радника, обука и опремање извршилаца у одржавању и анализа средстава за рад са циљем елиминисања хроничних проблема.

У пракси је чест пример да се користи DMAIC модел из 6σ прилаза. DMAIC је скраћеница настала од енглеских речи Define (дефиниши проблем), Measure (измери вредност), Analyse (анализирај све расположиве податке), Improve (имплементирај/унапреди поступке за

елиминисање проблема) и Control (контролиши спровођење имплементираног решења). Применом овог модела у пракси, остварено је елиминисање од 70 до 92% отказа.

Комплетна Lean филозофија значајну пажњу посвећује трошковима / утрошцима / отказу (ово је у Lean филозофији дефинисано као све оно што не додаје вредност производу или услузи), тако да је један од циљева LM и снижавање / елиминисање трошкова (ово се не чини на рачун квалитета интервенција одржавања или на рачун интензитета отказа).

Карактеристика Lean приступа је да је тешко идентификовати неки „револуционарни“ корак који је заслужан за успех овог приступа. Приступ углавном обухвата поступке и активности који су познати у теорији, односно у неким другим приступима (пример TPM указује да је могуће и у потпуности преузети неки концепт), тако да велики успех овог приступа пре треба приписати доследности примене свих елемената приступа и синергијском деловању тих елемената, него неком конкретном елементу. Али, и поред ове констатације, могуће је идентификовати елементе који представљају језгро овог приступа.

Сама чињеница да није могуће идентификовати конкретне елементе који су заслужни за успех Lean приступа, говори да је најважнији елемент нешто што је неопипљиво, нешто на чега је јако тешко уперити прст, дакле нешто невидљиво (или тешко видљиво), нешто што представља „везивно ткиво“ приступа, а то је *култура*. Култура је онај елемент који обједињује све активности Lean приступа у складну целину и који је заслужан за чињеницу да сваки радник даје свој максимум (и у вршењу свог посла и у тражењу могућих унапређења у свим областима са којима долази у додир).

к) *e-maintenance*

Израз *e-maintenance* се јавља у раним 2000-тим и сада је уобичајен термин у литератури која се бави одржавањем. У индустријској пракси, данас, концепт *e-maintenance* подразумева интеграцију информационих и комуникационих технологија са стратегијом и/или планом одржавања. Неки аутори (Muller et al., 2008.) сматрају да је проистекао из иновативног начина подршке производњи (*e-manufacturing, e-business*).

*e-maintenance* је мултидисциплинарно подручје (Kajko-Mattsson et al., 2010.) које обухвата одржавање и информационе и комуникационе технологије, са задатком да одржавање буде интегрални део одређеног пословног или другог процеса и да одржавање доприноси остварењу основног циља организације. *e-maintenance* се дефинише и као нови концепт одржавања који користи нове технологије за подршку одржавању.

*e-maintenance* решења укључују различите сервисе као што су *e-Monitoring, e-Diagnosis* и *e-Prognosis* (Kumar, 2010.).

Концепт *e-maintenance* у пракси има више значења и најчешће су то:

- *E-maintenance* као стратегија одржавања где се задаци одржавања организују применом ИТ алата и где се користе подаци о стању опреме у реалном времену;
- *E-maintenance* као план одржавања који користи технике аутоматске обраде података у примени неке од „признатих“ концепција одржавања (*CBM, Proactive Maintenance, Collaborative Maintenance, Remote Maintenance and Service Support*);
- *E-maintenance* као тип одржавања у коме се традиционални приступи одржавању замењују предиктивним и проактивним приступом;
- *E-maintenance* као подршка традиционалном одржавању.

Сматра се да без обзира како се примени, *e-maintenance* олакшава процес одржавања, чак и када се користи само за управљање информацијама о одржавању.

#### л) Opportunistic maintenance (OM)

Према (Kamaruddin, 2014.) *OM* је приступ одржавању који комбинује корективно и превентивно одржавање. Одржавање се врши када нека компонента откаже, и док систем није у раду због поправке, пружа се прилика да се изврше превентивни прегледи или замене делова, по унапред припремљеном плану, а све у циљу да се превентивно делује на отказе. Концепт је први пут примењен 1963. године. Све компоненте у систему имају дефинисане интервале превентивног одржавања, али се акције превентивног одржавања не предузимају док се нека компонента не поквари. Из овога је и јасно да се овакав приступ одржавању може примењивати само у одређеним областима одржавања. Циљ овог приступа је да скрати време одржавања и повећа поузданост система. Описује се и као систематичан метод за прикупљање података о техничком систему, препланирање радова у одржавању и израду инструкција за одржавање и деловање у смислу одржавања када се укаже шанса, тј. онда када одржавање мора да се предузме (отказ). Општи циљ приступа је да се постигне оптимални систем одржавања према два супротстављена критеријума: поузданост и цена одржавања.

Према (Koouchaki et al., 2012.), *OM* приступ одржавању је приступ оријентисан на систем а не на поједину компоненту. Осим поменутог циља, настоји се и повећање ефикасности ресурса одржавања. Иако настоји да смањи цену одржавања, приступ утиче на повећање расположивости опреме. Ако се одржавање предузме због квара једне компоненте, предузимањем акција одржавања и на другим компонентама (технолошки, функционално повезаним) позитивно се утиче на расположивост система.

#### љ) Operator-Based Maintenance (OBM)

Оператер или корисник може да буде један од најважнијих чланова тима за одржавање. Добро обавештени, обучени и одговорни оператери ће осигурати да опрема функционише прописно. Оператори су прва линија одбране од непланираних застоја у техничким системима. *OBM* претпоставља да оператери који су у свакодневном контакту са средствима могу користити своје знање и вештине како би предвидели и спречили кварове и друге губитке. Главни циљ програма одржавања је „опремање“ оператера са следећим вештинама везаним за средства:

- Способност откривања неправилности;
- Способност исправљања мањих неправилности и функције грешака, ако је могуће;
- Способност постављања оптималних услова за рад средства; и
- Способност одржавања оптималних стања опреме.

У свом раду оператори користе чулне алате који им помажу у идентификацију проблематичних процеса и имају могућност да отклоне пропусте или да добију помоћ да се реше проблеми пре него што се претворе у велике пропусте. То су:

- Осматрање било каквих неправилности;
- Појава неуобичајене буке, вибрација, цурења;
- Опажање велике температуре или хладних површина;
- Уочавање необичних мириса или мириса паљевине.

## 4. Одржавање усмерено на поузданост

### 4.1. Осврт на теорију поузданости

*Поузданост* (Покорни, 2011.) се најчешће дефинише као вероватноћа да ће неки производ (технички систем) извршавати захтеване функције у одређеном периоду времена уз дефинисане радне услове. Другачије речено, то је вероватноћа да ће тренутак отказа  $T$  настати после посматраног времена  $t$ . Може се дефинисати и преко других величина, осим времена. На пример, поузданост у цивилном ваздухопловству (*Despatch Reliability*) се дефинише као проценат летова који нису отказани или није дошло до кашњења због техничких проблема. Поузданост је сложена карактеристика и представља показатељ квалитета, а као показатељ најчешће се даје средње време између отказа (*Mean Time between Failure - MTBF*).

Одржавање се карактерише и *погодношћу одржавања*, која се дефинише као вероватноћа да ће пројектовани поступци одржавања бити изведени у задатом времену и задатим условима одржавања, а као показатељ се често даје средње време оправке (*Mean Time to Repair - MTTR*).

*Расположивост (готовост)* се дефинише као вероватноћа да ће систем у било којем тренутку времена бити расположив, односно да ће бити у стању да ради или да се укључи у рад под условом да се користи под дефинисаним условима. За савремене системе комуникација, у оптицају је захтев за расположивошћу познат као „пет деветки” (0,99999), а војни стандарди најчешће захтевају расположивост техничких система у границама 0,92-0,96.

Очигледно, већа расположивост се може постићи већим  $MTBF$  (већом поузданошћу) или мањим  $MTTR$ , или комбинацијом једног и другог. Са становишта корисника важна је расположивост (оперативна) и може се израчунати преко односа укупног времена за које је производ био исправан за употребу и укупног времена у току кога је производ био неисправан.

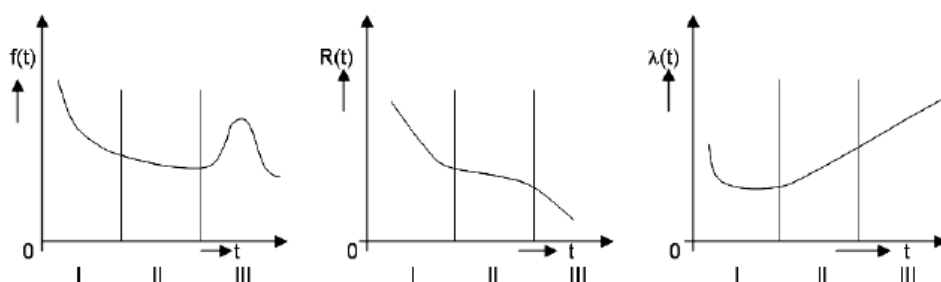
За прорачун поузданости компоненти и система, у току пројектовања, као и анализу и обраду података о поузданости, односно отказима (кваровима) у току употребе, развијене су многе методе. Разликују се методе за неоправљиве и оправљиве елементе и системе. Елементи и системи се најчешће карактеришу тзв. интензитетом отказа ( $\lambda$  карактеристиком).

Основни проблеми у поузданости опреме и њених саставних делова (на пример, успостављање законитости о појави отказа и евалуација вредности показатеља поузданости) могу се решавати на два различита начина:

- Применом искључиво статистичке теорије у обради отказа; и
- Истраживањем и анализом физичких закона који карактеришу техничко стање елемената и система.



У стриктној примени статистичког приступа, који је још увек у великој употреби, откази се третирају као апстрактни случајни догађаји, а стање елемента се, најчешће, своди на само два стања: исправан и отказао. Метод одређивања поузданости елемента или система се онда своди на два корака. Прво, на основу испитивања или праћења рада у употреби, формира се статистика отказа елемента. Затим се применом теорије вероватноће одређује теоријска функција густине расподеле отказа која јој најбоље одговара (експоненцијална, нормална, Вејбулова, итд.) и она се користи у моделу поузданости, који затим служи за квантитативно одређивање показатеља поузданости, на пример, вероватноће исправног рада (слика 31).



Слика 3.3. - Најчешће законитости  $f(t)$ ,  $R(t)$  и  $\lambda(t)$ <sup>78</sup>

Слика 31. Општа законитост односа функције густине расподеле отказа, поузданости и интензитета отказа (Милошевић, 2015.)

Када је потребно уградити захтевани ниво поузданости у уређај или систем који се пројектује, обично се полази од структурног модела поузданости, а улазни подаци у тај модел су интензитети отказа елемената, који се могу наћи у стандардизованим приручницима као што је, на пример, MIL-HDBK-217 (таблице поузданости за електричну и електронску опрему), или добити од произвођача, што је ређи случај. Искуство многих аутора је да су управо ови подаци највећи проблем. Постоји више метода прорачуна поузданости. Прорачунату (прогностичку) поузданост потребно је проверити у лабораторији.

У пракси се прорачун, а и пријемна испитивања поузданости, најчешће свде на примену експоненцијалне расподеле времена рада до отказа, која у основи има претпоставку да је интензитет отказа константан, односно не зависи од времена, а што често није реално. Неке организације (војска), готово увек, поузданост средстава проверавају и интензивним и сложеним испитивањима, док се друге ослањају на тзв. гаранције произвођача. Управо особина експоненцијалне расподеле да интензитет отказа не зависи од времена чини је једноставном за примену, па је то и разлог њене честе примене, иако је то узрок и недостатака. Једноставност примене се састоји у томе да је средње време до отказа (*Mean Time to Failure - MTTF*) једнако реципрочној вредности интензитета отказа. Осим тога, ако се претпостави тзв. редни модел поузданости, а то се често у пракси ради, поготово код орјентационог прорачуна поузданости, укупан интензитет отказа је једноставно збир интензитета отказа појединих елемената у тој редној вези.

Даље, проблем је у томе, што код експоненцијалне расподеле поузданост уређаја, у неком наредном интервалу времена, не зависи од претходног времена рада тог уређаја, што такође није оправдано, јер код многих саставних елемената долази до изражаја старење и трошење, а то се експоненцијалном расподелом не узима у обзир.

Подаци који се узимају из стандардизованих приручника, као што је MIL-HDBK-217 и други, који се највише и користе код прорачуна поузданости, засновани су на подацима добијеним статистичком обрадом отказа који су се десили на уређајима који су, или су били,

у употреби. Ако се у пројектовању новог уређаја користе нови материјали, поставља се логично питање да ли такви подаци одговарају тој новој ситуацији, односно да ли се будућност може прогнозировать само на основу прошлости.

Иако су за прорачун поузданости делова и склопова развијене бројне методе (FTA, FMESA, Марковљеви модели, итд.) оне су за инжењерску примену доста компликоване. Осим тога, код сложених система (са великим бројем елемената и са више стања), поготово ако се ради о оправљивим системима, детерминистички приступ није у стању да даје решења (број стања па и број једначина, на пример Марковљевим моделима) постаје веома велик, па се прибегава примени симулационих метода. Због тога, и поред озбиљних критика, експоненцијална расподела се и даље користи, јер нема погодног алтернативног инжењерског модела за решавање основних проблема поузданости, укључујући и прорачун поузданости система.

Све методе, осим физике отказа, заснивају се мање или више на статистичким подацима добијеним из експлоатације елемената или из испитивања у лабораторији (класична поузданост). Статистички приступ процене поузданости не одговара новим високо поузданим елементима и уређајима или елементима и уређајима који се раде у једном примерку или врло малом броју примерака, односно уопште у случају када су подаци о статистици отказа непотпуни или их нема. Неадекватност овог чисто статистичког концепта поузданости уочена је још у току развоја теорије поузданости као научне дисциплине.

Приступ утврђивању поузданости производа на бази физике отказа заснован је на чињеници да су суштина начина како долази до отказа односно механизма отказа, основни механички, електрични, термички и хемијски процеси. Разумевањем основних механизма отказа, могу се идентификовати потенцијални проблеми у новим и постојећим технологијама и решити пре него стварно постану проблем.

Очигледно да је одржавање у директној вези са поузданошћу и расположивошћу, односно са кретањем поузданости у току животног века уређаја односно система. Данашњи свет је све зависнији од поузданог рада техничких система, било државних, пословних или било којих других. Ниска поузданост и расположивост доводе до угрожавања безбедности, незадовољства корисника и до великих губитака, како због тога што се не испоручује услуга, тако и због већих трошкова одржавања, итд. Поузданост се више не може рачунати само на основу поузданости опреме, већ се мора узети у обзир и поузданост софтвера (јер практично нема или неће бити система у коме није садржан и софтвер), али и поузданост човека, зависно од природе и намене система, посебно код одређивања поузданости извршења задатка (мисије) система у којима је човек део система, или се активира у случају отказа неке од функција система. Недостаци прорачуна поузданости уз претежну примену експоненцијалне расподеле, наметале су потребу усавршавања постојећих метода али и тражење нових приступа. Тако последњих двадесетак година, због недостатака класичног статистичког приступа у одређивању поузданости, расте интерес за тзв. „физику отказа“, која се заснива на проучавању физичко-механичко-хемијских карактеристика и одређених физичких параметара елемената и уређаја, који карактеришу њихово стање, и која се успешно користи. Брз развој савремених технологија указује да су изазови који се постављају пред стручњаке које се баве поузданошћу и даље велики, посебно када се ради о системима са све заступљенијим софтвером. Поузданост и расположивост система су два фактора која увек треба да се узму у обзир, заједно са ценом, перформансама, временом развоја, ризиком отказа и осталим факторима.

## 4.2. Савремен приступ концепту одржавања према поузданости

### 4.2.1. Одржавање према поузданости (RCM, Reliability Centered Maintenance)

У периоду који предстоји (следеће декаде) трошкови производње и радне снаге ће према очекивањима и прогнозама расти, док се истовремено очекује смањење капиталних инвестиција. Индустриски лидери траже начине да у сусрету са тим изазовима побољшају оперативну ефикасност и поузданост. Неки од изазова су елиминисање трошкова корективног одржавања, смањење трошкова персонала за одржавање и могућих штетних ефеката по околину. Идеја је да се изврши приближење односно препознају најбоља пракса и ефикасније методологије за постизање циљева одржавања. Лидерство на овом плану имају авио компаније (произвођачи) које за основни циљ имају тотално напуштање непланског одржавања и искључиву примену планског одржавања са циљем побољшања ефикасности по стопи од 20% на годишњем нивоу. Ова вредност од 20% показује велике економске бенефите које доноси добар плански, на поузданости оријентисан (*RCM - Reliability Centered Maintenance*) програм одржавања (Wright, 2010.).

Одржавање оријентисано ка поузданости је структурирани, аналитички приступ одржавању са циљем да минимизује или елиминира неочекиване (случајне, изненадне) отказе кроз непрестану анализу, изврши избор и побољшање материјала (сиrovина, репроматеријала, резервних делова, радних флуида) и радног процеса у смислу његовог сталног прилагођавања и подешавања, креира програме оспособљавања запослених, дисциплиноване инспекције и планско (*Scheduled*) одржавање.

Програм RCM се заснива на анализи последица отказа (*Failure Mode Effects*) и анализи критичности специфичних система и подсистема. Такође се заснива на анализи прикупљених података ради установљавања трендова и имплементацији програма одржавања који омогућава промене ради постизања (изградње) високог степена поузданости система. Прописно имплементиран RCM обезбеђује ефективну контролу оперативних трошкова и повећава оперативну спремност. RCM се препоручује у смислу примене још у фази развоја производа, али се може применити и у каснијим фазама животног циклуса техничког система.

### 4.2.2. Развој (*Background*)

Експлоатација класичног RCM почиње са првим детаљно документованим RCM процесом у студији познатој као „Nowlan and Hear Report“.

„Nowlan and Hear Report“ је резултат студије припремљене за комерцијалну авио индустрију у раним шездесетим годинама двадесетог века, за време развоја програма превентивног одржавања за нови авион Boeing 747, по захтеву Америчке федералне агенције за ваздушни саобраћај (FAA). Почетне анализе су показале да ће економски трошкови таквог програма бити врло високи, па су спроведена и додатна истраживања у циљу валидације карактеристика отказа авионских компоненти.

Таква студија је показала да само 11% компоненти има структуру отказа која подржава плански ремонт или замену делова, док 89% компоненти уопште нема тренд отказа (потпуно су случајни) који подржава планско одржавање (замену), што је приказано на слици 28.

Како је планска замена делова примарна карактеристика планског одржавања у овом случају, за 89% делова је био потребан нов начин приступа проблему одржавања. Новоразвијене технологије праћења стања (*Condition Monitoring*) обезбедиле су предвиђање

отказа компоненти. Даљи допринос истраживањима је иницирало Америчко министарство одбране за потребе одржавања војне авијације, на основу чега је развијен процес под називом „Maintenance Steering Group Logic - MSG“. У основи су дате препоруке за диверзификацију процеса одржавања према специфичним захтевима односно карактеристикама техничких система, где се нарочито издвајају комерцијална авијација, војна авијација и комерцијална индустрија. Комерцијална индустрија такође развија стратегије одржавања у више праваца, с обзиром на различитости процеса (и техничких система).

Удружење SAE (*Society of Automotive Engineers*) је дефинисало посебан стандард JA 1011, који одређује какав процес треба да буде да би се сматрао правим RCM.

### 4.2.3. Задатак RCM

RCM идентификује политику одржавања која се мора имплементирати са циљем да се допринесе функцији система (техничког система). То значи да се RCM фокусира на функцију система, а не само на одржавање опреме (техничког система).

Следећи пример илуструје разлику између одржавања опреме и очувања функције. Ради се о простом техничком систему чији је задатак да одржава одређени ниво течног флуида у суду (резервоару). Нека се циљ постиже пумпањем флуида из резервоара А у резервоар Б. Традиционална анализа одржавања се фокусира на одржање пумпе у раду (исправно стање). Та анализа може садржати и неке напредне технике као што је анализа вибрација или нека друга предиктивна техника. Алтернатива томе, прави RCM концепт се фокусира на стање резервоара Б у смислу попуњености каква је дефинисана по захтеву. Један од одговора (решења) је уградња резервне пумпе, чиме се постиже функција система чак и када откаже главна пумпа. Ако је резервоар А изнад резервоара Б, може се уградити додатни вентил који се отвори у случају да пумпа откаже, чиме се постиже и даље пуњење резервоара Б док се пумпа не поправи. Може се одредити и за могућност (у пракси се не користи често овакав приступ) да се ниво флуида у резервоару Б држи изнад потребног, па се и на тај начин обезбеђује потребна количина флуида у резервоару Б док се пумпа не поправи (замени).

Кључна је стратегија која ће се применити, односно може се применити више стратегија истовремено. Питање је наравно која од њих је најбоља. Одговор зависи од појединачних захтева, тј. чему такав систем треба да служи, а RCM анализа је дизајнирана да обезбеди потребан одговор за сваки оперативни контекст употребе опреме. RCM разматра планско одржавање (по времену, радним циклусима и сл.), промене дизајна производа (техничког система), непрекидну обуку корисника и персонала за одржавање, оперативне промене, рад до отказа (не одржавати до отказа) и друге промене као опције очувања функције опреме. Свака опција се вреднује и оцењује у смислу техничко-технолошке изводљивости и њеног утицаја на безбедност, окружење (екологија), оперативности (функцију) и цену.

RCM има за основу планско одржавање базирано на карактеристикама појављивања отказа компоненти система у њиховом оперативном контексту (значају). Планско одржавање има много форми и укључује визуелне инспекције (прегледе), софистициране технике инспекције (вибродиагностика, термална анализа и др.) или плански ремонт (и генерални ремонт опреме). RCM обезбеђује аналитичке технологије за одређивање већине ових алата и њихову оптималну употребу. Види се јасно да RCM концепт препознаје и технике „поправи кад откаже“ или „ради до отказа“ као прихватљиву технику, када је она ефективна са становишта коштања или без утицаја на безбедност или окружење.

Непосредна сарадња и заједничке анализе корисника опреме и персонала који се бави одржавањем су врло корисне и резултују побољшањима употребе и одржавања.

#### 4.2.4. RCM процес и кораци имплементације

У првом кораку је потребно дефинисати листу (списак, регистар) опреме, са потребним детаљима о најважнијим подсистемима опреме. Таква листа обезбеђује одређивање тежишта или приоритета који ће се анализирати. Затим се одређује функционална хијерархија техничких система (опреме, постројења) појединачно за све различите системе, у смислу која је њихова примарна функција. У томе је најважније идентификовати ток материјала, енергије, контролних сигнала и команди. Корисно је применити технику блок дијаграма. Одређивање ограничења је следећи корак. Тиме се боље одређују критеријуми и приоритети за анализу, односно идентификују подсистеми који се обавезно морају узети у обзир, а који не. Наредни корак је идентификовати сопствене људске ресурсе који могу да спроведу претходну (такву) анализу. Препоручује се формирање тимова експерата (за одржавање) и тимова састављених од корисника (због њихових очекивања) и непосредних извршиоца одржавања. Таква комбинација обезбеђује узимање у обзир свих релевантних чињеница о систему. Ангажовање сарадника изван организације или стручњака друге врсте (нпр. за заштиту, медицину, специјалисти за неинвазионе технике дијагностике) врши се по процени ако је потребно.

За примену RCM концепта и технологије мора се извршити обука и техничких експерата у организацији и оперативних руководиоца (менаџера). За меродавну анализу, у циљу примене RCM концепта, морају се прикупити веродостојни подаци и записи о оправкама, утрошку резервних делова, радног времена, структури ангажоване радне снаге, трошковима. Сви савремени концепти одржавања високо цене, осим статистичких података, искуство механичара, а подаци о томе се прикупљају и сређују путем погодних анкета.

#### 4.2.5. Анализа базирана на приоритетима

RCM анализа, која је кључна за примену RCM процеса, базирана је на 7 питања дефинисаних стандардом SAE JA1011:

1. Које су функције система (техничког система);
2. На који начин систем запада у стање да не може вршити функцију (функционални откази);
3. Који су разлози настанка функционалних отказа;
4. Шта де дешава када се догоди отказ;
5. Које су последице функционалних отказа;
6. Шта треба урадити у циљу предвиђања или спречавања сваког отказа (који захват и у ком интервалу);
7. Шта треба урадити уколико није могуће одредити адекватну превентивну акцију.

Одговор на питања од 1 до 4 даје FMEA (*Failure Modes and Effects Analysis*) анализа, а на питања од 5 до 7 даје стратегија очувања функције система. Циљ RCM анализе је да идентификује стратегију очувања функције система на начин да елиминише, избегне, помери (одложи) настанак отказа или обезбеди „живот“ са последицама отказа. Примена технологија за праћење стања система, тј. неког подсистема (или параметра), директно доприноси квалитету RCM концепта. На тај начин, са аспекта више критеријума се дефинише интервал замене делова. Даље се разматра стратегија очувања функције система.

У великим системима, са пуно разнородних и по сложености различитих техничких система (опреме), потребно је одредити стратегију одржавања за свако средство и скуп средстава у

целини. У ранијим корацима анализирани су узроци и последице отказа, као и могуће појединачне стратегије очувања функције система. Те појединачне стратегије се морају груписати у логичке целине (групе).

Примера ради, уколико је на 3 подсистема потребно предузети акције одржавања према интервалима од 100, 150 и 200 радних циклуса, активности се тако морају подесити да се изврше у истом тренутку када је систем (намерно) стављен ван функције – искључен. Моћ RCM концепта је у томе да интервал акције одржавања за цео систем не мора бити најмањи интервал према подсистему који има најмањи интервал који захтева акцију одржавања. Ако је најмањи интервал, у овом случају 100 јединица, везан за подсистем чији отказ има за последицу угрожавање безбедности, акција одржавања („гашење система“) се мора спровести сваких 100 јединица. Ако са друге стране, подсистем који захтева акцију одржавања на 200 јединица рада има за последицу отказа угрожавање безбедности, а подсистеми који захтевају акцију одржавања након 100 и 150 радних јединица и чија је последица отказа економска или оперативна, може се донети одлука о јединственој акцији одржавања на сваких 200 радних јединица.

На крају, ако сва 3 подсистема утичу на оперативност и трошкове, планирани интервал акције одржавања се одређује на основу „Cost-Benefit“ анализе, и очекивање је да тај интервал буде између 100 и 200 радних јединица система. Крајњи корисник може одредити апсолутне критеријуме, нпр. оперативна способност, па се у таквом случају систем мора зауставити односно прегледати према најмањој интервалској јединици (неког од подсистема, с тиме да се тада прегледа само он, а остали по реду пристизања интервала).

Важно је истаћи да постоје и проблеми: периодична расклапања и инспекције критичних делова опреме коштају и троше време радне снаге. Други је већ описан проблем како успоставити интервале одржавања и листу активности. Трећи проблем је да средствима које тренутно правилно ради могу опати - деградирати својства услед честог расклапања, али се у овом случају отварају могућности примене неинвазионе дијагностике (вибродиагностика, анализа уља и друге методе). Одржавање не продужава дизајнирани животни век техничког система. Генерални ремонт продужава животни век средства (обнављањем ресурса).

#### **4.2.6. Имплементација и унапређење RCM концепта**

План имплементације прилагођен је свим задацима који се требају реализовати и свим структурним нивоима организације. Крајњи производ треба да буде програм одржавања, документован у смислу стандарда и процедура одржавања.

Процедуре садрже:

- шта се одржава (предмет одржавања),
- како се одржава,
- како (колико) често се одржава,
- који стандарди се примењују.

Прописани програм одржавања обухвата:

- потпуно документоване процедуре одржавања,
- план (планирање) опреме (и инфраструктуре),
- методологију (планирања и управљања) трошкова,
- управљање-контролу резервних делова,
- руковођење процесом.

Програм одржавања је заснован на следећим критеријумима (мора их испунити):

- успостављен је ефективни програм одржавања,
- постоји системски приступ управљању (идентификовање, разумевање и управљање системом који чини више повезаних процеса за дати циљ),
- стално се унапређује,
- примењује се процесни модел (свака активност која користи ресурсе да би трансформисала улазе у излазе може се сматрати процесом, врсте процеса: реализација и администрирање),
- координирају се активности за вођење организације и управљање њоме,
- примењују се стална побољшања, сталне активности на повећању способности за испуњавање захтева,
- постоји проток информација између нивоа управљања одржавањем, постоји „повратна веза“ у протоку података у циљу побољшања стратегије одржавања,
- ефективан је (мера реализације планираних активности и планираних резултата),
- ефикасан је (однос остварених резултата и употребљених ресурса),
- поседује инфраструктуру (скуп објеката, опреме и услуга неопходних за рад организације).

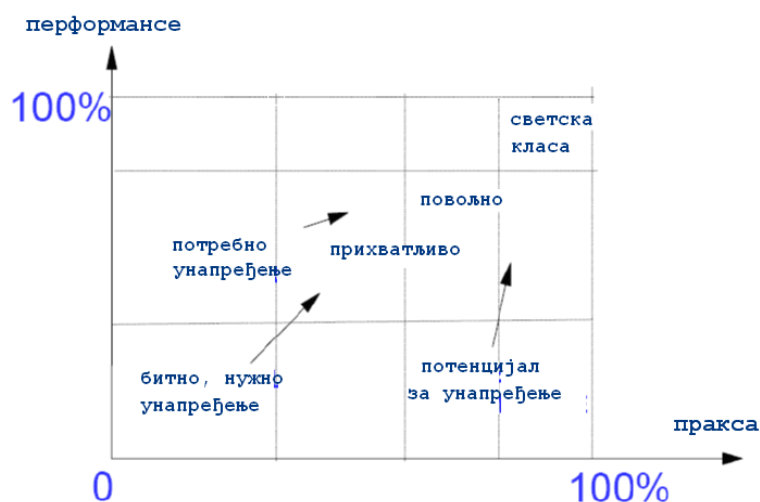
#### 4.2.7. Добити од примене RCM-a

Користи од пуне примене RCM концепта су:

- Повећање расположивости опреме;
- Смањење трошкова одржавања, посебно непланских корективних акција;
- Минимизација и елиминисање понављајућих отказа;
- Боље разумевање функционисања система и боља пракса употребе;
- Побољшање безбедности (корисника и персонала за одржавање) и заштите околине;
- Унапређење тимског рада између разних персоналних специјалности (занимања);
- Повећање морала и задовољства корисника;
- Документованост процеса и процедура ствара услове за будуће анализе и побољшања;
- Унапређење управљања процесом одржавања.

#### 4.2.8. Даљи развој RCM

Производне и услужне делатности у системима који своје резултате вреднују на критеријумима ефективности и ефикасности користе модерне технике за побољшање квалитета, често назване и „World Class Processes“ (слика 32), и ту спадају следећи процеси: Lean, Six Sigma, Theory of Constraints (TOC) и сам RCM.



Слика 32 - Управљачки процес „World Class Processes“

Six Sigma је методологија развијена на бази захтева за елиминацијом грешака у производњи или услугама. Дефинисана је на имплементацији стратегије мерења процеса и која се фокусира на побољшање процеса и смањење варијација у процесу (стабилност).

Примарни модел за достизање циљева је тзв. DMAIC (*D-Define, M-Measure, A-Analyze, I-Improve, C-control*) модел. Six Sigma значи да ће се у производном (радном, услужном) процесу рада на милион прилика за грешку догодити највише 3,4 грешке.

ТОС (*Theory of Constraints*) је процес орјентисан на идентификацији и уклањању ограничења у функционалном процесу организације, који су одређени тренутним стањем и циљевима организације.

#### 4.2.9. Проблеми имплементације побољшања (прави алат за прави посао)

Корисници често користе алате за побољшање који су им већ познати. Често се постављени циљеви не достижу, а при том се створе финансијски трошкови. За решавање проблема изабере се погрешан алат. Насупрот томе, започне се са применом више алата одједном и дође до пренатрпаности обиљем података, анализа, информација. Зато је идеално решење балансирана примена разних алата за побољшање система, где се технологије (технике) и методологије примењују истовремено, али са јасном логичком и интеграцијском везом.

Циљ побољшања процеса је материјална уштеда, не на штету функције, већ на елиминацији узрока трошкова, оптимизацији радних процедура и управљања материјалом (сировине у производњи, резервни делови, радни флуиди, енергенти, помоћни материјали у процесу одржавања) и задржавање и повећање поузданости и расположивости, односно постизање максималног ефекта у оквиру додељеног буџета. У великој мери се циљеви постижу већ на основу расположивог знања, само уз примену савремених алата и уз строгу дисциплину рада. Складна комбинација и примена више алата за побољшање даје оптимални резултат.

RCM концепт је робустан, ефективан алат за развој изврности услуге, у овом случају за одржавање техничких система. Иако је у основи RCM развијен за механичке компоненте, концепт је еволуирао до мере да се може нормално користити за вредновање скоро сваког процеса (активности) тако што обезбеђује логичку и методолошку интерпретацију сваког процеса. Синергијски резултат RCM производа, интегрисаног са управљачким алатима – Lean, Six Sigma, ТОС је огроман. Могу да се идентификују и адресирају прилике за побољшање процеса на сваком нивоу. RCM процес је и основна методологија која помаже у одржавању војних (оружни системи) и индустријских техничких система који су



подложни старењу (природно старе, не могу се зановити због високе цене или других ограничења, али се и даље морају користити).

RCM се и даље развија и велике напретке очекује од истраживања у областима: CBM (*Condition Based Monitoring*), системи за надзор параметара опреме (*Prognostic and Health Monitoring Systems*), софтверска решења за управљањем опремом и залихама (*Applications of Inventory and Spares Management Practices*), предвиђање исправности електронских склопова (*Predictive Electronic Health Practices*).

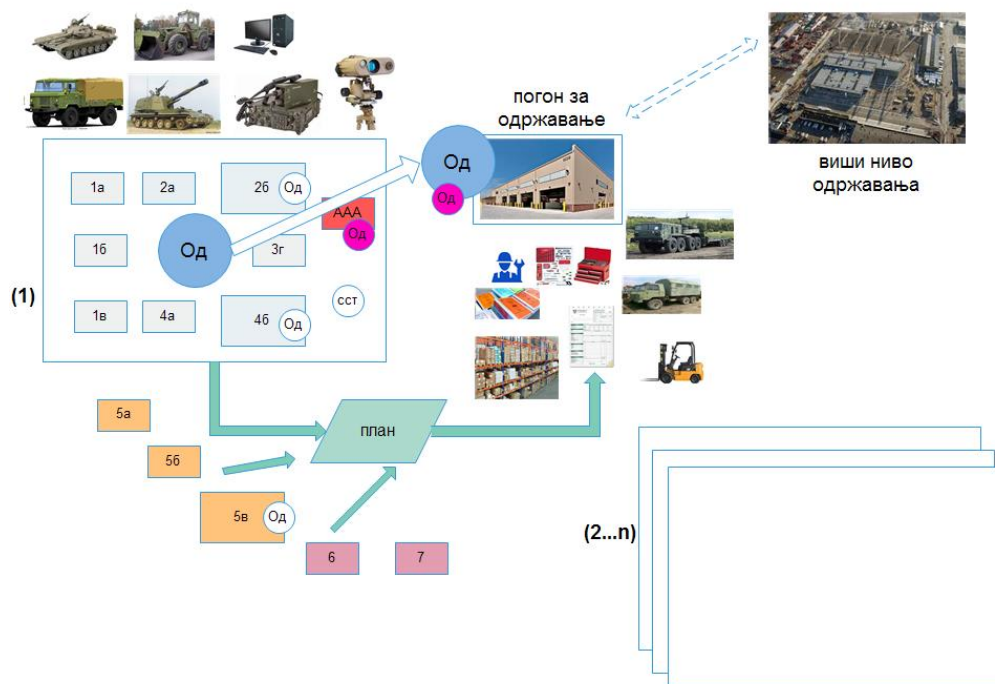
## 5. Војни системи одржавања - Систем одржавања у Војсци Србије

### 5.1. Одржавање, нормативно уређење и организација

**Одржавање** је логистичка функција којом се, кроз примену организационих и техничко-технолошких мера, радњи и поступака, чувају и обнављају ресурси и постиже захтевани степен исправности и поузданости техничких система, материјалних средстава и инфраструктуре. Мисија система одржавања војске је да обезбеди ресурсе, вештине и способности да се одржи спремност животног циклуса оружних система и опреме и обезбеди спремност и способност војске за извођење широког спектра операција.

Систем одржавања (СОд) у ВС чине елементи (слика 33), а то су људски ресурси (кадар); алат, уређаји и опрема; техничко технолошка документација, систем залиха резервних делова, инфраструктура и процеси (слика 34), од којих се сваки детерминише по посебно дефинисаним критеријумима и прописима. Организован је хијерархијски у складу са природом војног система (тактички, оперативни и стратегијски ниво).

Такође, систем је детерминисан законом, правима и другим документима (прописи, интерна правила, општи и интерни стандарди).



Слика 33. Елементи система одржавања и окружење

Ради остварења мисије захтевају се **способност** (способност је појам који се односи на диспозицију за успешно вршење одређене активности, независно од мотивације, увежбаности и искуства) **и компетентност** (надлежан, меродаван, формално или стварно оспособљен – квалификован - за неки посао) СОд.

Карактеристике система одржавања су велики број различитих техничких средстава (система) за одржавање, различита сложеност и бројност, различите технологије, организација у више нивоа (хијерархијска), ресурсна ограничења и рад по дефинисаним приоритетима, географска разуденост техничких средстава, утицај саме природе војног система и општег окружења.



Слика 34. Процес одржавања

Уређење система врши се организацијски и технолошки. Према амбијенту у коме војска изводи своје активности (копно, ваздух, вода), војска је организована у видове, а последично и систем одржавања, иако постављен на јединственим основама, има своје специфичности према врсти техничких средстава (и групама средстава) за које је одговоран.

Основне карактеристике СОд, осим наведених су и:

- јединствено управљање (руковођење, командовање),
- јединствено планирање, буџетирање и извршење,
- јединствен ток информација и докумената,
- јединствена технологија,
- стандардизовани комплети алата, опреме, испитних станица, покретних (на возилима) комплета алата,
- стандардизовани приручници за рад и оправке,
- стандардизовани каталози резервних делова и јединствено обележавање резервних делова,
- дефинисани стандарди за профилима стручне радне снаге и профили лица који се баве управљањем и стандардизован и нормиран процес оспособљавања,
- прописани стандарди СОд код развоја и увођења опреме у наоружање,
- карактеристичан однос потреба за одржавањем и могућности СОд и нужност одређивања приоритета у одржавању,
- информациони систем у развојној фази.

Анализе процеса одржавања врше се по нивоима, у дефинисаним интервалима. Углавном се састоје од прегледа исправности, набрајања статистичких показатеља, података о утрошку финансијских средстава. Мерење остварених резултата и њихово поређење са планираним, утврђивање одступања између планираних и остварених резултата и предузимање корективних акција на систему врши се контролама где контролор поступа по

дефинисаним параметрима, питањима и критеријумима. Систем одржавања у ВС је врло робустан. То значи да може да одговори на све захтеве, али не одједном и не одмах. Зато се често дефинишу и мењају приоритети у одржавању. Последица тога је да се део средстава не одржава у потпуности у складу са дефинисаним процедурама и обиму.

## 5.2. Концепција сталног усавршавања система одржавања (СОд)

Систем одржавања се нужно развија (треба да се развија), пратећи развој војне вештине, технике и технологије. Зато је потребно имати научно утемељен концепцијски приступ усавршавању одржавања.

Полазна поставка при стварању концепције усавршавања СОд је да систем одржавања постоји зато да задовољи објективне потребе средстава, опреме и постројења за одржавањем. Теорије поузданости, погодности за одржавање, експлоатације и одржавања су потпуно развијене у смислу да је за сваки тип средства и начин његове експлоатације могуће идентификовати све потребе за одржавањем у целокупном његовом животном веку. Ове потребе могу бити превентивне (контроле и прегледи, попуне замене делова и материјала, подешавања, итд.) или корективне (оправке након отказа). Идентификоване потребе се квантификују и дефинише се начин њиховог задовољења одговарајућим операцијама одржавања, чиме се добија технологија одржавања. Она обухвата и потребне ресурсе (опрему, резервне делове, репроматеријал, простор, енергију, квалификацију и број извршилаца) и услове провера и контрола. Према томе, технологија одржавања представља параметризовани скуп превентивних и корективних операција одржавања. Технолошке операције одржавања се групишу у тзв. технолошке програме одржавања (основно одржавање, технички прегледи, превентивни средњи ремонт, оправке заменом блокова, оправке блокова, итд.).

Техничко средство захтева само по себи одржавање, без обзира ко ће га спроводити (слика 35). Зато организација одржавања треба разумно да дефинише надлежности у смислу за шта је одговоран корисник, а за шта техничка служба. Граница по којој је за део одржавања надлежан корисник, а за видове одржавања техничка служба за само средство није важна, али је важно да у одржавању учествују заједнички, укључујући и организације изван војске (ремонтне и производне). Критеријуми при анализи и синтези система одржавања су параметри готовости, поузданости, функционалне подобности, трошкови одржавања, ограничења у ресурсима, захтеви корисника и услови експлоатације.

Императив у одржавању је целовит и јединствен приступ уз обавезну сарадњу корисника и техничке службе. Превелика одвојеност основног одржавања (корисник, слика 36) и техничког одржавања и ремонта (техничка служба, слика 37) доводи до тога да се средству не пружа правовремено све што захтева и да се нерационално троше ресурси.

Одвојеност доводи до пребацивања одговорности за стање средства, што у крајњем не побољшава стање средства. За наведено постоје и објективни разлози, као што су непопуњеност јединица војске важним специјалностима механичара, недовољна оспособљеност стручне радне снаге, издвојеност техничких од родовских јединица, тзв. гарнизони приступ, слабо или нерационално дефинисана дубина операција у основном и техничком одржавању. Са друге стране, субјективни разлози су слаба оспособљеност корисника за основно одржавање (у основи и познавање средства), тренд непридавања значаја одржавању средстава (стручна радна снага се ненаменски користи, не уважавају се захтеви), неизвршење и прескакање операција основног одржавања (корисници) и слаба сарадња са техничком службом (планирање, обука, координација).

Зато усавршени СОд полази од опредељења да се примењује комбинована превентивно – корективна политика одржавања, да буде организован у више нивоа, да се повећа готовост

средстава одржавањем код корисника, да се одржавање изврши на нижим нивоима, а да се замењени саставни делови одржавају на вишим нивоима (агрегатни приступ одржавању).

Посебно се мора имати у виду организација одржавања у дефинисаним мисијама војске, где у мисији одбрана Републике Србије од оружане агресије, техничка служба неће бити у могућности да правовремено интервенише тамо где се јављају потребе и да ће корисник често морати сам да поправља средства, нарочито када је потребно само прегледати и припремити средство за задатак. Овом захтеву директно доприноси агрегатни принцип одржавања, који у фази опремања средствима захтева повећане финансијске издатке за обезбеђење залиха резервних делова и склопова (агрегата). Неиспуњавање овог захтева директно утиче на расположивост средстава и опреме.

Варијанте одржавања подразумевају да за свако средство треба прво разрадити технологију одржавања, а затим технолошке програме одржавања распоредити по нивоима одржавања. Ако дође до промене услова или ограничења, поступак усавршавања СОД се може поновити. Варијанте одржавања се стварају према технологији одржавања, концепцији одржавања и организацији одржавања.



*Слика 35. Илустрација „неодржаваних“ возила, обострано од корисника и система одржавања*



*Слика 36. Основно одржавање*



*Слика 37. Радионичко одржавање*

Технологија одржавања се поставља према својствима средства, његовој поузданости и погодности за одржавање. Она одређује шта ће се радити, ко ће радити, којом опремом и алатима, како ће се радити, колико често и у каквом простору. Нека операција одржавања може се извршити у различитим условима (простор, алат, кадар) без нарушавања техничко-технолошких захтева. Све више се захтева аутоматизација мерења на средству и уграђена могућност самодијагностике. Концепција одржавања је опредељена као комбиновано превентивно – корективно одржавање уз уважавање ограничења. Организација одржавања треба да одреди однос између појединих нивоа одржавања и осигура реализацију одређене технологије одржавања. Основни проблем у организацији у више нивоа је одређивање надлежности одржавања појединих нивоа. Наиме, технологија одржавања не одређује где ће се одређени технолошки програм одржавања изводити, односно не одређује му ниво одржавања. Ово је специфичан организациони проблем и његово решавање дефинише надлежности појединих нивоа одржавања. Тек након дефинисања надлежности, врши се прорачун потреба за радном снагом, опремом и алатом, асортиманом и количинама резервних делова и др.

Овај приступ је врло важан јер обезбеђује да нема произвољне или просте административне поделе одржавања по нивоима. Неки технолошки програми одржавања се додељују кориснику, а техничким јединицама се додељују сложенији програми одржавања. Зато је важно још једном поновити да корисник мора темељно познавати функцију средства, а техничке јединице технологију одржавања и ремонта, како би без бојазни извршавали операције одржавања у складу са техничким упутствима за свако средство.

Информациони систем одржавања је императив модерног времена и техничко технолошког развоја. Исти обезбеђује праћење целокупног процеса одржавања. Недопустиво је да се на информацију да ли неког дела има на залихама губи 10-20 дана. Такође, прикупљање осталих података у циљу анализа траје данима, а подаци нису попуно веродостојни и поуздани.

Као такав, мора да обезбеди:

- Оцењивање ваљаности одржавања у одређеној војној јединици и у целокупном СОД;
- Управљање одржавањем средстава;
- Идентификацију појава у циљу унапређења и побољшања СОД;
- Преглед средстава (број, локација, стање, коришћење), временски ток одржавања, трошкове одржавања (радне снаге, опреме, резервних делова, енергије, простора итд.).

Поступак праћења преко информационог система осигурава брзе реакције на било који поремећај који утиче на економичност СОД или готовост средства.

Истраживања и развој логистичке подршке у домену подршке средстава наоружања и војне опреме јесу начин за усавршавање СОД.

Одговор на наведена питања, односно методологија, су дефинисани још почетком деведесетих година (1990.), кроз истраживачко развојне програме:

- Усавршавање СОД и система снабдевања резервним деловима;
- Оптимизација надлежности, ресурса, и технологија у СОД;
- Даља доградња логистичке подршке СОД, развој софтвера и експертских система.

Обнављање ових пројеката може донети огромне користи, а реализација је битно олакшана с обзиром на развој информатичког софтвера и приступ информатичке опреме. Такође, усавршавање кадра техничке службе мора бити оријентисано у овом правцу, а недостатак

кадра за пројекте и развојне програме се може превазићи сарадњом са високим школама и институтима изван војске.

### 5.3. Приступ усавршавању - репројектовању СОД

Према (Станојевић и др, 2002., Stanojević i Mišković, 2003.) систем одржавања се понаша нестационарно у времену, па је зато потребан стални надзор и стално је актуелан проблем репројектовања или унапређења. Један од основних проблема је како одредити и квантификовати утицајне факторе. Могућност квантификације утицајних фактора представља посебан квалитет, пошто омогућава спровођење одговарајућих *прогностичких поступака*. Поступак квантификације изводи се путем стварања одговарајућих модела СОД који се користе за експериментисање.

Многи аутори се слажу да не постоји једна и основна мера за успешност логистичких система који обухватају и СОД. Могуће је, међутим, одредити параметре успешности СОД, као и њихове минималне и/или максималне вредности, које треба постићи у пројектовању или функционисању система. Данашњи трендови развоја СОД у домену концепције - стратегије система одржавања су јасни, усмерени на што ширу примену одржавања према стању и превентивно одржавање. Посебан допринос примени ових концепција дао је развој опреме за техничку дијагностику, самодијагностику и информатичке технологије. Тежи се успостављању рационалног режима експлоатације техничких система (ТС), максималном смањењу потреба ТС за одржавањем и повећању учешћа корисника у одржавању. Тежи се ка смањењу броја непотребних превентивних радова, смањивању ризика од изненадних, посебно, хаваријских отказа, преношењу дела радова на кориснике (растерећење СОД), смањењу застоја у одржавању и утрошка резервних делова и других ресурса, а тиме и трошкова. Постоји и могућност отклањања слабих места на ТС (путем анализе генезе отказа) и тиме смањења учестаности отказа. У смислу трендова усавршавања организације јасно је да ће кључни елемент успеха бити адекватан механизам координације, односно адекватна организациона структура, правила и процедуре. На пољу стратегије (методологије) усавршавања - пројектовања СОД, јавља се више концепција које се по својој природи међусобно допуњавају, као нпр. концепт *Business Proces Reengineering - BPR*, унапређење пословних процеса (*Business Process Improvement - BPI*) и моделовање пословних процеса (*Business Process Modeling - BPM*).

Не могу се, међутим, сва потенцијална решења применити на све делове СОД. Због тога је потребно извршити класификацију делова подржаног система и/или делова СОД према: генераторима захтева за одржавање, карактеру захтева за одржавање, специфичним поступцима и захтевима управљања, карактеру радне снаге, простору на којем се изводе активности, постављеним циљевима, карактеру делатности, припадности деловима СОД и ширег окружења и слично. Тек на основу овакве класификације могуће је специфичним целинама СОД придружити скуп могућих решења функционисања која садрже скуп могућих акција управљачке, организационе, технолошке или концепцијске природе. Тиме се ствара оквир за пројектовање варијантних решења структуре и процеса у оквиру СОД. Само на основу анализе система стиче се довољно информација за креирање одговарајућег модела система.

Због карактеристике СОД да се већина процеса који се у њему одигравају може описати случајним променљивима, да их често карактерише нестационарност, велики број лимитирајућих фактора, а да треба уважавати специфична управљачка решења, најбољи начин за пројектовање СОД, и у том смислу и за потребна изучавања (квантификације), је примена метода **математичког моделирања и симулације**. Да би се сагледала укупност појединих ефеката, мора се карактеристични СОД посматрати као целина. Као најбољи начин за пројектовање - усавршавање СОД, показала се примена метода математичког моделирања и симулације. Модел у том случају мора обухватити све карактеристичне

токове (људи, материјала, р/д, информација, новца, итд.). Моделовање и симулација се врше за све комбинације технолошких и организационих варијанти СОд. Креирана варијантна решења СОд заједно са системом критеријума чине специфичан експериментални оквир. Избором најбољег међу понуђеним решењима завршава се поступак пројектовања система одржавања.



## 6. Модел и вредновање успешности процеса одржавања

### 6.1. Процес и Организација

#### 6.1.1. Моделовање пословног процеса, преглед и оквир

Према (Aguilar-Saven, 2004.) пословни процес је комбинација скупа активности у предузећу дефинисане структуре која описује логички ред активности и одговорности и чији је задатак да постигне неки одређени циљ - оствари резултат. Модел процеса обезбеђује свеобухватно сагледавање и разумевање процеса. Предузеће се може анализирати и интегрисати преко својих пословних процеса. Отуда проистиче важност коректног моделовања пословних процеса. Употреба правог модела узима у обзир сврху анализе због које се креира модел и способност расположивих техника и алата. Број референци усмерених ка моделовању пословног процеса је веома обиман, што има за последицу да је потребно сразмерно дуго време за проучавање и разумевање постојећих концепата и терминолошких одређења. Моделовање пословног процеса неспорно може да се третира као посебна научна дисциплина, и треба да буде економичан и ефикасан алат за laku употребу. За опис рада пословног система велики је проблем то што не могу да се користе природни језици, а прецизан опис преко формалних језика је неразумљив за већину корисника. Оно што је потребно, јесте техника која организује природне језике на тај начин да елиминиса двосмисленост и омогући ефикасну комуникацију и разумевање. Показало се да је поступак моделовања једна од најефективнијих техника за разумевање и једнозначну комуникацију. У процесу моделовања елиминишу се детаљи, чиме се умањује видљива комплексност система који се проучава. Преостали детаљи се организују на такав начин да би елиминисали двосмисленост и истакли битне информације. Графичке презентације се користе да би обезбедиле да већина корисника размишља о процесу моделовања као о сликовитој презентацији. Поред графичког приказа потребно је дати и прецизне дефиниције елемената који се појављују у моделу, као и пропратни текст, који је критичан према моделу који врши своју улогу, као средство комуникације.

#### 6.1.2. Увод

Процес који додаје вредност (*Value-adding Processes*) је напредни приступ организовања предузећа насупрот конвенционалном приступу функционалне хијерархије. Зато је моделовање пословног процеса постало популарно. Експерти у пољу ИТ технологија и пословног инжењеринга су прихватили да успешан систем почиње разумевањем пословног процеса организације. Концептуално моделовање пословног процеса се примењује да би олакшало развој софтвера који служи да подржи пословни процес и омогући анализу и редизајн или унапређење процеса. Пораст популарности оријентације ка пословном процесу је узрокован и рапидним повећањем броја методологија и техника моделовања и

алата за подршку концепту. Процес одабира праве технике и правог алата за моделовање процеса постаје изазов не само због броја расположивих приступа, већ и због недостатка водича који објашњава и описује новоуведене концепте. Аутор (Aguilar-Saven, 2004.) је анализирао преко 7000 стручних радова из области моделовања пословног процеса. Највећи број је објављен у часописима/зборницима из области ИТ и рачунарства. Важно је напоменути да све расположиве технике моделовања пословног процеса нису и универзалне технике.

### 6.1.3. Предлог оквира и преглед литературе

Изучавање и разумевање система уобичајено се врши са карактеристичним - специфичним приступом (погледом) и при том се користи специфична техника моделовања. Зато је важно да се идентификује сврха модела и изабере техника моделовања. Различите технике су различито прихватљиве и примењиве за моделовање, на пример једна за моделовање процеса (описује процес), а друга за изградњу система који контролише процес. Када се анализира пословни процес, потребно је имати могућност интеракције са моделом и анализе типа „шта ако“, што се обезбеђује поступцима симулације. 1993. године Macintosh је дефинисао фазе процеса:

- Дефинисање и подешавање процеса;
- Понављање активности процеса;
- Стандардизација и документовање процеса у организацији;
- Управљање - мерење перформанси и контрола процеса;
- Оптимизација - континуална унапређења.

Лако је видети да је за сваку наведену фазу потребан другачији модел. Прве три фазе захтевају моделе чији је задатак да опише процес у циљу анализе, а последње две захтевају моделе чија је сврха да подрже одлучивање. Модел треба да обухвати активности које укључују време, ресурсе, узрочности - међузависности и одговорности. Сврха модела је да подржи одлучивање у областима: анализа, планирање и примена плана (шта је сврха процеса, шта он ради) и редизајн. Као резултат прегледа литературе (Aguilar-Saven, 2004.), идентификовано је да се модели пословног процеса углавном користе за: учење о процесу, доношење одлука у процесу и развој софтвера за пословне процесе.

### 6.1.4. Опис најважнијих техника за моделовање процеса

Нека општа дефиниција процеса би могла да гласи: процес је релација између улаза и излаза, где се улаз трансформише у излаз применом низа активности које додају вредност излазу. Такође постоје и многе класификације пословног процеса. Наводи се постојање основног и подржавајућег процеса. Основни или примарни процес је дефинисан циљевима организације (предузећа). Подржавајући или секундарни процес ствара услове да примарни процес изврши свој задатак и оствари циљеве. Развијене су многе технике моделовања процеса и даље се укратко описују.

#### Графикон тока (*Flow Chart Technique*)

Графикон тока је дефинисан (слика 38) као формализована графичка презентација рада или производног процеса, организационог дијаграма или софтверских секвенци. То је графичка презентација у којој се симболи користе да опишу операције, податке, ток и смер кретања и ресурсе а ради анализе или дефинисања и решавања проблема. Методе моделовања

процеса помоћу графикана тока користе се за опис процеса. Представља једну од првих методологија за моделовање процеса.



Слика 38. Графикон тока, пример

Важно својство графикана тока је флексибилност. Процес се може описати на више различитих начина. Стандард само прописује обележавање (*notation*). Веома је лак за употребу и не захтева велико време за израду модела. Већ на први поглед на модел, јасно је о чему се ради и шта модел представља. Недостаци су превелика флексибилност и што су границе процеса често нејасне. Сам дијаграм може бити изузетно велик. Нису лако уочљиве главне и секундарне активности, па је тежак за читање. Погодан је за опис процеса који захтева детаље. Није погодан за приказивање одговорности у систему, односно тешко је повезати организационе функције са активностима.

#### Дијаграм тока података (*Data Flow Diagrams - Yourdon's Technique*)

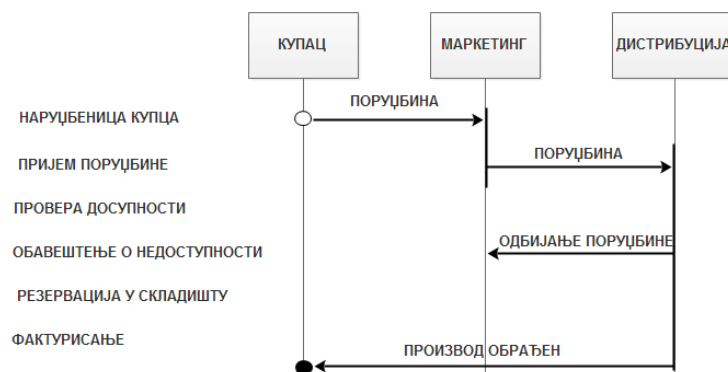
Дијаграм тока података приказује ток података/информација са једног на друго место. Употребом ове технике, аналитичар прецизира процес на логичком нивоу. То значи да се описује шта процес треба да ради уместо како треба да ради. Сваки процес може бити рашчлањен на подпроцесе у циљу приказа више детаља. Приказује само ток информација, не и материјала. Техника описује функционални модел који описује значење активности, ограничења и функционалне зависности. Другим речима, техника описује како информације улазе и излазе из процеса, које активности мењају информације, где се информације складиште и организационе функције којима информације припадају. Постоји и посебан облик ове технике под називом Акциони дијаграм, који се одликује могућностима да прикаже ток информација и материјала.

#### Дијаграм одговорности у активностима (*Role Activity Diagrams - RAD*)

Ова методологија је базирана на графичком приказу процеса из перспективе улоге појединца као и интеракције са другим учесницима у процесу. Улога је апстрактна нотација понашања и описује жељено понашање у организацији. Ова методологија је посебно ефикасна за подршку комуникацијама. Процес се описује као низ активности.

#### Дијаграм међузависности улога (*Role Interaction Diagrams - RID*)

У овој методологији (слика 39) активности су придружене улогама у форми матрице (активности се дају вертикално, а улоге хоризонтално). Текст и симболи се користе за опис процеса. Хоризонталне линије описују активности учесника у процесу и међусобне интеракције.



Слика 39. RID методологија

Одговорности су веома добро дефинисане. Могу се приказати веома комплексни процеси. Највише се користи за опис процеса који треба да прикаже координацију активности.

### Гантов дијаграм

Гантов дијаграм је матрична презентација која у вертикалној оси наводи све задатке/активности које се морају извршити. Хоризонтална оса садржи процењено време трајања сваке активности и ко је одговоран за конкретну активност. Периоди трајања активности се изражавају у различитим временским базама (сати, дани, недеље, месеци). Представља веома једноставну презентацију процеса, али не приказује јасну међузависност активности.

### „IDEF“

„Integrated Definition for Function Modelling (IDEF)“ је фамилија метода за моделовање процеса. Најважније су IDEF0, IDEF1, IDEF1X, IDEF2, IDEF3, IDEF4 и IDEF5. IDEF0 је техника моделовања која се користи за модел функције типа „шта да радим“.

### Coloured Petri-net - CPN

Техника представља графички оријентисан језик за дизајн, симулацију и верификацију система. Веома је погодна са системе који обухватају велики број подпроцеса који међусобно комуницирају и захтевају координацију. Техника има формалну математичку презентацију са прецизно дефинисаном синтаксом и семантиком.

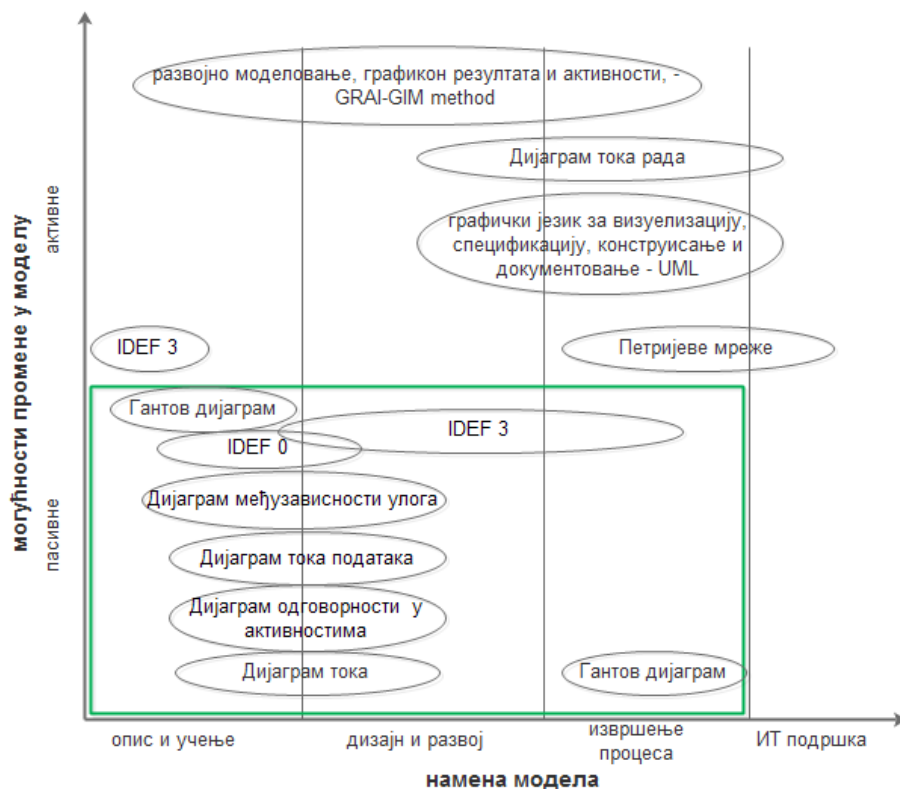
### Објектно оријентисани методи

Генерално, техника подразумева систем који ради са објектима различитих типова и где нека акција може да се изврши зависно од типа објекта. Другим речима, процес се моделује помоћу објеката који се трансформишу активностима унутар процеса. Објекат је ентитет који комбинује структуру података (атрибути) и понашање (операције). Објекат има стање (state), једно од могућих стања у којима се објекат налази зависно од вредности његових својстава (атрибута). Стање објекта се мења зависно од операција које сам објекат може да изврши. Група сличних објеката назива се класа. Порука је захтев који објекат прима и након операције и одговор који се након операције враћа пошиљаоцу (другом објекту). Постоји велики број техника из ове групе, а једна од највише коришћених је Unified Modelling Language (UML), која је својеврстан стандард за технике из ове групе. UML је језик за спецификацију, визуализацију и конструкцију софтвера и не-софтверских система. UML покрива концептуалне и конкретне елементе као што су програмерске класе, шеме база података, софтверске компоненте.

### Дијаграм тока рада (Workflow Technique)

У општем смислу, дијаграм тока рада у пословном процесу у коме се документи, информације и задаци крећу између учесника ради извршења акција по дефинисаним

правилима. Ток рада је ток задатака између учесника у организацији. Задаци се извршавају редно и/или паралелно. То је метод, сем за моделовање процеса, за анализу и унапређење система. Постоји већи број програмских језика за примену ове технике, који имају своје специфичне нотације и графичке ознаке за опис система, а генерално се разврставају у: графички базиране језике, мрежно базиране језике „Workflow Programming“ језике. Business Process Management (BPM) је екстензија класичне „Workflow“ технике. Преглед BPM методологија је дат на слици 40.



Слика 40. BPM методологије (Aksuet al., 2010.)

### 6.1.5. Опште методологије

Моделовање процеса у ширем контексту може се директно применити и на моделовање пословних процеса. Опште методологије користе се за развојну фазу, дизајн и анализу процеса. Обухватају скуп процедуралних, техничких и других стандарда за документовање процеса.

## 6.2. Организовање

Организовање (Nagoun и Duffuaa, 2009.) је процес уређивања и подешавања односа, релација и одговорности ресурса (људи, материјал, технологије и др.) са циљем остварења циљева организације. Начин на који су формално уређени односи делова организације представља организациону структуру. То је систем који укључује додељивање задатака, процес рада, односе и одговорности извештавања и комуникационе канале. Организација је динамичан систем који се непрекидно развија како би пратио технолошке промене, процесе и окружење у којем функционише. Од организације одржавања се захтева да буде ефективна. Не постоји међутим универзално прихваћена методологија за дизајн система одржавања. Поједини аутори сматрају да је један од проблема што не постоје потпуни структурирани приступи систему одржавања (организациона структура са дефинисаном

хијерархијом одговорности и контроле, дефинисаним процедурама и политикама одржавања, итд.). Одржавање се организује на основу искуства и процена и коришћењем техника формалног одлучивања. Постављају се два витална питања која мора да реши систем одржавања: стратегија одржавања која одређује када, где и на којим техничким системима се предузимају акције одржавања и одреди структура која подржава одржавање; планирање које обезбеђује одлуке које акције одржавања се предузимају и обезбеђује ресурсе потребне за извршење акција одржавања. Најчешће, организација одржавања обухвата: планирање, организовање, примену - извршење и контролу. У одређивању организације одржавања у обзир се морају узети одређени фактори, као што су капацитет одржавања, степен централизације - децентрализације и однос сопствено (*in House*) - услужно (*Outsourcing*) одржавање.

Планирање капацитета за одржавање утврђује потребна средства за одржавање, укључујући потребне специјалности извршилаца, потребну администрацију, опрему, алат и простор за рад. Критични аспекти капацитета одржавања су број и вештине извршилаца потребних за реализацију активности одржавања. Тешко је одредити тачан број различитих врста извршилаца, јер је оптерећење одржавања неизвесно, нарочито у системима када је интензитет напрезања - употребе техничких система неизвесно. Стога су прецизне прогнозе за будуће потребе радова на одржавању битне за одређивање капацитета за одржавање. Израда дугорочне процене у одржавању за планирање капацитета је зато важна способност система одржавања.

Одлука о примени централизоване или децентрализоване организације одржавања или комбиноване (хибридне) организације зависи од величина и типа организације која организује одржавање. Свака од поменутих форми има предности и недостатке.

Избор да ли развијати сопствене капацитет за одржавање или их „куповати“ (*Outsourcing*), односно имати комбиновани приступ, зависи од више фактора, а међу најважнијим су: стратегија организације, технолошки и економски фактори.

Поред тога што је циљ дизајнирања организације одржавања решавање одређеног проблема, такође је важно успоставити низ критеријума за идентификацију ефикасности организације. Следећи критеријуми могу да се сматрају најважнијим:

- Улоге и одговорности су јасно распоређени и додељени;
- Одржавање је постављено на право место у организацији;
- Ток информација је дефинисан и одређен;
- Успостављена је контрола над процесом одржавања од стране компетентних запослених;
- Структура подржава стална побољшања;
- Трошкови одржавања су минимални;
- Мотивација и култура запослених.

Још једна важна функција која, ако не постоји, директно доводи до неефикасног одржавања је управљање материјалом и деловима потребним за одржавање. Одговорност ове функције је да се обезбеди доступност материјала и резервних делова у потребном квалитету и квантитету у право време уз минималне трошкове. У великим или средњим организацијама ова организациона јединица може бити независна од организације за одржавање. Међутим, у многим околностима је она део организације одржавања.

## **6.3. Продуктивност одржавања и мерење перформанси система одржавања**

### **6.3.1. Продуктивност одржавања**

Продуктивност одржавања је важно питање ефективности и ефикасности одржавања (Parida and Kumar, 2009., Sharma K. and Sharma G., 2014.). Продуктивност одржавања у ужем смислу се мери тек у последњим деценијама. С обзиром да је одржавање мултидисциплинарна област, са великим бројем улазних и излазних параметара, перформансе продуктивности одржавања се морају мерити свеобухватним приступом. Одржавање је велики финансијски издатак за многе компаније или организације. Мерење перформанси одржавања је постао суштински битан елемент стратешког размишљања. Исто се односи и на котинуирану контролу одржавања. На одржавање утичу и промене у развоју технологије и информационе технологије и све више се у процес одржавања укључују професионалци из других области. Суштина потребе да се мере перформансе одржавања је у томе да је то начин да се процес одржавања контролише и надзире са циљем да се могу предузети одговарајуће и корективне акције, а ради постизања циљева као што су безбедност, социјална и друштвена одговорност, ефикасност и ефективност организације/компаније.

Генерално, продуктивност се дефинише као однос излазних карактеристика према улазним. „Излаз“ једног система су добра или услуге, док улаз представљају различити ресурси као што су радна снага, материјал, алати, опрема и друго. За одређени улаз, што је већи излаз то је већа ефикасност. Ефикасност подразумева радити на прави начин односно мера односа излаз/улаз. Може се изразити као однос стварног утрошка ресурса према очекиваним или као утрошак ресурса према дефинисаном излазу. Ефективност подразумева да се ради права ствар и она је мера усаглашености „излаза“ према специфицираним карактеристикама.

Продуктивност је комбинована мера ефективности и ефикасности. Продуктивна организација је истовремено ефективна и ефикасна. Побољшање продуктивности одржавања се постиже оптимизацијом (минимизирањем) губитака ресурса одржавања и потпуним обезбеђењем процеса одржавања (логистика одржавања). Свако смањење трошкова одржавања утиче на већу продуктивност. У циљу одређивања (мерења) ефективности система одржавања, потребно је измерити продуктивност и идентификовати области где је могуће предузети мере на побољшању система. И процес одлучивања захтева објективне оцене стања система одржавања.

### **6.3.2. Мерење перформанси и продуктивност одржавања**

Мерење перформанси система одржавања служи највишем и осталим нивоима руковођења да планирају и контролишу процес (Samat et al., 2011., Simões et al., 2011., Allen, 2006.). Сам концепт мерења перформанси почиње са применом деведесетих година прошлог века. Неминовно се концепт развија и модификује у складу са захтевима који су последица напретка у развоју технологија, производних процеса и др. Концепт мерења перформанси одржавања треба да буде добро дефинисан и разумљив, тј. треба да буде јасно шта се мери, како се тумаче перформансе система одржавања и како се усклађују са вишим циљевима организације. У суштини, концепт подразумева да се циљеви организације „претворе“ у задатке, тј. циљеве које треба да оствари извршни (тактички) ниво организације и да се узму у обзир измерене перформансе система одржавања као што су расположивост (опреме), поузданост, МТБФ средње време између отказа и др., а да се на највишем (стратешком) нивоу могу доносити одговарајуће одлуке. Организациона структура система одржавања и

повезаних система најчешће је организована у три нивоа: стратегијски, оперативни и тактички. Перформансе одржавања, односно мерења перформанси, се врше у три димензије:

- 1) Ефективност - задовољење захтева и потреба корисника;
- 2) Ефикасност - економично и оптимално коришћење ресурса одржавања; и
- 3) Способност за промене – свест највишег нивоа управљања о потреби да се систем мења.

На бази ове три димензије су развијени бројне методологије (начини) мерења перформанси. Пример: ENAPS (*European Network for Advanced Performance Studies*). Систем мерења перформанси је дефинисан као „метрика“ која се користи да квантификује ефикасност и ефективност неке активности. Као такав он треба да обезбеди опште информације које свим нивоима управљања обезбеђује рационално доношење одлука. Мерење перформанси се може сагледавати и кроз три различита нивоа: 1) мерење индивидуалне перформансе, 2) мерење перформанси система, 3) однос система мерења перформанси и окружења. Други приступи додају и финансијски контекст. Систем мерења перформанси одржавања се дефинише као мултидисциплинарни процес мерења и образлагања вредности постигнутих одржавањем. Мерење перформанси је средство (алат) које помаже управљању организацијом, планирању, контроли и реализацији промена (унапређења). Мерење перформанси је и средство које служи мерењу карактеристика примењене политике (одржавања). Кључни показатељи перформанси (*Key Performance Indicators - KPI*) се дефинишу за сваки елемент стратегијског плана. Кључни показатељи перформанси се даље могу рашчланити на индикаторе перформанси који се уобичајено дефинишу на најнижем нивоу организације. На тај начин се могу измерити перформансе и сагледати трендови који се могу користити за идентификацију процеса, области, делова организације који захтевају промене и побољшања у циљу постизања циљева организације. На тај начин, систем мерења перформанси одржавања представља основу за доношење одлуке која и каква побољшања се могу применити. Мерење перформанси одржавања такође обезбеђује визуелизацију процеса одржавања свим нивоима управљања. Финансије су увек важно питање организације па у складу са тим систем мерења перформанси узима у обзир финансијске и не-финансијске показатеље. Према свему наведеном, систем мерења перформанси одржавања се користи као: 1) алат стратегијског планирања, 2) алат извештавања, 3) алат за контролу и надзор, 4) алат за подршку променама (побољшањима). Индикатори перформанси се користе за мерење перформанси било ког система или процеса. Индикатори служе да се упореде актуелне вредности са референтним (захтеваним) вредностима. Индикатори перформанси се деле на такозване „водеће“ (*Leading*) и „накнадне“ (*Lagging*). Водећи индикатори указују на будуће догађаје. Накнадни индикатори су показатељи нечега што се већ десило.

### 6.3.3. Перформансе процеса одржавања

Продуктивност одржавања „има за циљ“ да минимизује трошкове одржавања кроз мерење укупних резултата/перформанси процеса одржавања и максимизује свеукупне перформансе система одржавања. Мере перформанси одржавања су: расположивост опреме, средње време између отказа (*Mean Time between Failures - MTTF*), учесталост „Failure/Breakdown“, средње време оправке (*Mean Time to Repair - MTTR*) и друге. Индикатори продуктивности процеса одржавања „мере“ степен искоришћења ресурса као што су радна снага, утрошак материјала, алата, опреме и друго. Поменути елементи такође формирају различите индикаторе цене/коштања. Контрола продуктивности процеса одржавања обезбеђује одрживост буџета одржавања и достизања циљева организације, производног система или неког другог. Продуктивност одржавања се бави истовремено



ефективношћу и ефикасношћу система одржавања. У процесној индустрији (производња), стање опреме „у отказу“ представља најважнији показатељ продуктивности одржавања. За разлику уобичајених активности у производњи, које су релативно једноставне и које се понављају, активности и акције одржавања се углавном не понављају. Због тога, за процес одржавања, проблеми који се јављају су најчешће нови и релативно непознати. Зато су запосленим у одржавању увек потребна мултидисциплинарна знања да би успешно решавали проблеме у одржавању.

Међу најважније мере (индикаторе) продуктивности система одржавања су:

- Укупна цена одржавања/укупна цена производње;
- Распоживост (Availability) = (планирано време у раду - време у застоју)/планирано време у раду;
- Стопа производње (Production Rate) = (временски норматив по јединици x број произведених јединица)/време у раду, где је време у раду = планирано време у раду - време застоја;
- Стопа квалитета (Quality Rate) = (укупан број производа - број неисправних производа)/укупан број производа;
- Средње време оправке (MTTR) = укупан збир времена поправки / број отказа;
- Средње време између отказа (MTBF) = време рада/број отказа;
- „Maintenance Breakdown severity“ = цена одржавања отказа/број отказа;
- „Maintenance Improvement“ = време превентивног одржавања/распоживо време за одржавање (капацитет);
- „Maintenance Cost per Hour“ = укупна цена одржавања/капацитет одржавања у часовима (време);
- Искоришћење (људских) капацитета за одржавање = време рада (одржавања)/укупан капацитет одржавања (време, капацитет радне снаге);
- Ефикасност радне снаге = стварно време одржавања/планско време одржавања;
- Утрошак материјала у одржавању/радни налог = укупна цена материјала/број радних налога;
- Индекс цене одржавања = укупна цена одржавања/укупна цена производње.

Све наведене мере захтевају да се прилагоде одређеном систему одржавања, односно да њихово значење буде дефинисано и јасно.

#### 6.3.4. Мерење продуктивности одржавања

Различити фактори и питања се морају узети у обзир приликом мерења перформанси система одржавања. Међу најважније факторе спадају:

- Вредност добијена процесом одржавања (а не: „одржавање је непотребан трошак“);
- Ревидирање расподеле и распореда ресурса (да ли су могућа побољшања, да ли су могући бољи ефекти и др.);
- Фактори безбедности на раду и еколошка питања;
- Управљање знањем (нове технологије не само да убрзавају администрацију процеса и бољу комуникацију, него и директно утичу на одржавање омогућавајући све већу примену одржавања према стању уместо планског - превентивног одржавања, а све

то захтева сталну едукацију запослених);

- Нови трендови у одржавању (стратегије и политике);
- Промене организационе структуре (мисли се на организацију за коју организација одржавања обавља задатке).

### Индикатори перформанси одржавања (*Maintenance Performance Indicator - MPI*)

Индикатори процеса одржавања се користе за оцењивање ефективности процеса одржавања. Под индикатором се подразумева производ неколико мера. Индикатор перформанси је мера која приказује квантификовану вредност нивоа перформансе. Избор индикатора перформанси зависи од примењеног начина мерења перформанси. Индикатори могу да буду коришћени за финансијске анализе и извештаје, праћење искоришћења ресурса, оцену задовољења корисника-потрошача, оцену укупне расположивости опреме (ОЕЕ) и друго (Muchiri and Pintelon, 2008., Grecik, 2009., Charaf and Ding, 2015., Mahmood et al., 2016.). Важно је да индикатори могу да повежу улазне и излазне параметре процеса. Ако се индикатори добро изаберу и дефинишу, онда они могу да обезбеде пуну контролу над процесом, области које не функционишу добро, удео и допринос процеса одржавања у ширем систему, искоришћење капацитета радне снаге и др.

### Питања мерења перформанси одржавања

За унапређење продуктивности одржавања потребно је предузимати сталне провере система одржавања уважавајући следећа питања:

- Продуктивност људских ресурса;
- Политика одржавања и организација одржавања;
- Обука управљачког дела система одржавања;
- Методологија и обука за планирање, методологија израде плана рада (за ниво извршења);
- Техничка (технолошка) обука;
- Методологија управљања процесом одржавања и буџетирање одржавања;
- Објекти за рад;
- Контрола материјала и залиха за потребе система одржавања;
- Историја употребе опреме и превентивног одржавања (записи и анализе);
- Степен развијености организације одржавања за примену технологије праћења стања;
- Развијеност информационог система.

Разумевање потребе за мерењем перформанси процеса одржавања у контексту свих процеса који се одвијају у једној организацији и према томе свих радних процеса (активности) је посебно важно за успешну примену мерења продуктивности процеса одржавања.

Детаљно разумевање процеса одржавања пре студије о питањима која су предмет мерења перформанси система одржавања било које организације је важно, како би примена поступка и процеса мерења перформанси система била могућа без тешкоћа. Процес одржавања почиње дефинисањем циљева и стратегије одржавања који проистичу из визије, циљева и задатака шире организације. На основу циљева одржавања, политике одржавања, расположивих ресурса и способности, одређује се програм (програми) одржавања. Програми се затим рашчлањују на потребне задатке (поступци, акције) одржавања. Реализација задатака одржавања се врши у одређено време и на одређеној локацији према плану одржавања. Под задацима одржавања се подразумевају: поправке, замене

неисправних делова или склопова, подешавања, подмазивање, инспекције (прегледи), модификације и друго. Руководство организације мора да разуме важност одржавања и да усагласи план одржавања са визијом, циљевима и задацима организације. У реалном животу, међутим, редовно се дешавају неспоразуми и неразумевања између очекивања организације и ресурса додељених (одређених) за функцију одржавања, односно нису усаглашени план одржавања, извршење плана и извештавање и анализа по функцији одржавања. Из наведеног произилази потреба да се мапира процес одржавања и идентификују препреке (уска грла) између планирања одржавања и извршења плана одржавања.

Логистичка подршка одржавања, према захтевима који се постављају одржавању је од највећег значаја за планирање, израду плана рада и извршење плана одржавања. Под логистичком подршком одржавања се подразумева располагање резервним деловима и материјалом у довољним потребним количинама и на време, алатима и опремом, техничком документацијом (упутства за одржавање, каталози резервних делова). Када се не располаже са потребним ресурсима (радна снага, делови, материјал, алат и опрема и др.) директно се умањују перформансе система одржавања. Људски фактор у одржавању, односно немотивисани и нестручни извршиоци, такође умањују перформансе одржавања. Систем и начин извештавања у процесу одржавања је важно питање за примену мерења перформанси система одржавања и одређивање (израчунавање) индикатора перформанси. Анализа података који се добијају извештавањем мора да буде објективна и потпуна.

Захтеви који се постављају пред методологију мерења перформанси одржавања, добијају се одговарањем на питања:

- Који индикатори важни за пословни процес организације су повезани са одржавањем;
- У каквом су међусобном односу индикатори и како они представљају захтеве корисника/потрошача;
- Да ли су индикатори објективно мерљиви и како описују ефективност и ефикасност организације;
- Да ли су индикатори тешки за примену (израчунавање);
- Која квантитативна и квалитативна својства приказују индикатори;
- Како се доносе одлуке на бази вредности индикатора;
- Које корективне и које превентивне акције се предузимају на основу вредности индикатора;
- Када и како се дефинишу и врши редизајн индикатора.

Индикатори се дакле дефинишу одговарањем на наведена питања. Индикатори се израчунавају на основу записа у одржавању (радни налози). Индикатори су засновани на вредностима неког параметра у времену или према циљевима и приказују позитивне или негативне наговештаје. Индикатор може да буде и таквог типа да приказује тренд за неки период. За приказивање вредности индикатора се користе различите технике визуализације (дијаграми, графикони и др.).

Питања повезана са развојем и применом система мерења перформанси система одржавања су:

- Стратегија: како циљеве организације и стратегију претворити у конкретне задатке и активности који се извршавају на оперативном и тактичком нивоу; како субјективну визију руководства претворити у објективне циљеве и задатке; како индикаторе повезати са циљевима организације; како створити и одржавати културу рада која подржава објективно мерење перформанси?

- Организациона питања: како повезати процес мерења перформанси одржавања са стратегијом организације; зашто постоји потреба за системом мерења перформанси одржавања; шта треба конкретно да се мери, ко и када треба да мери и како треба да буде мерено; како дефинисати одговорности по нивоима организације; како побољшати комуникацију?
- Како мерити; како изабрати праве индикаторе; како прикупити податке и извршити анализу; како користити извештај добијен на основу мерења перформанси система одржавања?
- Одрживост: како применити систем мерења перформанси одржавања за побољшања; како развити културу потребну за примену система мерења перформанси одржавања; како периодично модификовати систем мерења перформанси; како створити поверење у систем мерења перформанси на свим нивоима организације одржавања)?
- Одређивање индикатора: Примена SMART (*Specific, Measurable, Attainable, Realistic and Timely*) теста.

Мерење перформанси система одржавања у циљу оцене интерне ефикасности је усмерено ка томе да ли се процес врши на прави начин и мери се у смислу оцене трошкова, продуктивности радне снаге и др. и бави се управљањем ресурса одржавања да квалитет и квантитет радова буду у складу са захтевима спецификацијама. Мерење перформанси система одржавања у циљу оцене екстерне ефикасности је усмерено ка томе да ли се ради права ствар и да ли су корисници/потрошачи задовољни и као такво представља дугорочни показатељ. Објективни циљ мерења перформанси је успостављање релације између мерења интерних параметара система одржавања (узроци, ресурси) и мерења екстерних параметара (ефекти).

Систем мерења перформанси система одржавања

Систем мерења перформанси одржавања се дели у три фазе: дизајн система мерења перформанси, мерење перформанси, употреба система мерења перформанси за анализу и унапређења (редизајн процеса). Препоручује се да се формира тим за дизајн и имплементацију система мерења перформанси.

Интеграција одржавања у систем организације (предузећа)

Стратегија процеса одржавања се изводи из стратегије више организације. Да би се постигли циљеви више организације, потребно је дефинисати конкретне циљеве и задатке за (под)систем одржавања за сваки ниво. Сложеност организације захтева да систем мерења перформанси буде усклађен са функционалним и хијерархијским односима унутар организације. Ово је посебан изазов за велике и комплексне организације и организације са више циљева (мисија).

Систем мерења перформанси одржавања треба да олакша и подржи доношење одлука највишег нивоа руковођења. Као такав мора да прикаже финансијске и не-финансијске индикаторе. Са аспекта људи који обезбеђују податке за њега, он мора да буде лак за употребу и да не захтева додатно ангажовање

Индикатори перформанси могу да се групишу у 7 категорија и то:

1. Индикатори који указују на задовољство корисника;
2. Индикатори који указују на финансијске трошкове;
3. Индикатори који приказују стање опреме;
4. Индикатори који описују задатке процеса одржавања;
5. Индикатори који описују безбедност на раду и заштиту околине (екологија);

6. Индикатори задовољства запослених;
7. Индикатори који представљају показатеље раста.

Пре имплементације, индикатори треба да буду проверени са аспекта поузданости, у смислу да је могуће „мерење“ у времену и са аспекта пуноважности, односно да је измерено оно што је требало бити мерено.

Имплементација развијеног система мерења перформанси за сваку организацију представља ризик и изазов. Погрешно коришћење информација ради унапређења процеса, без примене одговарајућих алата и недостатак посвећености или активног учешћа највишег руководства, представља још један ризик који може да поништи све ефекте успостављеног система мерења перформанси. Систем мерења перформанси захтева да буде институционализован (регулисан, са дефинисаним обавезама и одговорностима).

### **6.3.5. Стандарди за одређивање индикатора перформанси одржавања**

Највећи изазов и ризик мерења перформанси система је имплементација система и валидација дефинисаних индикатора у реалном систему одржавања (Jiménez-Redondo et al., 2013.). Имплементација подразумева примену развијеног система мерења перформанси на постојећи план одржавања. Затим се систем мерења перформанси користи да би се проверило да ли функционише поуздано и реално.

Без формалних мерења перформанси, тешко је планирати контролу и унапређивати систем одржавања. Перформансе одржавања треба мерити због оцене успешности (продуктивности), контроле, унапређења процеса одржавања и због извршења циљева више организације. Различити специфични модели мерења перформанси одржавања су развијени и користе се у различитим индустријским гранама. Према томе какви су циљеви организације, дефинишу се системи мерења перформанси и индикатори перформанси.

Осим различитих организација (*International Atomic Energy Agency - IAEA, Society for Maintenance and Reliability Professionals - SMRP, European Federation of National Maintenance Societies - EFNMS*) које су развиле или интензивно раде на дефинисању погодних индикатора перформанси одржавања, и одређене индустријске гране су испробале овакав концепт (нуклеарне електро централе, индустрија нафте и гаса, сектор производње енергије, железнице). У табелама 7 и 8 су дати прегледи индикатора према EN 15341 стандарду.

Табела 7.- „Leading PI“

категорија	мера/ индикатор	Јед. мере	опис	препоручена вредност
идентификација рада	процент превентивног рада	%	време рада на превентивном одржавању/ расположиво време за рад	75-80%
	процент корективног рада	%	време рада на корективном одржавању/ расположиво време за рад	10-15%
	процент рада на унапређењу	%	време рада на усавршавању опреме/ расположиво време за рад	5-10%
планирање рада	чекање на рад	%	захтев за оправку је у статусу „чекање“ <5 дана/укупан број захтева	80% захтева
	„јачина“ планирања (план рада)	%	плански рад/укупан рад	95% радних налога
	квалитет планирања (план рада)	%	радни налози (радови) који захтевају дораду/збир радних налога (укупно)	<3%
заказивање радова (план рада)	одзив планирања	%	број радних налога у статусу „планирање“/збир радних налога (укупно)	>80% радних налога
	интензитет планирања (заказивање, план рада)	%	време планског рада/укупно расположиво време	>80% расположивог времена
	Квалитет плани- рања (заказивања, план рада)	%	процент радних налога са одложеним извршењем због недостатка материјала или радне снаге	<2%
извршење радова	степен извршења плана рада	%	број радних налога извршених раније или у планираном времену/збир радних налога	>95% радних налога
	усаглашеност плана рада	%	процент радних налога завршених у планираном времену	>90%
	средње време поправке (MTTR)	час.	тотално време „у отказу“/број отказа	
	искоришћење радне снаге	%	време проведено у раду/ расположиво време	>80%
	квалитет радова	%	процент радова који захтевају дораду	<3%

Табела 8.- „Lagging PI“

категорија	мера/ индикатор	јединица	опис
мерење перформанси опреме	број отказа	број	број отказа (класификовано према последицама)
	Failure/ Breakdown Frequency	No/unit time	No of Failures по јединици времена (мера поузданости)
	MTBF	часова	средње време између отказа (мера поузданости)
	расположивост	%	MTBF/(MTBF+MTTR) Uptime/(uptime+downtime)
	OEE	%	Overall Equipment Efectivness
	директна цена одржавања	новчана јединица	укупни трошкови одржавања (превентивно+корективно)
мерење цене перформанси	Breakdown Severity	%	Breakdown Cost/укупни трошкови одржавања
	интензитет одржавања	\$/број производа	цена одржавања/број нових производа
	ERV (Equipment Replacement Value)	%	цена одржавања/вредност нове (поправљене - као нове) опреме
	цена персонала	%	цена радне снаге/укупни трошкови одржавања
	цена услуге одржавања	%	трошкови услуга одржавања/укупни трошкови одржавања
	цена материјала	%	цена материјала/укупни трошкови одржавања

Под способношћу опреме се сматра да је она у стању да изврши специфицирану функцију (Muchiri et al., 2011.). Управљачка функција одржавања захтева да има објективну оцену процеса одржавања и резултата одржавања. За то је потребан објективан систем мерења перформанси и индикатора који описују перформансе. Поступак мерења перформанси система одржавања није сам себи циљ, већ је он део пажљиве анализе интеракције система одржавања и организације којој припада одржавање. Циљеви организације одржавања могу се приказати илустрацијом на слици 41.



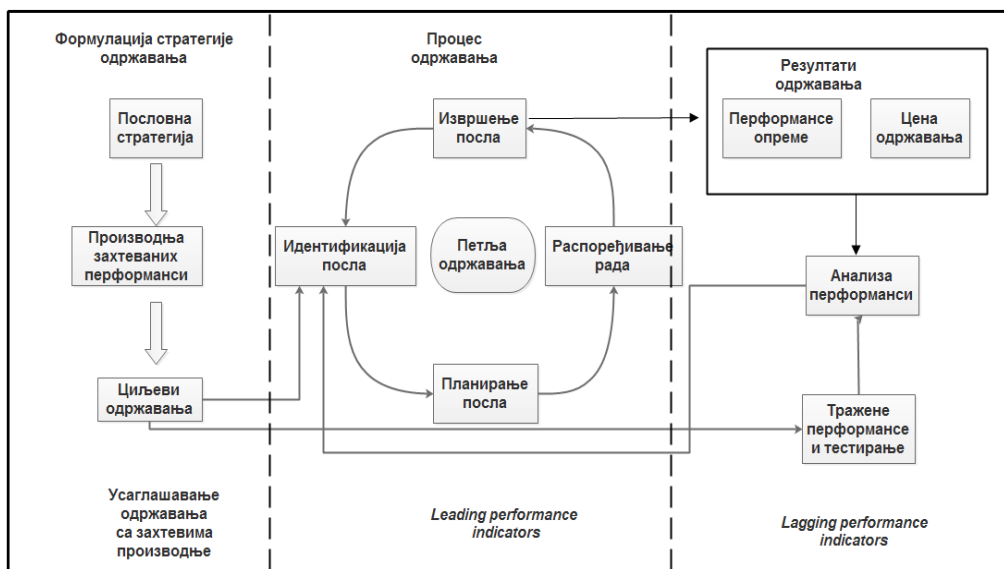
Слика 41. Циљеви одржавања

Када се дефинишу циљеви одржавања, одреди стратегија одржавања, потребно је одредити који тип одржавања ће се применити, када и колико често ће се спроводити акције одржавања. Одлучивање у одржавању подразумева избор акције одржавања (конкретан рад), политику одржавања и концепцију одржавања. Политика одржавања подразумева скуп правила која описују када се спроводе одређене акције одржавања (*Failure Based Maintenance, Use Based Maintenance /Time Based Maintenance, Design out Maintenance*). Концепт одржавања је општа структура одлучивања истовремено према акцијама одржавања (технологија) и политици одржавања (*Condition Based Maintenance, Total Productive Maintenance, LCC, Business Centred Maintenance* и др.). Након одређивања циљева и стратегије одржавања, успех процеса одржавања зависи од управљања процесом рада у одржавању. Циклус управљања радом у одржавању обухвата идентификацију рада (шта је потребно), планирање (ресурси, време, ограничења), планирање (план рада), извршење плана рада и завршетак рада. Радови у одржавању одређени су као превентивни, предиктивни и радови по појави отказа. Рад на одржавању (поправке) се повећава како се повећава број отказа. Сопствени циљ функције одржавања је планирање рада и рад по плану рада, што дефинише када и шта се плански искључује ради одржавања.

Мерење перформанси је основни принцип управљања. Добро дефинисани индикатори перформанси потенцијално могу да укажу на неусаглашеност захтеваних и стварних перформанси и да обезбеде наговештаје за побољшање стања отклањањем или ублажавањем поменутих неусаглашености. Они даље могу да помогну руководству одржавања да се фокусира на одређене области у процесу одржавања.

Више предложених и примењених решења за избор индикатора перформанси и методологија (оквира) за мерења перформанси одржавања указују на различите интересе према томе о ком пољу делатности се ради. Не постоји јединствена методологија за избор, дефинисање и управљање индикаторима перформанси, већ је то на корисницима да сами дефинишу. Нарочито је истакнуто да недостају модели мерења перформанси одржавања на оперативном нивоу организације одржавања који повезују циљеве организације одржавања и процес одржавања. Предложен је следећи аналитички модел за дефинисање оквира за мерење перформанси одржавања, као на слици 42.





Слика 42. Оквир за мерење перформанси одржавања (Parida et al., 2015.)



Слика 43. Области мерења перформанси према пословним специфичностима (Tättilä et al, 2014.)

Тренд у области мерења перформанси одржавања у долазећем периоду ће бити мапирање процеса и активности одржавања и сакупљање података које негативно утичу на перформансе (*Performance Killers*) а посебно са аспекта повећања расположивости опреме и искоришћења ресурса одржавања (слика 43). Процес мерења перформанси треба и да помогне процени доприноса система одржавања стратегијским циљевима организације. Процес мерења перформанси одржавања све више користи податке прикупљене приступима као што су *RAMS*, *LCC* и *e-Maintenance* ради доношења исправних управљачких одлука (Tättilä et al, 2014.).

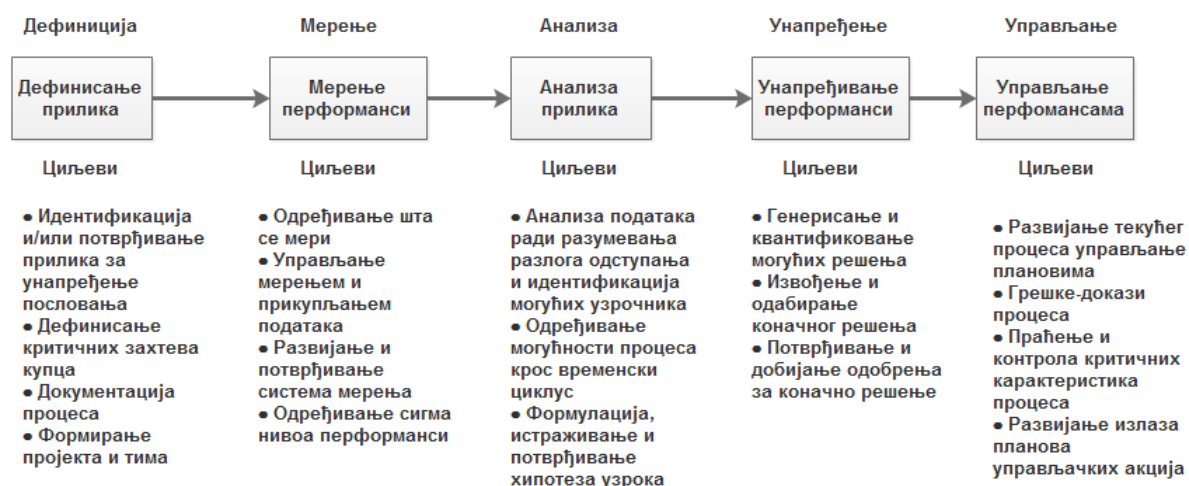
Из свега наведеног, произилази закључак да не постоји универзални концепт мерења перформанси система одржавања, као и да не постоје универзални индикатори перформанси, па према томе свака организација одржавања треба да их развије према својим потребама и циљевима организације којој припада.

## 7. Анализа стабилности и способности процеса одржавања

### 7.1. Квалитет као алат за побољшање процеса

Према (Montgomery et al., 2009.) квалитет је увек био интегрални део тј. својство производа и услуга. Формалне методе за контролу квалитета и усавршавање-побољшање развијају се еволутивно. У САД је 1960. године уведен *Zero defects (ZD)* програм. У периоду 1975.-1978. у Северној Америци интерес ка квалитету резултира појавом *Total Quality Management (TQM)* покрета. 1984. се појавио часопис *Quality and Reliability Engineering International*. 1987. је почела иницијатива *Six Sigma* у компанији Моторола. 1989. се појавио часопис *Journal Quality Engineering*. У 1990.-тим се интензивирала активност сертификације у индустрији САД према захтевима *ISO 9000*. *ISO 9000:2000* стандард је издат у раним 2000.-тим, а систем квалитета односно активности унапређења квалитета се осим у традиционалној индустрији шири на примену код ланаца снабдевања, финансијских услуга, осигурања, здравства, комуналних услуга и др. Статистичке методе за унапређење квалитета примењују се од 1920.-тих (*Bell Telephone Laboratories*). Други светски рат је знатно проширио употребу статистичких концепта контроле квалитета. 1950.-1960. је период рађања инжењерства поузданости који обухвата низ статистичких метода и алата. Статистички дизајнирани експерименти се значајно користе у времену 1970.-1980. у настојању западних (америчких) компанија да достигну конкурентност јапанских компанија, које поменути методологију користе још од 1960.-тих. 1980. године почиње раст употребе статистичких метода за унапређење квалитета и пословног процеса у ширем смислу. У периоду после 1990.-тих још више се интензивира употреба статистичких метода за унапређење квалитета и решавање управљачких проблема, због развоја метода и напретка ИТ опреме. Као примарни задатак политике квалитета се јавља систематска редукација варијација кључних карактеристика производа (услуга). Унапређење квалитета није могуће без посвећености менаџмента кроз најважније управљачке функције: планирање, обезбеђење квалитета, контролу и побољшавање.

*Six Sigma* користи специфичан приступ за решавање проблема и унапређење квалитета (Truscott, 2003.). Приступ се састоји од формализованог приступа у 5 корака: Define, Measure, Analyze, Improve and Control (*DMAIC*). *Six Sigma* оквир користи контролне дијаграме, дизајн експеримента, анализу способности процеса и многе друге статистичке алате. *DMAIC* приступ представља екстремно ефективан оквир за унапређење процеса. Популарна варијација *DMAIC* процеса је *DMADV* (*Define, Measure, Analyze, Design and Verify*). *DMAIC* процес (слика 44) није нужно везан за методу *Six Sigma* и може се користити без обзира да ли нека организација користи методу *Six Sigma*. То је генерална процедура.



Слика 44. DMAIC процес

Један од разлога успеха DMAIC процеса је тај што он ефективно користи релативно мали скуп алата. Алати DMAIC процеса су приказани у табели 9.

Табела 9. Алати DMAIC процеса

алат	дефиниши	измери	анализирај	унапреди	контролиши
Мапирање процеса/дијаграм тока	x	x			
Анализа узрока и ефеката		x			
Анализа способности процеса		x			
Тестирање хипотеза			x		
Регресиона анализа (међусобни утицај две или више појава), и друге методе које анализирају истовремено више варијабли			x		
"FMEA"- анализа начина отказа и ефеката			x		
Дизајн експеримента			x	x	
Статистичка контрола процеса, план контроле процеса		x	x		x

Пројекти су кључни аспект унапређења квалитета и процеса. Пројекти су интегрална компонента Six Sigma. Избор пројеката, управљање њима и успешно извршење је кључно за сваки покушај унапређења процеса не само кад се примењује Six Sigma. У том смислу пројекат представља потенцијални пробој или битно унапређење које за резултат има велико унапређење производа или услуге. Пројекти који се предузимају најчешће имају за циљ да свеукупно побољшају производ-услугу. Циљано теже ка областима са највећом шансом за побољшање и углавном су мотивисани актуелним проблемима. Други приступ је одређивање пројеката (за побољшање) према стратешким циљевима пословног процеса (организације). У том приступу, дефинишу се кључни пословни процеси и „метрика“ која их описује. Пројект се мора завршити у разумном року и треба да има конкретан утицај (допринос) метрици кључних пословних процеса. То значи да се много пажње мора

посветити дефинисању кључних пословних процеса организације, да се морају добро разумети ти процеси, односи и њихов међусобни утицај, као и да се развију погодне „мере“ за мерење перформанси процеса.

Први корак (фаза) DMAIC процеса (*Define*) је кратко документовање пројекта којим се обухватају: опис и циљ пројекта, временски оквир, почетни опис „метрике“ која ће се користити за оцену успеха пројекта, потенцијални добитак, ресурси за извршење пројекта. Други корак (*Measure*) има за циљ да оцени и разуме тренутно стање процеса. Садржи прикупљање података различитог садржаја и значаја. Важно је одредити листу свих кључних улазних варијабли процеса (Key Process Input Variables - KPIV) и кључних излазних варијабли процеса (Key Process Output Variables - KPOV). Ако су ови индикатори условно дефинисани у првој фази, у другој морају бити дефинитивно одређени. Ова фаза је временски врло захтевна, јер се морају прикупити многобројни подаци, односно мора се дефинисати какви и колико се подаци прикупљају, који се затим морају обрадити, док остали процеси морају да чекају резултате обраде тих података. Подаци се прикупљају из постојећих записа, што не мора увек да буде задовољавајуће. Некад постоје празнине у колекцији података, повремено се мењају методе вођења записа, а често жељене информације нису записане. Подаци који су прикупљени служе за одређивање тренутног стања или основних перформанси процеса. Такође служе за одређивање способности процеса. Прикупљени подаци могу да се репрезентују на више начина (Histogram, Pareto Chart, Run Chart, Scatter Diagram). На крају ове фазе, мора да постоји свеобухватна представа процеса као *Flow Chart* или *Value Stream Map*. Сви главни кораци и активности у процесу су идентификовани. Обезбеђени су KPOV и KPIV. Потпуно је јасно који су извори података, како је одлучено који ће се подаци прикупити, да ли је валидан систем мерења, да ли је прикупљено довољно података да би се обезбедила слика перформанси процеса. Фаза Анализе има за циљ да употреби прикупљене податке (из фазе Мерење) како би се донели закључци о релацијама узрок-последича у процесу и да се разумеју извори варијација. Другим речима, циљ је да се открију потенцијални узроци дефеката и проблема, губици или неефикасност. Узроци могу бити садржани у самом процесу (Common Causes) или су екстерни (Assignable Causes). Уклањање унутрашњих узрока уобичајено представља мењање процеса, док уклањање екстерних представља елиминисање специфичног проблема. Алата који се примењују у овој фази су: контролни дијаграм (*Control Charts*) који омогућава раздвајање поменутих узрока; статистички тестови који омогућавају оцену како другачији услови рада утичу на резултате; Регресиона анализа која омогућава моделирање процеса према релацији жељених излазних варијабли и независних улазних варијабли. И „Failure Modes and Effects Analysis (*FMEA*)-анализа начина отказа и последица“ се често користи у овој фази са циљем да рангира потенцијалне узроке варијација, грешака и дефеката особина производа или процеса. Унапреди корак подразумева креативно промишљање о специфичној измени која се може применити на процесу и другим стварима које се могу урадити како би се постигао жељени утицај на перформансе процеса. За ову намену постоји широка палета алата. Редизајн процеса са циљем унапређења процеса рада и смањења уских грла се користи техникама дијаграм тока и/или мапирање тока вредности. Даље се могу користити техника за елиминацију грешака и дизајн експеримента (*Design of Experiments – DoE*). Дизајн експеримента се може применити на постојећи физички процес или на компјутерску симулацију моделованог процеса и може се употребити за оцену који фактори утичу на производ система и за оптималну комбинацију утицајних фактора. Финални корак, фаза Контроле, подразумева предају контроле усавршеног процеса „власнику“, кроз План контроле процеса и друге потребне процедуре како би се осигурали добици од побољшаног процеса. Контролни дијаграми (карте) спадају у најважније алате за ову фазу. Транзиција процеса од тренутног стања ка усавршеном процесу је врло осетљив поступак, па посебним планом треба да се предвиде изненадни проблеми, тј. начин реаговања у таквим случајевима.

Према (Gulati, 2013.) организације морају стално побољшавати процесе, смањивати трошкове и смањити губитке како би остале конкурентне. Подаци се требају анализирати користећи различите технике и алате како би развили и имплементирали ефикасне планове који могу довести до побољшања процеса. Нови захтев за „континуирано побољшање“ у ISO 9001 захтева од организација да сакупљају и анализирају податке о перформансама процеса користећи ревизије, интерне показатеље учинака и повратне информације клијената. Поред тога, опрема/системи постају веома сложени. Иако је идентификација проблема постала прецизнија, способност њиховог решавања није нужно побољшана истом стопом.

Различити алати и технике су доступни за анализу и унапређење процеса - од једноставних листи провера и табела до софистицираног софтвера за моделовање који је од помоћи у решавању проблема. У табели 10 је дат преглед поменутих алата.

Табела 10. Алати за решавање проблема (Gulati, 2013.)

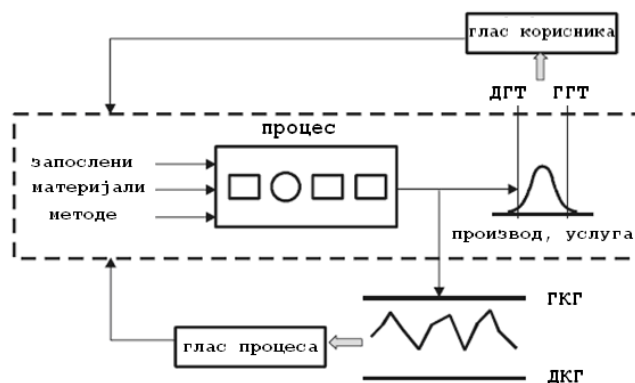
	назив	основне особине
1	5 Whys	откривање узрока проблема
2	Barrier Analysis	праћење тока енергије у процесу
3	Cause-and-Effects Analysis	идентификација могућих узрока проблема
4	Cause Mapping	идентификација утицаја појединих узрока проблема и њихова међузависност
5	Checklists	структурирана форма за прикупљање података о процесу
6	Control Charts	граф који показује како се процес одвија у времену и евентуалне варијације
7	Design for Six Sigma (DFSS)	систематска методологија за обезбеђење квалитета нивоа 6S (Six Sigma); одвија се по фазама дефинисаним као DMADV
8	Design of Experiments (DOE)	поступак пажљиво планираног експеримента, са већег броја варијабли фокус се преноси на кључне од утицаја на процес
9	Failure Modes and Effects Analysis (FMEA)	техника за одређивање потенцијалних узрока отказа и њиховог утицаја и предузимање акција према највећем ризику
10	Fault Tree	на основу отказа или догађаја, прогресивно се анализирају сви узрочници, а затим и њихови узрочници до фазе када они представљају иницијалне. Тиме се одређује потенцијална прилика да се отказ елиминира.
11	Flow Chart (Flow Diagram, Flow Process Chart, Network Diagram)	графички приказ процеса, по корацима, и токова у процесу (материјал, информације) од почетка до краја. Примењује се за опис, документовање, анализу и унапређење процеса (система)
12	Mistake Proofing (Poka -Yoke)	метод/поступак за елиминисање грешака односно дизајн процеса или производа који спречава појаву грешака
13	Muda	одређивање губитака, рада који не доприноси вредности
14	Mura	одређивање неконзистентности
15	Muri	одређивање бескорисног рада
16	Pareto Analysis	дијаграм који приказује појаве према њиховој учесталости, по редоследу највећег броја појављивања, са циљем да се издвоји неколико доминантних у односу на остале (принцип 80/20)

	назив	основне особине
17	PDCA — Deming's Improvement Cycle	Plan – Do – Check – Act (PDCA) методологија за побољшање
18	Root Cause Analysis	методологија која води до откривања корена проблема
19	Scatter Diagram	дијаграм који приказује парове нумеричких података, по једну варијаблу на свакој оси, са циљем откривања трендова и релација
20	Six Sigma	методологија систематске анализе процеса са циљем смањења варијација процеса и елиминације губитака. Примењује се кроз кораке познате као DMAIC процес
21	Standard Deviation	стандардна девијација приказује варијације вредности варијабле од њене средње вредности
22	Stratification	техника која раздваја податке прикупљене из различитих извора тако да се образац може сагледати
23	Theory of Constraints (TOC)	концепт и методологија намењени постизању најефикаснијег тока материјала у систему. Циљ је превазилажење уских грла у систему
24	Value Stream Mapping (VSM)	алат за визуализацију и разумевање тока информација и материјала, са циљем елиминације непотребних корака

## 7.2. Мерења стабилности и способности система (анализа процеса одржавања)

Анализа способности процеса или опреме се изводи са циљем оцене усаглашености параметара процеса или опреме (односно система) са захтевима дефинисаним стандардима, правилима и потребама. Анализа обезбеђује и идентификовање карактеристика процеса потребних за пројектовање мера и примену метода и техника унапређења квалитета. Кроз анализу и оцену способности процеса формира се одговор на питање: *да ли је процес у стању да обезбеди захтевани ниво квалитета односно оствари циљ*. Услов способности процеса је његова стабилност.

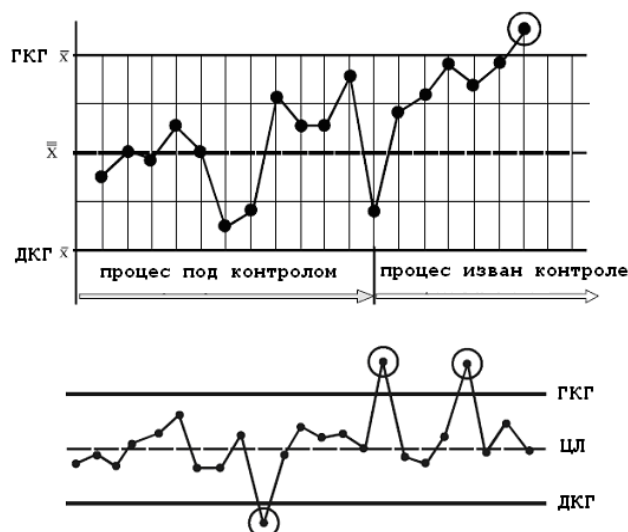
Статистичка контрола процеса (*Statistical Process Control - SPC*) није само статистичка слика процеса већ је и слика колико је систем под контролом и колико је ефикасан (Oakland S.J., 2003.; Stapenhurst T., 2005.; Montgomery D.C., 2009.). Процес је трансформација скупа улазних параметара који могу бити материјал, активности, енергија у одређене излазе који могу бити производи, услуге, информације. У *SPC* бројеви и чињенице представљају основ за доношење одлука и предузимање активности, што са друге стране захтева уређен и стабилан систем вођења записа о активностима. Скуп алата које подразумева *SPC* обезбеђују максимално, објективно и ефикасно искоришћење информација из прикупљених података. То су: дијаграм тока процеса (шта се ради); преглед листова/табеле (колико често се ради); хистограми (слике варијације); графикони (слике варијација по времену); Pareto анализа (приоритизација); анализа узрока и ефеката (шта узрокује проблеме); дијаграми расипања (истраживање односа); контролне карте (мониторинг варијације током времена). *SPC* подразумева коришћење статистички заснованих алата и техника претежно за контролу и побољшање процеса. Главни алат који је повезан са *SPC*-ом је контролна карта. Контролне карте имају вишеструку намену поред основне, а то је да се утврди да ли је процес у стању контроле. Они се редовно могу користити као аналитички алат за генерисање и тестирање идеја и претпоставки о томе шта може покренути проблеме у процесима.



Слика 45. Мерење перформанси процеса

На слици 45 приказана је суштина мерења у процесу у циљу оцене стабилности и способности, а значење ознака је следеће: ГГТ, ДГТ - горња и доња граница спецификације утврђена захтевима корисника, ГКГ, ДКГ - горња и доња контролна граница утврђена анализом процеса. Организација треба да одржава захтевима утврђене карактеристике и способност процеса.

Метод контролних карата је један од основних алата који се користи за оцену стабилности и способности процеса. То је статистичка метода.



Слика 46. Основна стања процеса

На слици 46 приказане су две основне оцене стања процеса и обележено је стање процеса изван контроле - појава тачака изван контролних граница (прескоци, трендови).

Процес праћења и мерења управљачкој структури процеса обезбеђује одговоре на следећа питања:

- Да ли се процес одвија у складу са планом?
- Да ли су резултати процеса добри?
- Да ли резултати процеса обезбеђују успех организације?

Показатељи способности су погодан бездимензионални систем показатеља способности процеса. Зато су области примене показатеља значајне, као на пример:

- Превенција појаве грешака;

- Непрекидно унапређење и усавршавање;
- Утврђивање приоритета унапређења и усавршавања;
- Анализа и оцена расипања и подешености процеса и опреме;
- Провера способности производног система, и сл.

Ово важи посебно ако се има у виду да представљају општи језик комуникације међу стручњацима.

Ако се на овај начин анализира способности система одржавања, може се извршити са неколико аспекта, као нпр.:

- Анализа (мерење) опште исправности опреме у одређеном временском периоду тако што се узме средња вредност за 100% опреме. Ипак, овакав приступ није најпогоднији зато што не прави разлику између многобројних и простих средстава и врло сложених али малобројних, па производ анализе може бити погрешан закључак;
- Анализа специфичне групе опреме, што је погоднији начин имајући у виду специфичности те групе;
- Могу се анализирати и елементи система одржавања, као што су: временски ток превентивног и корективног одржавања, утрошак ресурса (рад) у времену, исправност опреме, расположивост опреме, подсистем снабдевања резервним деловима, искоришћење капацитета радне снаге (односно губици), анализа трошкова по појединој групи опреме са аспекта одржавања и др.

Зато је погодно да се анализа врши од општег ка посебном.

### 7.3. Анализа-дефинисање проблема

У оцени успешности мисије СОд треба сагледати тренутно стање, трендове и планове активности, као и окружења и ограничења. Идентификација критичне опреме (класичан начин, углавном искуствене методе и знања), у смислу исправности и поузданости може се извршити погодном визуелном интерпретацијом тренутног стања.

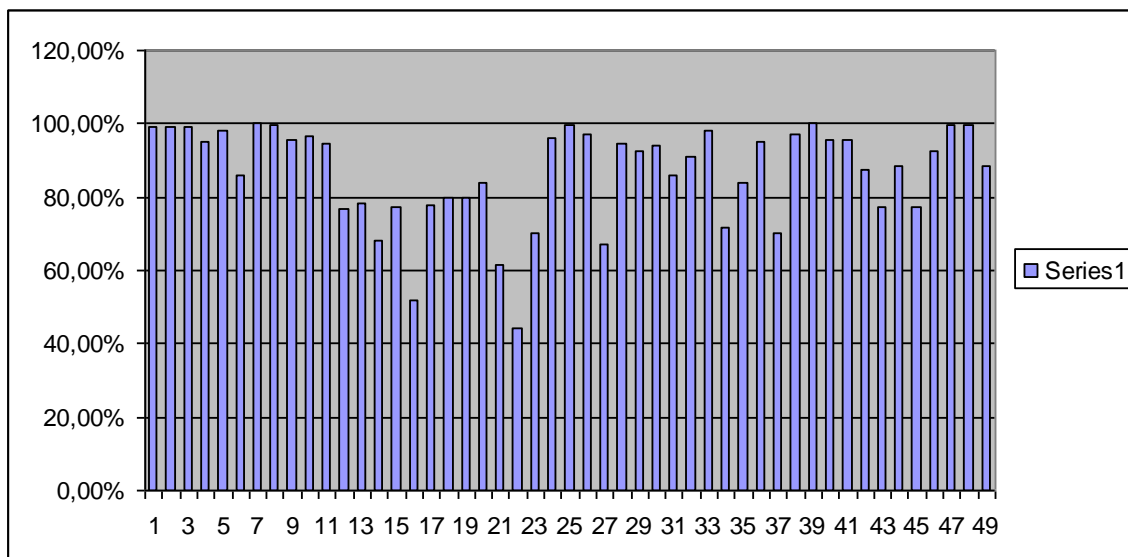
Табела 11. Приказ прегледа стања исправности

РБ	Ознака средства	Степен сложености	Број средстава			Технички исправно		Функционално исправно		Технички неисправно због		
			употр.	резерва	укуп.	колич	%	колич	%	ЛР	СР	ГР
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1.	А		15793	24095	39888	39473	98,96%	39789	99,75%	289	17	109
а)	А.1.	просто	15650	22857	38507	38101	98,95%	38417	99,77%	289	16	101
б)	А.2.	ниже сложено	143	1238	1381	1372	99,35%	1372	99,35%	0	1	8
2.	Б		160	556	716	681	95,11%	696	97,21%	19	8	8
а)	Б.1.	више сложено	20	82	102	100	98,04%	100	98,04%	2	0	0
б)	Б.2.	више сложено	62	161	223	192	86,10%	207	92,83%	17	7	7
в)	Б.3.	сложено	2	0	2	2	100,00%	2	100,00%	0	0	0
г)	Б.4.	ниже сложено	76	313	389	387	99,49%	387	99,49%	0	1	1
3.	В		160	238	398	380	95,48%	382	95,98%	9	8	1
а)	В.1.	више сложено	141	128	269	260	96,65%	260	96,65%	2	6	1
б)	В.2.	сложено	12	104	116	110	94,83%	111	95,69%	5	1	0
в)	В.3.	сложено	7	6	13	10	76,92%	11	84,62%	2	1	0
4.	Г		2914	1477	4391	3446	78,48%	3728	84,90%	625	153	167



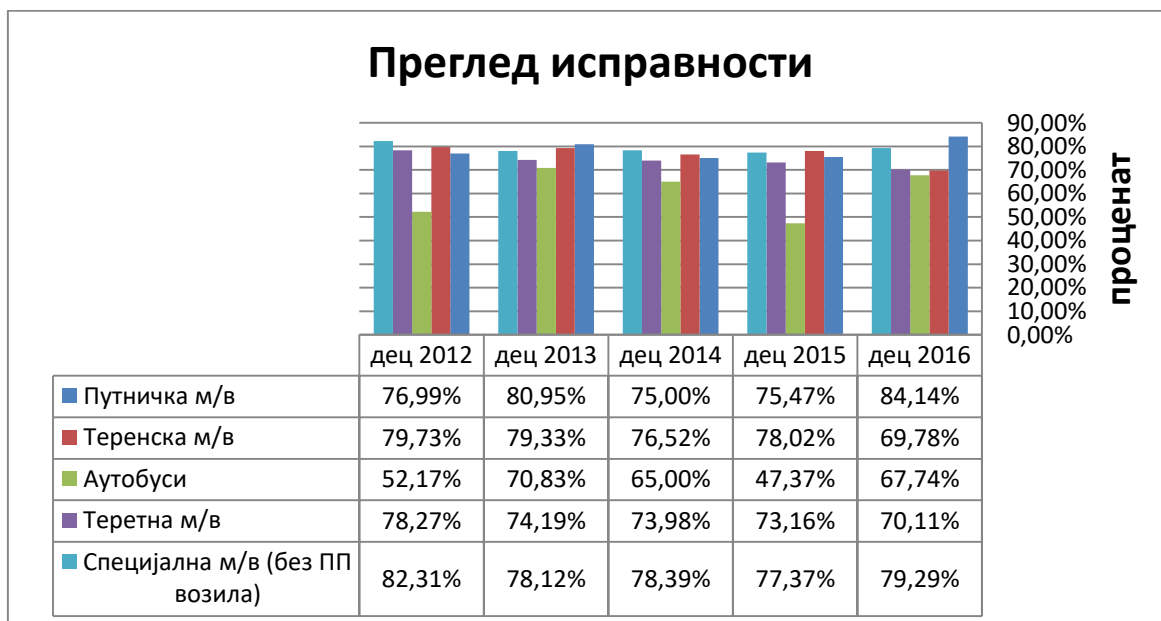
РБ	Ознака средства	Степен сложености	Број средстава			Технички исправно		Функционално исправно		Технички неисправно због		
			употр.	резерва	укуп.	колич	%	колич	%	ЛР	СР	ГР
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
а)	Г.1.	ниже сложено	143	4	147	100	68,03%	110	74,83%	39	5	3
б)	Г.2.	ниже сложено	973	328	1301	1004	77,17%	1097	84,32%	174	61	62
в)	Г.3.	ниже сложено	27	0	27	14	51,85%	18	66,67%	6	3	4
г)	Г.4.	ниже сложено	597	599	1196	931	77,84%	991	82,86%	182	46	37
д)	Г.5.	сложено	678	301	979	784	80,08%	851	86,93%	140	28	27
ђ)	Г.6.	просто	94	104	198	158	79,80%	163	82,32%	21	8	11
е)	Г.7.	просто	402	141	543	455	83,79%	498	91,71%	63	2	23
5.	Д		412	245	657	403	61,34%	570	86,76%	211	16	27
а)	Д.1.	врло сложено	160	65	225	100	44,44%	184	81,78%	107	11	7
б)	Д.2.	сложено	252	180	432	303	70,14%	386	89,35%	104	5	20
6.	Е		3290	5258	8548	8231	96,29%	8476	99,16%	275	17	25
а)	Е.1.	просто	1536	2571	4107	4086	99,49%	4095	99,71%	9	4	8
б)	Е.2.	ниже сложено	81	173	254	247	97,24%	250	98,43%	4	3	0
в)	Е.3.	сложено	156	85	241	162	67,22%	195	80,91%	58	8	13
г)	Е.4.	ниже сложено	1517	2429	3946	3736	94,68%	3936	99,75%	204	2	4
7.	Р		6760	2675	9435	8729	92,52%	8760	92,85%	374	163	169
а)	Р.1.	просто	3536	1595	5131	4822	93,98%	4847	94,47%	117	62	130
б)	Р.2.	сложено	248	79	327	281	85,93%	282	86,24%	20	15	11
в)	Р.3.	сложено	2976	1001	3977	3626	91,17%	3631	91,30%	237	86	28
8.	И		175	6	181	178	98,34%	181	100,00%	3	0	0
9.	Ј		9447	4190	13637	9799	71,86%	9805	71,90%	346	1075	2417
а)	Ј.1.	просто	285	177	462	387	83,77%	388	83,98%	31	13	31
б)	Ј.2.	просто	451	178	629	597	94,91%	602	95,71%	11	4	17
в)	Ј.3.	просто	8711	3835	12546	8815	70,26%	8815	70,26%	304	1058	2369
10.	К		1180	1276	2456	2388	97,23%	2409	98,09%	13	2	53
а)	К.1.	просто	509	553	1062	1062	100,00%	1062	100,00%	0	0	0
б)	К.2.	просто	300	342	642	614	95,64%	621	96,73%	8	0	20
в)	К.3.	просто	312	369	681	650	95,45%	662	97,21%	2	1	28
г)	К.4.	ниже сложено	59	12	71	62	87,32%	64	90,14%	3	1	5
12.	Л		9998	515	10513	8131	77,34%	8488	80,74%	581	1474	327
а)	Л.1.	ниже сложено	17	0	17	15	88,24%	15	88,24%	1	0	1
б)	Л.2.	просто	9981	515	10496	8116	77,32%	8473	80,73%	580	1474	326
13.	М	сложено	82	69	151	140	92,72%	144	95,36%	8	1	2
14.	Н	просто	89	170	259	258	99,61%	269	103,86%	0	1	0
15.	О	просто	2623	2981	5604	5587	99,70%	5598	99,89%	10	2	5
16.	П	ниже сложено	394	2088	2482	2850	88,40%	2472	99,60%	40	0	334

У табели 11 је дат илустративни приказ стања исправности, а графикон на слици 47 представља графички приказ стања исправности више врста опреме (нпр. 49 на слици). Овакви прегледи се обично раде не крају одређеног временског интервала.



Слика 47. Приказ исправности опреме

На основу важности и значаја опреме, идентификује се на пример као критично стање опреме – која има најмањи проценат исправности, што захтева одговарајућу реакцију с обзиром да устаљени систем одржавања не даје бољи резултат на основу 3-годишње анализе. Овакав вид анализе даје само једну димензију стања/проблема. Зато се може дати приказ стања исправности по времену, за једну врсту опреме (слика 48), ради потпуније слике стања и оцене успешности система одржавања.

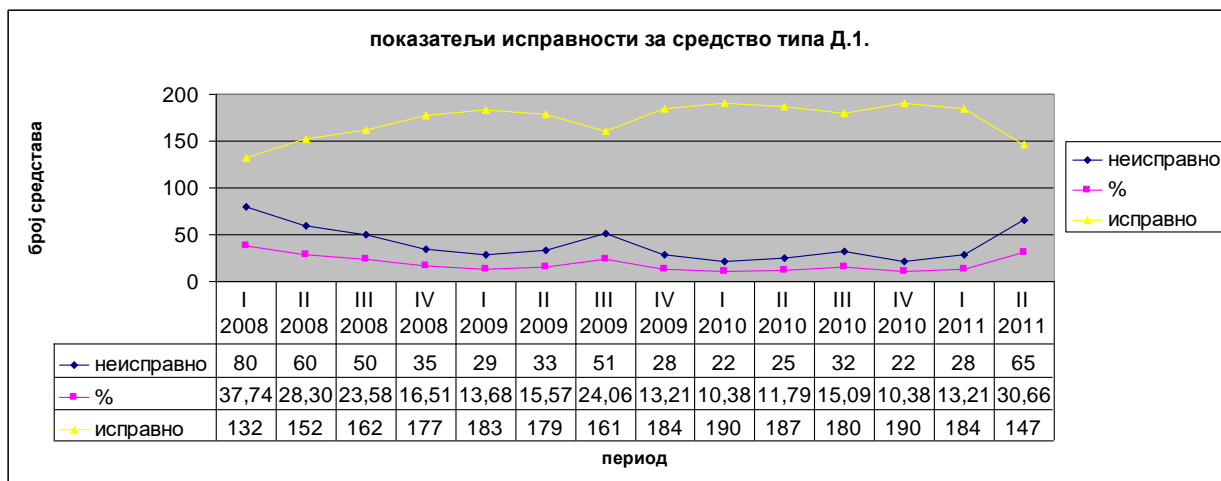


Слика 48. Илустрација графичке репрезентације исправности моторних возила

## 7.4. Оцена стабилности и способности система

### а) Анализа типа „Year-to Date (YTD)“

Погодном графичким приказом степена исправности опреме (један тип опреме, може се радити за сваки), као на слици 49, пружа се мали број података, односно није могуће сагледати опште разлоге за промене, трендове, проблеме. Закључци о томе могу се донети аналитички, прикупљањем извештаја и других података.



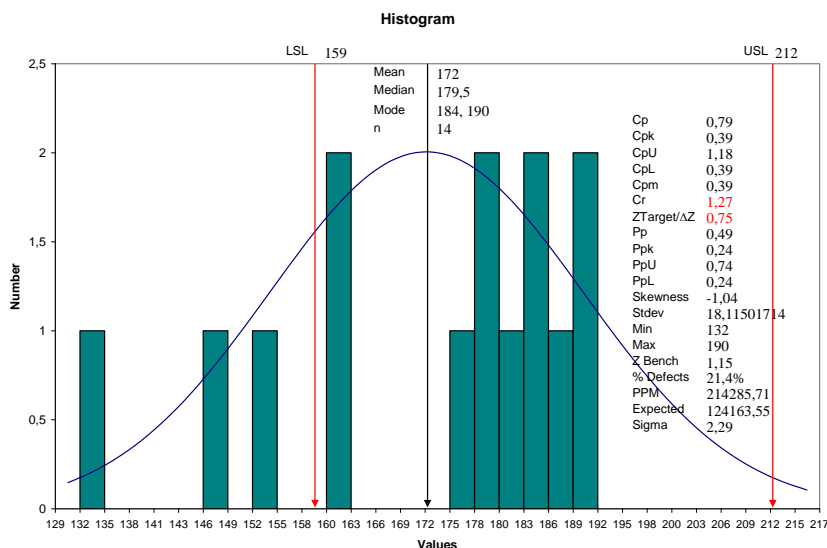
Слика 49. Приказ исправности у трогодишњем периоду

Проблем „класичних“ анализа се огледа у томе што овакви дијаграми обично подразумевају један временски период и упоређују се са претходним периодом, тако да углавном не говоре ништа суштински о одвијању самог процеса. Организације већ одавно користе палету различитих метода за извештавања и упоређивања перформанси и углавном су задовољни таквим начином рада, мада често постоји дилема треба ли користити нешто друго, као што су нпр. контролне карте. Различите форме извештаја, за различите временске периоде, треба да покажу како се процес који је од интереса одвија, да ли постаје бољи, лошији или задржава континуитет. Да ли се процес одвија глатко или има проблема. Проблем је што такви извештаји и табеле садрже пуно података али мало информација. Једна од најчешћих грешака је да се упореде два стања (један показатељ у времену) и одмах донесе закључак. Занемарује се да су многе варијације, односно њихови узроци случајни, тј. непредвидиви. Упоређивање две вредности једног показатеља је једноставно, али то превише поједностављује обично комплексну ситуацију. Зато су многе организације развиле методологије за праћење перформанси које подразумевају упоредне прегледе дијаграма и табела за два временска периода или дужи временски период како би пратиле како се перформансе мењају у времену. Међутим, таква поређења је и даље тешко вршити (Stapenhurst, 2005.).

б) Анализа заснована на SPC (*Statistical Process Control*) методи

Очекивања корисника од система одржавања („глас корисника“)

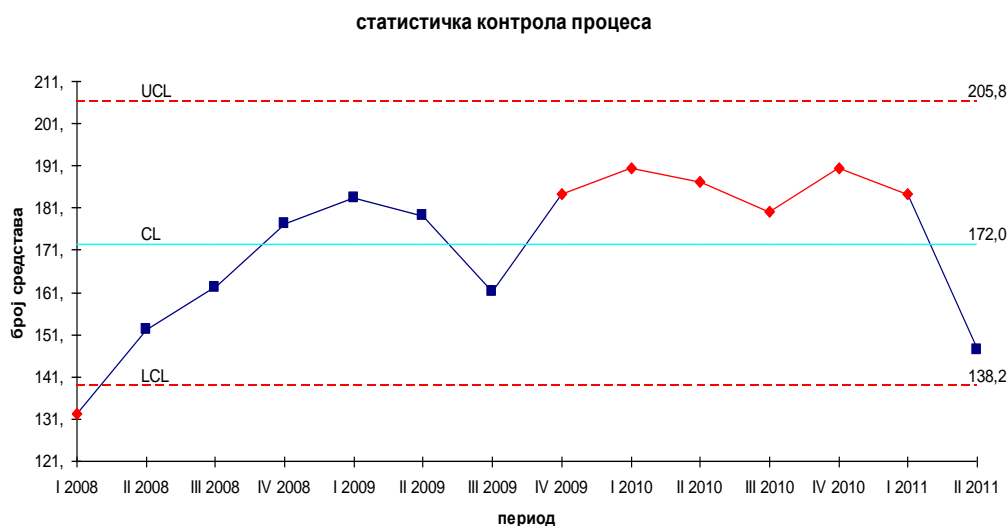
Хистограм за временски период од 3 године изгледа као на слици 50, а представља број исправних средстава одређеног типа (преглед исправности не месечном нивоу). Када се оцењује успешност организације одржавања, хистограм је веома ефикасно средство и алат за сагледавање појава расипања у систему. Такође може да послужи за одређивање карактеристика одређених појава, као што су расподеле броја средстава које захтевају одржавање, ангажовање ресурса (нпр. рад механичара) и др.



Слика 50. Хистограм „Глас корисника“

### Понашање система („глас процеса“)

Контролне карте омогућавају приказ понашања процеса у односу на његов положај и расипање. Језгро свих SPC активности је контролна карта (слика 51). Графичким приказом мерних вредности може се добро проценити понашање процеса и његова способност. Примена контролних карти са контролним границама, које се односе на процес, дозвољава процену да ли је процес статистички под контролом. Карактеристике способности процеса при том треба процењивати тек када је претходно потврђена стабилност процеса.

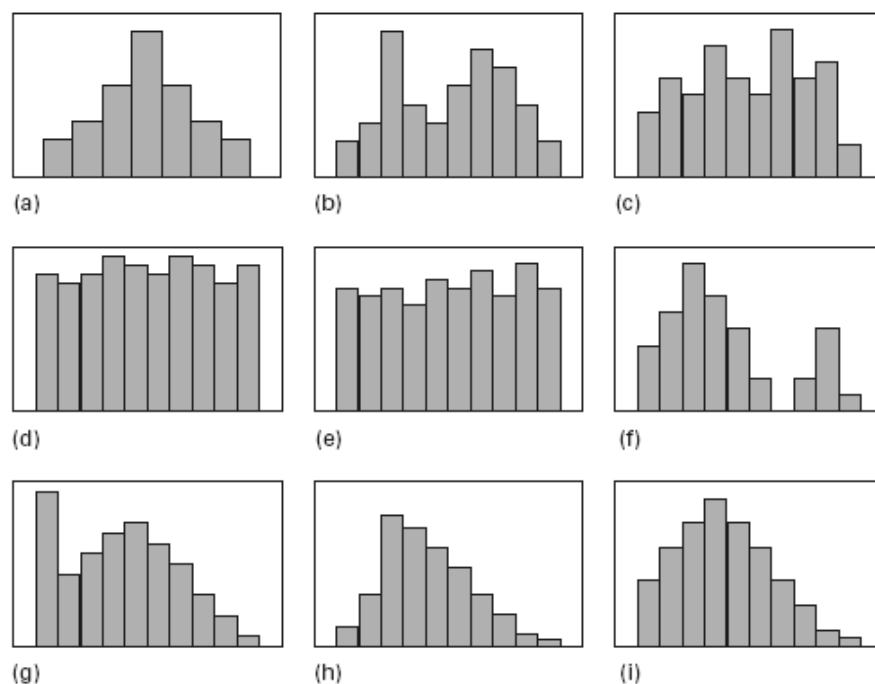


Слика 51. Стање једног средства, број исправних комада, за интервал од 3 године, „глас процеса“

### Тумачење хистограма и контролних графова

Хистограм, иако важан инструмент, не говори ништа о понашању процеса по времену. На пример, могуће је да су све ниске вредности (параметра) забележене прво, а високе вредности трају константно, или да је након сваке ниске вредности постојала висока. Вредност хистограма је ипак велика, јер јасно указује на расипања у процесу. Алат за

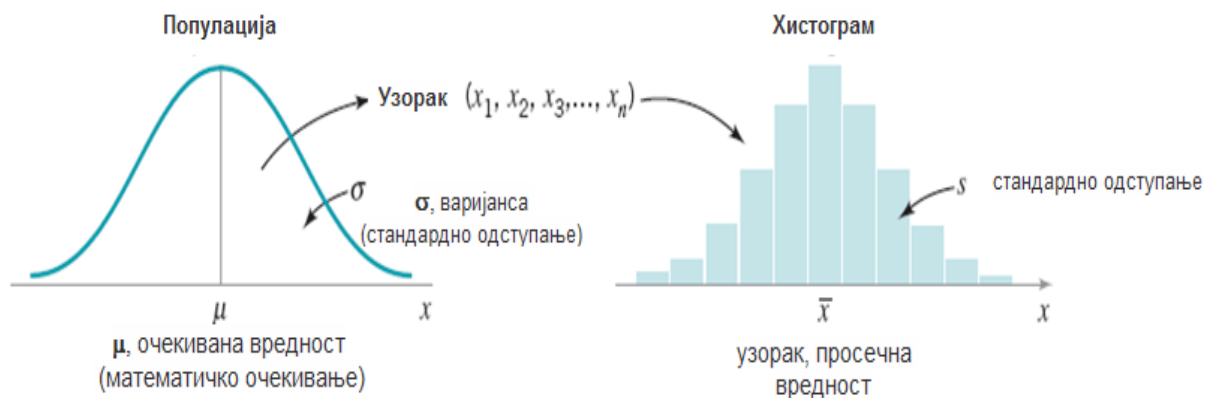
откривање трендова или образаца понашања у подацима је графикон у форми податак-време. Такав графикон репрезентује карактеристику процеса у времену. Као и хистограм, служи да се одреде минималне и максималне вредности и средња вредност изабраног параметра. За разлику од хистограма, може да укаже на трендове, сезонске појаве и скокове у процесу.



Слика 52. Карактеристични облици хистограма

Хистограм ипак може да укаже на неке особине процеса. На слици 52, под (а) је пример типичне нормалне расподеле која описује стабилан процес са мало расипања. Под (b), „двоструки врх“, је случај да су „два“ процеса комбинована у исто време (допринос две радне машине, радне смене и сл.). Под (c, d) је случај постојања „више“ подпроцеса у главном процесу са различитим доприносом у резултатима. Под (e) је случај наизменичних стања виших и нижих вредности, може да укаже на грешке у мерењима (заокруживања) или на неодговарајући избор интервала мерења у конструкцији хистограма. У овом случају треба преиспитати податке и начин груписања (конструкција хистограма) пре покушаја да се открију узроци који изазивају овакво стање процеса. Под (f) је случај „раздвојене“ расподеле, где су средње вредности веома различите. Ако једна од две расподеле има само неколико вредности, то указује на повремено подпроцес као нпр. привремено и повремено ангажовање додатних ресурса у некој активности. Случај под (g) указује на процесе у којима постоји захтевани или специфицирани лимит неке вредности. Често може да укаже на нетачно намерно извештавање где се не жели приказати вредности испод захтеваног лимита, па се пријаве вредности изнад лимита. Ако специфицирани лимит има више вредности, ивица хистограма се помера удесно. Под (h) је случај „распршене“ расподеле где средња вредност (mode) није у средини и где је карактеристичан дуги или кратки „реп“ у дистрибуцији података. Ово је чест случај код ситуација где максимална вредност појаве није ограничена а минимална, нула, увек постоји (нпр. број инцидената, отказа или одбацивања). Распршени подаци са „грбом“ на десној страни се морају истражити пре доношења закључка. И под (i), приказан је случај у коме облик хистограма указује да је неком административном акцијом уклоњен део података, односно нпр. контрола квалитета је уклонила производе са нижим вредностима неке особине.

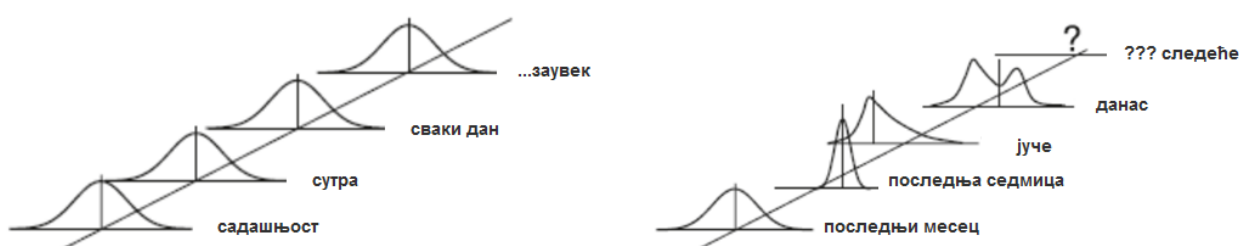
Осим наведеног, хистограм (слика 53) служи и да се на основу узорка донесе закључак о целој популацији (неке појаве или својства).



Слика 53. Хистограм као алат за процену понашања неке популације (Montgomery, 2009.)

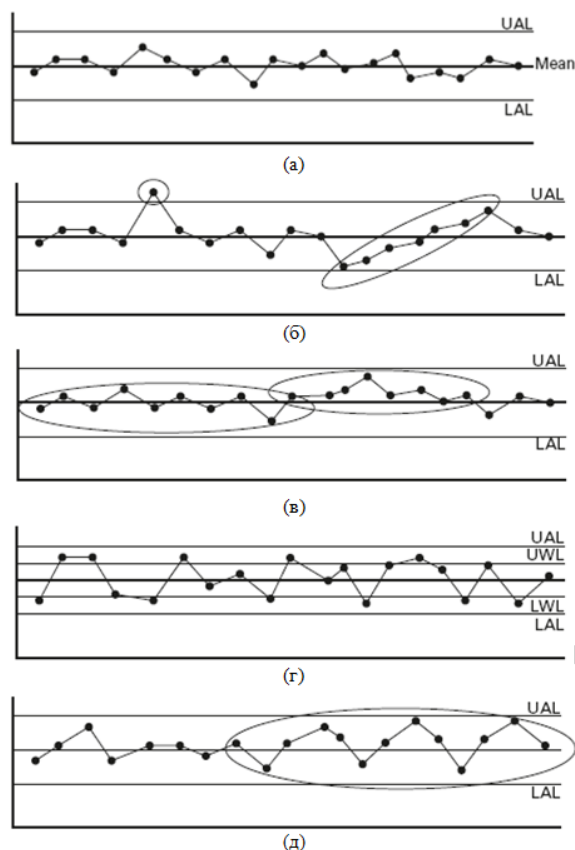
У овом случају циљ статистичког закључивања (слика 53) је доношење закључака или доношење одлука о популацији на основу узорка одабраног од популације.

Ако се хистограм (неке појава или својство) конструише по временским интервалима, онда може послужити за закључивање о својствима процеса по времену и евентуално за предвиђање понашања у будућности (слика 54).



Слика 54. Хистограм као алат за процену понашања (Montgomery, 2009.)

Контролни графови могу директно указати на неке појаве у процесу, а карактеристични примери су дати на слици 55 (а-д). Значење натписа је следеће: upper action limit (UAL), горња контролна линија; lower action limit (LAL), доња контролна линија; upper warning limit (UWL), горња упозоравајућа линија; lower warning limit (LWL), доња упозоравајућа линија; mean средња вредност. Процес је под контролом, подаци су случајно дистрибуирани и окупљени око средње вредности унутар лимита и без очигледних образаца груписања (а). Процес није под контролом, вредности су изван контролних лимита и постоје трендови (б). Процес није под контролом, постоје серије вредности изнад/испод просечне вредности (в). Процес није под контролом, вредности нису распоређене око средње вредности (г). Процес указује на цикличне појаве/специфичне образце понашања (д).



Слика 55. Специфичне појаве и индикације на графу контролне карте (Oakland S.J., 2003.)

## 7.5. Сопствено истраживање применом SPC стратегије

Систематска студија процеса се може извршити одговором на питања: може ли да се посао одвија исправно (способност), да ли се посао обавља исправно (контрола), да ли је посао обављен исправно (квалитет) и да ли се посао може урадити боље (унапређење). Без улажења у дефинисану област статистичке контроле процеса, која је алат али и стратегија за смањење варијација у процесу, употребом контролних дијаграма сагледава се понашање процеса одржавања (варијације) и употребом хистограма се сагледава облик (закон) варијација.

Захваљујући уређеном систему документовања акција одржавања, на располагању су вишегодишњи записи о појединачним акцијама одржавања, по врстама опреме, месечне рекапитулације одржавања и годишње анализе одржавања. У складу са циљевима истраживања, а то је стратегијски поглед на проблем одржавања, расположиви подаци о одржавању су сређени у форми табела, које у редовима по месецима као временској јединици обухватају број средстава која су одржавана и утрошено време за одржавање, за превентивно и корективно одржавање. Редовима су представљене различите врсте опреме која се одржава.

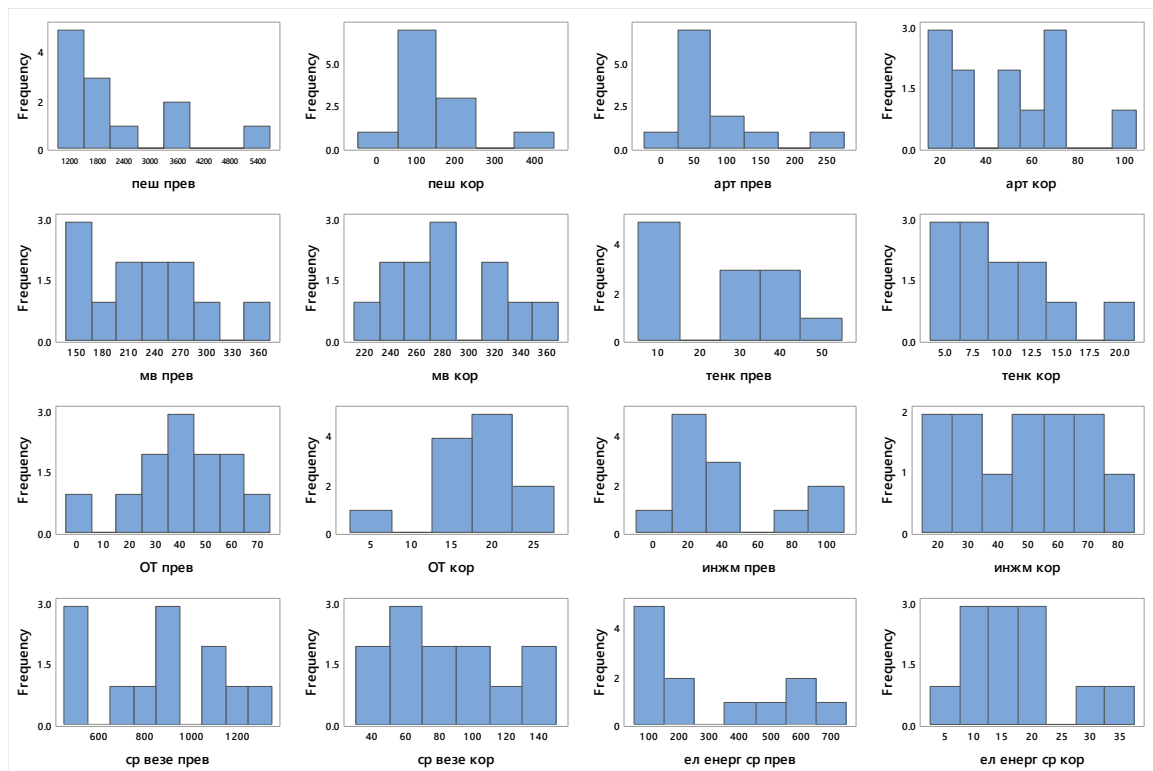
Табела 12.- Принципијелни изглед сређених података о одржавању

2014, 2015, 2016											
Врста опреме	акције одрж.	јан		феб		мар		”””		дец	
		Σ комада	Σ време (h)	Σ комада	Σ време (h)	Σ комада	Σ време (h)	Σ комада	Σ време (h)	Σ комада	Σ време (h)
опрема 1	прев.	22551	320					...			
	корект.	250	61						...		
опрема 2	прев.	191	2633							...	
	корект.	296	2608								...
...	прев.			...							
	корект.				...						
опрема n	прев.					...					
	корект.						...				

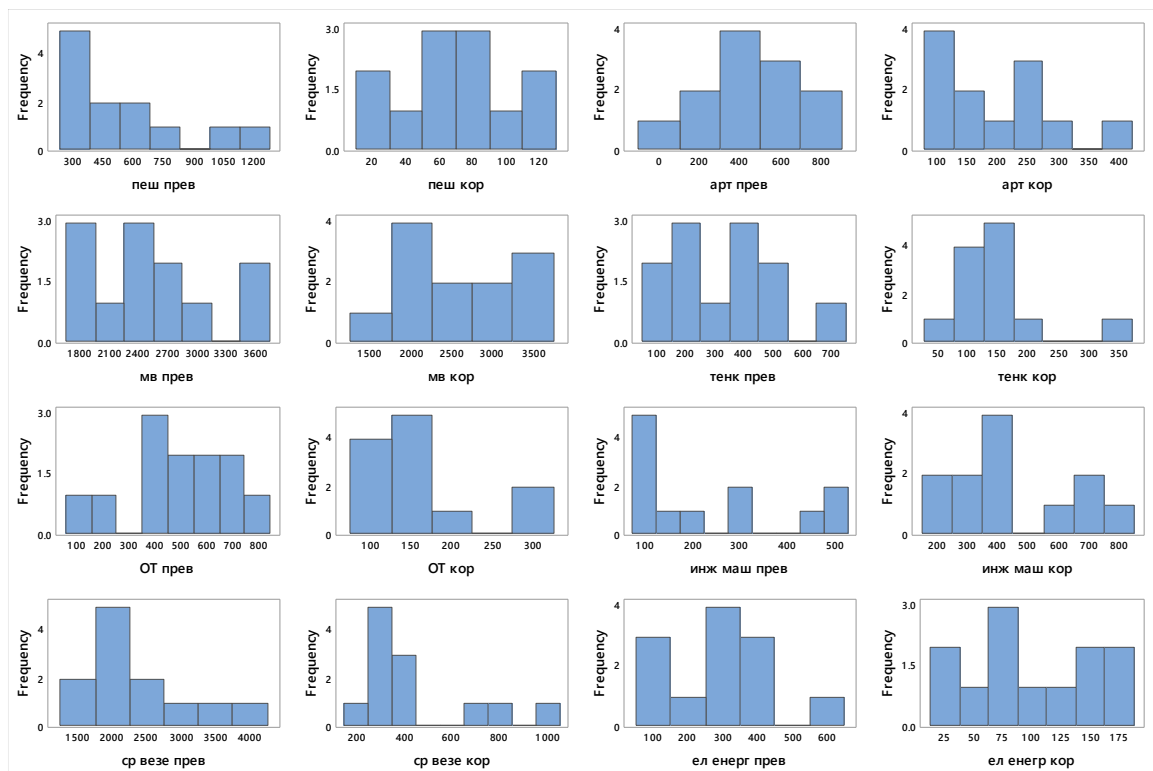
У табели 12 је приказана форма извештајне табеле, на основу које се могу вршити анализе. Генерално, извор свих података су: јединични радни налози са свим подацима о средству које се одржава, планови одржавања, прегледи исправности и расположивости опреме, прегледи неисправности, прегледи механичара-бројно стање, специјалности и распоред, прегледи извршења планова превентивног и корективног одржавања, прегледи искоришћења капацитета за одржавање (са структуром оствареног капацитета и губицима), прегледи ангажовања уговорних капацитета, прегледи требовања резервних делова и материјала и степен задовољења захтева, прегледи општег и специјалног алата, прегледи стања инфраструктуре за одржавање (објекти, радионице), цене делова и услуга и др.

За једногодишњи период, за збир вредности по месецима, изглед хистограма којима се описује облик варијација броја средстава која су одржавана и утрошеног времена за одржавање (превентивно и корективно одржавање), за више врста опреме, дат је на сликама: 56-57. Уједно је извршена оцена претпостављене математички дефинисане расподеле (слике 58-59) за једну врсту опреме. Подаци се односе за 2016. годину. Анализом је обухваћена формација која обухвата 50% -80% опреме војске.

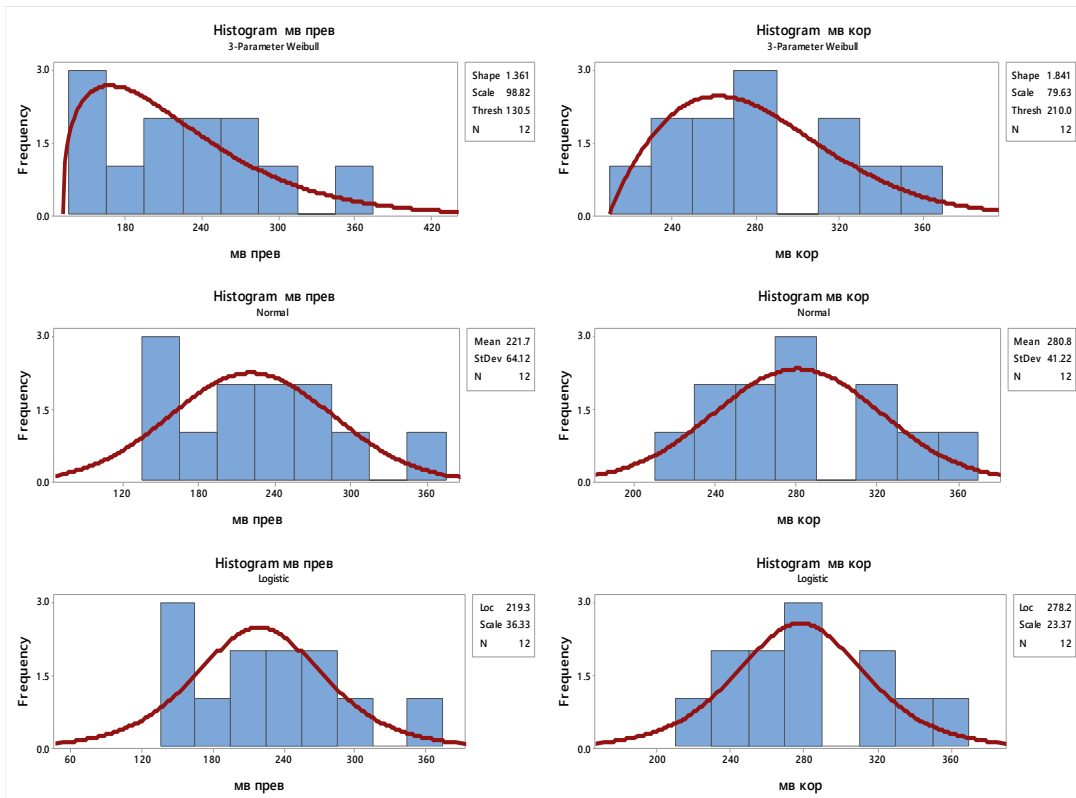




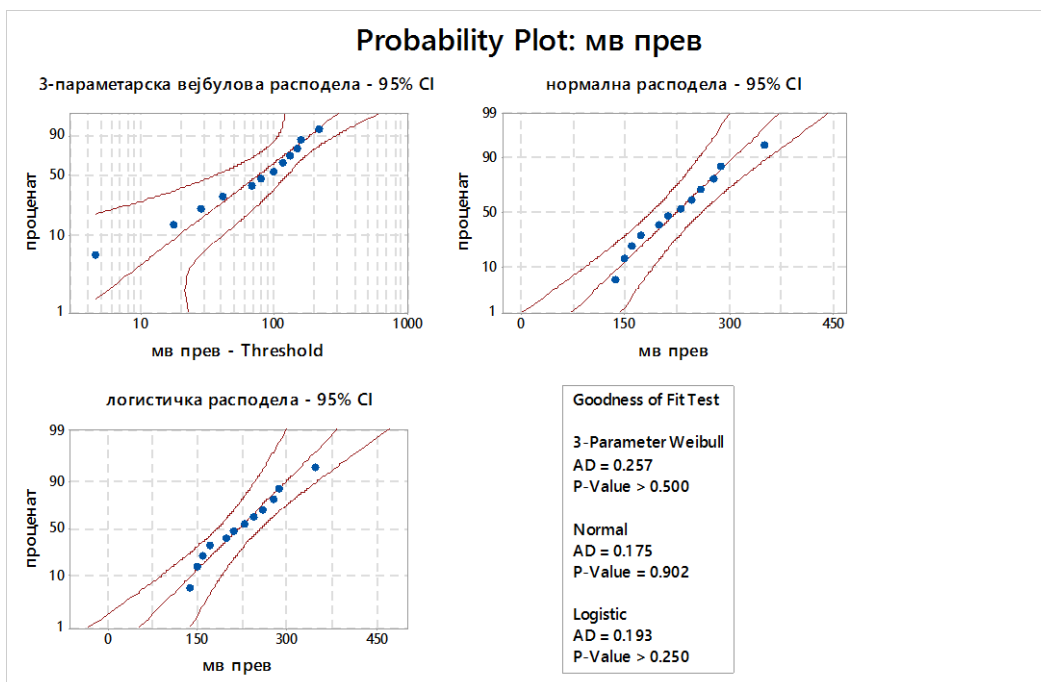
Слика 56. Расподела броја средстава која су одржавана по месецима.



Слика 57. Расподела времена одржавања по месецима



Слика 58. Број средстава, апроксимација дистрибуције теоријским (математичким) расподелама, за једну врсту опреме

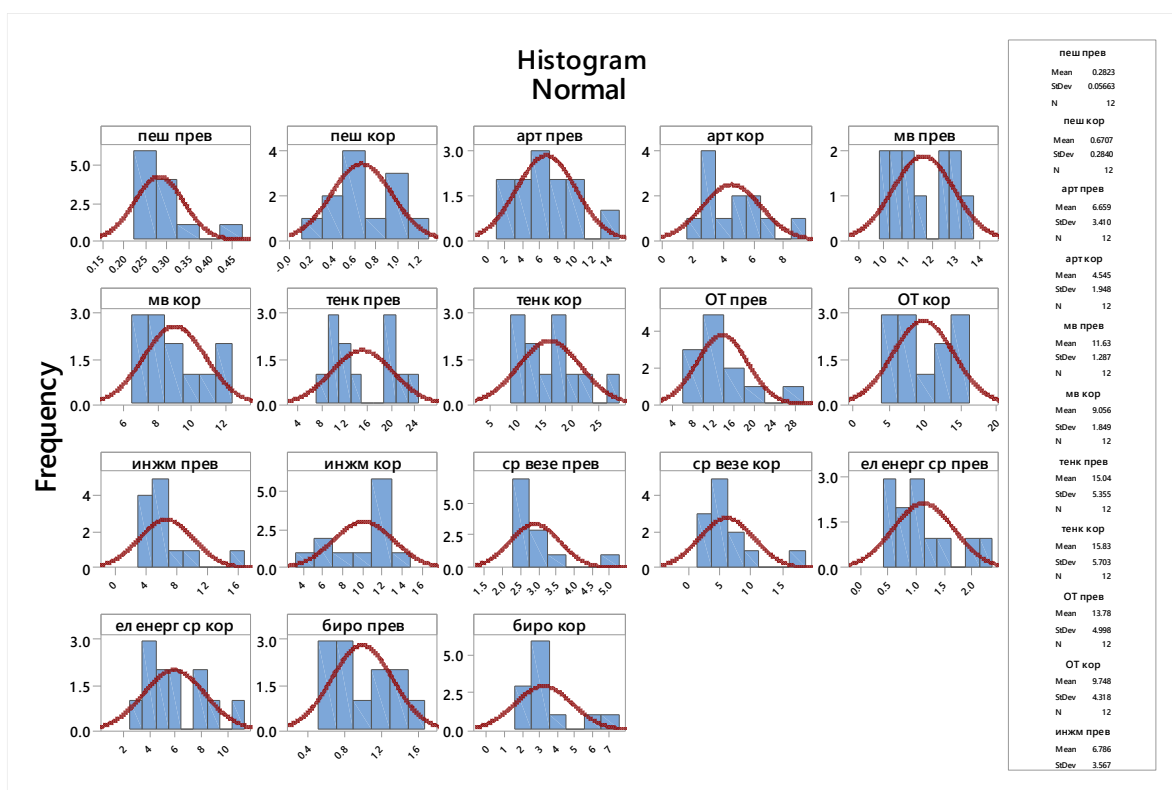


Слика 59. Оцена оправданости примене нормалне дистрибуције, приказ упоређења теоријских расподела (месечни ниво) и пример оцене „доброте“

Када је потребно економично и ефикасно одредити која теоријска расподела најбоље описује стварну појаву (подаци о понашању система одржавања, у конкретном примеру број возила по месецима подвргнутих превентивном одржавању), може се употребити алат *Individual distribution identification* из пакета MiniTab. Оцена погодности расподеле се заснива на графику вероватноће (probability plot) и статистичких тестова који проверавају

фреквенцију прикупљених података (хистограм) или одступање података од теоријске расподеле (goodness of fit test). Тестови (слика 59), другим речима, упоређују случајни узорак са теоријским дистрибуцијама. У реалним појавама се ретко дешава да оне прате идеално неку од теоријских расподела. Према томе, тестови представљају водич за одлуку о употреби неке од теоријских расподела као погодне за одређени случај. График вероватноће представља праву линију око које се блиско налазе вредности измерених података (ако је теоријска расподела добро изабрана) а уједно су унутар граница интервала поверења (95% у овом случају, на графу означено са CI-Confidence intervals, или  $\alpha=0.05$ ) које су репрезентоване закривљеним линијама око праве линије. Што мања вредност AD (Anderson-Darling test (AD), за разне дистрибуције) и  $p\text{-value} > \alpha$  указују на добро изабрану теоријску расподелу (Öner, 2017.).

Из наведеног се може даље дефинисати приближна карактеристика MTTR (слика 60), за превентивно и корективно одржавање, за више врста опреме, што је карактеристика која боље описује систем одржавања у односу на MTBF, што је више особина самог техничког система.



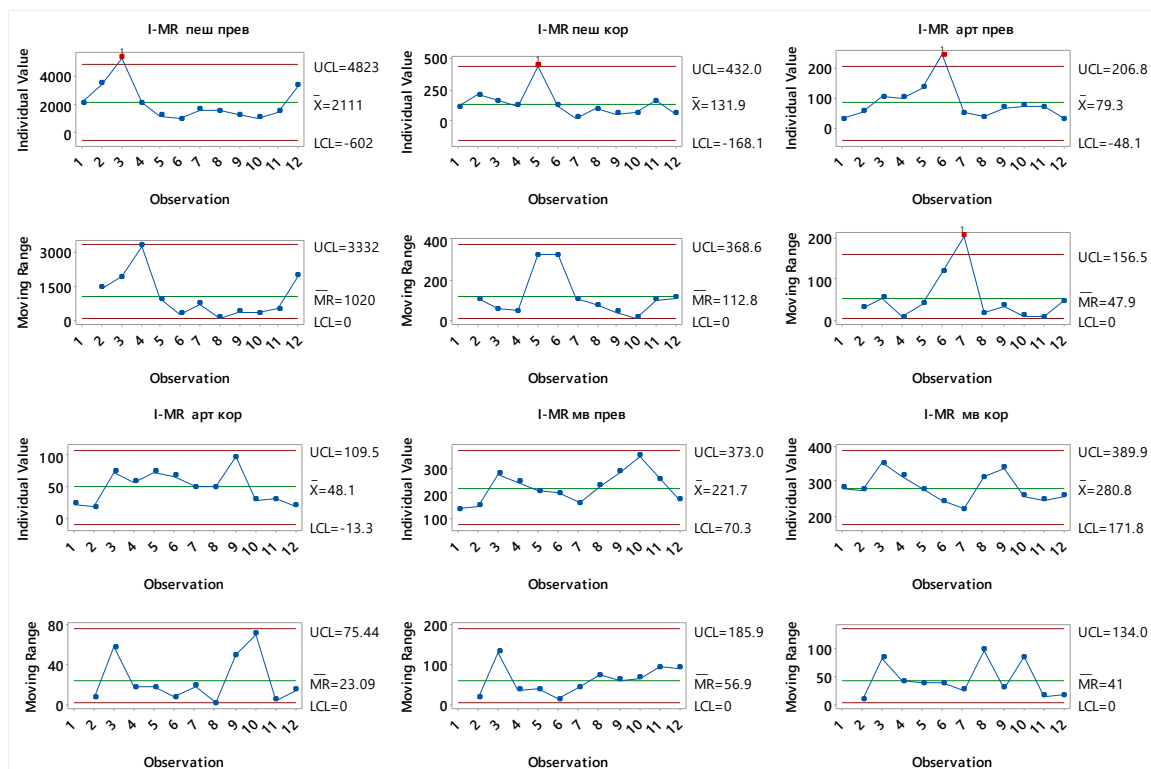
Слика 60. Карактеристика MTTR

За теоријску расподелу је ради илустрације приказана нормална (слика 60), али се описаном процедуром (слика 58 и 59) може одредити адекватна која најбоље описује појаву.

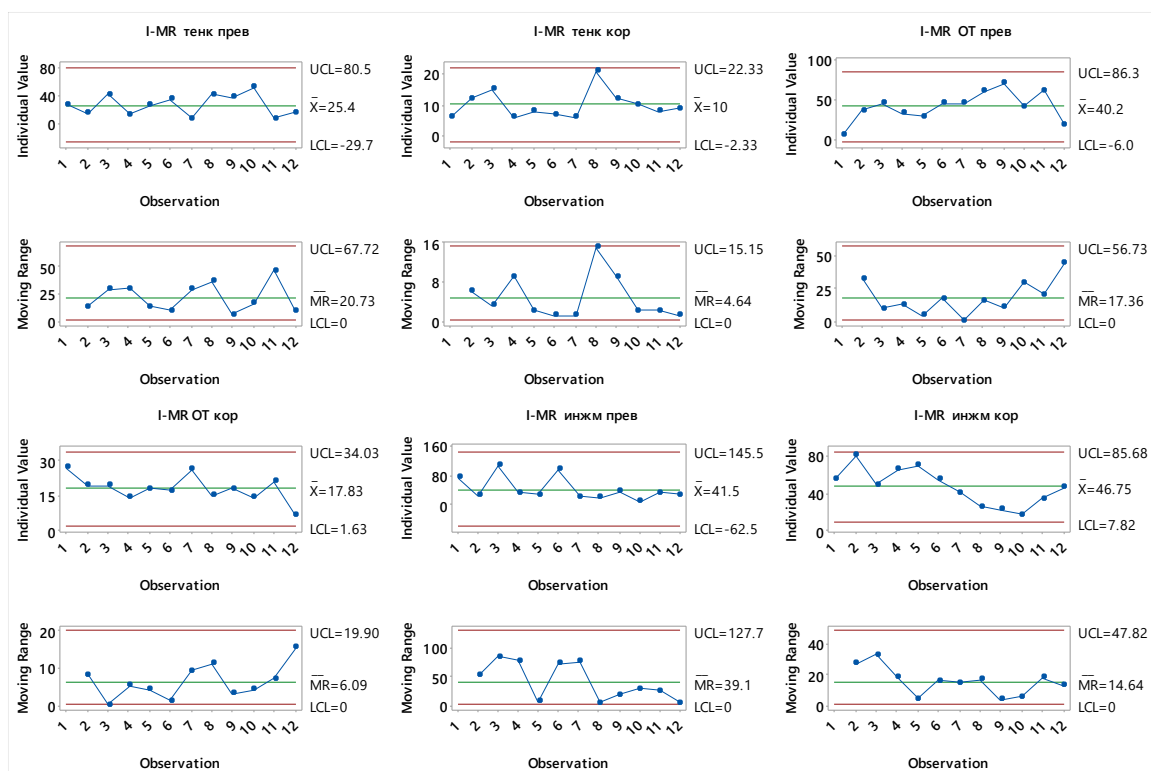
Применом контролног графа за 9 најважнијих група опреме оцењује се стабилност процеса, према критеријумима број средстава и време одржавања (превентивно и корективно одржавање). За временски интервал је узето 30 дана (месец). Подаци се односе на 2016. годину.

Пар контролних графова, вредност параметра (*Individuals*) и промене параметра (*Moving Range*) који се у енглеској литератури означава скраћено као „X-MR chart“ или „I-MR chart“ и који се односи на један параметар процеса који се анализира, користи се за одређивање да ли је процес стабилан и предвидив, односно описује како се процес понаша у времену. Граф параметара (*Individual (X) chart*) приказује вредности параметра у дефинисаним временским интервалима. Граф промене параметра (*Moving Range (MR) Chart*) приказује

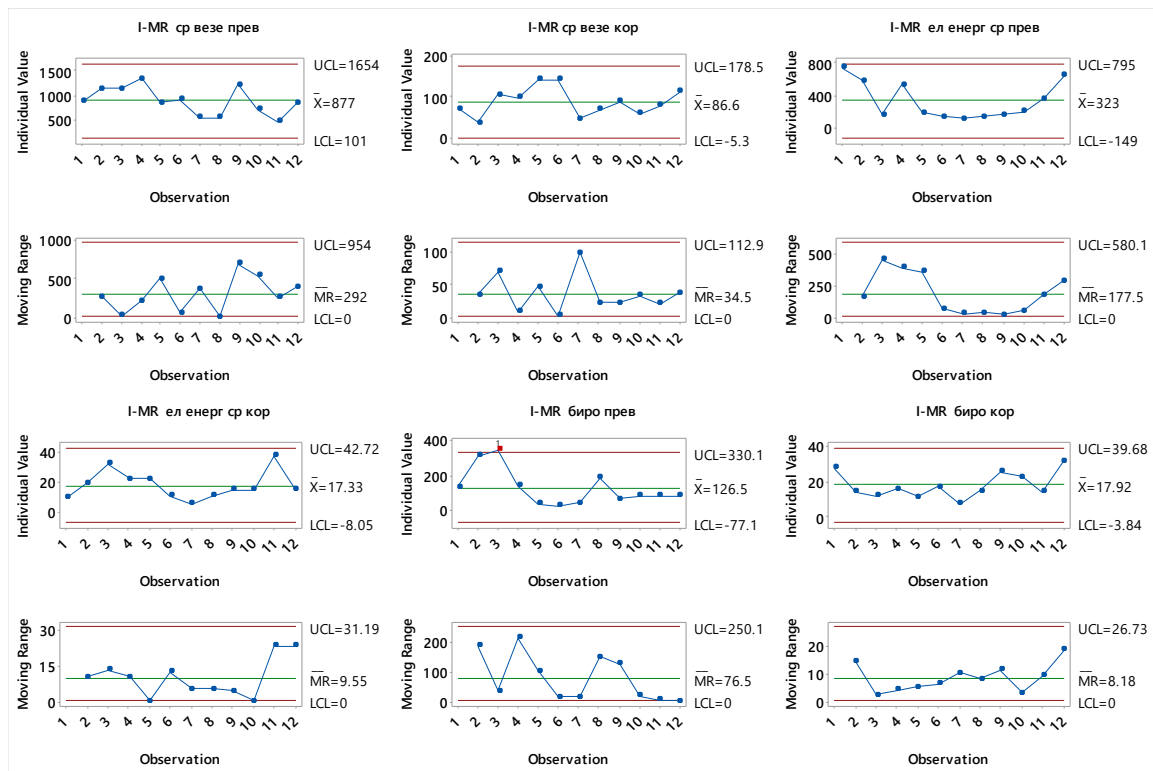
варијацију вредности параметра између две мерне тачке. Ови графови се користе и за мониторинг ефекта усавршеног процеса. Најпре се приказују контролни графови који су репрезентација броја средстава која су одржавана (превентивно и корективно одржавање), што је дато на сликама 61-63.



Слика 61. Контролни граф типа  $X/\overline{MR}$  или  $I-MR$ , број опреме у одржавању по месецима (оружје, артиљерија, теренско теретна возила)

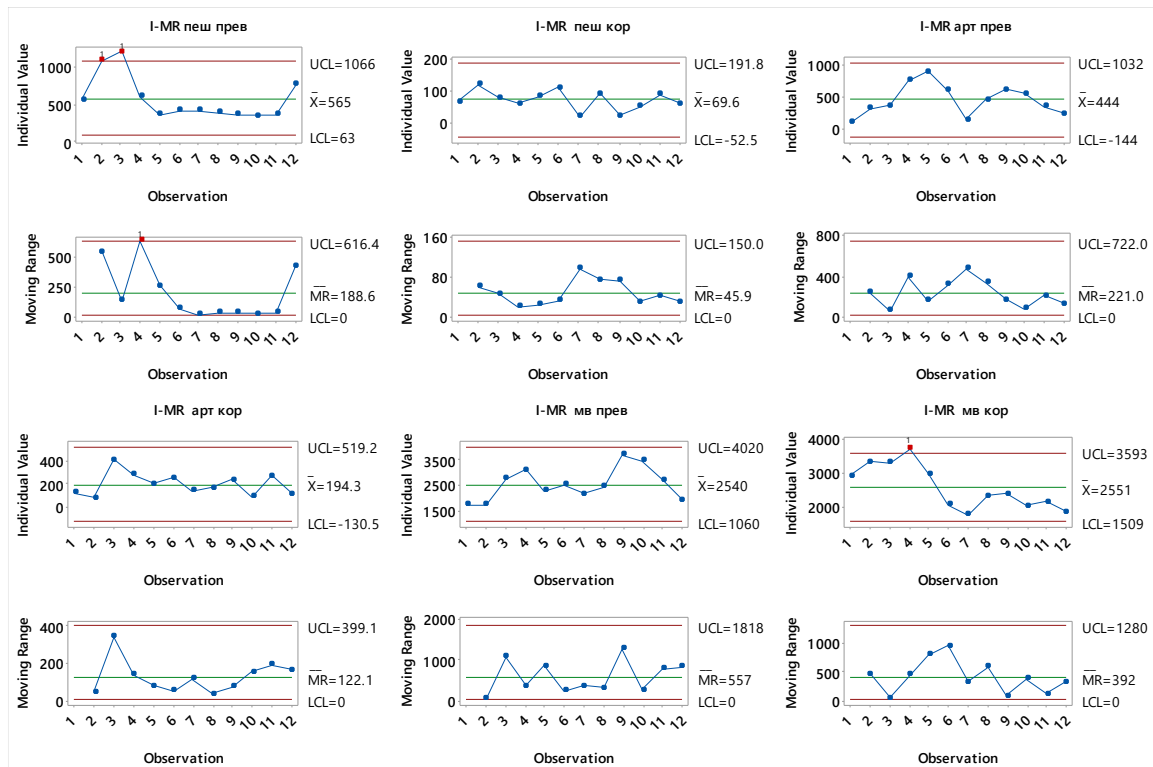


Слика 62. Контролни граф типа  $X/\overline{MR}$  или  $I-MR$ , број опреме у одржавању по месецима (тенкови, транспортери, инжињеријске машине)

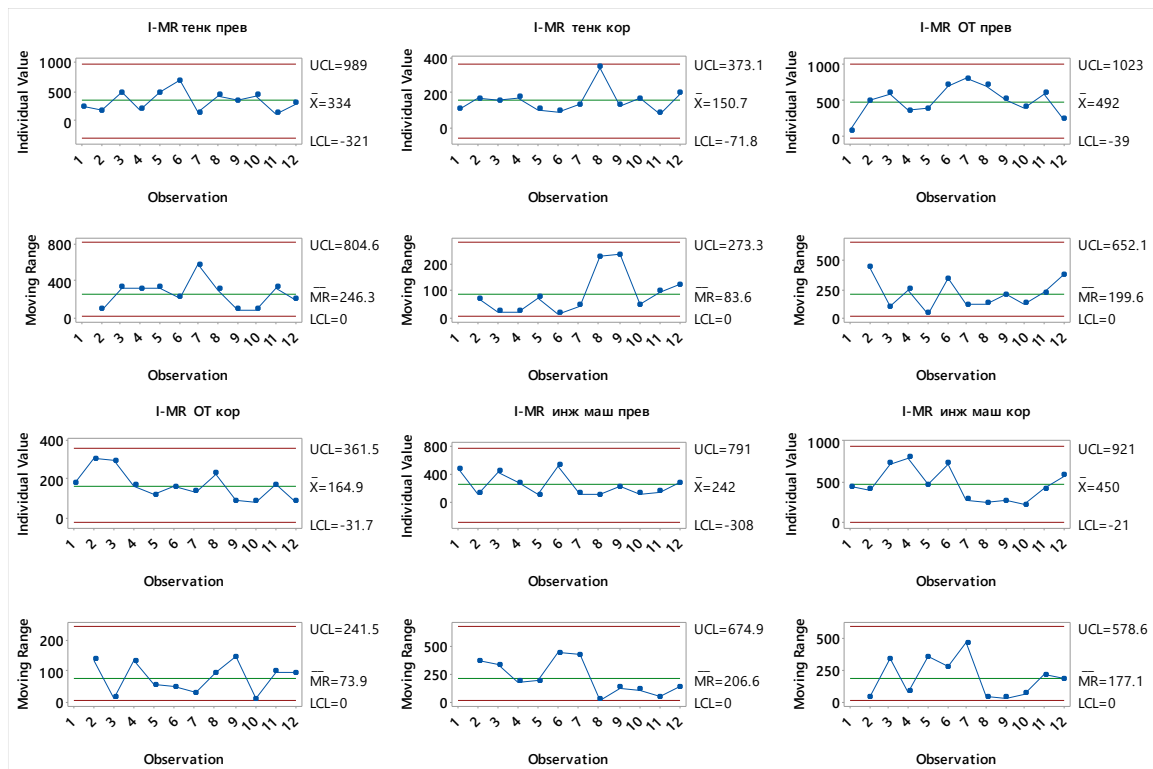


Слика 63. Контролни граф типа  $X/\overline{MR}$  или  $I-MR$ , број опреме у одржавању по месецима (средства везе, електроенергетска средства, биро опрема)

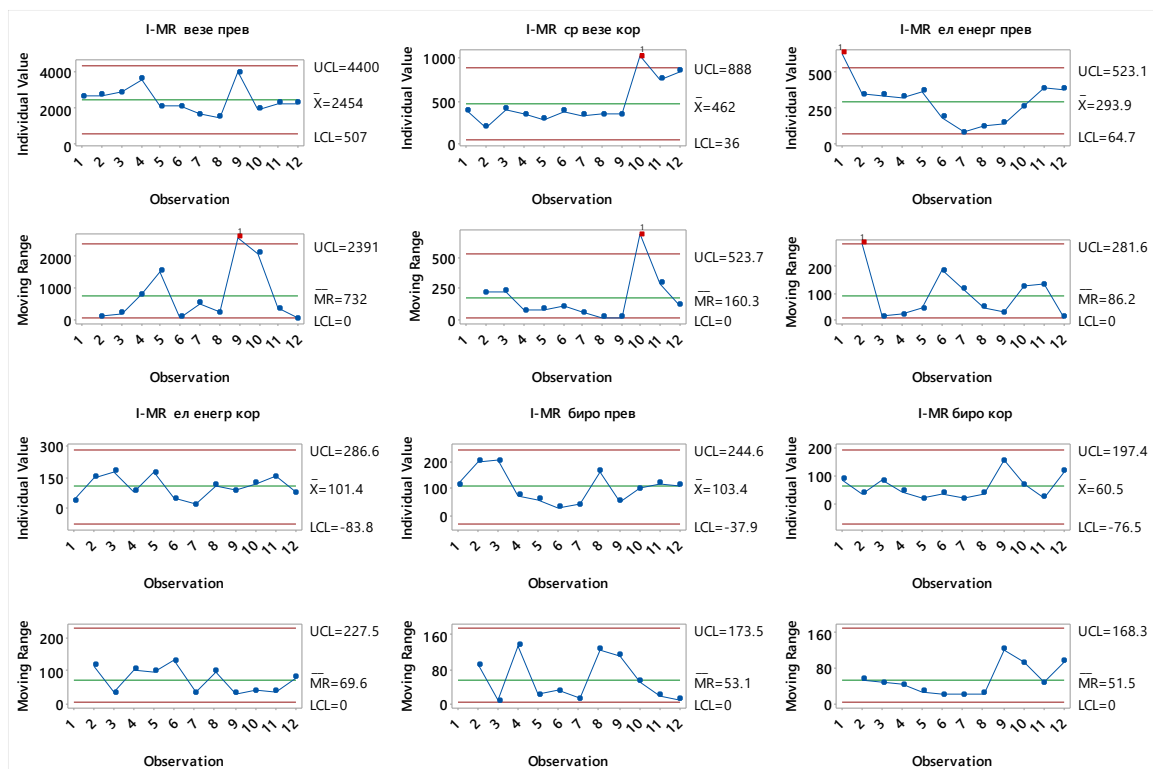
Затим се приказују контролни графови који су репрезентација времена трајања одржавања (превентивно и корективно одржавање), што је дато на сликама 64-66.



Слика 64. Контролни граф типа  $X/\overline{MR}$  или  $I-MR$ , време рада механичара у акцијама одржавања по месецима (оружје, возила, борбена возила)

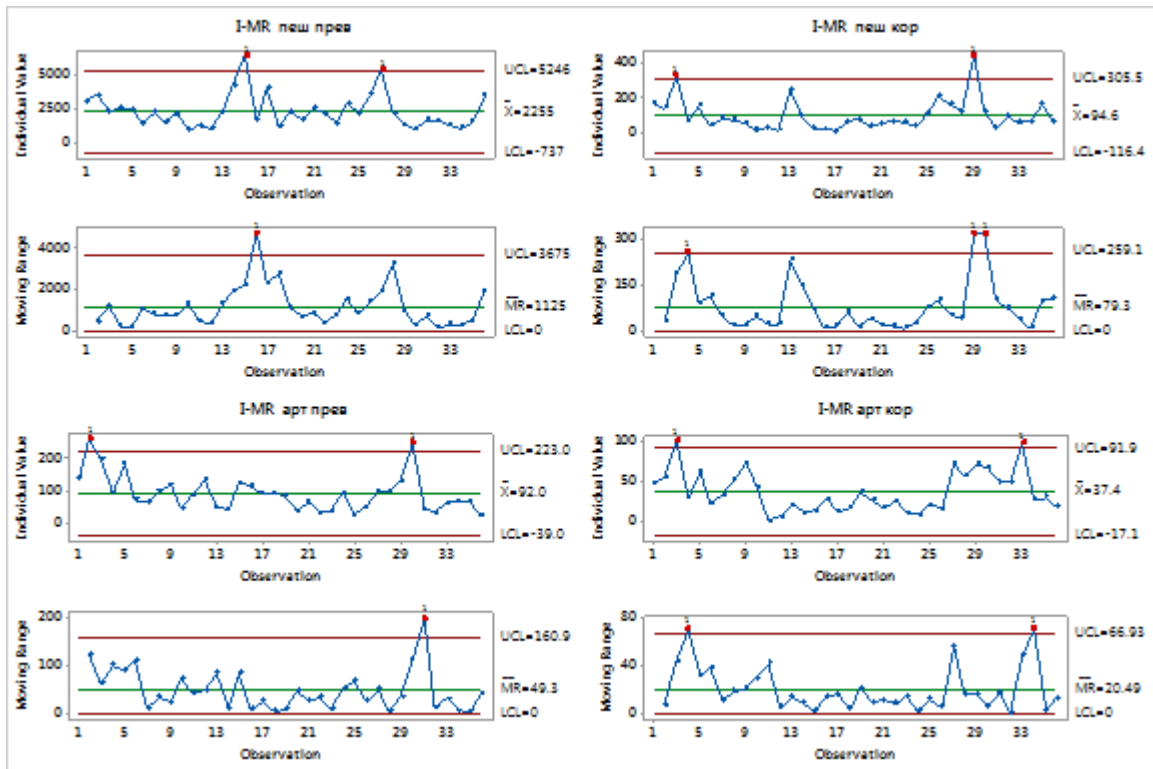


Слика 65. Контролни граф типа  $X/\overline{MR}$  или  $I-MR$ , време рада механичара у акцијама одржавања по месецима (тенкови, транспортери, инжињеријске машине)

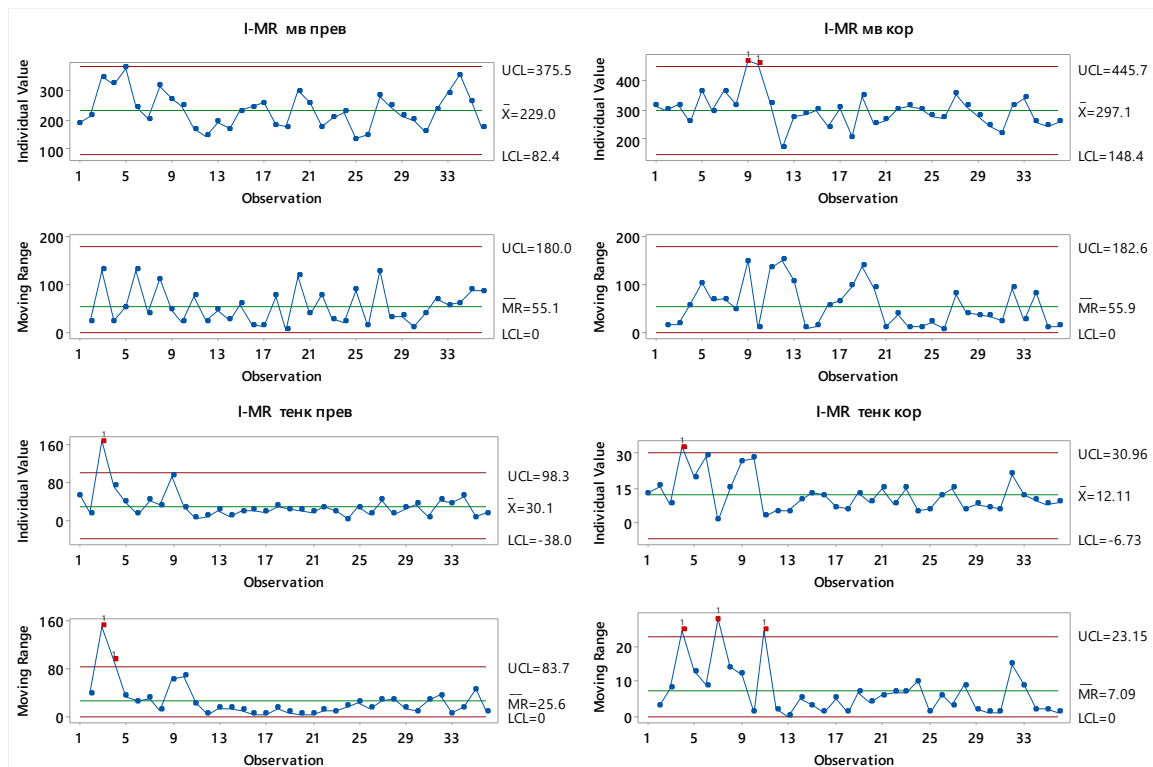


Слика 66. Контролни граф типа  $X/\overline{MR}$  или  $I-MR$ , време рада механичара у акцијама одржавања по месецима (средства везе, електроенергетска средства, биро опрема)

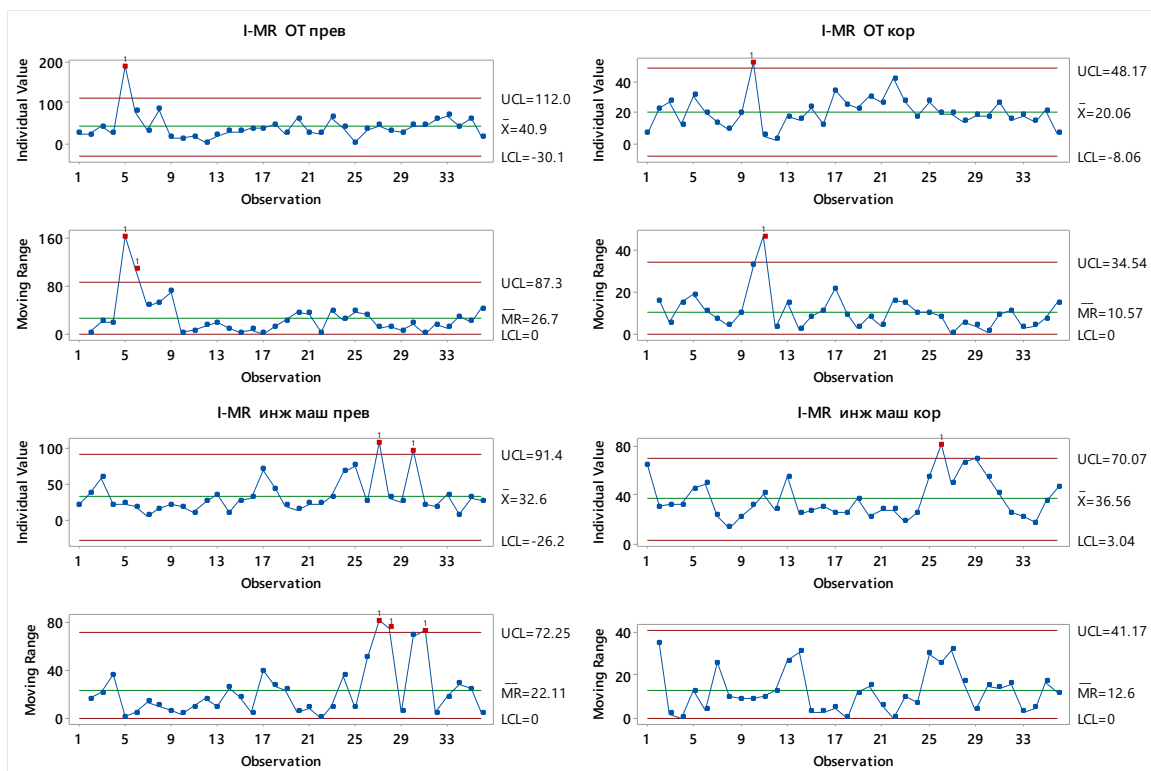
Због јасно видљивих нестабилности процеса одржавања који се огледа у значајним варијацијама броја опреме која се подвргава одржавању и времена одржавања, узорак анализе се са једне године повећава на три године односно за период 2014.-2016. године. Прво се анализира број опреме (слике 67-70) која се подвргава одржавању, а затим и времена трајања одржавања (слике 71-74).



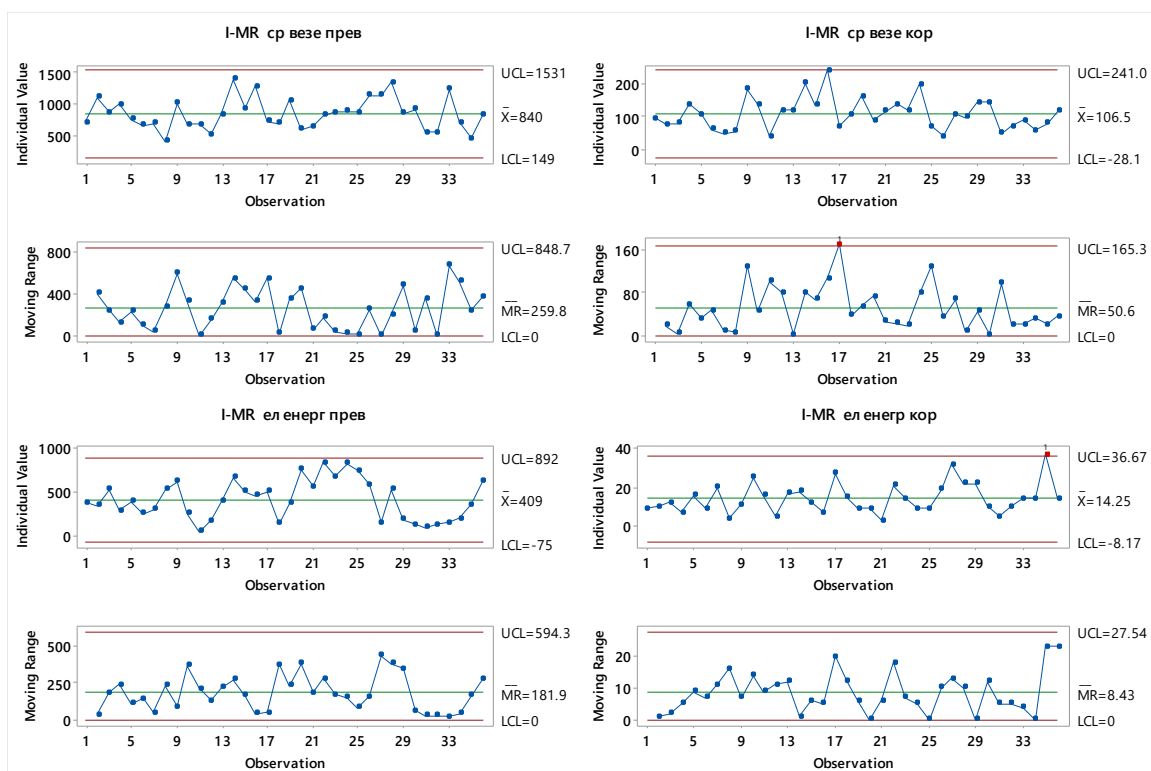
Слика 67. Контролни граф типа  $X/\overline{MR}$  или  $I-MR$ , број опреме у одржавању по месецима (оружје, артиљерија)



Слика 68. Контролни граф типа  $X/\overline{MR}$  или  $I-MR$ , број опреме у одржавању по месецима (возила, тенкови)

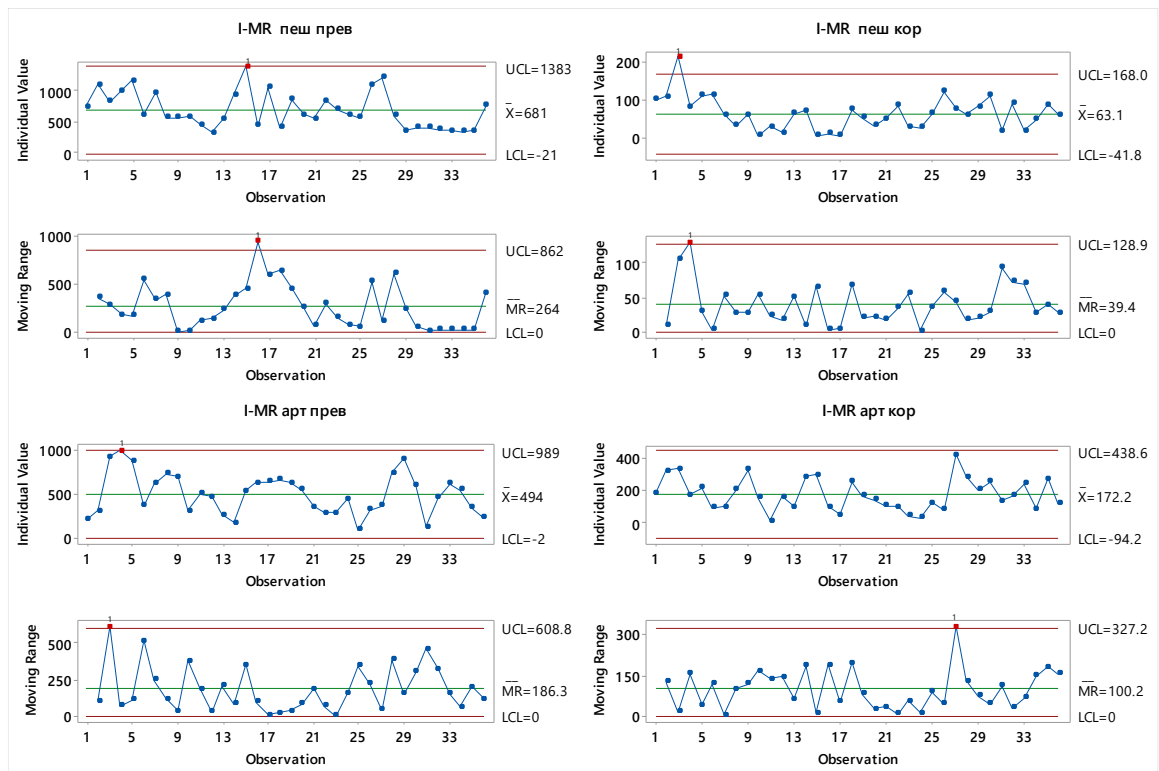


Слика 69. Контролни граф типа  $X/MR$  или  $I-MR$ , број опреме у одржавању по месецима (транспортери, инжењерија возила)

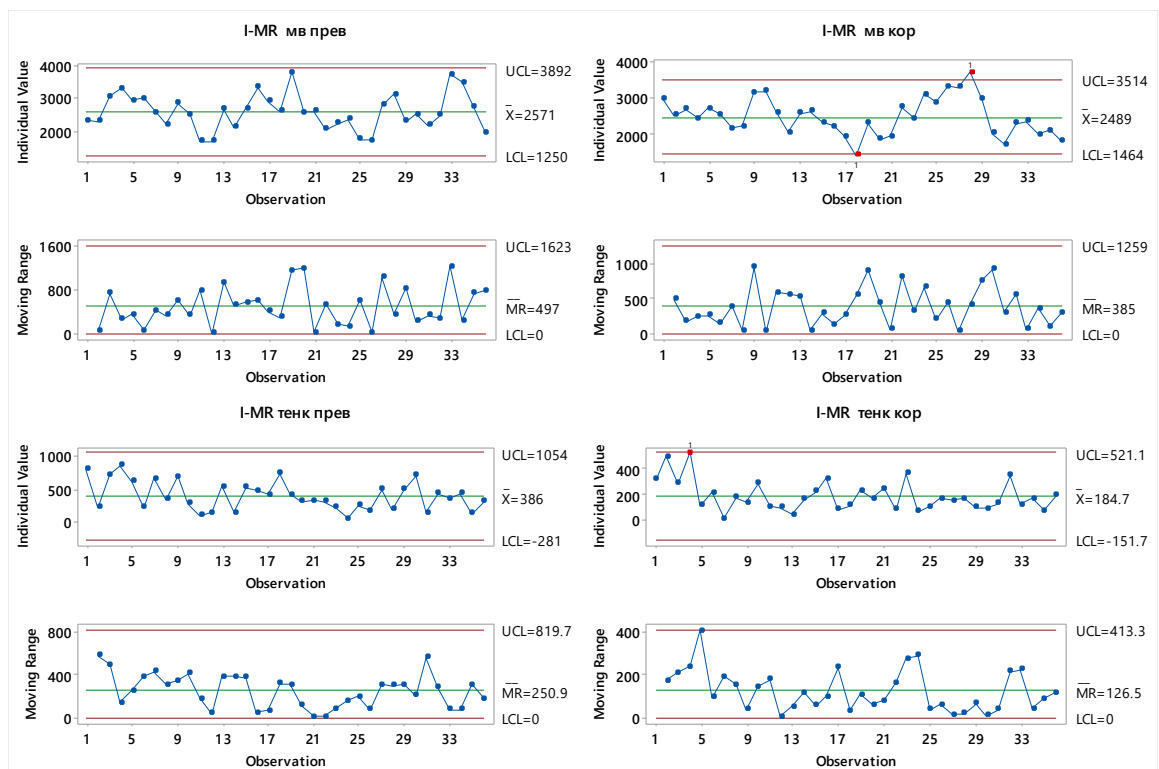


Слика 70. Контролни граф типа  $X/MR$  или  $I-MR$ , број опреме у одржавању по месецима (средства везе, електро-енергетска средства)

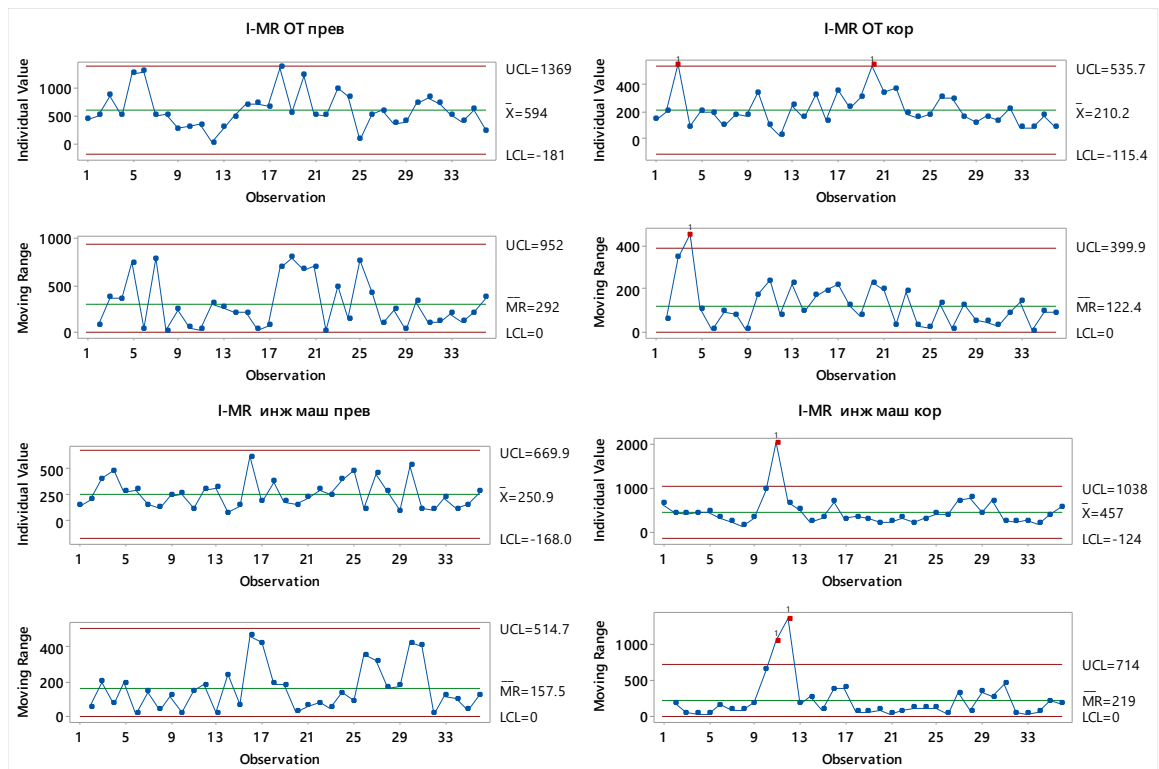




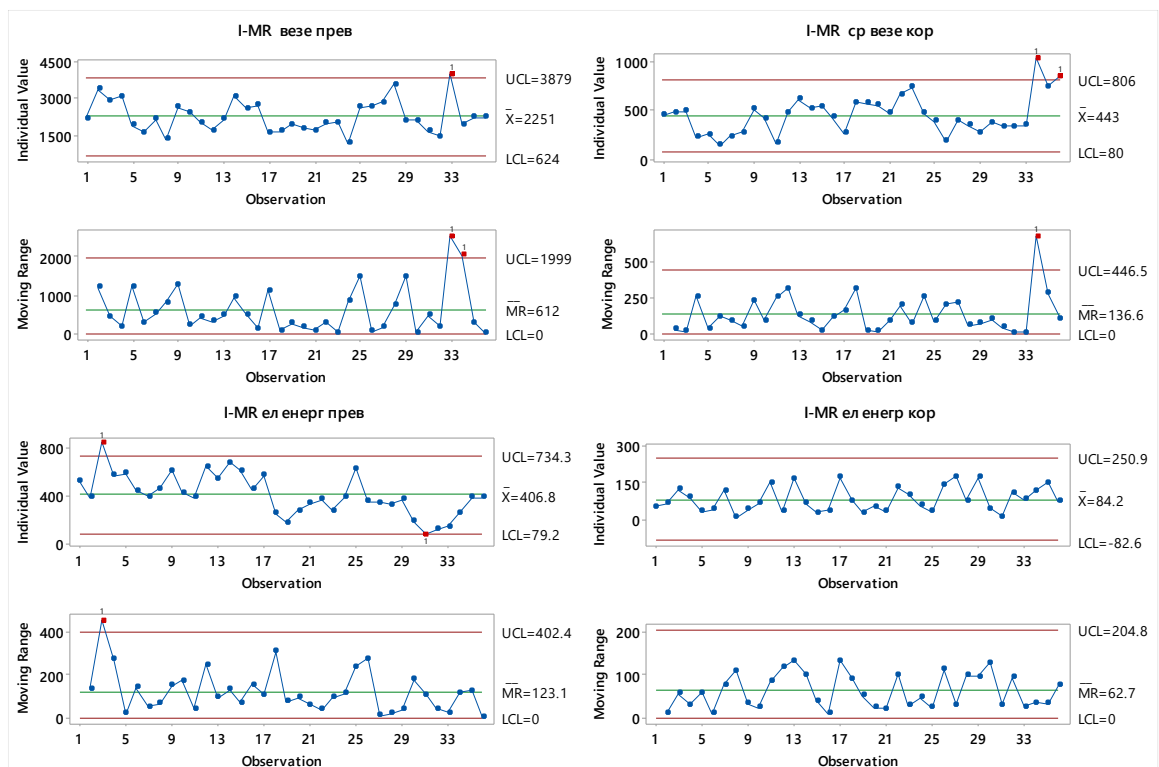
Слика 71. Контролни граф типа  $X/\overline{MR}$  или  $I-MR$ , време рада механичара у акцијама одржавања по месецима (оружје, артиљерија)



Слика 72. Контролни граф типа  $X/\overline{MR}$  или  $I-MR$ , време рада механичара у акцијама одржавања по месецима (возила, борбена возила)

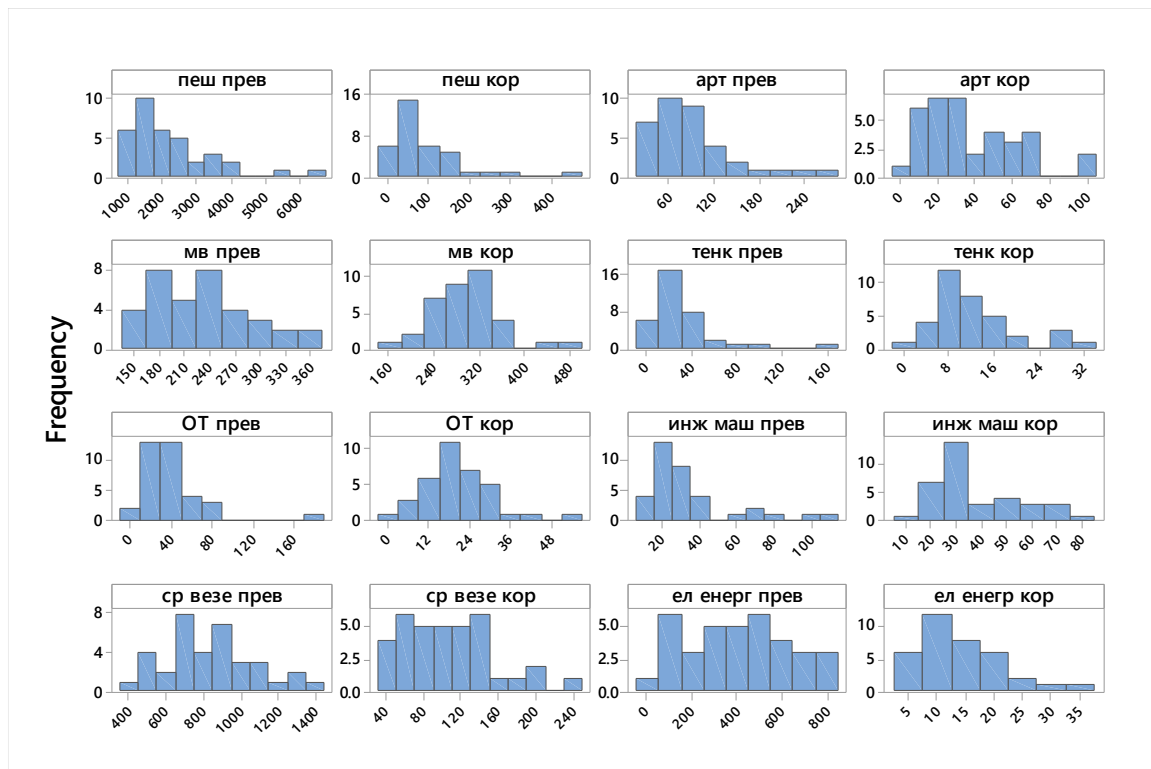


Слика 73. Контролни граф типа  $X/\overline{MR}$  или  $I-MR$ , време рада механичара у акцијама одржавања по месецима (транспортери, инжињеријска возила)

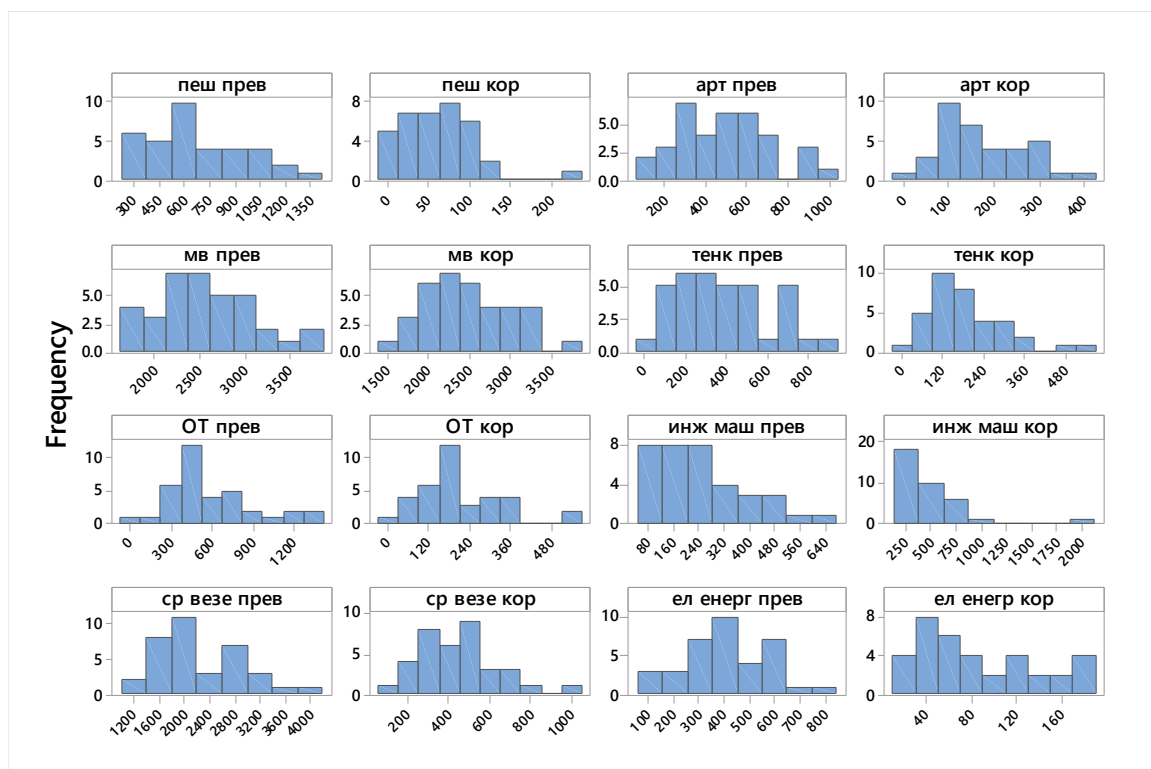


Слика 74. Контролни граф типа  $X/\overline{MR}$  или  $I-MR$ , време рада механичара у акцијама одржавања по месецима (средства везе, електро-енергетска средства)

Изглед хистограма којима се описује облик варијација броја средстава која су одржавана и утрошеног времена за одржавање (превентивно и корективно одржавање), за више врста опреме, дат је на слици 75 и 76. Уједно је извршена оцена претпостављене математички дефинисане расподеле времена одржавања (слика 77).

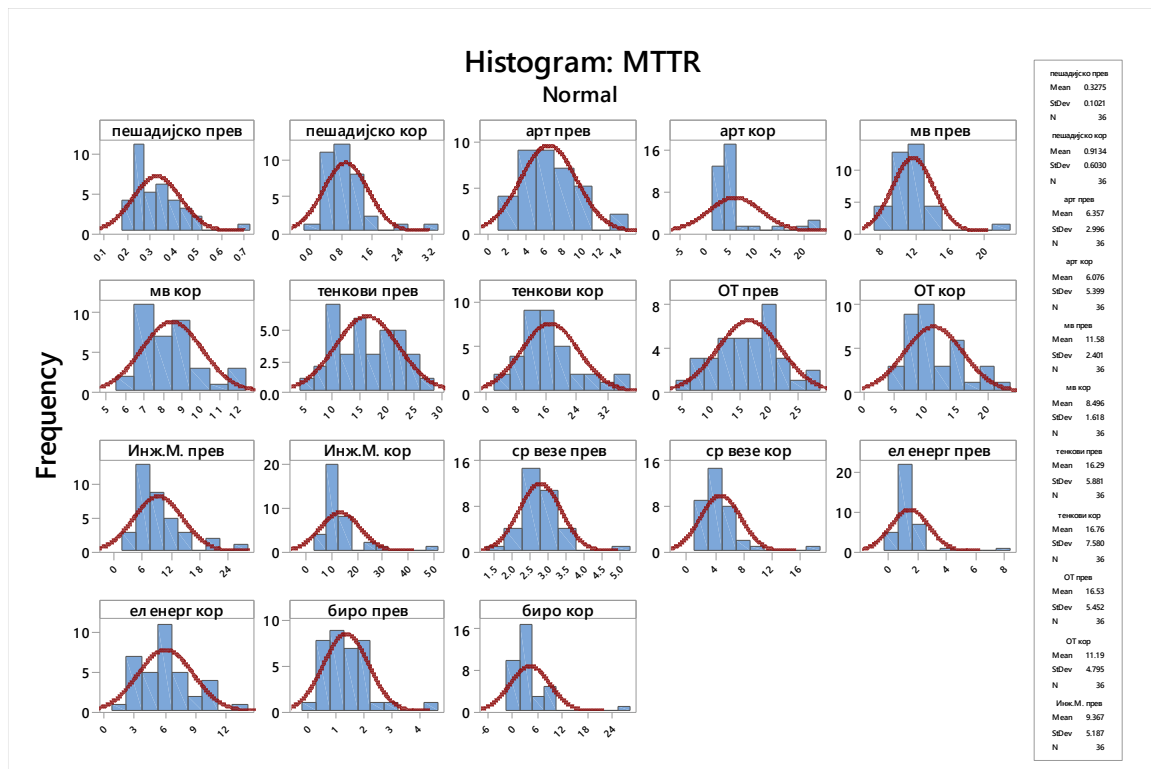


Слика 75. Хистограм, број средстава у одржавању



Слика 76. Хистограм, времена одржавања (36 месеци укупно)

Из описаног, може се одредити карактеристика MTTR за трогодишњи период.



Слика 77. Хистограм MTTR, за 3 године

Из облика хистограма и контролних графова јасно се закључује да је процес нестабилан.

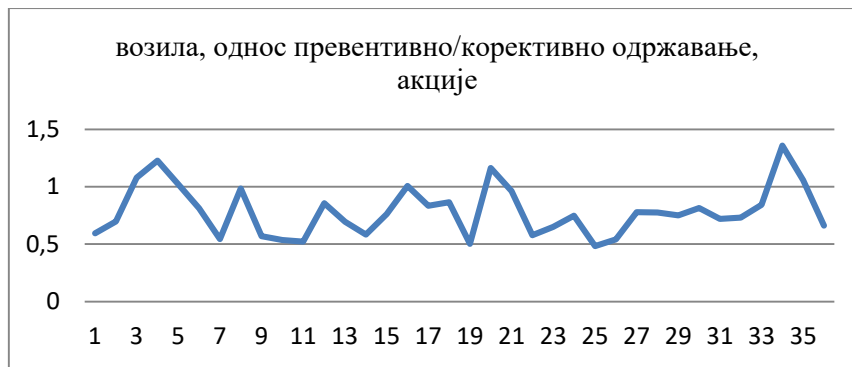
Сада је могуће директно одредити неке индикаторе перформанси система одржавања (КПи) што је графички приказано на сликама 78-82:



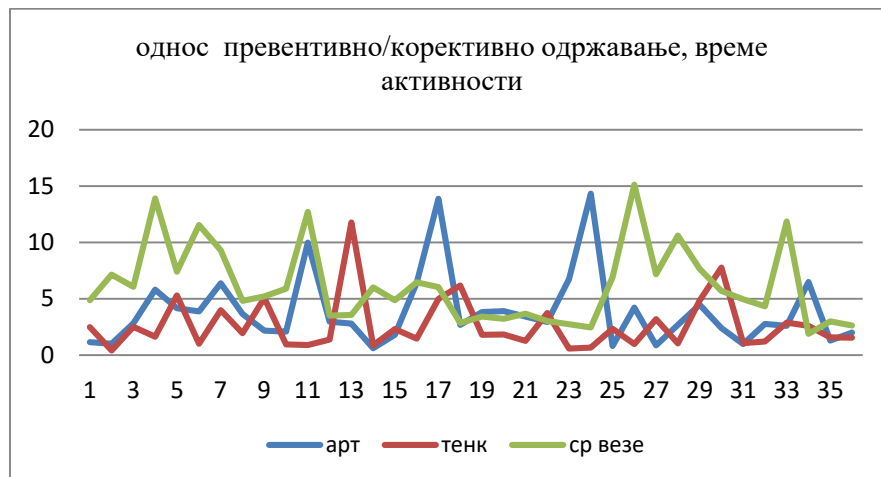
Слика 78. Однос броја превентивног/корективног одржавања за средства везе



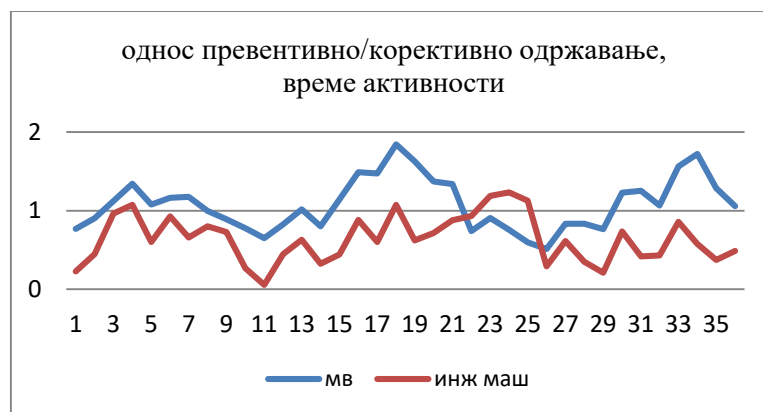
Слика 79. Однос броја превентивног/корективног одржавања за наоружање



Слика 80. Однос броја превентивног/корективног одржавања за возила



Слика 81. Однос времена превентивног/корективног одржавања за 3 врсте опреме

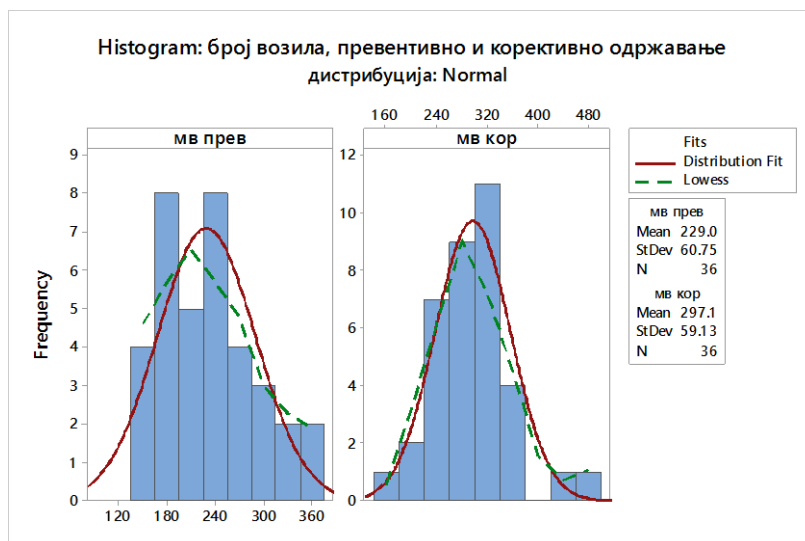


Слика 82. Однос времена превентивног/корективног одржавања за 2 врсте опреме

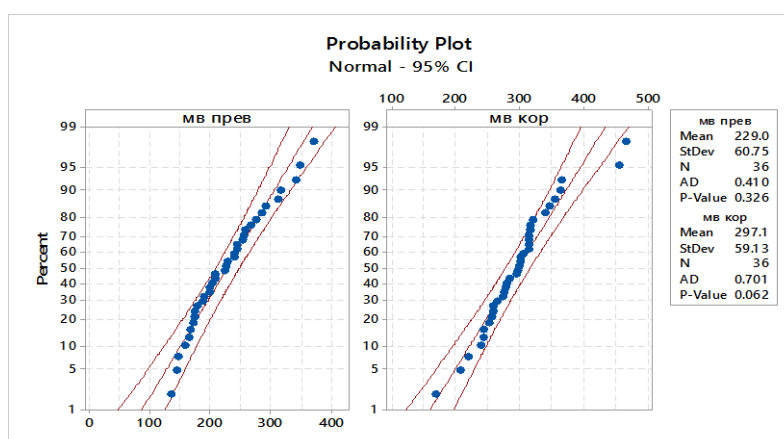
Истраживање се сада може усмерити на једну врсту опреме, с обзиром да се у сложеном систему одржавања који је предмет истраживања, средства и опрема користе независно, да употреба једне врсте не зависи од друге, да се за одржавање једне врсте опреме користе ресурси, опрема, алат који су независни у односу на другу опрему. Онда се процес може генерализовати, тј. поновити за сваку врсту опреме. Ово није случај који се може применити у неком производном процесу где су машине, опрема и остали ресурси директно међузависни.

Зато се проблем поједностављује детаљном анализом проблема одржавања теретно теренских возила.

Изглед хистограма (слика 83) и оцена изабране математичке расподеле (слика 84) којима се описује облик варијација броја средстава која су одржавана и утрошеног времена за одржавање (превентивно и корективно одржавање), садржи анализу за период од 36 месеци, за групу *Теренска-теретна возила*.

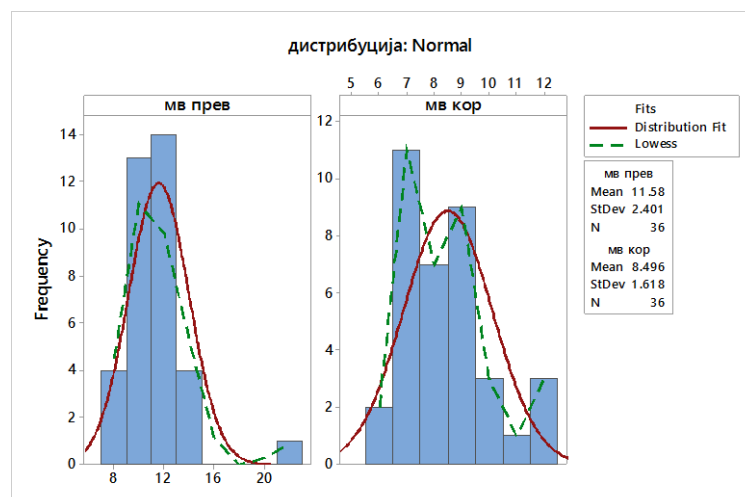


Слика 83. Хистограм, расподела броја возила у одржавању, по месецима



Слика 84. Оцена оправданости примене нормалне расподеле

На основу прикупљених података (трогодишњи период), могу се одредити расподеле времена превентивног и корективног одржавања (слика 85).



Слика 85. Расподеле времена превентивног и корективног одржавања МТТР, по месецима

Након наведеног, може се одредити и учесталост појављивања возила у смислу захтева за одржавањем, што је учињено на начин да се број возила у одређеном месецу подели са бројем радних дана у месецу. Односно за потребе симулације, број возила се подели са бројем радних сати у месецу, пошто је временска база симулације, што ће касније бити објашњено, подешена у сатима.

Важност овог дела истраживања, осим што даје објективну оцену способности и стабилности система одржавања, је и у томе што ће прикупљени и анализирани подаци послужити за развој модела одржавања, а затим и експериментисање. Наиме, у примени метода моделовања и симулације један од важних типова модела је модел(овање) базиран(о) на подацима (*Data - Based Modeling*) (Banks, 2010.). Базира се на подацима који описују репрезентативни аспект субјекта модела. Развој модела почиње са напредним истраживањем или са прикупљањем података који се користе у симулацији. Извори података за овај тип модела могу бити актуелно стање реалног система, тестирање и оцена реалног система, друге симулације над системом, квалитативна и квантитативна истраживања, као и претпоставке експерата из ове области. Модел је развијен са становишта да се систем проверава под различитим условима и са различитим улазима. Резултати симулације се памте и могу се поредити са новим резултатима са другачије дефинисаним параметрима симулације. Овај тип модела се најчешће употребљава када реалан систем није могуће или је врло ризично директно подвргнути променама са аспекта могућих последица. Такође, његова предност је и у примени у случајевима када „физика“ модела није потпуно јасна. Овај тип модела (моделовања) је директно зависан од квалитета и квантитета (поузданости) података о систему којима се располаже.

## 7.6. Предлог побољшања

Предлог парцијалног побољшања у сложеном систему (по броју средстава и по конструкцијској сложености, комплексној организацији) треба на крају оценити са аспекта могућег утицаја на неки други део система. Прихватљиво је побољшање које не утиче на смањење неког другог чиниоца (елемента). Дакле, промена је добра ако је „некоме боље, а истовремено никоме није горе“.

### 7.6.1. Вишекритеријумска оптимизација

**Вишекритеријумска оптимизација** (ВКО) је тражење најбољег решења из низа допустивих решења у смислу више усвојених критеријума. Вредности критеријумских функција показују колико је разматрани систем добар (добит, квалитет) или лош (коштање, штете) за дате алтернативе система. Оптимизација је одређивање решења које је најбоље према дефинисаном критеријуму и које задовољава сва дата ограничења (*оптима форма*, најбоље што се може постићи у одређеним приликама).

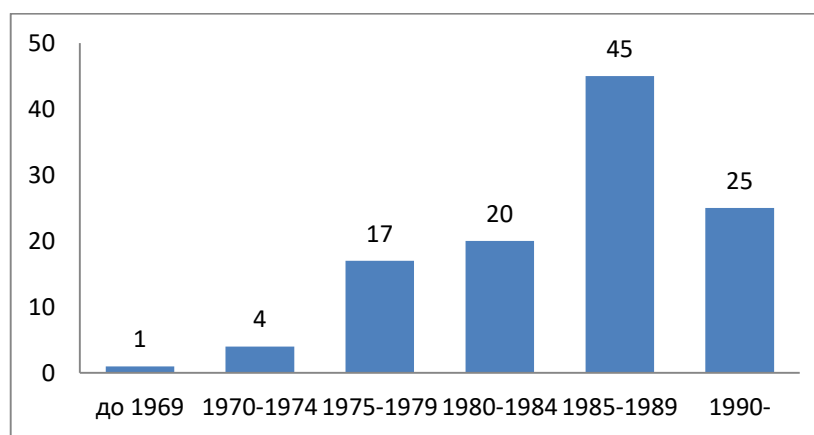
Једна група ВКО метода решава проблеме са континуалним математичким моделом (енгл. *Multiobjective Optimization*), док друга група решава проблеме анализе и рангирања алтернатива (енгл. *Multicriteria Decision Analysis, Multicriteria Decision Making*).

У задацима са конфликтним критеријумима често не постоји допустиво решење за које све критеријумске функције имају најбоље вредности (тачка са најбољим вредностима у простору критеријума назива се идеалном). Тада се тражи решење у виду компромиса које је прихватљиво од већине у процесу одлучивања, и које нема тако лоше критеријумске показатеље због којих би опоненти имали изразите разлоге да га не прихвате.

## 7.6.2. Проблем оптимизације система одржавања

Оптимизација је важан и чест поступак у многим инжењерским областима. У многим случајевима тај поступак се врши методом покушаја и грешака. Да би се избегле такве монотоне активности, уведени су систематски приступи, као ефикаснији и који обезбеђују гаранције да се боље решење може или не може наћи.

(Dekker, 1996.) даје анализу и преглед модела оптимизације одржавања (132 референце) анализирајући радове на тему оптимизације у одржавању (слика 86). Проблем оптимизације се разматра из угла инжењера којима је блиска теорија поузданости и операционих истраживања, као и из угла менаџмента које интересују нижи трошкови одржавања. Одржавање се у овом времену сматра функцијом која не ствара нову вредност, већ представља трошак за организацију/компанију.



Слика 86. Преглед броја радова на тему оптимизације у одржавању (Dekker, 1996.)

О одржавању се води рачуна у фази набавке опреме и постаје популаран приступ праћења цене животног века опреме кроз *Life-Cycle-Costing* концепт. Концепт одржавања или стратегија описује догађај (отказ, временски период, итд.) који „активира“ неки тип акције одржавања (инспекција-преглед, оправка, замена). Кључан је план одржавања који обухвата дефинисање термина одржавања, припрему рада и потребних капацитета (радна снага). Контрола одржавања има за циљ да упореди планирано стање са актуелним стањем на основу чега менаџмент закључује да ли има проблема или не. Такође, наглашене су области где је одржавање нарочито важно а то су: медицина (апарати и опрема), хемијска индустрија, производња нафте и деривата, железница, транспортне компаније, комерцијална авијација, производња челика и метала, јавни сектор (производња електричне енергије, путеви, инфраструктура) и одбрана.

Модел оптимизације одржавања се дефинише као математички модел чији је циљ налажење оптималног односа цене одржавања и користи од одржавања уз уважавање свих врста ограничења. Генерално, модели оптимизације одржавања покривају 4 подручја и то: опис техничког система, његове функције и значаја; моделовање настанка отказа и последица отказа; опис расположивих информација о систему; жељено стање (*Objective Function*) и оптимизациона техника која се примењује за изналагање оптималног решења. Модели се класификују као детерминистички и стохастички. Разматрају се једноставни системи и сложени системи и облици када се располаже са расподелом вероватноће отказа или не. Као методе (технике) оптимизације се користе линеарно и нелинеарно програмирање, Марковљеви модели одлучивања, технике анализе одлучивања и хеуристички приступи (*Multi Criteria Analysis MCA*, нпр.). Резултати оптимизација су: однос цена одржавања/расположивост опреме; најбољи термини одржавања; најбољи план одржавања, и др. Наглашава се и раскорак између академских и индустријских развојних институција



које се баве одржавањем. Модели оптимизације се примењују кроз најчешће два поступка: студија случаја (реални проблеми, реални подаци) и развој нових модела.

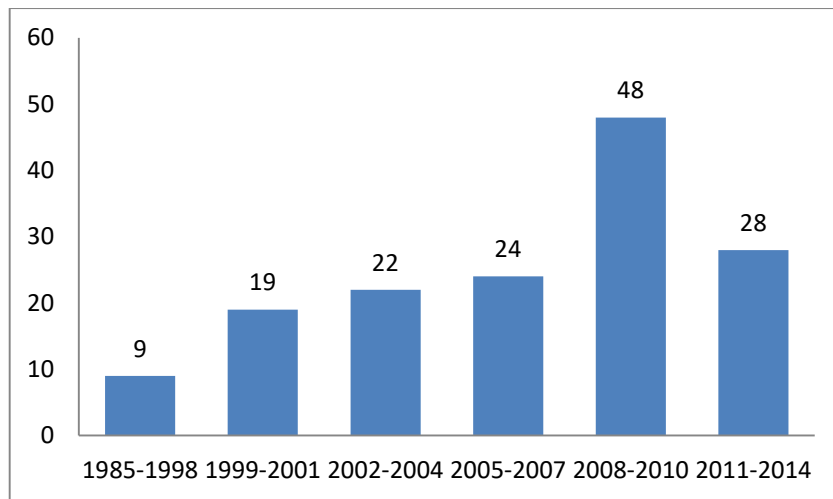
Такође се наглашава проблем расположивих података о одржавању (поузданости) с обзиром на популарну политику периодичне замене опреме новом и појаву све новије и савременије опреме о којој не постоје историјски подаци о одржавању. Најбољи резултати се постижу у већ поменутих областима (путна инфраструктура, производња електричне енергије, возни паркови и др.) односно у оптимизацији термина инспекција/прегледа опреме. Војни сектор, иако се препознаје као један од водећих у организацији одржавања, природно остаје затворен за публикације и презентовање резултата оптимизација које се најчешће везују за планирање радне снаге, расположивост опреме и цену животног века опреме. За већину модела оптимизације велику улогу игра прикупљање и анализа података о одржавању.

Софтвери (*REGINA, FRANTIC, MAINOPT, KMOSS, OPTIMON* и др.) који се користе за оптимизацију одржавања су углавном наменски развијени и прилагођени тадашњем развоју рачунара.

Аутор даље закључује да постоји велики временски јаз између развијене теорије (оптимизација одржавања) и њене примене у пракси. Препознат је низ проблема који утичу на развој и примену модела оптимизације у одржавању. Модел одржавања је тешко математички описати и не може се свести на једноставну математичку формулу. Развијени програми (софтвер) су корисни све док се исти проблем понавља. Развијени модели су неотпорни на одступања, тј. промену почетних претпоставки употребљених код моделовања. Проблеми одржавања нису универзални, тј. сваки је специфичан. Даље, веома је значајан проблем података који се огледа у проблему моделовања прогресивног погоршања стања опреме (eng. *Deterioration*, може се исказати преко интензитета отказа  $\lambda$ , Марковљевим процесима/методама, као случајан процес и на друге начине (Noortwijk and Frangopol, 2004.) и учесталости појава отказа система у времену. Информациони систем одржавања треба да обезбеди записе и податке важне за моделовање система одржавања. Јаз теорије и праксе је још један проблем. Модели оптимизације одржавања су тешки за разумевање и интерпретацију. Одржавање за разлику од других дисциплина није у већем значају подржано од стране академских структура. Многи радови на тему оптимизације одржавања су публиковани са становишта математичког значаја и екстремно су тешки за примену код одржаваоца опреме. Компаније нису заинтересоване за публикување постигнутих резултата иако су креатор многих извршних идеја у оптимизацији одржавања. Са друге стране, академски истраживачи се ретко баве решавањем индустријских проблема сем у случајевима када су стимулирани од самих компанија. Одржавање, иако довољно јасно има дефинисан свој домен, има огроман број варијација и извођења, па не постоји општи модел који би се користио за опис система и оптимизације.

Општи је закључак да су главни мотиви оптимизација: економски и поузданост опреме. Даљи развој рачунара и софтвера за ове сврхе и технолошки напредак (уграђена поузданост, пројектована поузданост, производне методе, методе дијагностике стања и др.) омогућиће умањење описаног јаза и боље и ефикасније методе и моделе оптимизације одржавања, са главним циљем да одржавање постигне захтевану ефикасност и ефективност. Захтевају се и промене у култури, односно захтеваће се да менаџери одржавања као стандардни алат за рад користе софтвер за оптимизацију процеса.

(Ding et al., 2015.) дају преглед истраживања на тему оптимална политика одржавања (156 референци) анализирајући радове на тему оптимизације у одржавању (слика 87). Оптимална политика одржавања треба да обезбеди план активности који садржи скуп правила која служе као водич менаџменту одржавања да спроведе ефикасно и ефективно одржавање. Одржавање захтева велике финансијске издатке који могу да буду 15-70% од свих расхода.



Слика 87. Преглед броја радова на тему оптимизације у одржавању (Ding et. al., 2015.)

Различити појавни облици одржавања су посебан изазов за изналажење оптималне политике одржавања. Ипак, захтева се уважавање цене одржавања, поузданости опреме и других фактора и ограничења у циљу постизања најбољих перформанси. У литератури, модели оптимизације политике одржавања се заснивају на „*Certainty Theory*“ у математици познатој као теорија вероватноће.

У уводу, аутори најпре класификују политике одржавања (слика 88):

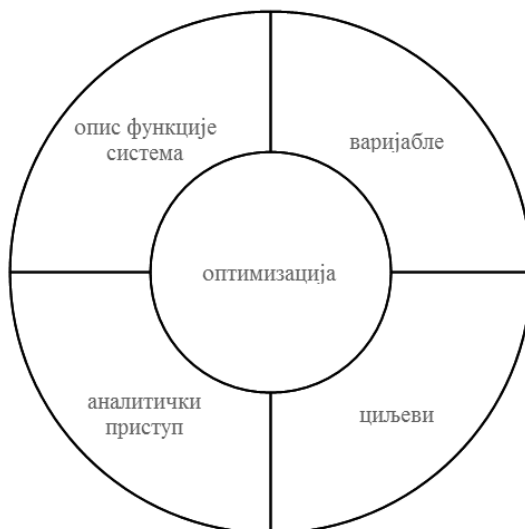


Слика 88. Политике одржавања (Ding et. al., 2015.)

Исту класификацију дају и (Mostafa et al., 2015.), с тиме да је називају стратегија уместо политика. Корективно одржавање се извршава кад дође до отказа. И данас се примењује код опреме чији отказ не утиче битно на функцију система, отказ није ризичан и не изазива финансијске губитке. Превентивно одржавање је повезано са теоријом поузданости, акције одржавања се предузимају у дефинисаним временским интервалима са циљем да се минимизују или спрече откази. Даљи напредак представља предиктивно одржавање које се односи и на одржавање према стању, где се акције одржавања врше када је то потребно и уз примену савремене технологије надзора стања. Ипак се не примењује тамо где је економски неоправдано и где није објективно могуће вршити надзор великог броја параметара стања. По савременом схватању, одржавање није више непотребни потрошач ресурса, и активност која спречава и отклања отказе, већ је то процес сарадње међу више субјеката унутар предузећа/система и процес сталног усавршавања система на начин да се у одржавање интензивно укључе корисници опреме и да се опрема стално побољшава. Аутономно одржавање подразумева концепт одржавања где одржавање и корисник опреме сарађују у извршавању задатака одржавања.

*Design out Maintenance (DOM)* политика има за циљ да унапреди систем (опрему) са циљем да одржавање учини лакшим или да чак елиминира потребу за одржавањем. Све наведене политике имају своја специфична својства. Према томе, оптимална политика одржавања

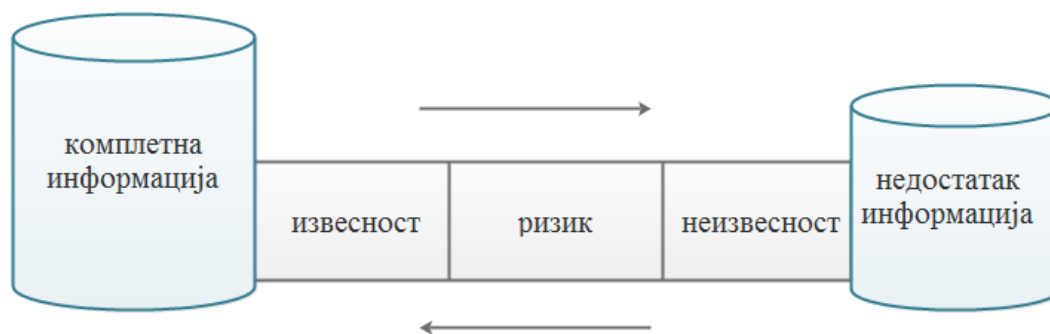
има општи циљ да повећа ниво расположивости и поузданости опреме и смањи непотребне трошкове/инвестиције. Другим речима, оптимизација има за циљ да одреди балансирано решење система одржавања према дефинисаним захтевима и ограничењима. Модел оптимизације политике одржавања има елементе приказане на слици 89.



Слика 89. Елементи модела оптимизације политике одржавања

За оптимизацију је потребан модел који формално описује процес, систем или концепт који је предмет изучавања. И овде је наглашено да модел мора да обухвати опис система који се одржава, опис прогресивног погоршања стања опреме (енг. *Deterioration*), циљну функцију (циљ оптимизације) и аналитички оквир или алат оптимизације.

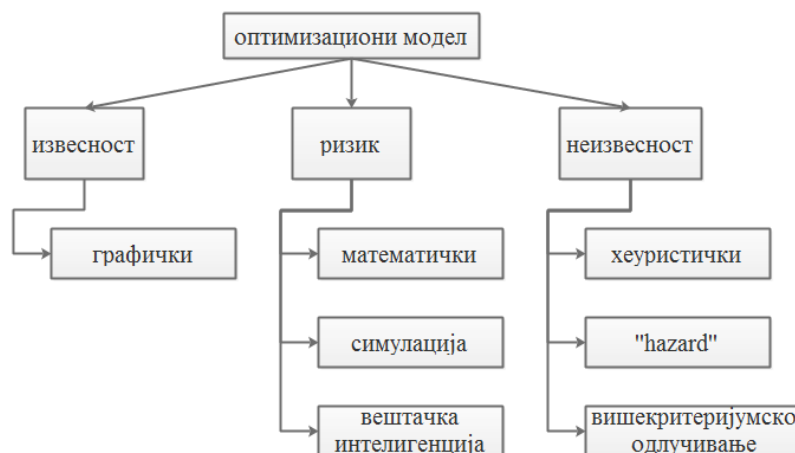
Даље аутори класификују моделе оптимизације политике одржавања према „*Certainty Theory*“, односно према степену извесности: извесност, ризик, неизвесност (слика 90).



"Certainty theory continuum"

Слика 90. Модели оптимизације политике одржавања према „*Certainty Theory*“

Степен сигурности (извесности) се односи на доступне информације о утицајним факторима који утичу на систем који је предмет оптимизације. Са вишим степеном доступних информација, тачност резултата оптимизације ће се повећати. Претпоставке или нејасне информације могу се класификовати на ниво ризика или несигурности. Према наведеном, дата је класификација модела оптимизације политике одржавања (слика 91).



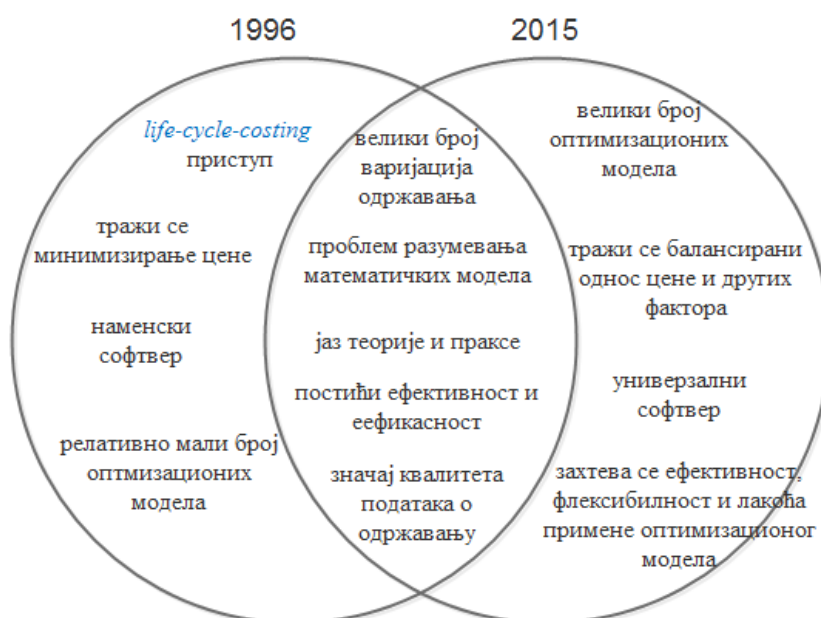
Слика 91. Класификација модела оптимизације политике одржавања

У најкраћем, ове категорије обухватају:

- 1) Извесни модели (Certainty Category): графички модел (*Decision-Making Grid - DMG* - матрица одлучивања), *Fuzzy* логика интегрисана са DMG;
- 2) Ризични модели (Risk Category): математички (метод преживљавања- оцена утицаја више варијабли на понашање система (*Proportional Hazard Method - PHM*), Марковљев метод, комбинација и интеграција математичког модела и симулације), симулације (*Monte Carlo* симулације, *Agent Based* симулације, симулације дискретних догађаја, *Fuzzy Discrete Event* симулације) и модели на бази вештачке интелигенције (*Genetic Algorithm - GA*, симулација са применом генетског алгорита);
- 3) Неизвесни модели (Uncertainty Category): хеуристички модели (стабла одлучивања, студије случаја), модели на бази ризика (*FMECA* анализа начина отказа и критичности ефеката отказа, *Fuzzy* логика, *Неуронске мреже*, анализа стабла отказа), вишекритеријумско одлучивање (аналитички хијерархијски процес - *Analytic Hierarchy Process – AHP*; метода продуктивних тежинских фактора - *Weighted Summethod – WSM*; фамилија метода за избор акције из скупа акција *Elimination and Choice Translating Reality – ELECTRE*; аналитички мрежни процес - *Analytic Network Process – ANP*; комбиноване примене *Fuzzy ANP*, *Fuzzy Logic AHP*, *Fuzzy Logic + ELECTRE III*).

Као интересантни примери, могу да се наведу следећи радови. Оптимизација процеса одржавања применом генетског алгорита је приказана у (Nestic et al., 2013.). Марковљев процес је употребљен за одређивање најбоље политике одржавања и интервала одржавања у раду (Parakonstantinou and Shinozuka, 2014.). Примена напредних еволутивних метода (генетски алгоритам и др.) за оптимизацију одржавања је приказана у (Петровић и др., 2011.). За одређивање политике одржавања пример примене AHP је дат у (Goossens and Basten, 2014., Maletic et al., 2014b) и ANP у (Esmacilian et al., 2015.), а пример ANP за избор индикатора успешности одржавања у (Van Horenbeek and Pintelon, 2014., Vujanović et al., 2012.). За побољшање примене Overall Equipment Effectiveness-(OEE) као мере успешности одржавања предложена је и приказана интеграција са ANP у циљу мерења перформанси одржавања у више димензија (Wudhikarn, 2013.). Хибридни (комбиновани) метод оптимизације интервала превентивног одржавања, применом *Particle Swarm Optimization* и *Cuckoo Search* приказан је у (Guo et al., 2016.). Пример избора политике одржавања применом вишекритеријумског одлучивања и комбинацијом *Fuzzy-ANP* методе дат је у (Lesani and Javanmard, 2015.). Пример примене ELECTRE II методе за избор политике одржавања према ограниченом броју критеријума је дат у (Mahamoud et al., 2015.).

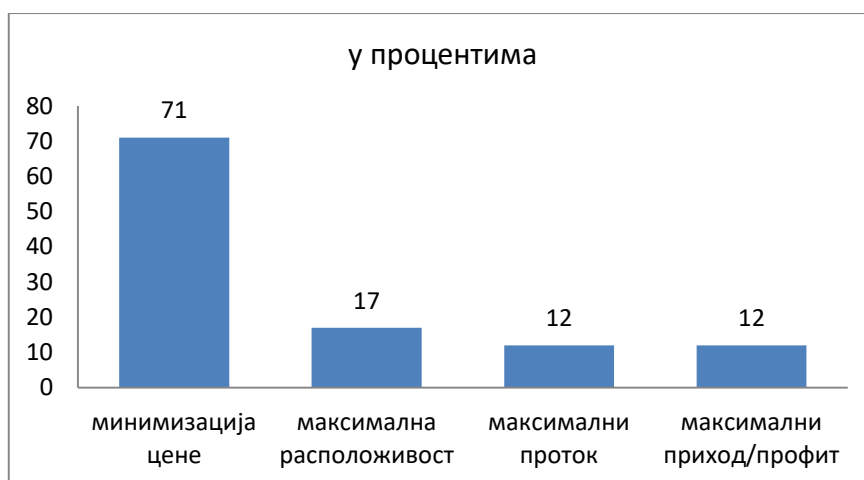
Аутори (Mostafa et al., 2015.) констатују јаз између академских и индустријских примена модела оптимизације политике одржавања, као и да је потребно прећи са теоретских на примењена истраживања на овом пољу. Примењено истраживање мора да има следеће важне особине: ефективност, флексибилност и лакоћу примене. Такав приступ обезбеђује да се може идентификовати корен проблема, рангирају значајни критеријуми, прикупе релевантне информације о систему и спроведе оптимизациона анализа у разумном времену. И овде је у великој мери дат значај квалитету података који служе у анализи и изради модела. Такође, аутори наводе да је већина предложених модела оријентисана на уникатни систем или неки релативно једноставан систем одржавања. Фази лингвистика се афирмише као лакша и разумљивија у односу на нумеричке вредности код дефинисања ограничења приликом процеса оптимизације. *Multi-Criteria Decision Making – MCDM* приступ се такође препоручује као лакши за примену и разумевање. Изнет је став да финансијски показатељи не могу бити врхунски критеријум за оптимизацију одржавања, односно нужни су и други показатељи који се релативно лако могу мерити путем индикатора. Аутори нису наводили софтверска решења која се користе у ове сврхе, с обзиром да је дато тежиште на методологији, а не на алатима.



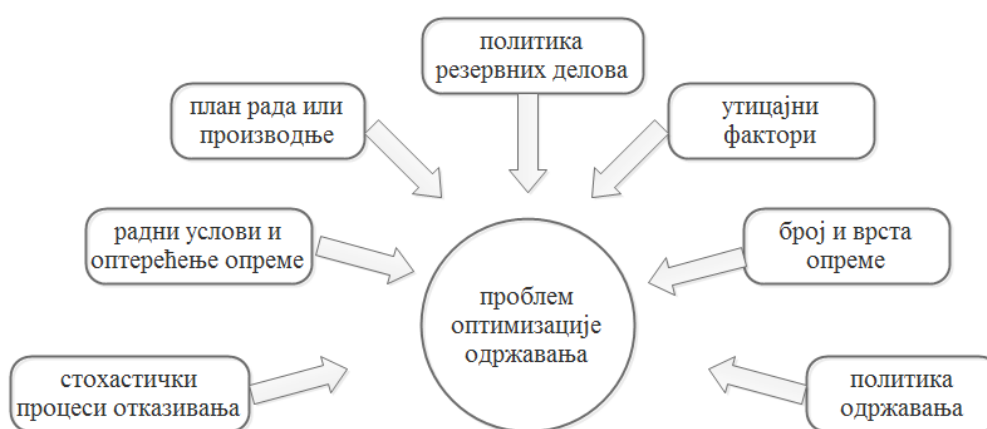
Слика 92. Основна својства модела оптимизација у одржавању

Анализирајући радове (Dekker, 1996.) и (Ding et. al., 2015.) који третирају проблем оптимизације у одржавању, с обзиром на временски оквир настајања, може се донети закључак о заједничким својствима и разликама у сагледавању проблема, што је илустровано сликом 92.

Према (Alrabghi, 2015.), основни циљеви оптимизација у одржавању су дати на слици 93, а проблеми оптимизација на слици 94.



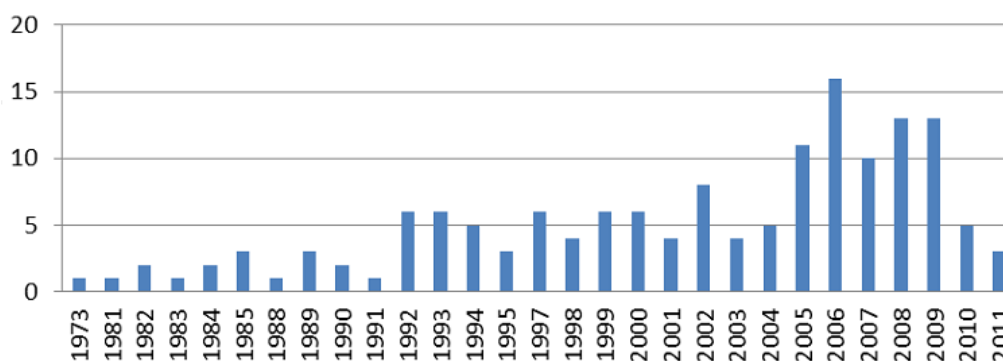
Слика 93. Циљеви оптимизације, преглед литературе 2000.-2014. (Alrabghi, 2015.)



Слика 94. Проблем оптимизације одржавања (Alrabghi, 2015.)

### 7.6.3. Симулација као алат оптимизације

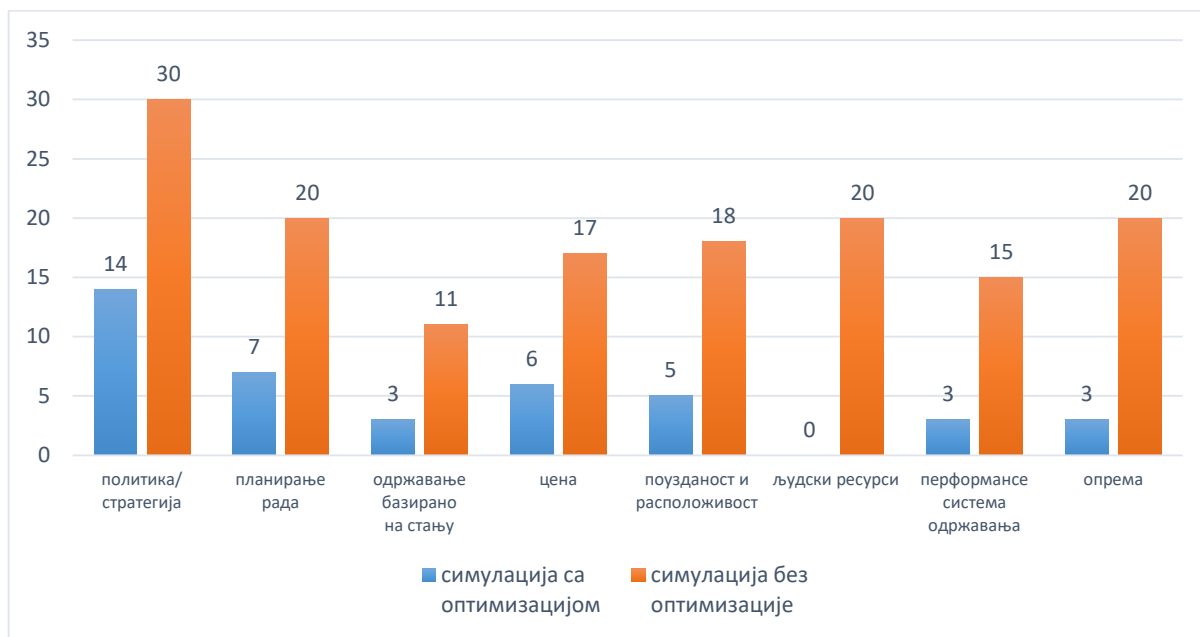
Према (Alabdulkarim et al., 2013.) различити приступи аналитичког и статистичког моделирања су широко коришћени у истраживању одржавања. Број публикација обухваћених истраживањем је илустрован сликом 95.



Слика 95. Број публикација из области симулације и одржавања за период 1973.-2011. (Alabdulkarim et al., 2013.)

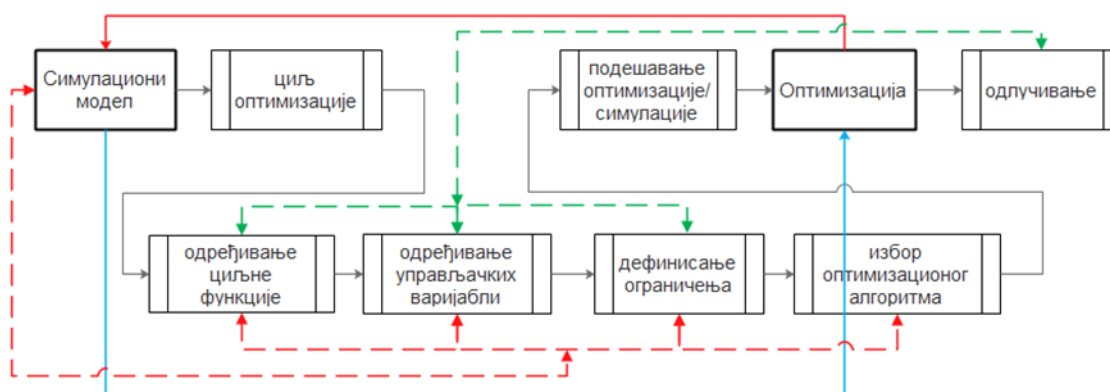
Постоји широк спектар алата за анализу сложених система као што су оне које укључују једноставне алате засноване на статичким табелама до оних који укључују софистициране

симулационе технике. Однос симулација и примене оптимизација је, према аутору, илустрована сликом 96.



Слика 96. Примена симулација у одржавању за период 1973.-2011., број радова (Alabdulkarim et al., 2013.)

Аутори су дали систематско истраживање и преглед публикованих радова који разматрају област симулација у одржавању, наравно и са аспекта оптимизације. Један од важних закључака који се износи је да се слабо изучава одржавање као систем (изучава се на конкретном средству или неком његовом подсистему, али се сложен систем у смислу велики број опреме или сложена опрема не изучава). Примена *Discrete Event Simulation - DES* може да обезбеди разумевање понашања сложеног система који чине многобројне компоненте и подсистеми (под тиме се може сматрати и сложен технички систем али и пуно разноврсних техничких система у употреби), односно локација опреме, употреба опреме, радна снага, залихе резервних делова, итд. Уједно је могуће одредити њихов међусобни утицај на перформансе одржавања (план одржавања, локација залиха резервних делова, време транспорта, застоји и др.). Посебно је такође наглашено да без обзира на раст популарности примене симулација, област који назива „*Field Maintenance*“ скоро и да није заступљена. Општи концепт комбинације оптимизације и примене симулација је илустрован сликом 97.



Слика 97. Оптимизација базирана на симулацији, начелни приказ

## 8. Симулација

### 8.1. Симулациони модел, теоретске основе

Термин *симулација* упућује на скуп метода и апликација које опонашају понашање реалног система, уобичајено користећи одговарајући рачунарски програм. У центру симулације налази се концепција система. Када се термин систем користи у контексту симулације, значи скуп објеката са добро дефинисаним сетом интеракција (односа) између њих. Данас је употреба симулација популарна техника, с обзиром на снагу рачунара и квалитет савремених програма (софтвера).

Појам симулација се може дефинисати као „*подражавање-имитирање понашања динамичког система применом модела у циљу анализе и вредновања могућих егзистенцијалних стања у једном реалном или виртуелном систему*“ (Davidović, 2005.).

Симулација представља имитацију реалног света, стања или процеса. Симулација је процес пројектовања модела реалног или имагинарног система и извођење експеримената са тим моделом. Симулација се користи за различите сценарије укључујући моделирање природних система, а основни циљ је да се имитира начин њиховог функционисања. Симулациони експерименти се користе за разумевање понашања система или развој стратегија функционисања система. Симулација се примењује и при проучавању ефективности управљања системом одржавања. Тако су се неки истраживачи и научници бавили симулирањем система одржавања користећи различите политике одржавања и њихов утицај на настанак отказа, док су други разматрали утицај врсте одржавања и примену вероватносних расподела. У сваком случају, акценат је стављен на смањење времена у отказу, а самим тим и смањење трошкова који настају због одржавања (Ristić и др., 2011.).

Симулација, као и многе друге аналитичке методе, подразумева анализу система преко његовог модела. Систем је постројење или процес као нпр.: производно постројење са машинама, персоналом, транспортним средствима и складиштем; банка или други сервис; ресторан или супермаркет; аутопут са припадајућим елементима и сигнализацијом; рачунарска мрежа са својим компонентама; сервис услуга и др.

Људи често проучавају систем да би измерили његове перформансе (*Estimate System Performance*), унапредили функционисање система (*Simulation-Based Optimisation*) или да би га дизајнирали ако он још не постоји. Менаџери и контролори у неком систему могу да користе такав алат као помоћ у *Day-to-Day* активностима, као помоћ у случајевима када је потребно одлучити шта радити нпр. у фабрици када нека важна машина испадне из функције. Симулација није само статистички експеримент. Симулација подразумева и добро познавање процеса чији се модел анализира.

(Rao, 2009.) констатује да, у најширем контексту, симулације и симулационе методе могу да се сврстају у технике оптимизације (табела 13). **Оптимизација је процес који се врши**



са циљем добијања најбољих резултата под одређеним околностима. У дизајну, производњи и одржавању било ког инжењерског система, инжењери морају да доносе технолошке и управљачке одлуке на више нивоа одговорности и по времену животног века инжењерског система. Највиши циљ тих одлука је *или да се минимизира потребан напор или да се максимално остваре жељени резултати*. Пошто се у реалном окружењу ова два циља могу изразити као функција одређених варијабли, оптимизација се може дефинисати као процес налажења минимума или максимума функције. Развијене су бројне оптимизационе методе за решавање различитих оптимизационих проблема.

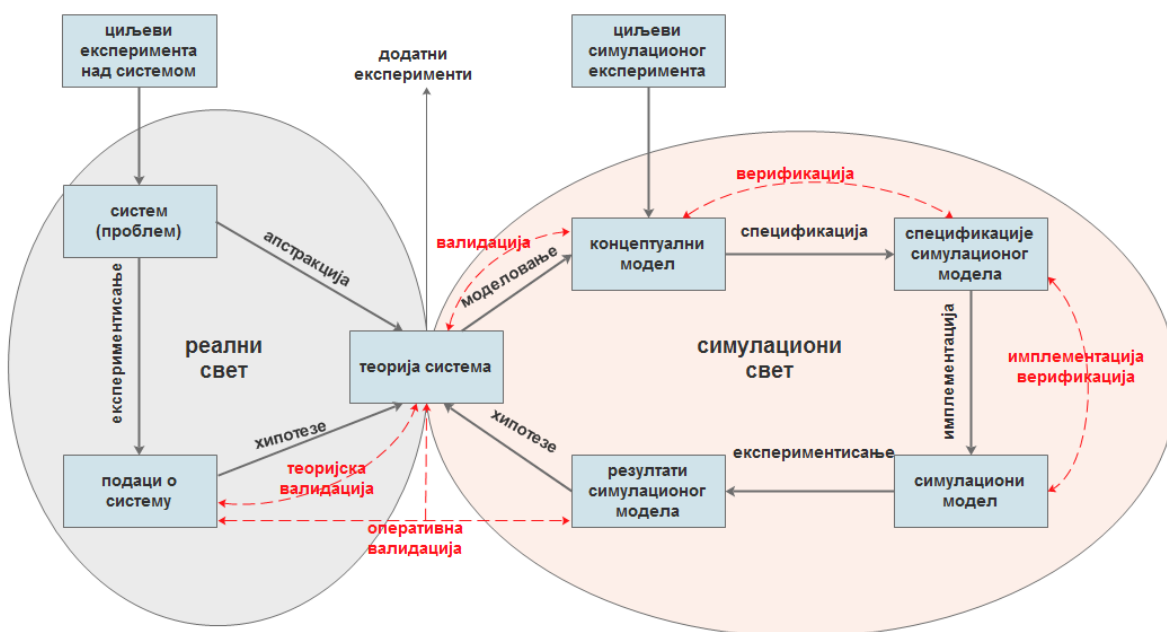
Табела 13.- Технике оптимизације (Рао, 2009.)

Математичко програмирање (оптимизационе технике)	Технике стохастичких (случајних) процеса	Статистичке методе	Модерне или нетрадиционалне оптимизационе технике
Инфинитезимални рачун (Calculus methods)	Теорија одлуке (Statistical decision Theory)	Регресиона анализа; (Regression analysis)	Генетски алгоритам
Математичка анализа	Марковљеви процеси	Груписање података (Cluster analysis), препознавање образаца (pattern recognition)	Симулирано каљење (Simulated annealing)
Нелинеарно програмирање	Теорија редова	Дизајн експеримента (Design of experiments)	Мрављи алгоритам (Ant colony optimization)
Геометријско програмирање (математички проблем оптимизације у којем функција циља и ограничења имају специјалну форму)	Процес обнављања, Poisson-ови процеси (Renewal theory)	Дискриминациона анализа, Факторска анализа	Particle swarm optimization (PSO)
Квадратно програмирање (функција циља је квадратна функција, систем ограничења су линеарне функције)	Симулационе методе		Неуронске мреже
Линеарно програмирање	Теорија поузданости		Фази оптимизација
Динамичко програмирање			
Целобројно програмирање			
Стохастичко програмирање			
"Separable programming" – решавање нелинеарне функције више варијабли у уском региону апроксимацијом помоћу линеарне функције			
Вишекритеријумска оптимизација			
Мрежне технике: CPM и PERT			
Теорије игара			

Технике математичког програмирања се користе у налажењу минимума функције више варијабли под прописаним скупом ограничења. Технике стохастичких процеса се користе за анализу проблема описаног скупом случајних варијабли за које је позната дистрибуција вероватноће (*Probability Distributions*). Статистичке методе омогућавају анализу експерименталних података и израду емпиријског модела (базираног на подацима а не на логици) који верно репрезентује реалну појаву. Модерне оптимизационе технике служе за решавање комплексних инжењерских оптимизација.

Један од највреднијих аспеката примене симулације је што је могуће објаснити и разумети реалну појаву без скувих експеримената у лабораторији или на терену. Успешна симулација је способна да да довољно кредибилна решења (опис система, контрола понашања система и предикција понашања у будућности). Немогуће је а и непотребно (нпр. неки реални елементи који не утичу значајно на систем) развити симулациони модел који репрезентује све детаље и понашање реалног система. Зато се уводе одређене претпоставке. Симулациони модел је апстрактна репрезентација реалног система. Поменути претпоставке и апстракције или поједностављења неминовно утичу на одређене нетачности симулационог модела. Циљ моделовања је да оне буду што мање, односно да симулациони модел довољно тачно представља реалан систем (Xiang et al, 2005.). Процена квалитета модела врши се верификацијом и валидацијом (Qi et al, 2013.).

Слика 98 представља релацију између реалног света и симулационог модела, према (Pace, 2004.).



Слика 98. Релација реалне појаве и симулације (Pace, 2004.)

### 8.1.1. Моделовање система

Моделовању система се може приступити на следеће начине:

1. „Играње са системом“, што подразумева експериментисање над постојећим системом. Пример може да буде раскрсница са сигнализацијом, где се тражи подешавање које најбоље задовољава различите интензитете оптерећења

(фреквенција саобраћаја). Овде није потребан модел система који верно описује реалну ствар;

2. „Играње са системом“ није могуће, што подразумева да експериментисање над системом није могуће због реалних могућности да се догоде штетне и опасне појаве или изазову застоји и губици (нпр. предефинисати ток операција у фабрици, предефинисати процедуре на аеродрому или банци и сл.). У оваквим ситуацијама је потребан модел система. Модел треба да одговори на питања *шта ако*. Аналитичар има слободу да провери велики број алтернатива. Ипак, модел се мора сачинити пажљиво, водећи рачуна о потребном броју детаља, односно оно што се добије из модела не би смело да се разликује да је експеримент извршен над реалним системом. Такво својство модела се назива *валидност*;
3. Физички модел, што подразумева израду макета, умањених објеката и постројења, верне копије дела постројења као нпр. контролна соба, симулатор лета са свим функцијама авиона и др.;
4. Логички (математички) модел система, што представља скуп апроксимација и претпоставки, структурних и квалитативних, о томе како систем функционише или како би требао да функционише. Логички модел се обично изводи на рачунару (софтвер) и има за циљ да верно ослика понашање система који је предмет анализе. Ако је модел валидан, понашање модела ће бити верно понашању реалног система у различитим ситуацијама. Моделом се лако манипулише кроз програм (софтвер) који се користи и могу се, као што је већ речено, испробати многе алтернативе. Када је модел креиран, потребно је дефинисати начин како манипулисати њиме (испробавање алтернатива) и како анализирати његово понашање. Ако је модел једноставан, у те сврхе, могу да се користе математички алати као што су теорија редова, методе диференцијалних једначина или методе линеарног програмирања. Ако би модел могао да буде одређен једноставном математичком формулом, анализа би била једноставна преко контролисаних параметара једначине а неодређености би биле избегнуте. Ипак, многи реални системи које људи моделују и проучавају су веома компликовани, па су и валидни модели веома компликовани. За такве моделе користе се симулације.

### 8.1.2. Рачунарске симулације

Рачунарске симулације обухватају методе за проучавање широког спектра модела реалног система помоћу нумеричке процене коришћењем рачунарских програма дизајнираних да опонашају рад система или његове карактеристике, обично у времену. Другим речима, симулација је процес дизајна и израде компјутерског модела реалног или замишљеног система са циљем извршавања нумеричких експеримената као би се разумело понашање система за дати скуп услова. Иако симулације могу да се користе за проучавање једноставних система, права снага и смисао њихове употребе је код изучавања комплексних система. Иако симулације нису једини алат за проучавање система, оне су често избор број један. Разлог је тај што модел може бити врло комплексан и може реално да репрезентује систем. Други алати захтевају већа поједностављења, што у крајњем може да угрози валидност модела. У великим корпорацијама, статистичке анализе и симулације представљају водеће алате менаџмента за оцену и анализу пословног процеса.

Симулација имају и своје недостатке. Реални системи могу бити изложени неконтролисаним и случајним поремећајима или су им такви улазни параметри. Зато многе симулације подразумевају случајне (стохастичке) улазне параметре, што узрокује да су и излазни параметри такви. Покретање стохастичке симулације је самим тим еквивалентно у вршењу таквог експеримента. Број путника на некој (нпр. аутобуској) станици се разликује

по данима. У многим симулацијама, што је време трајања симулације дуже, резултати се „упросекују“, само је питање које је то време у симулацији „довољно дуго“.

Без обзира на могућност више начина класификације симулација, често се користе следеће:

- Статичке-динамичке;
- Континуалне-дискретне;
- Детерминистичке-стохастичке.

Симулација се може извршити:

- Мануелно-ручно;
- Програмирањем у општим језицима;
- Употребом симулационих језика;
- Употребом симулатора високог нивоа (графички кориснички интерфејс, интуитивност примене објеката и релација међу њима, обиман мени и уграђени дијалози, анимације, флексибилност).

### 8.1.3. Симулације у области одбране (војне симулације)

Симулације се спроводе са циљем умањења трошкова и ризика у животном веку техничких средстава. Моделовање и симулације се примењују у свим фазама тзв. аквизиције средства: дефинисање захтева, програм опремања, дизајн, производња, тестирање, логистичка подршка.

У овој области, дефинисане су три класе симулација:

- *Виртуалне симулације*, које репрезентују реалан систем физички (механички, електронски, итд.) и где је човек укључен у петљу симулације. Као пример могу да се наведу симулатори летилица, возила, оружја и др. Такође, овде спадају и виртуални прототипови опреме где оператор може да доживи реалност система упоредив са стварним системом;
- *Конструктивне симулације*, које репрезентују систем и његов рад. Овде спадају рачунарски модели система, аналитички алати, макете и модели, дијаграми тока и др.;
- *Симулације путем употребе реалне опреме и ангажовања људи (вежбе)*.

### 8.1.4. Раст примене симулација

Симулације су своју зрелост достигле 1990.-тих (Pereira et al., 2011., Patil et al., 2016.). Препрека да постану универзални алат у пословним процесима је велико потребно време развоја модела и потребно знање за развој успешне симулације. Развој рачунара и софтвера омогућио је интеграцију софтвера за симулације са базама података, програмима за обраду текста и табеларне калкулације. И лакоћа употребе софтвера за симулације утиче на њихову све већу прихваћеност. Брзи развој ИТ-а не даје лак одговор на будућност симулација (софтвера) али је извесно да ће се имплементирати у системе за аутоматске статистичке анализе, софтвер који препоручује промене система, да ће симулације бити тотално интегрисане у софтвер који се користи за управљање системом и да ће се бити део *Virtual Reality* решења.

### 8.1.5. Предности и недостаци симулација

Према (Murthy, 2007., Alrabghi and Tiwari, 2015.), коришћење симулација, као што је речено, врши се у областима где проблем није могуће описати „традиционалним“ методама због природе проблема и комплексности проблема формулације потенцијалних вредности варијабли. Симулације су постале један од најважнијих алата у управљачком одлучивању. Могуће је сагледати различите алтернативе без ремећења реалног система. Симулација као квантитативна техника користи компјутеризовани математички модел.

Предности коришћења симулације:

- Директност и флексибилност;
- Може се анализирати велики и сложен реални систем;
- Често је то једина могућа метода;
- Анализира се интеракцијски ефекат индивидуалне компоненте (варијабле) на систем да би се одредило која је најважнија;
- Симулациони модел једном конструисан може да се користи неограничено за анализу различитих ситуација;
- То је вредан и погодан метод да се сложени систем рашчлани на компоненте и да се оне анализирају.

Ограничења симулационе технике:

- Пошто симулација ради под претпоставкама и ограничењима (неодређеностима), резултат симулације је поуздана апроксимација рада реалног система, односно није могуће добити апсолутно оптимални резултат;
- У многим ситуацијама није могуће идентификовати све варијабле процеса које утичу на понашање система (процеса);
- У великим и сложеним проблемима, веома је тешко у програму за симулацију обухватити све варијабле (и њихове особине) и одредити њихов међусобни утицај;
- Свако решење (модел процеса) је јединствено и није могуће употребити га на други проблем.

### 8.1.6. Верификација и валидација модела

Верификација подразумева оцену да се модел понаша како је замишљено да се понаша. Валидација модела је оцена да ли се модел понаша као реалан систем.

Верификација се врши тестирањем понашања модела при чему се као улаз (инпут) задају уобичајени параметри и где се зна (очекује) познати - уобичајени излаз. Погодно је испробати екстремне улазне параметре и анализирати излаз из модела. Такође, погодно је (према терминологији коришћеног програма), пропустити један ентитет кроз модел и пратити га кроз модел ради оцене да ли су логика модела и подаци у моделу коректни.

Валидација модела је коначна оцена усаглашености модела са стварним системом (ако постоји). Треба упоредити стварне улазне и излазне параметре ако су снимљени. Статистички тестови и здраво резонување се такође користе. Валидирани модел онда може да се користи за развијање алтернатива за реални систем.

### 8.1.7. Проблеми верификације и валидације

Према (Zhang et al., 2015.) верификација и валидација модела („V&V“-*Verification and Validation*) су обавезни кораци пре примене модела у пракси. Интеграцијом „V&V“ и процеса развоја модела, смањује се ризик од грешака, повећава се тачност модела и појачава се убеђење дизајнера (корисника) у резултате модела. Модели се интензивно користе у истраживањима где описују систем и сценарио предвиђања. Верификација и валидација модела („V&V“) квантификују поверење у тачност предвиђања базираних на моделу под одређеним претпоставкама. Верификација се односи на прављење система (модела) тачним, а валидација на прављење правог система. Прво се ради верификација. Валидација подразумева валидацију концептуалног модела (утврђивање да су поставке и претпоставке у основи концептуалног модела тачне и да модел у разумној мери репрезентује проблем и одговара намени) и оперативног модела (одређивање да излаз из модела има довољан степен поверења и тачност за намене за које је дизајниран). Постоје разни приступи начину валидације, а неки су дати у табели 14 и 15.

Табела 14. Начини валидације (Zhang et al., 2015.)

Техника	Објашњење
Анимација	Употреба графика ради сагледавања понашања модела у времену
Упоредивање модела	Упоредивање резултата модела са резултатима других валидних модела
Валидност догађаја	Упоредивање догађаја у моделу са реалним системом ради сагледавања сличности
Екстремни услови	Провера модела у екстремним и мало вероватним условима
Мишљење стручњака	Оцена и мишљење стручњака о разумности модела
"Намештене вредности варијабли"	Поставити параметре модела да резултат може да се израчуна независно од модела и упоредити их
Валидација на основу података	Употребити део стварних података за дизајнирање модела а остатак података за тестирање
Рационализам; емпиризам;	Закључивање да се претпоставке у моделу заснивају на чињеницама и да модел тачно репрезентује систем; претпоставке су емпиријски доказиве.
Интерна валидација	Покретање више симулација ради сагледавања резултата. Велике разлике у резултатима указују на лош модел.
Оперативна графика	Истовремено се приказује и анализира вредност више индикатора у времену који су производ употребе модела.
Варирање вредности варијабли	Мењају се вредности улазних варијабли ради закључивања о ефектима.
Предиктивна валидација	Упоредити предвиђање модела са стварним системом.
Праћење (Traces)	Прати се кретање ентитета у моделу са циљем да се сагледа да ли је модел логичан и тачан
Turning-ов тест	Специфичан тест из области вештачке интелигенције. Експерт оцењује резултате модела и реалног система. Ако је тешко да установи разлику, модел је добар

Ове и друге начине валидације наводе аутори (Sargent, 2010.; Xiang et al, 2005.; Martis, 2006.).

Табела 15. Начини оперативне валидације (Sargent, 2010.)

	Класификација оперативне валидације	
приступ	Опсервабилни системи*	Не-опсервабилни системи
Субјективни приступ	Упоредивање коришћењем графичких приказа	Проучавање понашања модела
	Проучавање понашања модела	Упоредивање са другим моделима
Објективни приступ	Упоредивање коришћењем статистичких тестова	Упоредивање са другим моделима коришћењем статистичких тестова
* За систем кажемо да је потпуно опсервабилан (осмотрив) уколико је на основу мерења излазног вектора $y(t)$ у неком коначном интервалу времена могуће реконструисати вектор почетних стања		

Наука, индустрија и државна управа су посебно заинтересоване за валидацију модела. У тим круговима се у односу према моделу везују термини као што су: поузданост, кредибилитет, поверење, применљивост. Верификација и валидација модела као приступ, квантификују тачност и поверење закључивањем на основу упоређивања резултата модела и резултата добијених експериментом или на основу реалности.

Дефиниције верификације и валидације према Министарству одбране САД и Института инжењера електротехнике и електронике (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) су дате у табели 16.

Табела 16. Дефиниције верификације и валидације

	верификација	валидација	примена
Министарство Одбране САД	Процес одређивања да модел верно представља замишљени концепт, односно да се понаша како треба да се понаша	Процес одређивања степена тачности модела са аспекта описа реалног система	Рачунарске симулације у науци, инжењерству и операционим истраживањима
IEEE	Процес вредновања система или компоненте да би се утврдило да ли производи одређене развојне фазе задовољавају услове постављене на почетку те фазе	Процес евалуације система или компоненте током или на крају процеса развоја да би се утврдило да ли задовољава одређене захтеве	Софтверски инжењеринг

Верификација модела подразумева проверу да ли модел даје излаз као функцију улаза и да ли је у том смислу релација математички коректна. У основи, валидација модела је субјективна и може имати различита значења. Ово из разлога што дизајнер модела бира тестове валидности, одређује критеријуме за задовољавање теста валидности, одређује који излази из модела ће бити проверени у смислу валидације, подешава модел за тестирање и бира податке које ће при том користити. Верификација одговара на питање: „да ли радим

ствар исправно“ и „да ли модел и симулација у потпуности задовољавају намену и сврху“. Валидација пита: „да ли радим праву ствар“, „да ли ће модел одговарајуће подржати намену за коју се користи“ и „да ли је одговарајући за ту сврху“. Верификација и валидација модела („V&V“) не обезбеђују да је модел одговарајући и тачан за све могуће сценарије, али обезбеђују да је модел довољно тачан за сврху за коју је дизајниран.

Према (Toledo et al., 2004.) могу се издвојити две врсте валидационих приступа: визуелни и статистички. У визуелној валидацији приказани су графички излази из стварног и симулираног система, један поред другог, како би се утврдило да ли се могу диференцирати или не. Визуализација се може заснивати на модулима анимације доступним у већини симулационих модела. Алтернативно, могу се генерисати низови различитих излаза (нпр. токови, брзине). „Turing“ тестови се такође могу користити. Ови тестови укључују представљање стручњаку два сета излаза: посматрани и симулирани. Резултат теста зависи од тога да ли су ови експерти у стању да правилно идентификују два одвојена дела. У сваком случају, процес остаје инхерентно субјективна и хеуристичка вежба. Статистичка валидација примењује мере добробити прилива, интервале поверења и статистичке тестове за квантификацију сличности између стварних и симулираних система. Аутори предлажу приступ на више нивоа, који се састоји од концептуалне и оперативне валидације. Концептуална валидација се фокусира на конзистентност резултата симулације са теоријским темама. За оперативну валидацију предлаже се двоструко вредновање симулираних података у односу на посматрање у стварном свету користећи статистичке тестове: упоређивање одговарајућих средстава и поређење дистрибуција.

Према (Chinea et al, 2009.; Sargent, 2010.) проверавање модела није лак задатак, јер не постоји ниједан поступак или алгоритам који указује на кораке неопходне да би се то постигло. Штавише, пошто стварни системи нису потпуно познати, а пошто модели никада нису тачна репрезентација реалности, валидација је самим тим тежа. Технике које се користе за осигуравање степена верности модела или нивоа тачности са којим она представља стварност обично су следеће:

- Упоређивање резултата симулације са историјским подацима из стварног система (ретроспективна валидација);
- Коришћење симулације за предвиђање резултата, а затим упоређивање са резултатима које генерише систем током неког будућег временског периода (предиктивна валидација).

Једна од најпопуларнијих метода за валидацију је метода упоређивања резултата добијених симулацијом на моделу и реалних (измерених) података, мада се развијају и технике за аутоматизацију валидације (Haffke et al., 2015.).

## 8.2. Услови за примену симулације

Према (Davidović, 2005.), први корак у примени симулационог експеримента је дефинисање циљева и тзв. оквира експеримента. Овај део обухвата дефинисање временског хоризонта, степен детаљности при истраживању понашања система и др. Полазећи од циљева у даљем поступку приступа се системској анализи која треба да покаже које утицајне величине највише могу да допринесу остваривању постављених циљева. У овом процесу подаци се могу рашчланити на следеће групе:

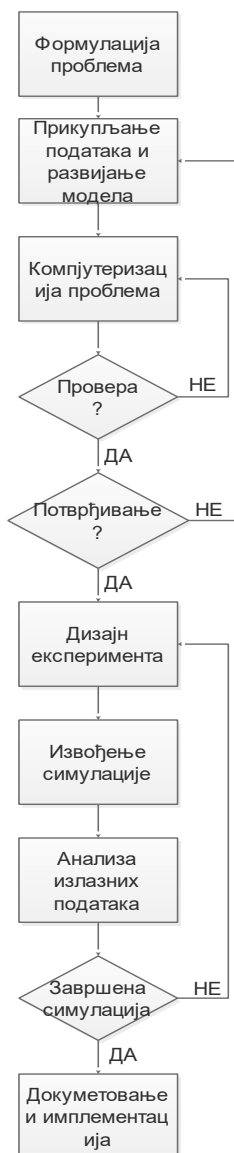
- Подаци који се односе на производе (шта је то што представља производ, услугу и како се понаша);
- Подаци о ресурсима (људи, машине, сировине и др.);
- Подаци о организацији процеса рада, стратегијама управљања, комуникационим механизмима, моделима рада, итд.



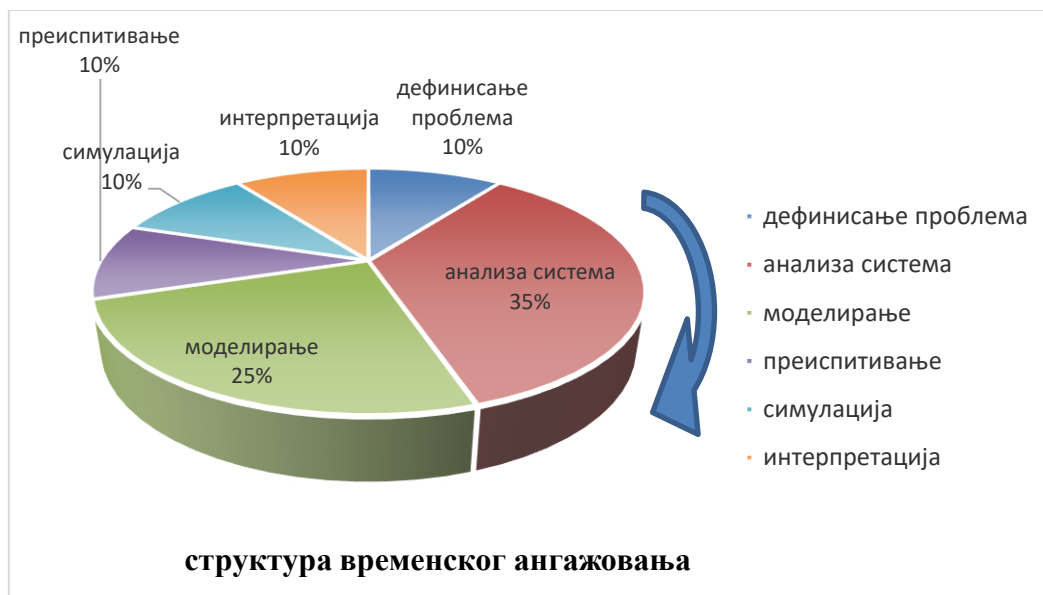
На основу ових података приступа се изради основног модела. При дизајну модела неопходно је упрошћавање модела али са довољно детаља који обезбеђују употребљиве резултате симулационог експеримента. Шематски приказ поступка дизајна модела и симулације је приказан на слици 99.

Степен апстракције подразумева да симулациони модел треба да буде што једноставнији, али и егзактан колико је то потребно. Алат за моделирање треба да обезбеди и графичко моделовање, како би се постигла добра прегледност и флексибилност. Тако дефинисан модел обезбеђује могућност спровођења симулационог експеримента. Први резултати експеримента служе за тестирање модела. Тестирање има за циљ да покаже да ли модел на тачан и одговарајући начин представља слику реалног система. Приликом тестирања се врши провера веродостојности резултата, тј. да ли су симулирани подаци упоредиви са подацима реалног система. Тек онда се може приступити спровођењу симулационог експеримента у циљу спознаје како функционише посматрани систем или процес, без обзира што су у моделу примењена поједностављења и апроксимације

На слици 100 дат је приказ структуре временског ангажовања по фазама (и фазе) спровођења симулационог експеримента.



Слика 99. Кораци симулационе студије, концепт (Ulgen et al., 2002.)



Слика 100. Структура рада у процесу дефинисања и употребе модела (Ulgen et al., 2002.; Давидовић, 2005.)

Симулациона техника има битно својство да омогућава спровођење комплексне „када-онда“ анализе уз трансформисање процесног ланца у оптимизациони процес. У процесима управљања квалитетом, применом симулационе технике могу се постићи стална унапређења обезбеђењем квалитетне подлоге за доношење одлука.

Симулациона техника има следећа важна својства у процесима управљања: пружа сигурност при планирању, потврђује функционалност при реализацији активности као и проверу управљачког механизма. Анализирањем различитих циљних величина долази се до могућег оптимума у процесу. Стиче се и боље разумевање везано за појаву одређених стања у систему, боље се сагледавају утицаји појединих параметара при њиховом варирању, односно боље се сагледавају динамичке реалности одређеног система односно процеса (Ulgen et al., 2002.; Давидовић, 2005.).

У току симулационог поступка у пракси се може у кратком времену и на флексибилан начин постићи компензација сметњи у производњи/услугама и редизајн процеса, односно унапређење перформанси.

Праћењем временског тока промена ефеката рада у систему могу се истраживати и поправљати многи логистички процеси и системи путем симулације. Већина појава у логистичким системима има стохастички карактер, па се реално јављају редови чекања или празни ходови. Симулација служи у таквим случајевима да се обезбеде одговарајуће квантификације преко којих може да се сагледа укупна функционалност једног система/процеса.

У логистичким системима основни задатак је сагледавање протока различитих врста кроз систем. Минимизација времена протока уз економично коришћење капацитета увек су повезани са одређеним конфликтима као и проблемом димензионисања капацитета појединих ресурса у систему. Посматрају ли се време протока, искоришћење капацитета, ниво залиха и др. као логистичка обележја квалитета, праћењем вредности ових обележја преко одговарајућих параметара сагледава се стање и успешност система упоређивањем стварних вредности са жељеним.

У једном симулационом експерименту основни метод у процесу приближавања оптималном стању је упоређивање добијених вредности за логистичке квалитативне параметре са жељеним вредностима. Све док се кроз варирање различитих променљивих

параметара на бази одступања добијених и жељених вредности за циљне вредности не дође до задовољавајућег резултата, симулациони експеримент се понавља.

У прошлости је симулациона техника била коришћена у многим случајевима једнократно само при планирању система. Данас се симулациона техника интензивно користи као тзв. „асистент систем“, тј. као подршка при решавању управљачких задатака у свакодневном раду. Применом симулационе технике корисник је у процесу управљања добио моћан инструмент којим се могу ревидирати одлуке и то применом алтернативних решења, уколико првобитне одлуке нису дале очекиване резултате. Развој нових софтверских пакета за симулације пружа нове могућности за интеграцију симулације у процес планирања.

Табела 17. Карактеристична примена симулација у области одржавања у Републици Србији, преглед радова

аутор	наслов	публикација/скуп	година
Петар Станојевић и др.	Пристап квантификацији утицајних фактора на систем одржавања	Научнотехнички ПРЕГЛЕД, vol. LI, br.1	2002.
Бранко Давидовић	Симулациона техника као алат за обезбеђење квалитета у логистици	32. Национална конференција о квалитету, Крагујевац	2005.
Петар Станојевић	Анализа ефеката увођења савремених стратегија одржавања	Војнотехнички гласник 4-5	2003.
Небојша Николић	Имплементација методе аутоматизованих независних понављања у симулацији система масовног опслуживања	Војнотехнички гласник 4/10	2010.
Драган Милчић и др.	Примена Монте Карло симулације у анализи поузданости система	12. Симпозијум термичара Србије и Црне Горе	2005.
Љиљана Петковић	On mathematical modeling in solving scientific and engineering problems	17th Symposium on Thermal Science and Engineering of Serbia	2015.
Златибор Љубинковић	Симулација ИТ подршке за управљање одржавањем железничких возила помоћу софтверског алата MS Project	YU Info конференција 2013	2013.
Олга Ристић и др.	Управљање одржавањем производних система-моделирање и симулација трошкова одржавања производних линија	ИМК-14 Истраживање и развој XVII, број 40, 3/2011	2011.
Олга Ристић	Динамичко моделовање и симулација превентивних експлоатационих активности у анализама поузданости електричне опреме	Докторска дисертација, ФТН у Чачку	2016.

Трошкови примене симулационог истраживања се могу знатно смањити применом референтних модела развијених за решавање специјалних задатака. Примена симулационе технике захтева висок ниво знања, што отежава њену ширу примену у срединама где тих знања нема. Веома је индикативан податак да је обим примене симулационе технике у

области планирања у САД-у знатно већи у односу на Европу, не само у односу на земље у транзицији већ и у односу на развијене европске земље. У табели 17 је дат преглед карактеристичних радова у области симулација у Србији.

### 8.3. Опис програма *Arena Simulation v.15*

*Arena software* (Rockwell Software), <https://www.arenasimulation.com>, је програмски пакет намењен моделовању пословних процеса и симулацији. За разлику од програма који служе само за опис и документовање пословних процеса, *Arena Simulation software* је моћан алат који обезбеђује дизајн сложених модела и симулације, са посебним интегрисаним алатом за оптимизацију. Дизајниран је за анализирање утицаја значајних и комплексних промена у систему и најчешће се користи код ланаца снабдевања, производних процеса, процеса друге врсте, логистичких послова, управљања складиштима. Оно што је важно истаћи, обезбеђује флексибилност и ширину како би се моделовао било који жељени ниво детаља и комплексности процеса. Ово решење је изабрано из разлога што је осим могућности употребе верзије која је слободна за употребу, али која има одређена ограничења примене, било могуће користити пуну лиценцирану верзију. Остали програмски пакети исте или сличне класе су: *Flexsim*, *Simio*, *Oracle Crystal Ball*, *Simul8*, *ProModel*.

Неке основне намене програма су:

- Детаљна анализа било ког производног процеса, укључујући управљање материјалом (сировине, полупроизводи);
- Анализа комплексног потрошачког сервиса;
- Анализа ланаца снабдевања, укључујући складиштење, транспорт и логистику;
- Предикција перформанси система базирана на кључним индикаторима („метрика“), као што су нпр. цена, радни циклуси, коришћење опреме;
- Идентификација уских грла процеса (преоптерећење ресурса, стварање застоја у току материјала, енергије, информација);
- Планирање радне снаге, опреме и материјала.

Основне активности које се спроводе у анализи процеса су:

- Моделовање процеса (графичка репрезентација процеса);
- Симулација (сагледавање перформанси система, сагледавање међузависности делова система и идентификација прилика за унапређење);
- Визуелизација (кроз динамичну графику);
- Анализа (како се систем понаша у стању какав јесте-тренутна конфигурација (as-is) и при неограниченом броју алтернатива (to-be), чиме се бира најбољи сценарио, тј. организација процеса.

Процес се описује као дијаграм тока (*Flowchart*). Тиме се наглашавају два основна концепта моделовања процеса односно *дијаграм* којим се мапира процес и *ток* који описује ток (материјала, енергије, информација).

У основи процеса је ентитет (*Entity*). Процес се моделује из перспективе ентитета. То је ствар или појава која независно постоји у систему и као таква је јединствена у појавном смислу. Она је предмет обраде, транспорта, трансформације или неког другог захвата. Ентитет се другим речима креће кроз процес.

Модули (*Modules*) су објекти дијаграма тока и објекти података који дефинишу процес који се симулира. Све информације и подешавања потребне за симулацију се смештају у модуле.

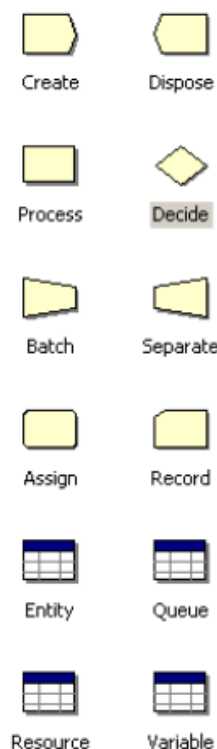
Најважнији модули основног процеса су (без превођења назива):

- Create: почетак процеса. Ентитет(и) улазе у процес у овом модулу;
- Dispose: завршетак процеса. Ентитет напушта модел;
- Process: активност, уобичајено захтева ресурс(е) и време за извршење операције. Процес може имати подпроцесе;
- Decide: одлучивање (може се описати и као чвор или као тачка одлучивања, има излазне вредности True или False);
- Batch: прикупљање скупа ентитета пре него што наставе процесуирање;
- Separate: дуплирање ентитета ради истовременог или паралелног процесуирања или раздвајање раније успостављеног скупа ентитета;
- Assign: промена вредности неког параметра у процесу симулације, као нпр. тип ентитета или неке друге варијабле процеса;
- Record: статистички запис, као нпр. број ентитета или време неког циклуса.

Сваки од наведених модула (слика 101), имају предефинисану графичку репрезентацију и детаљно се подешавају кроз њихове параметре.

Модули се повезују једносмерним релацијама. Овде ће бити приказан опис програма у најкраћим цртама, како би било јасно на који начин је употребљен у овом раду. На располагању је детаљно упутство и врло садржајан *Help* мени.

На први поглед програм делује врло једноставно. Суштина је међутим да је екстремно захтевно дефинисати параметре наведених (а и осталих) модула, како би симулација била што приближнија реалном систему.



Слика 101. Основни модули програма

Свака симулација (моделовање) почиње *Create* модулом. Овде је важно дефинисати тип ентитета (нпр. возило „ФАП 1118“) и учесталост појављивања (улаз у систем). Ова учесталост у овом модулу се назива *Type* и може имати следеће врсте вредности: *Random*,

*Schedule*, *Constant* и *Expression*. У последњој (*Expression*), учесталост појављивања ентитета се дефинише помоћу математичке функције расподеле, односно познатих типова теоретских расподела. Ентитет може бити као што је већ речено, потрошач, документ, део који се производи или електронски запис (наруџбеница, радни налог). У услужним системима ентитет често представља људе (пацијент, гост у ресторану, путник на аеродрому). Модел може да има више врста ентитета (нпр. производња аутомобила, а ентитети су најважнији подсклопови).

Модул *Process* је део модела где се обавља нека операција над ентитетом. Та операција захтева неко време и неке ресурсе за извршење. Ентитет се зато задржава (*Delay*) неко време у овом модулу. Време које ентитет проведе у овом модулу је у многим системима варијабилно. Зато се приликом моделовања, параметар *Delay* подешава на основу претпостављене или измерене/апроксимираних математичке функције расподеле. Током симулације, када ентитет „уђе“ у модул *Process*, програм ће узети неку вредност из дистрибуције која му је дефинисана у смислу времена задржавања у модулу. Током дуге симулације (пуно ентитета и дуго трајање), време задржавања ентитета ће се понашати према профили дефинисане расподеле.

У овом модулу се дефинишу и ресурси који су потребни за извршење операције над ентитетом. Долазећи ентитет чека на слободан ресурс. Ресурс може бити вишечлани скуп. Дефинишу се правила „ангажовања“ ресурса. Када дође на ред, ентитет заузима (*Seize*) ресурс, проводи неко време у модулу и затим ослобађа ресурс за следећи ентитет. Ресурс се посебно подешава (нпр. цена радног сата), поузданост и др.

Модул *Decide* обезбеђује гранање тока ентитета зависно од услова који су дефинисани и аналоган је програмерској команди *if-then*.

Модул *Dispose* представља завршетак процеса (симулације). Ту се броје ентитети који су напустили симулацију (нпр. број поправљених возила ФАП 1118).

Као производ симулације могу да се добију (али не само ови) следећи одговори (извештај):

- Укупно/средње време трајања процеса по ентитету;
- Цена-трошкови ресурса по ентитету, просек;
- Најдуже време задржавања ентитета у процесу;
- Највећи број ентитета који су истовремено чекали у реду на слободан ресурс;
- Степен искоришћења ресурса, итд.

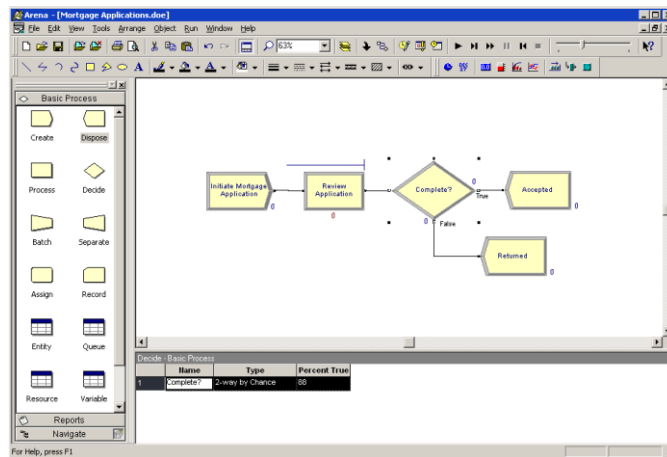
Модули података (*Data Modules*) су објекти у облику табеле који служе за додатно дефинисање карактеристика разних елемената процеса као на пример *ресурса*. Постоје:

- *Entity module*: дефинише тип ентитета, графичку ознаку ентитета, параметре цене;
- *Queue module*: дефинише правила рангирања за специфичне редове ентитета, тј. како долазе у систем (*First In, First Out*; *Last In, First Out*; *Lowest Attribute Value (first)*; and *Highest Attribute Value (first)*);
- *Resource module*: дефинише ресурсе у моделу - симулацији, као што су расположивост, капацитет, отказ - губитак ресурса и др. Ресурси се могу дефинисати као људи, машине и др.;
- *Variable module*: манипулација варијаблама, системским и креираним;
- *Schedule module*: користи се ближе одређивање *Resource Module* за креирање оперативног плана рада ресурса (расположивост) или за *Create Module* за креирање плана пристизања - појављивања ентитета;
- *Set module*: дефинише различите типове скупова као што су ресурси, бројачи, типови ентитета, итд. Најважније својство му је дефинисање чланова који припадају скупу.

Напредни модули који додатно обезбеђују детаљну разраду процеса и комплексно моделовање су:

- *Delay Module*: када ентитет пристигне у овај модул, задржава се према дефинисаном изразу за задржавање; типични примери примене су припрема и провера машине (за које време не може да ради) или трансфер докумената из једне целине организације у другу;
- *Dropoff Module*: искључује одређени број ентитета из групе и прослеђује их у други модул према дефинисаном правилу;
- *Hold module*: задржава ентитет који да би био „пропуштен“ чека сигнал, специфичан услов или га трајно задржава;
- *Match Module*: ентитети долазе у овај модул и „стају“ у предефинисане редове чекања (како је то дефинисано и одређено графичком конекцијом); ентитети остају у својим редовима док се не констатује „спаривање“ – стаје да у редовима за чекање стоји најмање један ентитет или да ентитети у различитим редовима имају неки исти атрибут; када се „спаривање“ догоди, модул ослобађа по један ентитет из свих редова за чекање да синхронизовано напусте модул и пређу у следећи; карактеристични пример је склапање делова у неки већи склоп, синхронизација излаза потрошача у попуњеним редовима;
- *Pickup Module*: модул искључује узастопне ентитете из постојећег реда почевши од специфицираног места у реду, затим их ставља на почетак долазеће групе ентитета;
- *Release Module*: ослобађа јединицу ресурса коју је претходни ентитет користио; када ентитет уђе у овај модул он предаје контролу над ресурсом коју је до тада имао; ентитет који чека у реду за тај ресурс преузима контролу тог ресурса;
- *Remove Module*: уклања ентитет из специфичне позиције у реду чекања и прослеђује га у означени модул;
- *Seize Module*: додељује јединицу ресурса (једног или више) ентитету;
- *Search Module*: претражује ред или групу ентитета ради налажења ранга ентитета;
- *Signal Module*: шаље сигнал у *Hold Module* у моделу и „ослобађа“ специфицирани број ентитета у следећи модул.

Постоје и додатни модули (за прецизније дефинисање локације, транспорта унутар система, за моделовање полуконтинуалних или операција брзог паковања), а опис је дат у корисничком упутству за програмски пакет. Описани модули без улажења у детаље, са својим подешавањима омогућују моделовање комплексног модела максимално приближног реалном. На конкретном моделу којим се бави овај рад објашњавају се детаљније сви коришћени модули и њихова подешавања. На крају, у овом делу који кратко описује овај алат, важно је рећи да *Arena* садржи скуп уграђених функција за генерисање случајних бројева из опште коришћених односно познатих типова теоретских расподела, где се од корисника очекује да унесе параметре. Општи изглед корисничког окружења је приказан на слици 102.



Слика 102. Општи изглед коришћеног програма Arena® Simulation software

## 8.4. Креирање модела одржавања, развој и експериментисање

### 8.4.1. Увод

Непосредни циљ овог истраживања је да се сагледа могућност моделовања, симулације и оптимизације једног аспекта војне логистике – одржавања, уз напомену да није ограничен само на тај домен. Војна логистика има за циљ да обезбеди све потребе за успешно извршење мисије одбране, примењујући једноставну формулу: праве ствари у право време, на правом месту по реалној цени (Arte и Kang, 2008.). Главни изазов и у пољу логистике су обухваћени такозваном 4D формулом: захтев, трајање, даљина и одредиште (Мајор, 2011.).

Основни циљ симулације је да преко динамичког модела омогући спознају о два важна параметра (индикатора успешности):

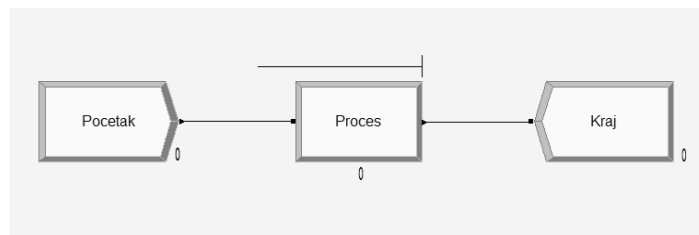
- Оперативна расположивост којом се описује ниво спремности опреме да врши функцију, изражено као однос времена у раду и збира времена у раду и није у раду;
- Искоришћење расположивих капацитета радне снаге за одржавање.

Смањење временског трајања оправке директно зависи од нивоа залиха резервних делова. Такође и логистика одржавања (недостатак резервних делова, ресурса за одржавање и/или лоша спрема кадра за одржавање) утиче на време трајања одржавања. Војни програми одржавања уобичајено деле одржавање у технолошке и организационе програме по нивоима, најчешће као ниво корисника, средњи ниво (специјализоване јединице-погони) и ниво системског ремонта. Оваква структура је честа пракса и комерцијалних компанија или сервиса. Способност одржавања расте са нивоом али и време трајања одржавања се повећава. Такође, са нивоом се повећавају и захтеви за резервним деловима и цена одржавања. Први ниво веома брзо враћа опрему у исправно стање, али је обим радова за који је надлежан и који обавља мали. Други ниво обухвата релативно обимне радове који кратко трају и одвијају се на малој удаљености од опреме или места отказа. Највећи утицај на други ниво испољавају ресурси и расположивост резервних делова. Овај ниво, јасно је има највећи утицај на оперативну расположивост. Трећи ниво подразумева обављање веома обимних радова одржавања који трају веома дуго и велика су логистичка времена (Мишковић и др., 2003.). У овом раду се анализира „други ниво“.



## 8.4.2. Елементарни модел – основни параметри

Најједноставнији модел мора имати минимум 3 модула, улаз, процес и излаз, што је у конкретном програму представљено као на слици 103.

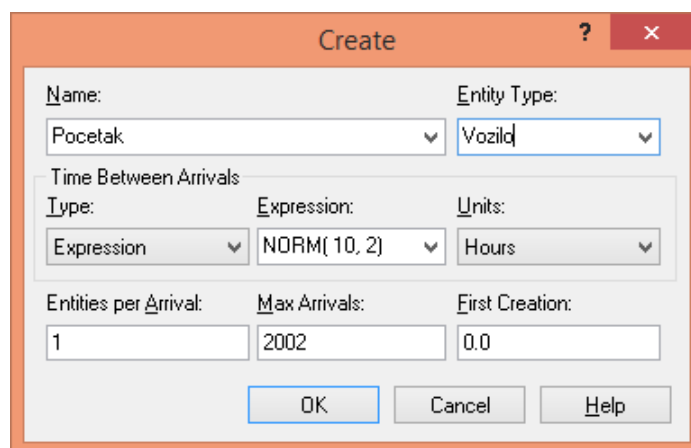


Слика 103. Елементарни модел за симулацију.

Даље су објашњени основи подешавања модула употребљеног програма.

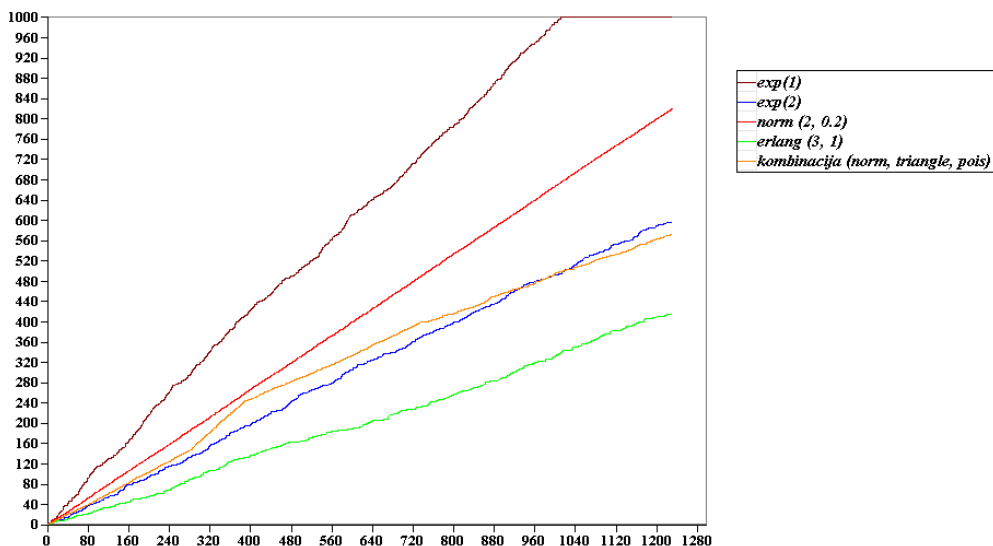
## 8.4.3. Ентитети

У контексту истраживања и коришћеног софтвера, ентитет је појава или објект над којим се предузимају неке активности. Зато је важно да се познају његова својства, како и колико пута се он јавља у процесу који се истражује. Начин „уласка“ у систем или законитост појављивања је један од најважнијих својстава модела. Закон појављивања се најбоље може описати математички, што је уједно и највећи изазов, тј, треба ту законитост описати верно стварним појавама. Законитост се одређује мерењима или снимањем историје процеса ако постоје записи. Ако такви записи не постоје, законитост се може приближно проценити. Ако се моделује потпуно нов систем, законитост се одређује као потребно својство система, нпр. „*треба произвести 100.000 производа годишње, превести одређени број путника и сл.*“



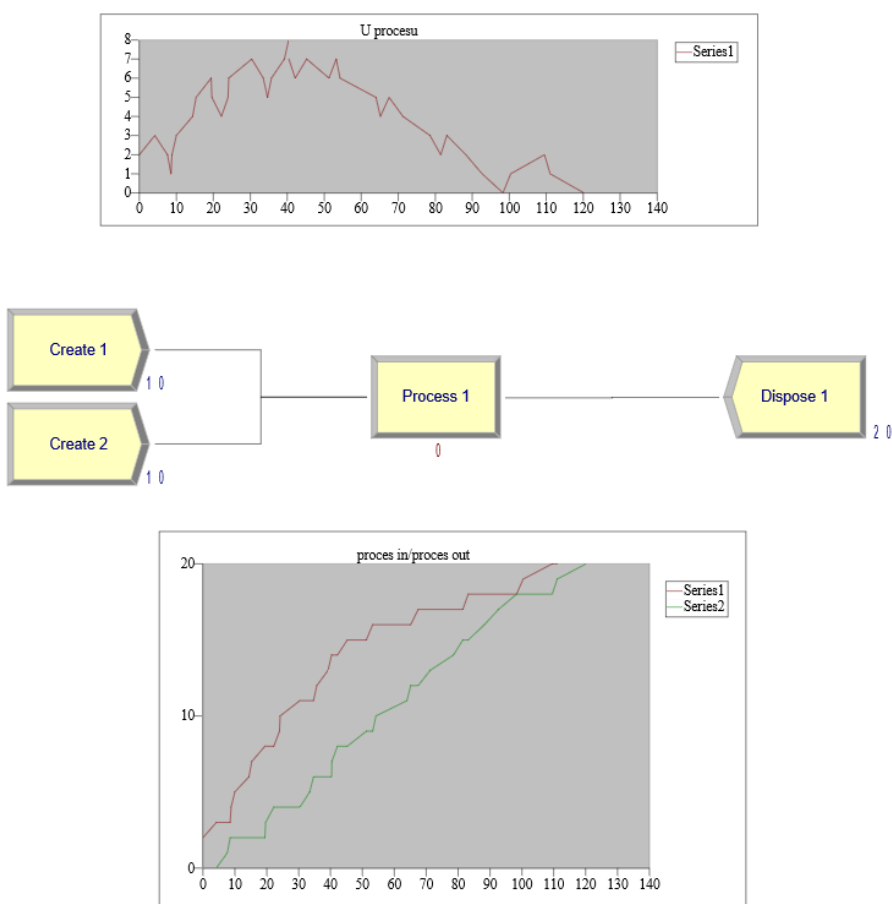
Слика 104. Подешавање „настајања“ ентитета

За дефинисање закона појављивања ентитета користи се кориснички дијалог, што је слично у свим алатима за моделовање и симулације и то је илустровано на слици 104 (релација време - број ентитета). Ради илустрације, приказани су ефекти (слика 105) неколико закона појављивања, који се често користе у теорији вероватноће примењеној у одржавању.



Слика 105. Ефекат различитих закона појављивања ентитета у систему одржавања

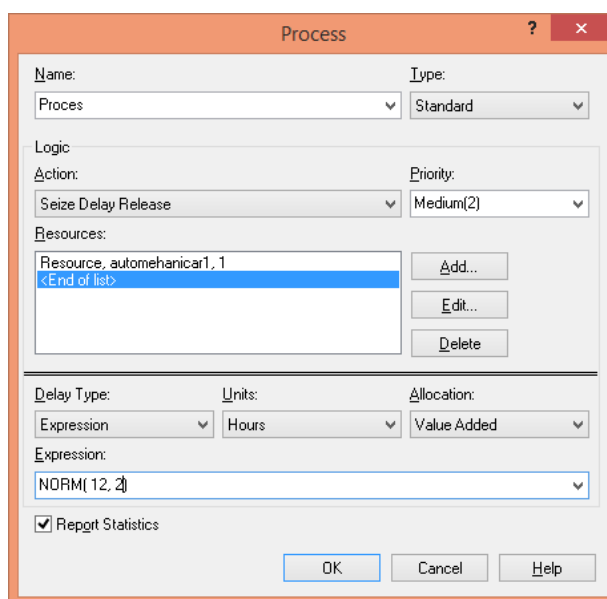
На слици 106 је приказан прост модел одржавања са циљем да се визуализује процес који има више закона појављивања ентитета (захтеви за одржавањем), а конкретно је приказан модел са два закона појављивања ентитета. Број дефинисаних закона може бити неограничен, али у моделу ипак треба да их буде минимално потребан број, што је веома важно *када се једним законом не може описати нека појава али зато може комбинацијом више законитости.*



Слика 106. Учесталост „улаза“ у систем одржавања према дефинисаном закону

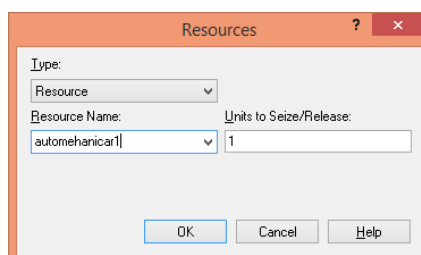
#### 8.4.4. Ресурси

Појам ресурси у моделу представља субјекте (људи, машине, опрема) који врше неку акцију или активност над ентитетом. Повезани су са тзв. модулом *Process* и у њему се дефинишу својства ресурса. У моделу одржавања основни ресурс су механичари, а може да буде и било која врста опреме (нпр. алат) и такође је важно да без обзира на сложеност проблема који се анализира ресурси буду моделовани да верно описују проблем. Ако већ постоји инфраструктура, алат, машине и др., онда је довољно под ресурсима (одржавања) сматрати само механичаре. Евентуална лоша опрема, недостатак опреме за рад, недовољна оспособљеност механичара се може моделовати помоћу посебних својства ресурса, а то је њихова поузданост (откази ресурса) и распоред рада (нпр. ако за два механичара постоји један алат, истовремено може радити само један, али у озбиљним системима било које врсте такав проблем се ретко јавља за разлику од поузданости ресурса која обухвата ненаменски рад људи или стварни застој машине у производњи). Осим броја (квантитет) ресурса, поузданости (квалитет), дефинише се колико ентитета одједном може да обради ресурс или ако је потребно, колико ресурса је истовремено потребно да обради један ентитет. Време потребно да један ентитет буде обрађен се дефинише као константа (што је погодно за аутоматизовану производњу) или преко одређене законитости трајања времена сваке појединачне „обrade“. Изглед корисничког менија за контролу и подешавање ресурса је дат на сликама 107-108.



Слика 107. Дефинисање ресурса процеса

Даље се може дефинисати да се у случајевима појава редова чекања, најпре обрађују они ентитети који и ако имају дефинисан приоритет (правила ангажовања ресурса). У противном, ентитети се обрађују по реду пристизања. За анализу трошкова, код ресурса се дефинише цена кад ресурс ради и када је слободан.



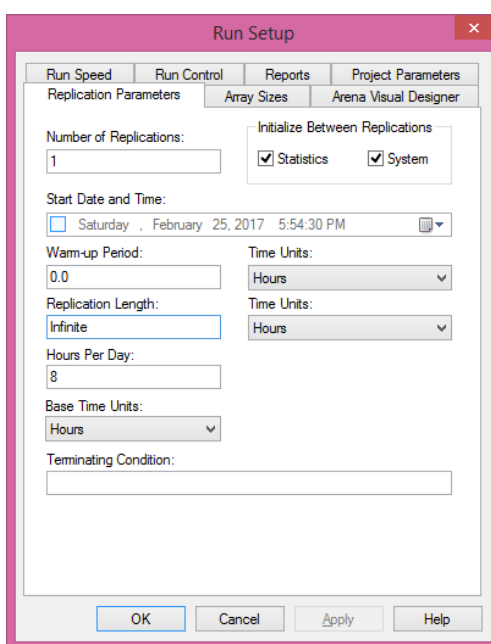
Слика 108. Ресурс „аутомеханичар1“

## 8.4.5. Атрибути и варијабле

Атрибути и варијабле у контексту модела и коришћеног програмског пакета су посебна својства која се односе на цео процес. Атрибут је обично својство ентитета (нпр. исправан-неисправан, ентитет-корисник, ентитет-локација) али се може придружити и другим елементима модела. Варијабла је глобално својство процеса који се моделује и то је нпр. време, сам ентитет, место у реду чекања и др.

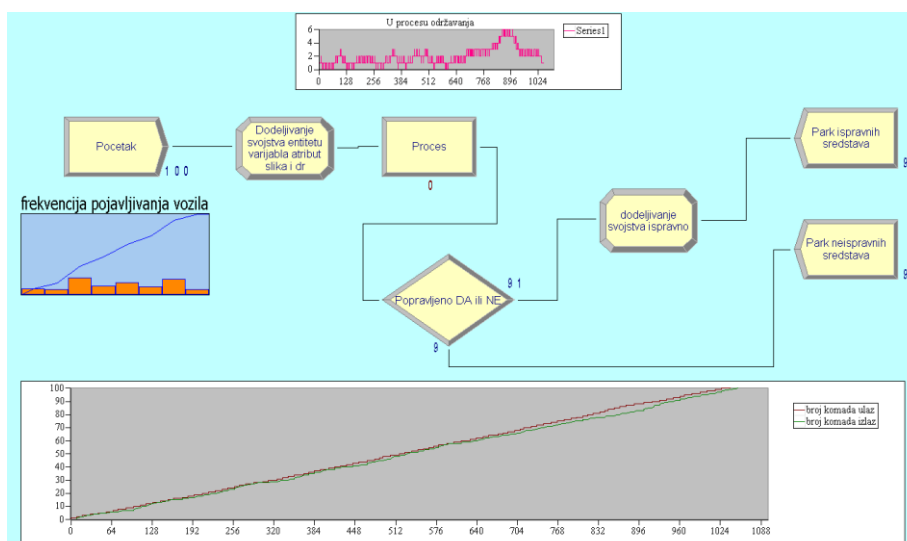
## 8.4.6. Општа подешавања

Општа подешавања модела и симулације се такође морају одредити (слика 109). То значи да се мора одредити почетак и крај времена симулације, број понављања симулација, јединица времена, услови прекида симулације и др.



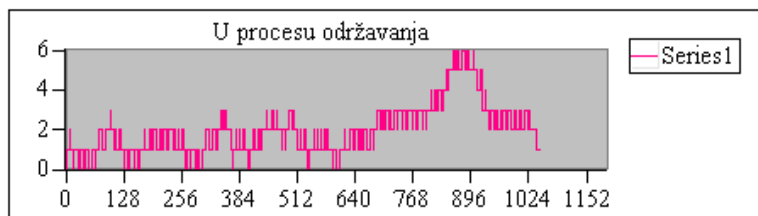
Слика 109. Основна подешавања симулације

На основу наведеног, може се приказати неки општи модел процеса одржавања и резултати симулације.

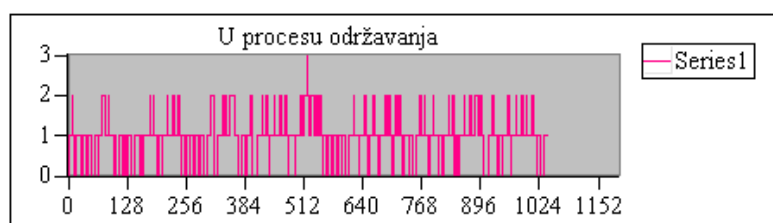


Слика 110. Упростићени, илустративни модел система одржавања и симулација

Модел на слици 110 је обухватио екстремно једноставан модел одржавања. На моделу је приказан део који описује појаву ентитета, додељивање својства „неисправан“, обраду ентитета у *Process*-у који обављају ресурси, закључивање по неком правилу (критеријуму) да ли је отклоњена неисправност, додељивање својства „исправан“ ентитету који је „поправљен“ и смештај у тзв. паркове (исправно, неисправно). Графички су илустрована (графикони по времену) изабрана стања у процесу (број креираних ентитета у времену, број ентитета у „одржавању“) и дат је приказ (слике 111 и 112) броја ентитета у одржавању са различито димензионисаним ресурсима.



Слика 111. Број возила у процесу када постоји 1 механичар (ресурс)



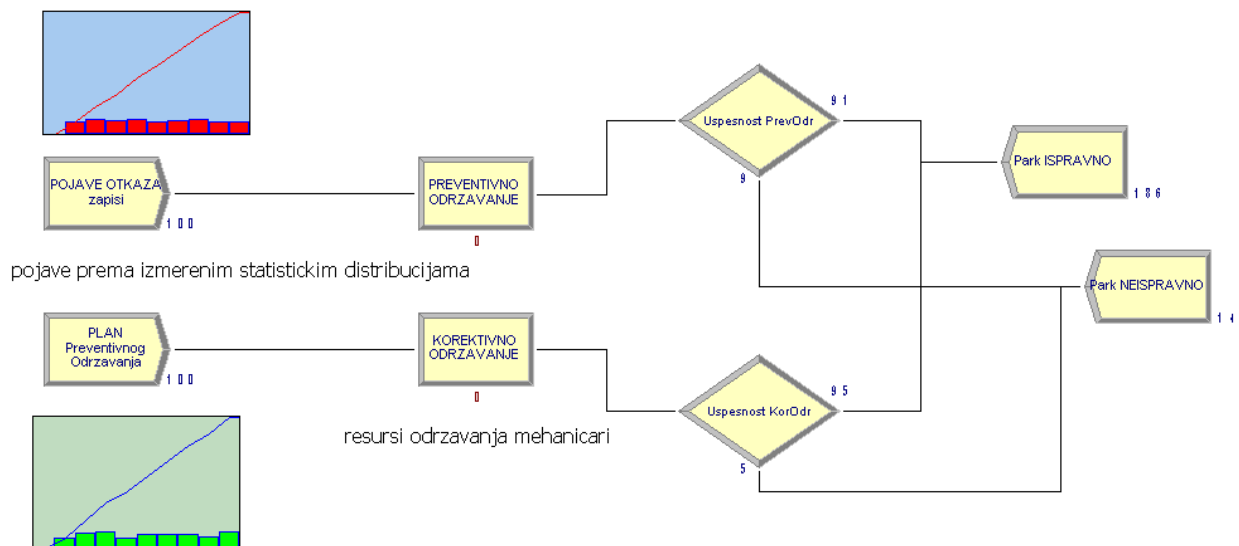
Слика 112. Број возила у процесу када постоје 2 механичара (ресурс)

На сликама 111-112 је илустровано колико ентитета је у непосредном процесу одржавања са различитим димензионисањем ресурса. Када се слике упореде, види се да када има више механичара, број ентитета у процесу јесте мањи. То значи да посао није обављен брже, јер неисправна возила нису одједном стигла у радионицу. Ово значи да је време задржавања укупног броја возила у радионици краће. Подешено је да је средње време задржавања због одржавања 10 часова, а и време (учесталост) појављивања неисправних возила је сваких 10 часова (ово су подешавања само за дато објашњење).

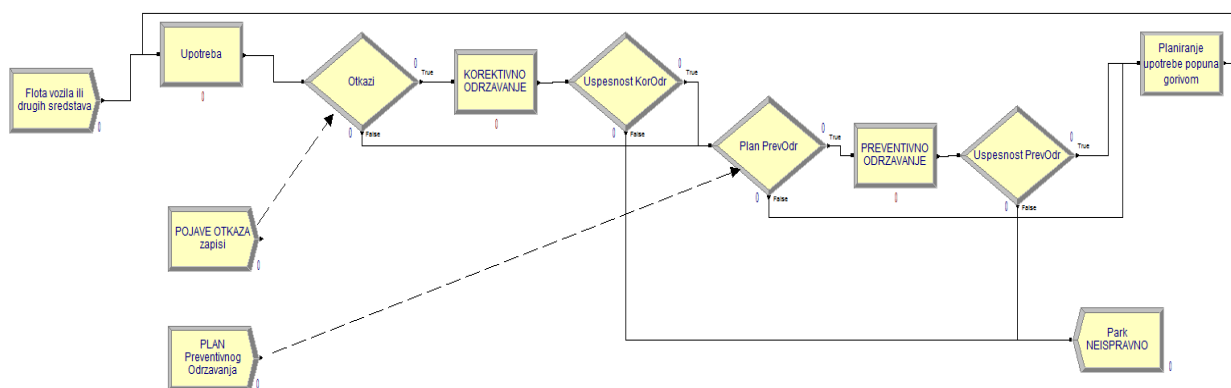
#### 8.4.7. Моделовање

Анализи система одржавања се може приступити на два начина. Први је да се одржавање посматра као независан систем (нпр. систем чека на захтев без обзира колико су средства која се одржавају оптерећена радом), што је за израду модела и саму симулацију лакша варијанта (слика 113). У одређеном временском интервалу анализира се способност система одржавања да одговори на захтеве а на основу ресурса који су му додељени. Могуће је разматрати варијанте шта-ако.

Сложенији модел анализе је да одржавање буде приказано у петљи коришћења средстава (слика 114). Овде постоји проблем што систем одржавања не располаже увек тим подацима, односно подацима о употреби и не утиче на употребу, већ само о броју појава отказа, временима трајања поправки и другим подацима које као систем сам креира.



Слика 113. Одржавање као изоловани систем



Слика 114. Одржавање у петљи употребе средстава (возила)

## 8.5. Модел, симулација as-is и to-be

На основу описаног алата и опште концепције рада, моделује се систем одржавања. Циљ моделовања је да се сагледа понашање система, тестира на поремећаје, оцени утицај различитих фактора на успешност, одреде индикатори успешности у реалном времену, испробају различите варијанте и оптимизује процес према изабраним критеријумима. У делу истраживања где је оцена система одржавања вршена применом стратегије *Статистичка контрола процеса*, нађено је да за већину опреме (велика разноврсност и број) постоје озбиљни показатељи да се процес одржавања одвија са пуно варијација и да има знакова нестабилности које указују да се процес не одвија на добар начин. Може се поставити питање до ког нивоа детаља је потребно моделовати систем одржавања. Како у систему одржавања, без обзира на разноликост опреме која се одржава, постоје јединствене и сродне технологије и ресурси који се не „мешају“ међусобно (нпр. одржавање возила и биротехничке опреме су независни процеси), довољно је дефинисати концепт модела који се онда као веродостојна репрезентација система може користити за истраживање целог проблема. Ако је потребно представити тотални модел одржавања, онда се развијено

решење једноставно мултиплицира уз одговарајуће подешавање сваког „подмодела“. Проблем модела одржавања је зато детаљно разрађен на проблему одржавања возила.

Такође је важно да се истакне да је циљ овог истраживања да се проблем сагледа на највишем, стратегијском нивоу, па је овакав приступ оправдан.

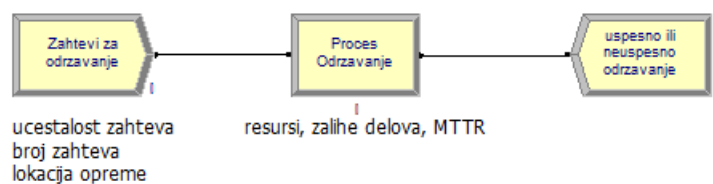
Моделовање захтева добро познавање система који се моделује. Мора бити уважена чињеница да постоји више географски разуђених формација, где свака може да поднесе захтев за одржавање. Једна од формација има статус са приоритетом у одржавању за нека средства. По појави неисправности, односно захтева за одржавањем, потребна је обрада захтева и одлучивање, односно одобравање, за шта је потребно одређено време, које се може назвати логистичко време. Ово време обухвата и друге активности. По одобрењу захтева, неисправна средства иду у процес одржавања, где постоје фазе: непосредан пријем, дијагностика и дефектација, обезбеђење материјала (резервни делови) и непосредан рад – поправка. Поправка може бити успешна само ако су према неисправности обезбеђени резервни делови и постоје ресурси.

Ту се јављају и знатна времена чекања, а исход успешности одржавања никад није потпун (100%). Због тога део неисправних средстава не може бити поправљен (постоје и други разлози као нпр. степен неисправности је сувише велики). Зависно од исхода, средства (возила или било које средство) се враћају кориснику исправна, неисправна (чекање на материјал), шаљу у виши степен одржавања или расходују.

Производ модела је могућност експериментисања и израчунавање индикатора успешности система одржавања, који се могу приказати нумерички или графички у релацији са временом, а последично и унапређење система одржавања.

### 8.5.1. Сопствено истраживање применом стратегије Симулациони експеримент

Студија путем симулације почиње дизајнирањем модела реалног система. Модел је репрезентација или имитација реалног система. Модел је поједностављена слика реалне појаве која укључује потребна поједностављења и апроксимације. Моделом се представља ток енергије, материјала, људи, информација и др. (слика 115).

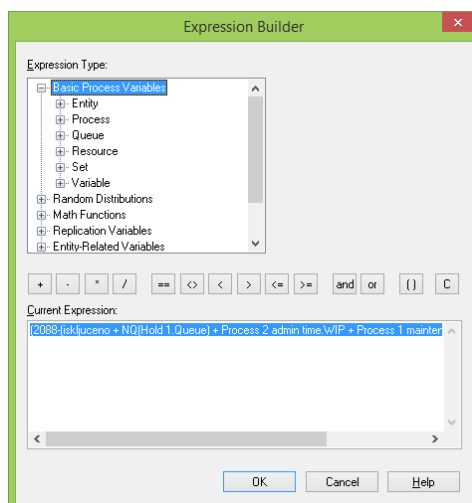


Слика 115. Елементарни модел процеса

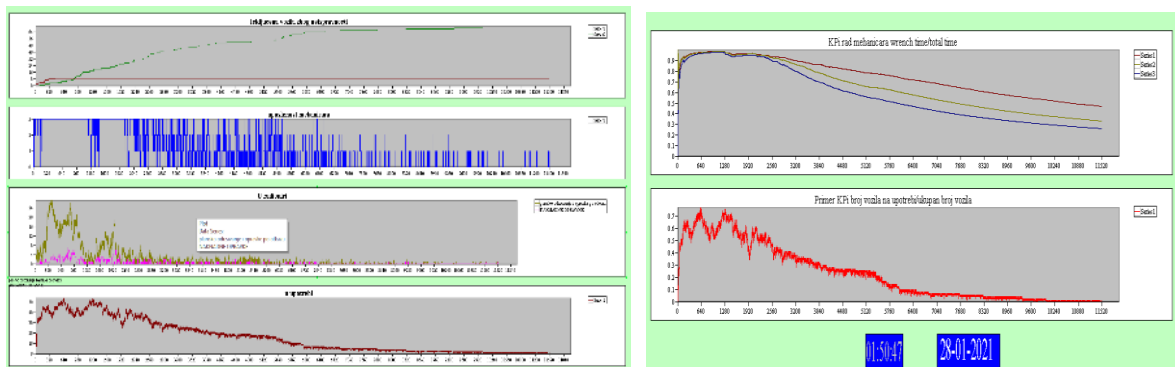
Утицајни фактори на систем одржавања који морају бити узети код моделовања су:

- Број средстава која захтевају одржавање;
- Време трајања одржавања;
- Број канала за одржавање (ресурси, капацитет, број механичара);
- Поузданост ресурса одржавања (губици у раду);
- Логистичка времена (припрема средства за оправку од стране корисника, време обраде документације и планирања, време враћања након поправки и др.);
- Удаљеност средства које захтева одржавање од ресурса за одржавање;
- Распољивост резервних делова.

Основни субјект у моделу одржавања је неки јединствени тип опреме, на пример возило типа „ФАП 1118“. Сваком типу опреме се може придружити различито својство/атрибут као нпр. корисник, локација, стање исправности, време појаве у систему и др. Та својства се могу мењати у току симулације. Када се започне симулација и током симулације, сваки појединачни комад опреме, који се у симулационим софтверима често назива ентитет, се креће кроз модел и постаје **објекат** над којим се врше различите акције у предефинисаним и подешеним модулима. Ентитет може да се налази у стању чекања због различитих разлога (административно време, чекање на испуњење неких услова пре конкретне акције над њим, итд.). Када су испуњени сви услови (синхронизација), над ентитетом се спроводи нека акција за коју су потребни ресурси (људи, опрема, машине, итд.). Ресурси се посебно дефинишу приближно стварној ситуацији и то може бити дефинисано кроз бројност, капацитет, расположивост, поузданост, врста рада, приоритети рада и др. Цена свих активности као и цена материјала (резервни делови нпр.) се такође може дефинисати. Број ентитета и типови (врсте) није ограничен, односно ограничен је евентуално верзијом софтверског пакета који се користи ако се користи готов производ. Када се креира симулациони модел, изврши валидација и верификација, може се вршити експериментисање и оцењивати систем одржавања. Оцењивање се може вршити оценом прихваћених и дефинисаних индикатора перформанси. Индикатори се дефинишу аналитички, применом едитора за њихово дефинисање (слика 116) и могу се приказати у облику графа (вредност по временској бази, слика 117).



Слика 116. „Expresion builder“



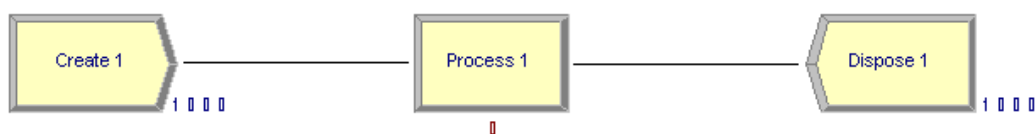
Слика 117. Илустрација графичког приказа индикатора перформанси



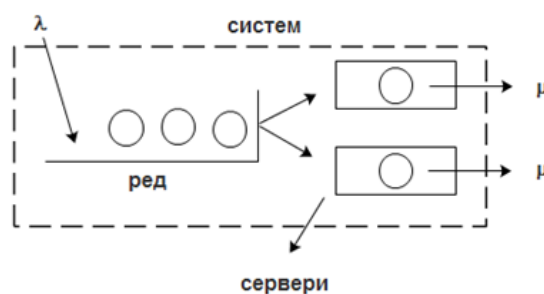
## Модел

Дизајн модела зависи од употребљеног софтверског пакета. Свако комерцијално решење има специфична својства. За ово истраживање је коришћен *Arena Simulation*®, version 15, у складу са правилима коришћења. Моделовању система одржавања се може приступити на начин интегрисаног моделовања употребе опреме, њеног искључивања због одржавања и враћања у употребу. Са друге стране, може се разматрати систем одржавања као самостални систем, с обзиром на расположиви број записа о одржавању и де факто стања да у великом броју случајних догађаја може бити развијен модел система који има за циљ да одговори на све захтеве. Као релативно посебан и независан систем унутар ширег система, одржавање не утиче на употребу опреме, па је и то разлог и основ да одржавање буде моделовано као посебан систем. Дефинисан модел има два истовремена процеса, корективно и превентивно одржавање. У корективном „каналу“, ентитети се појављују према измереном закону појављивања. То је захтев или улаз у систем одржавања. Када се ентитет појави, протекне неко време пре него што стварно започне акција одржавања. Наравно, потребан је и материјал и резервни делови који се морају обезбедити. Акција одржавања се може извршити и завршити само када су испуњени услови да је обезбеђен потребан материјал, делови и ресурси за одржавање. С обзиром да је реално да се у неком тренутку појави већи број ентитета, тј. захтева за одржавањем од капацитета за одржавање, модел има дефинисану логику да део ентитета привремено или трајно искључи из реда чекања (чекање на поправку, виши ниво одржавања и др.). У превентивном „каналу“, ентитети се такође појављују према измереној законитости. Координација са системом снабдевања деловима и материјалом је боља с обзиром на прецизније планирање. Ресурси за одржавање (персонал) су исти за оба канала, а време трајања активности одржавања је подешено према измереној законитости. Могу се дефинисати правила ангажовања и приоритети у раду. Трошкови се моделују кроз трошкове рада (активности било које врсте и материјал). Трошкови могу да буду исказани и као губици прихода због застоја опреме или због изнајмљивања опреме док је сопствена на одржавању. Сам процес је заправо итеративни процес, који захтева прилагођавање претпоставки, прилаза проблему и тактику истраживања.

Дизајн модела, корак по корак, треба да обухвати све напред наведене факторе. Модел, са параметрима: настајање захтева по закону *Random (expo(2))*, 3 механичара - канала за опслуживање, време поправке по закону *Norm (5,5; 0,8)* приказан је на слици 118.



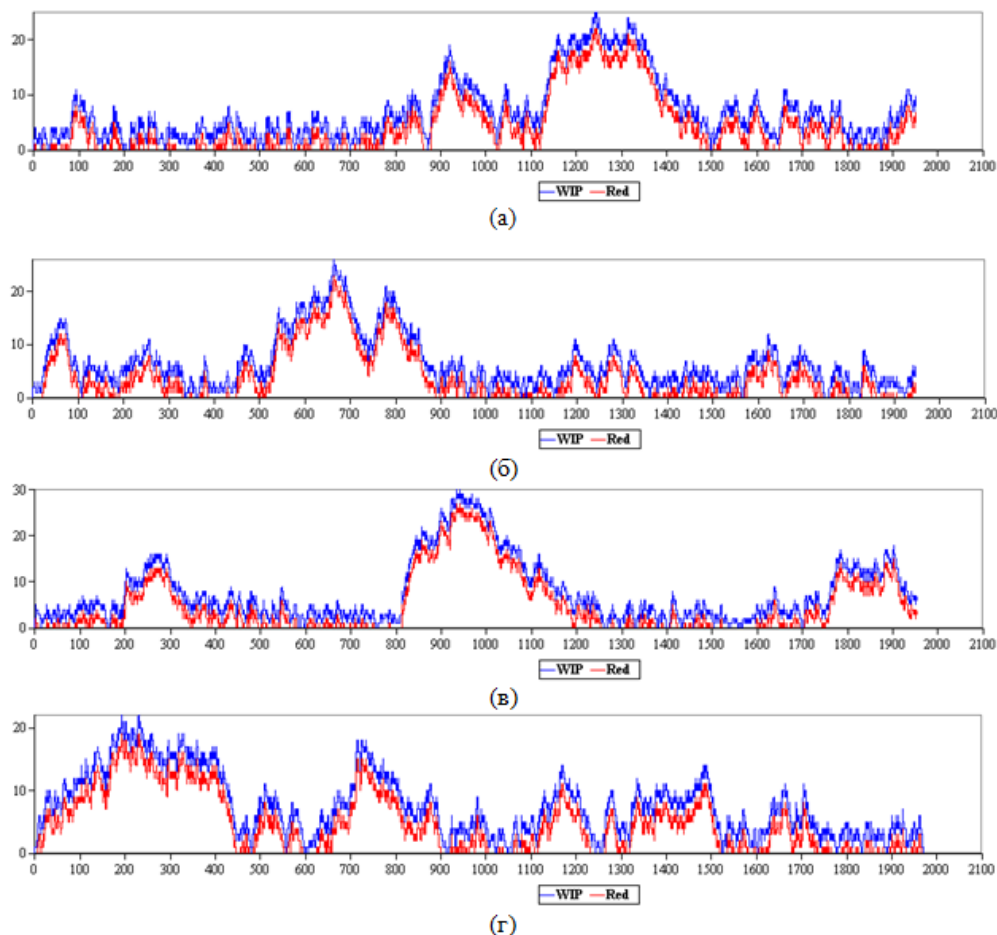
Слика 118. Процес одржавања (модел)



Слика 119. Број средстава (ентитета) у процесу одржавања

На слици 119 је илустрован ток ентитета у модулу *Process* који у овом случају репрезентује радионицу. Важно је имати у виду да број ентитета који су у реду чекања јесте ограничен физичким капацитетом.

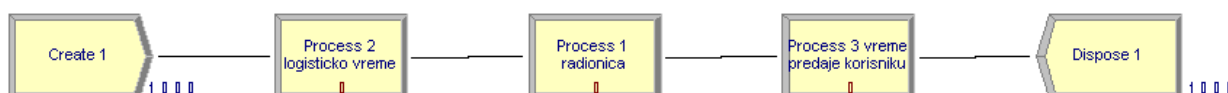
Када се за овакав модел дефинише индикатор успешности „број средстава у радионици“ (укупан број-WIP и број у реду чекања), графички приказ како се одвија процес по времену (хоризонтална оса) је дат на слици 120 (а-г).



Слика 120. Резултати симулације, број средстава у одржавању

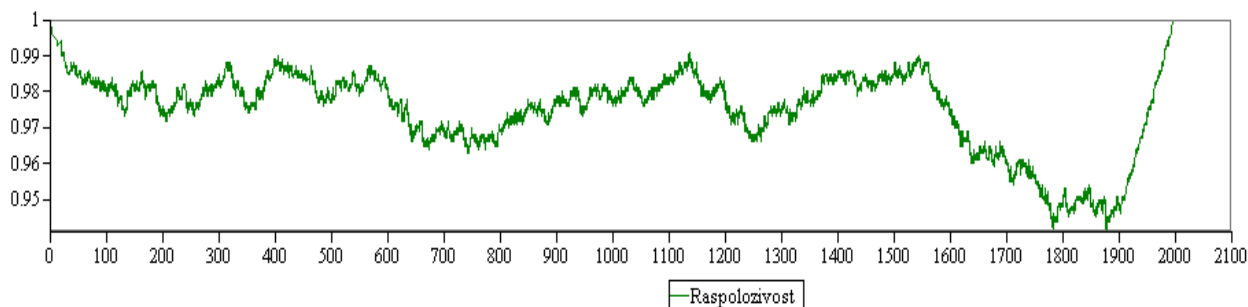
Илустративно је приказан резултат више пута поновљене симулације (4 пута, а-г) ради илустрације и сагледавања значаја понављања већег броја симулација.

Овакав једноставни модел не садржи важне утицајне факторе као што су логистичка времена (допрема средства до радионице, планирање и организација пријема), почетна дефектација и дијагностика, као и време предаје кориснику након поправке. Зато ће ти утицајни фактори бити додати и онда модел изгледа као на слици 121.



Слика 121. Проширење модела „логистичким временима“

Са тако дефинисаним параметрима, одмах се може прорачунати један од најважнијих индикатора успешности, *расположивост*, и вредност је приказана на слици 122.



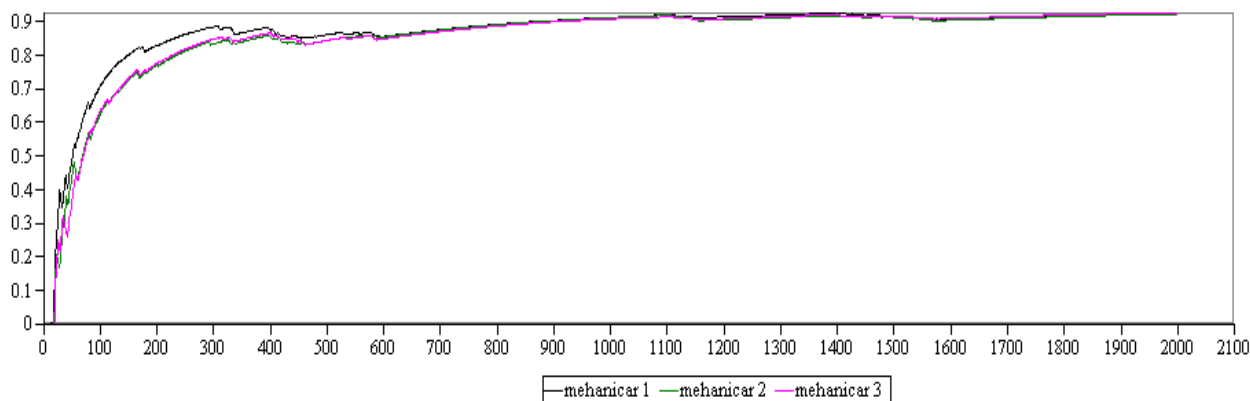
Слика 122. Распољивост опреме (флоте возила)

Распољивост је израчуната по формули:

$$A = \frac{N - M}{N}$$

где су  $A$  располољивост,  $N$  укупан број средстава (возила) на употреби,  $M$  број средстава у одржавању (неисправна средства).

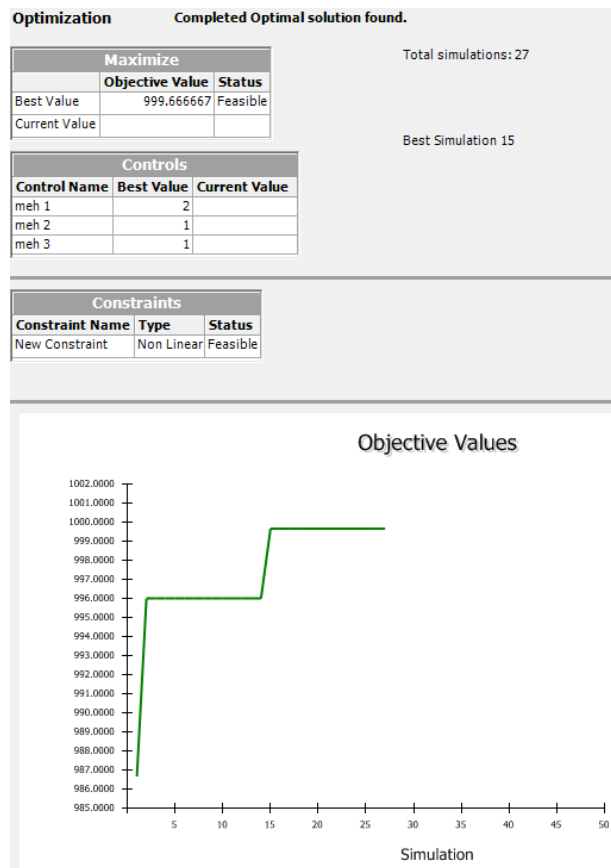
Следећи важан индикатор успешности је искоришћење ресурса-капацитета за одржавање, што је приказано на слици 123, за сваког од три механичара.



Слика 123. Искоришћење ресурса (рад механичара)

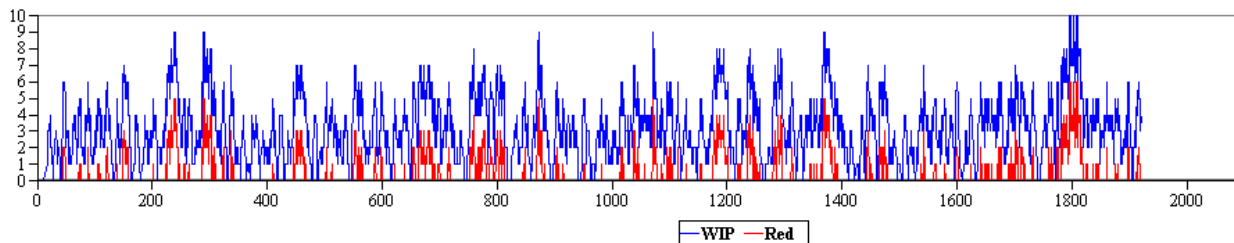
Јасно је да оваква скоро идеална слика није реална у пракси и зато ће касније бити моделована поузданост ресурса, односно њихово реалније понашање.

Одмах се може поставити и питање, колики је потребан број канала за опслуживање а да редови чекања буду минимални, на пример да мање од 10 средстава чека поправку (ограничење) и да буде поправљен максимални број средстава (циљна функција). На слици 124 је приказана оптимизација, тј. резултат оптимизације, из које произилази да је потребан један додатни механичар за постизање тражених циљева.

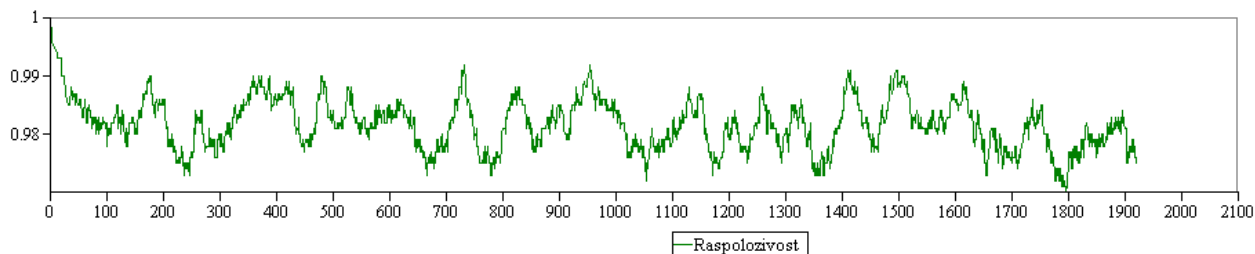


Слика 124. Резултат оптимизације

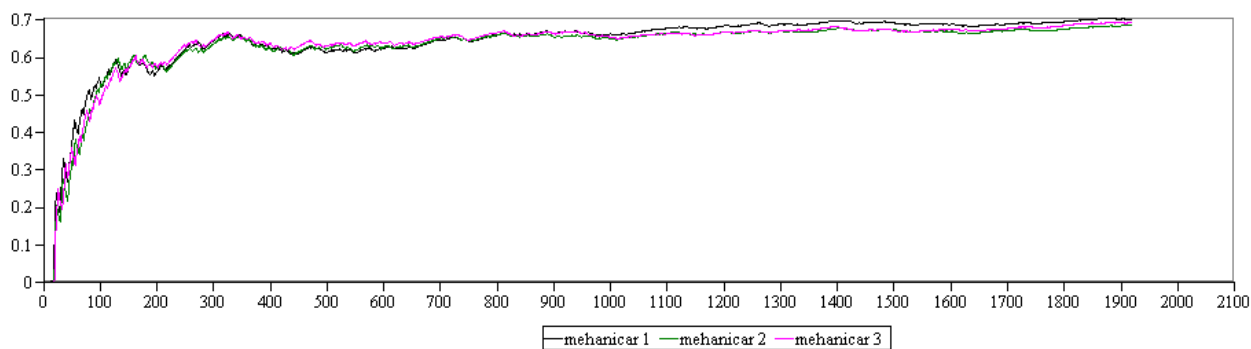
Сада раније дефинисани индикатори успешности изгледају као на сликама 125-127 и могу се упоредити са сликама 120, 122-123.



Слика 125. Број средстава у одржавању (број средстава на чекању не прелази 10)



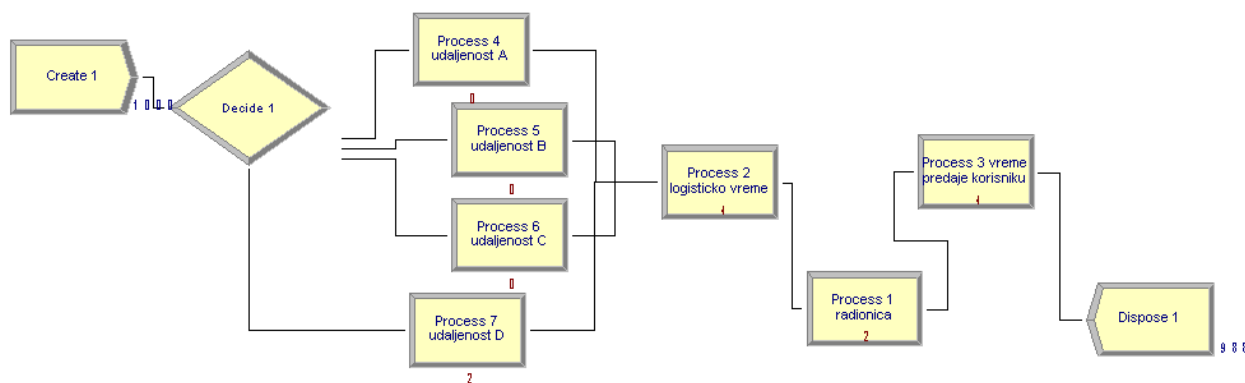
Слика 126. Распоживост опреме (флоте возила)



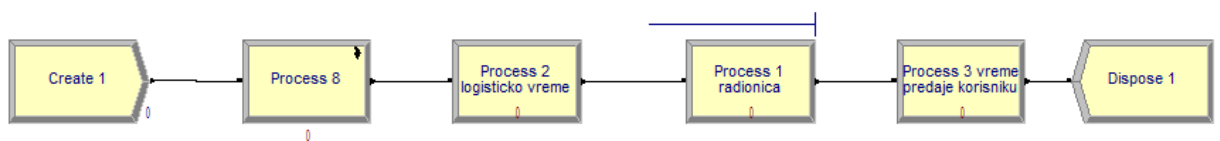
Слика 127. Искоришћење ресурса (рад механичара)

Даљи важан утицајни фактор је растојање или удаљеност самог средства од радионице, тј. ресурса за одржавање. Постоје два начина за превазилажење овог проблема, тј. његово моделовање, први да ресурси „оду“ до средства и други да се рационално моделује време потребно да се неисправно средство „доведе“ до радионице - ресурса. Први начин је неповољнији, јер време „путовања“ ресурса представља својеврстан губитак капацитета.

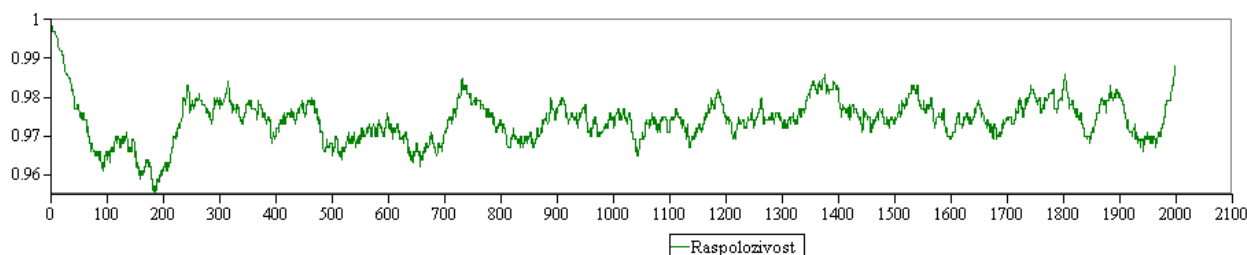
Када се у модел уграде „удаљености“ (слика 128 и 129), индикатори успешности нпр. расположивост опреме, изгледају као на сликама 130-131.



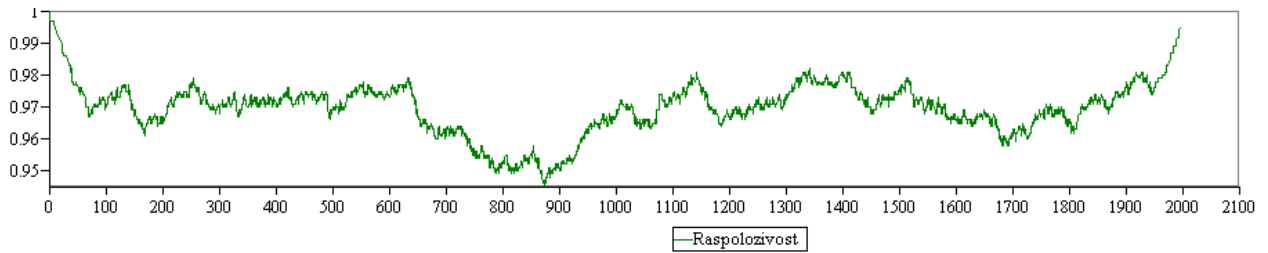
Слика 128. Моделовање географског распореда опреме (модел са уграђеним удаљеностима)



Слика 129. Модел еквивалентан моделу на слици 128

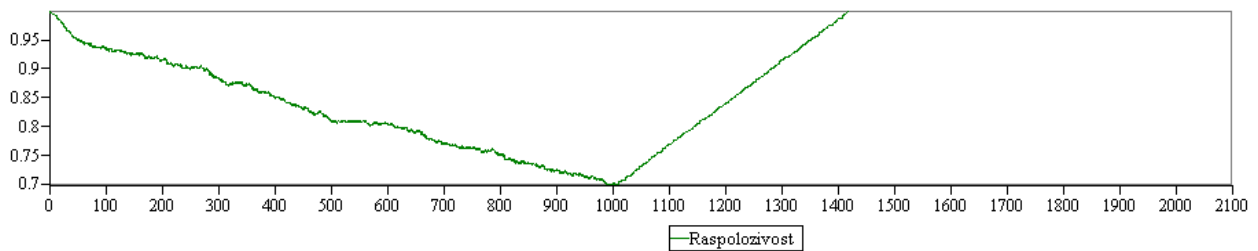


Слика 130. Распољивост, 4 канала за опслуживање



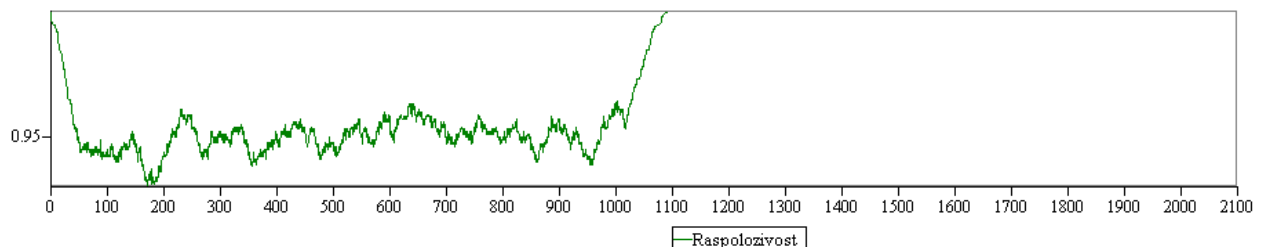
Слика 131. Распољивост, 3 канала за опслуживање

Може се размотрити утицај наглог поремећаја који се огледа у промени интензитета захтева за одржавањем, односно настајање захтева по закону *Random (expo(1))*, 4 механичара - канала за опслуживање, време поправке по закону *Norm (5,5; 0,8)*. Тада је располољивост приказана на слици 132.



Слика 132. Распољивост

За постизање стабилности система одржавања може се спровести поново оптимизација на раније описан начин. Произилази да је потребно 8 механичара да мање од 10 средстава чека поправку (ограничење) и да буде поправљен максимални број средстава (циљна функција), а располољивост опреме је приказана на слици 133.



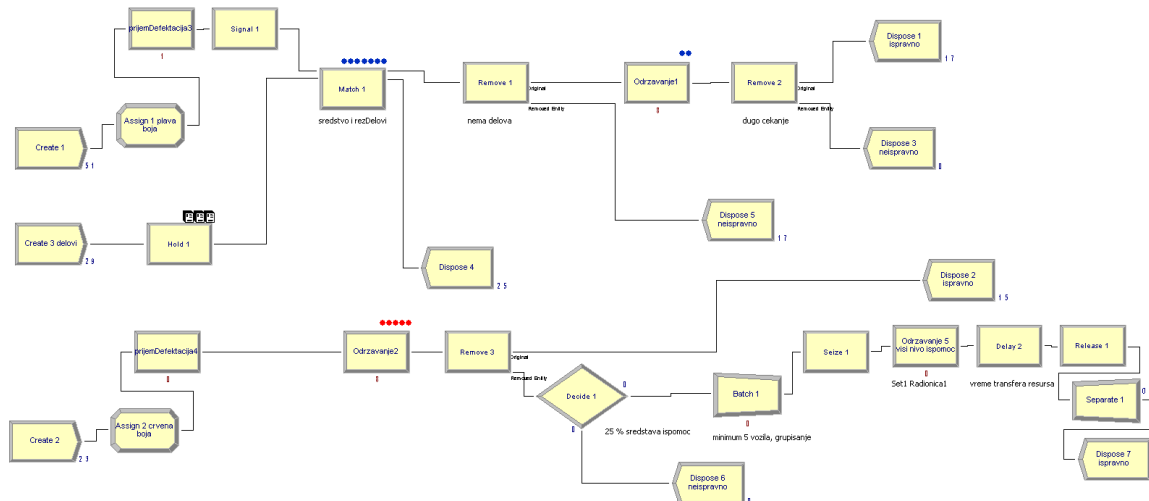
Слика 133. Распољивост

Потребно је још размотрити начин утицаја располољивости резервних делова на успешност одржавања и модалитет пружања испомоћи у одржавању између два „мини система“ одржавања.

Када се појави захтев за одржавањем (појави се ентитет), шаље се сигнал независном систему снабдевања резервним деловима. На више начина се може решити модел обезбеђења резервних делова, од простог дефинисања вероватноће до комплекснијих модела. У овом моделу, листе материјала (енг. *Bill of Materials-BOM*) настају случајно (по дефинисаном закону). Таква листа је различита за свако корективно одржавање једног истог средстава, а може бити приближно иста за свако превентивно одржавање једног истог средства. У виртуалном складишту где су смештене, чека се сигнал који генерише ентитет који „улази“ у одржавање. Када се прими сигнал, један *BOM* одлази у *Match* модул, где се у једном реду налазе ентитети који захтевају одржавање, а у другом *BOM*-и. Тек када истовремено у оба реда постоји најмање по један ентитет, ентитет који захтева одржавање се пропушта у процес - одржавање. Како у стварности увек у реалном времену постоји већи број ентитета у реду ентитета који захтевају одржавање од реда у коме су *BOM*-ови, посебан

оператор премешта „чекајуће“ ентитете из реда ентитета који захтевају одржавање на неко друго место, привремено или стално, када њихов број у реду пређе неку дефинисану вредност. Ово у реалном свету значи да систем одржавања не може одједном да одговори на све захтеве. Премештени ентитети могу касније поново бити помоћу одговарајуће петље враћени у процес одржавања, упућени у виши ниво одржавања или „проглашени“ непоправљивим.

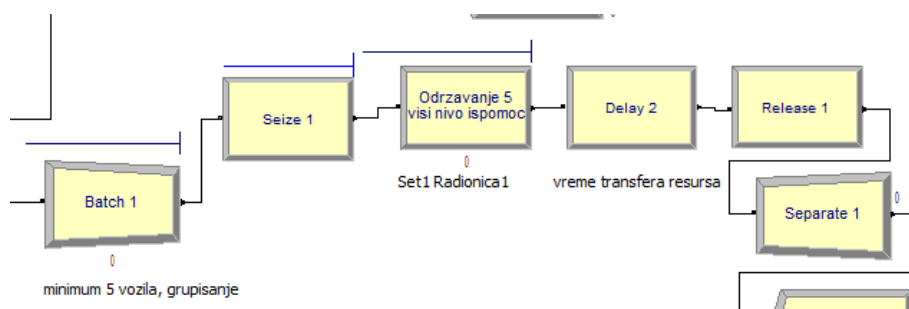
На слици 134, принципијелно је дат модел одржавања који у актуелној концепцији система одржавања представља тактички заокружену целину.



Слика 134. Модел два паралелна, независна система одржавања.

Израз тактички не мора се односити само на војне организације. У стварности он представља релативно аутономни, самоодрживи и независни систем одржавања који опслужује једну формацију/организацију. У правилу се састоји од наменске целине за одржавање која брине о средствима целе формације, а постоје и мање организацијске јединице за одржавање, самосталне, али које се ослањају на претходну. Назовимо већу јединицу за одржавање са 1, а мању са 2 (3,4, итд.).

У правилу, радионица 2 не може да одговори на све захтеве за одржавањем и захтева се испомоћ радионице 1. Испомоћ се моделује на начин да се средства из подсистема 2 једноставно упуте на одржавање у систем 1, или да се ресурси система 1 привремено доделе и физички алоцирају у систем 2 (слика 135).

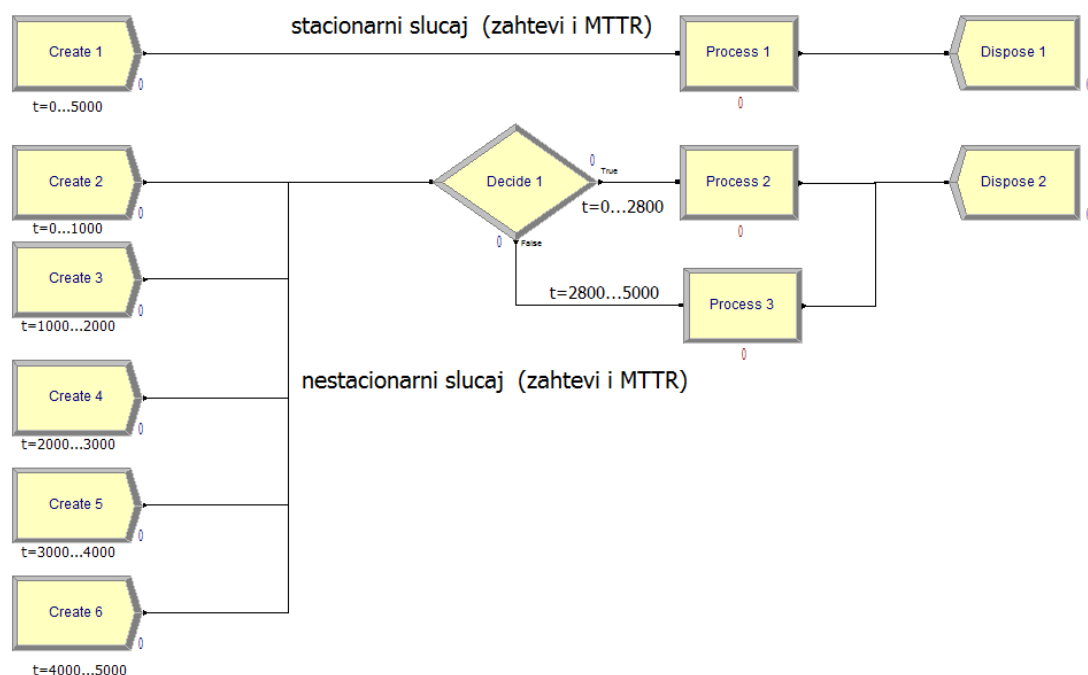


Слика 135. Модули Seize, Release употребљени за релокацију ресурса

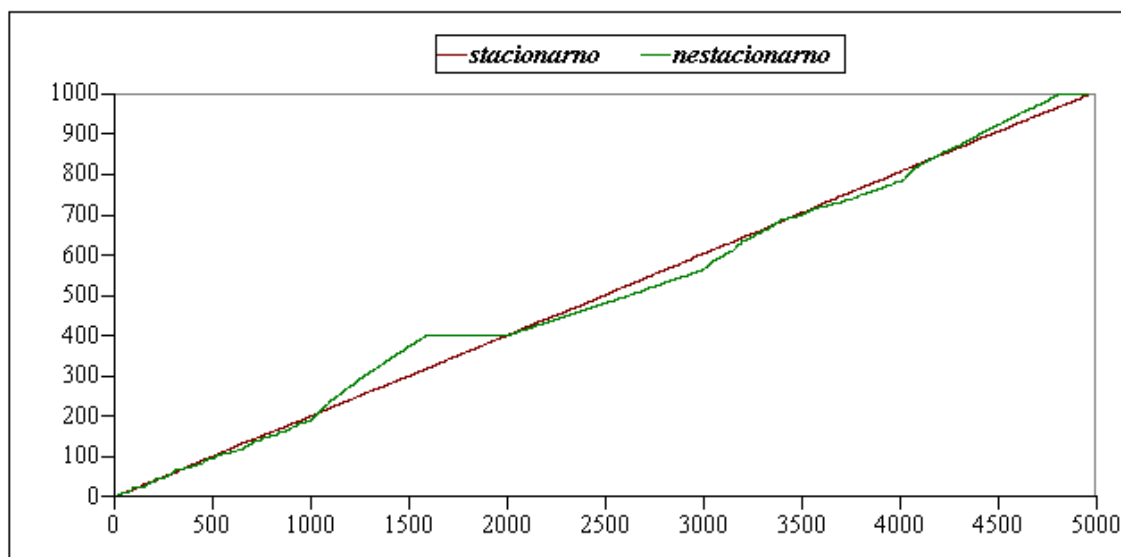
Радионица 1 испомаже радионицу 2. Ресурси радионице 1 се ангажују у „систему 2“ иако он има своју радионицу. Ресурси радионице 1 се ангажују тек када се групише одређени број средстава који систем 2 не може сам да поправи. Величина групе се дефинише према реалном систему и може бити и само 1. Ово је и модел када систем 2 уопште нема

радионицу. Док су ангажовани за потребе система 2, ресурси система 1 нису расположиви за систем 1.

Ако неке појаве у смислу нестационарности (на пример учесталост појава захтева за одржавање или време трајања акције одржавања) не могу да се за неки временски период опишу једним законом, онда се по времену, sukcesивно, одређује потребан број законитости и уграђује у модел што је као модел приказано на слици 136, а на слици 137 је приказан граф који репрезентује број захтева за одржавањем по времену.



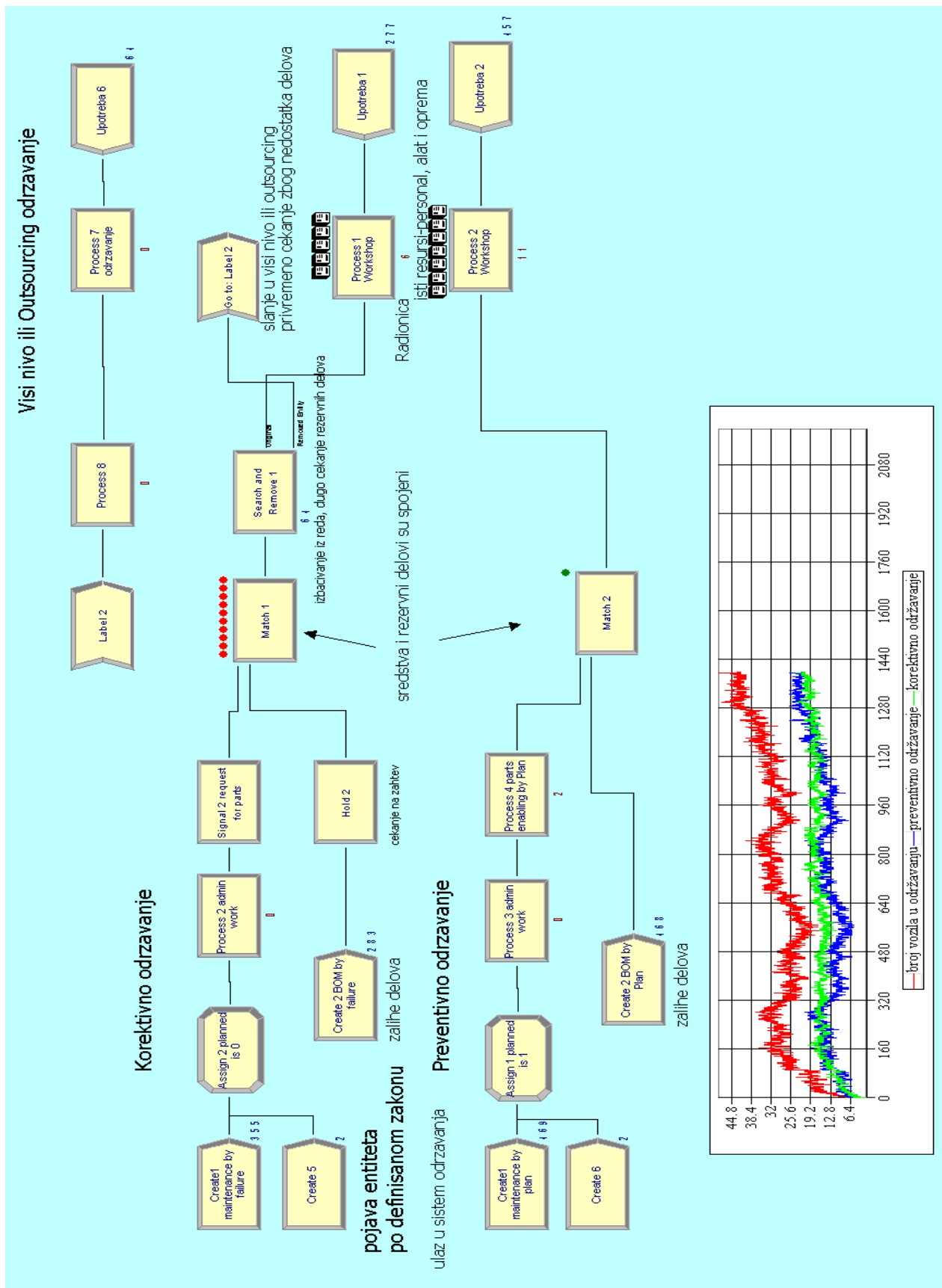
Слика 136. Модел са различитим законима понашања утицајних фактора



Слика 137. Број захтева за одржавањем по времену

На основи изнетог, дефинисан је почетни модел одржавања и приказан на слици 138, који репрезентује „радионицу 1“. Илустровано је и како се одмах приказују вредности индикатора успешности.

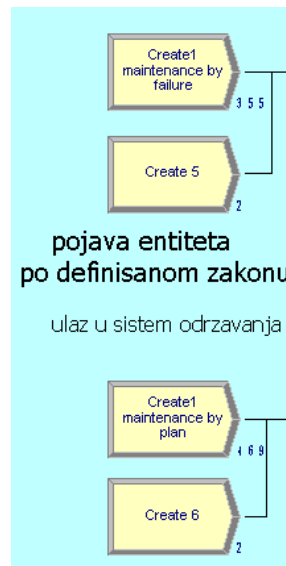




Слика 138. Почетни модел система одржавања

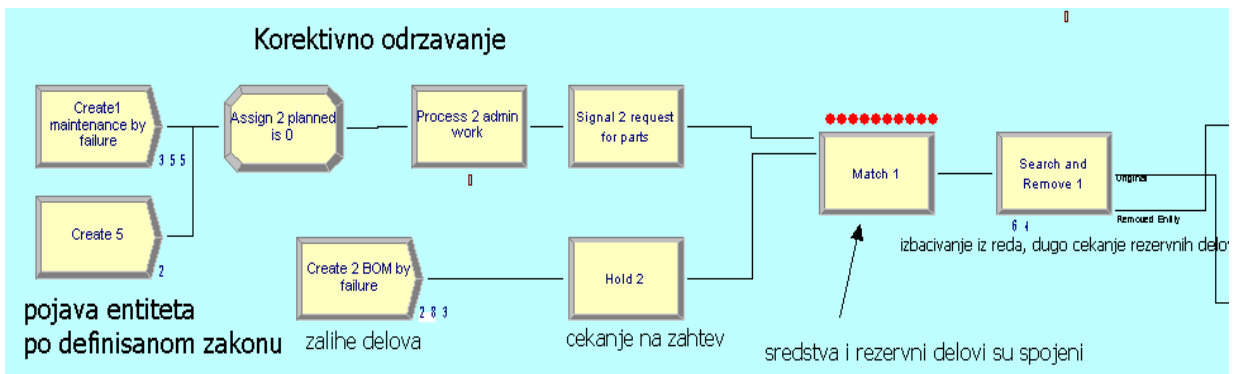
На слици 139 је приказан део модела задужен за креирање ентитета. У моделу постоје два „извора“ ентитета, основни и други који служи за креирање поремећаја који се у правилу огледају у повећању броја захтева за одржавањем. Поремећаји могу бити у секвенцама,

континуални и слично. У пракси та појава представља случај увођења нове опреме, изненадне активности које утичу на пораст интензитета употребе и отказа, промену зоне одговорности (када се нека додатна опрема додели за одржавање, а раније је била у надлежности неке друге јединице за одржавање и др.). Такође, јасно је раздвојено креирање захтева за превентивно и корективно одржавање.

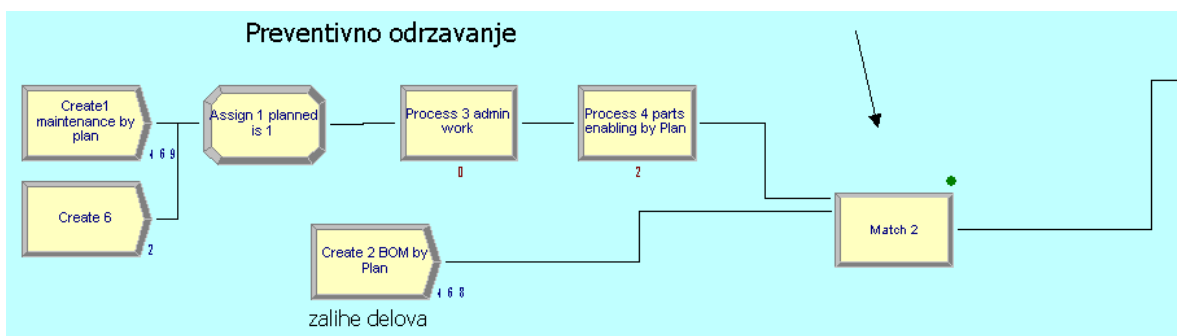


Слика 139. Модули за одређивање настајања захтева за одржавањем

На слици 140-142, наглашен је приказ редова чекања у модулима *Match* где се „упарују“ ентитети, тј. неисправна средства и резервни делови. Ентитетима је придружено својство-слика (обојени круг) ради визуелизације, контроле, валидације и верификације процеса.



Слика 140. Корективни канал одржавања, чекање резервних делова

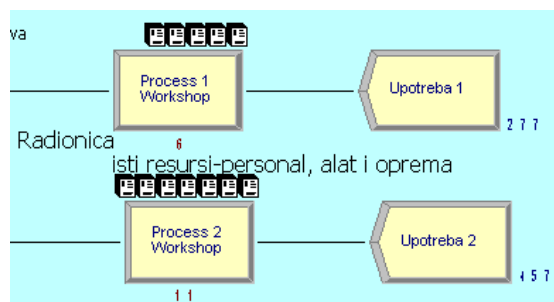


Слика 141. Превентивни канал одржавања, чекање резервних делова



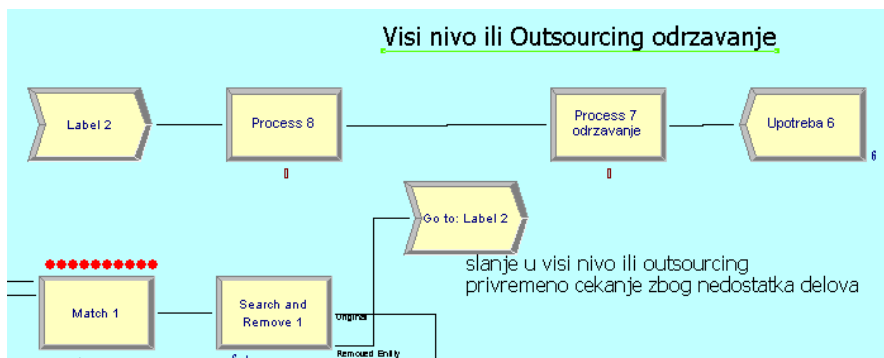
Слика 142. Визуелизација редова чекања у модулу за обезбеђење резервних делова

На слици 143 је приказано, ради визуелизације, стање у редовима чекања у „радионици“ која је описана са два модула *Process*, али је дефинисано да су ресурси исти за оба процеса. У радионици (процес 1 - корективно одржавање, процес 2 - превентивно одржавање) је на располагању 5 канала. Са слике се види да је на корективном одржавању 6 средстава од којих је 5 на чекању и да је на превентивном одржавању 11 средстава од којих је 7 на чекању.



Слика 143. Визуелизација редова чекања у модулу који врши улогу радионице

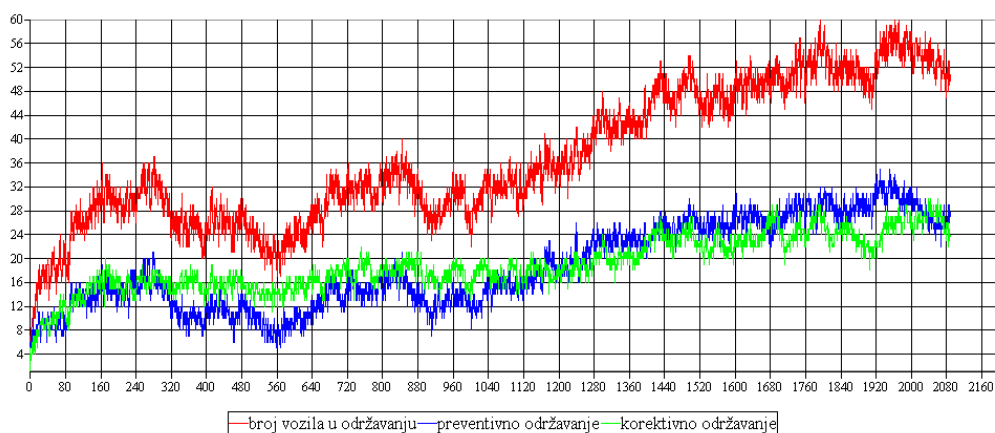
На слици 144 је приказан случај слања неисправног средства у виши ниво одржавања, односно случај да ред чекања за поправку пређе дефинисану границу. Неисправно средство може бити премештено и назад код корисника, означен као неуспешна поправка или стављен „на чекање“ до растеређења „радионице“.



Слика 144. Слање неисправног средства у виши ниво одржавања

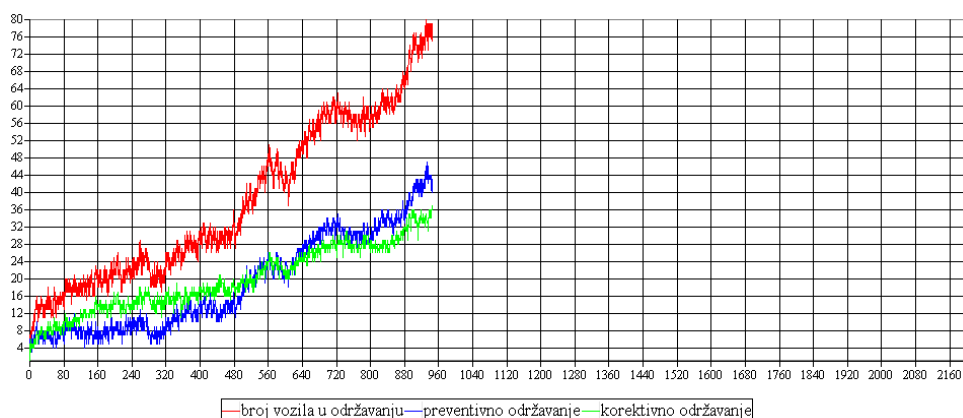
Експериментисање почиње дефинисањем параметара симулације и ради праћења понашања система, одмах се креирају индикатори процеса који динамички приказују изабрана стања у графичкој форми.

Резултат симулације, број возила у одржавању по времену је дат на слици 145. Број радних места је 5.



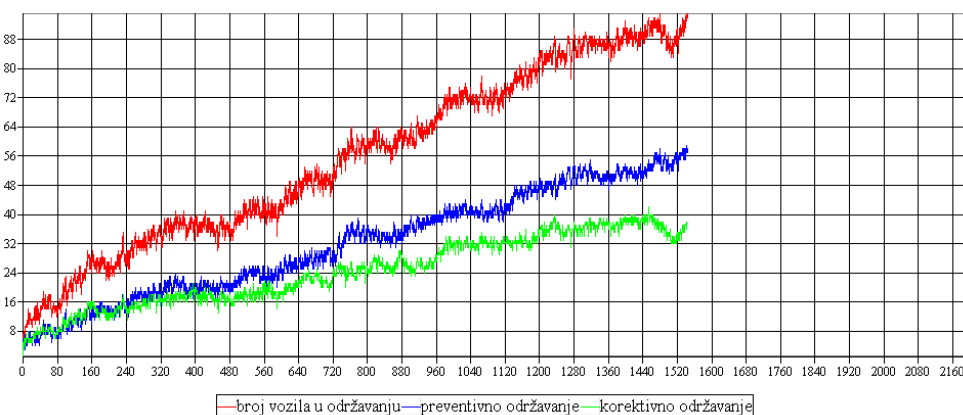
Слика 145. Резултат симулације, број возила у одржавању

Реално је дефинисати и непоузданост ресурса, што у пракси значи да они не проводе пуно радно време на отклањању неисправности. Непоузданост је за илустрацију одређена на начин да на сваких 7 сати рада, 1 сат механичар не врши поправке из било ког разлога (у раду- $\text{exp}(7)$ , није у раду- $\text{exp}(1)$ ), и одмах је видљив пораст броја возила у одржавању односно долази до појаве великих редова чекања. Понашање система је илустровано сликом 146.



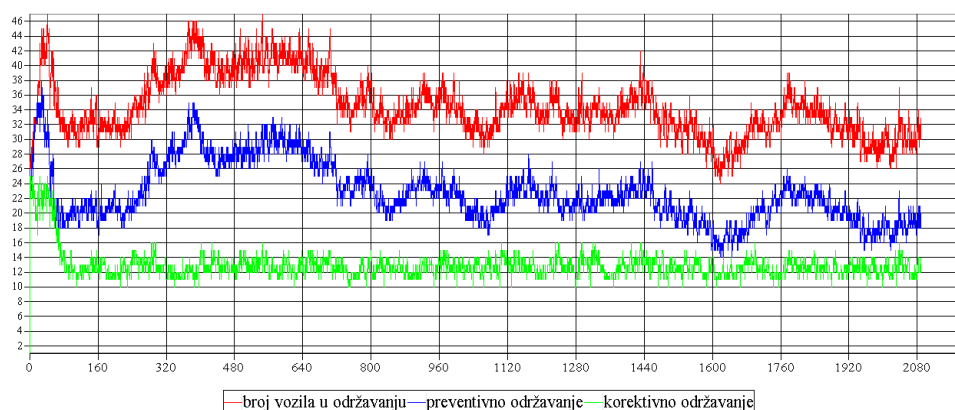
Слика 146. Резултат симулације, број возила у одржавању

Када се угради непоузданост ресурса (у раду -  $\text{norm}(7, 0.5)$ , није у раду -  $\text{norm}(0.5, 0.1)$ ), понашање система је илустровано сликом 147.



Слика 147. Резултат симулације (непоузданост ресурса), број возила у одржавању

Без посебне оптимизације, повећањем броја механичара за 1, систем постаје релативно стабилан, што је илустровано сликом 148.



Слика 148. Резултат симулације, број возила у одржавању, број механичара повећан за 1

Модел се проверава валидацијом и верификацијом. Верификација, већ је речено, представља испитивање да ли је и у којој мери концептуални модел на одговарајући начин представљен рачунарским кодом. Поступак верификације није поступак стандардне процедуре, односно не постоји универзални алгоритам. Зато се врши, и у овом раду је то и примењено, више различитих провера. Провером логичке исправности модел се пропушта на рачунару и пореде се добијени резултати. Појединачним тестирањем сваког модула проверава се да ли дају разумне излазе за све могуће улазе. Провером у односу на позната решења модел се подеси да представља реалан систем чија су решења позната и упоређују се резултати модела. Тестирањем осетљивости варирају се параметри један по један, док остали остају непромењени, проверава се утицај параметра на понашање модела, односно резултата. Тестирањем на поремећаје, параметри модела се постављају на неприродне вредности и проверава се како се понаша модел. Симулациони експеримент се онда користи за сагледавање различитих стања (варирање параметара). Врло брзо може да се дође до закључка о стабилности система. Војни системи, као што је већ речено, су нарочито заинтересовани за степен расположивости опреме и искоришћење капацитета (радне снаге) за одржавање, али су могући тестови и других индикатора успешности система одржавања.

## Оптимизација

Без одговарајућег алата, проналажење оптималног решења за симулациони модел је јако захтевно, јер је потребно задати иницијалне променљиве, пустити симулацију, извршити анализу добијених решења, након тога по некој законитости променити једну или више променљивих, опет пустити симулацију и тако све док се не добију задовољавајући резултати. Из наведеног јасно је да овај процес може трајати јако дуго и да је добијање оптималног решења неизвесно. Попут *Arena*-е, додатак за оптимизацију садржи већина симулационих пакета (Hrčka et al, 2014.; Amaran et al, 2016.; Abdessamad et al, 2016.). Сама природа стохастичких симулација одређује избор оптимизационе технике. Симулација, у форми симулације дискретних догађаја (метода симулационог моделовања система код којих се дискретне промене стања у систему или његовом окружењу догађају дисконтинуално у времену, користи се за анализу динамичких система са стохастичким карактеристикама), може бити описана алгебарски или као модел са улазима и излазима („црна кутија“); може имати један или више излаза: може имати детерминистичке или случајне излазе; може имати дискретне или континуалне параметре, и може имати експлицитна или имплицитна (скривена) ограничења. (Amaran et al, 2016.) упућује на сајт <http://www.orms-today.org/surveys/Simulation/Simulation.html> где се упоредно приказују оптимизациони додаци за симулационе пакете и најважнији примењени алгоритми.

*OptQuest* додаток унапређује могућности програмског пакета *Arena*®, на начин да омогућава тражење оптималног решења модела за симулацију. Симулациони модел је математички описан процес који захтева управљање. Поједини симулациони модели помажу у доношењу одлуке, а основни циљ оптимизације је да се одреде најбоље вредности за променљиве које служе за управљање системом. На пример, оптимизација помаже да одредимо оптималан број људи за извршење неког посла. Једно од ограничења симулационог модела је да модели у основи раде као „црне кутије“ – које само израчунавају модел за управљање који ми одредимо. Тако, користећи симулациони модел за израчунавање перформанси процеса, морају се прво одредити управљачке променљиве, након тога пустити симулација ради процене перформанси одабране конфигурације.

*OptQuest* превазилази наведено ограничење аутоматским трагањем за оптималним решењем у оквиру *Arena* симулационих модела. Довољно је описати оптимизациони проблем и пустити *OptQuest* да пронађе вредности управљачких променљивих који максимизују или минимизују предефинисан циљ. Такође, *OptQuest* је дизајниран да пронађе решење које задовољава широк спектар ограничења која се могу задати. Као најважније, *OptQuest* је алат који од корисника не захтева детаљно познавање алгоритама оптимизације које користи.

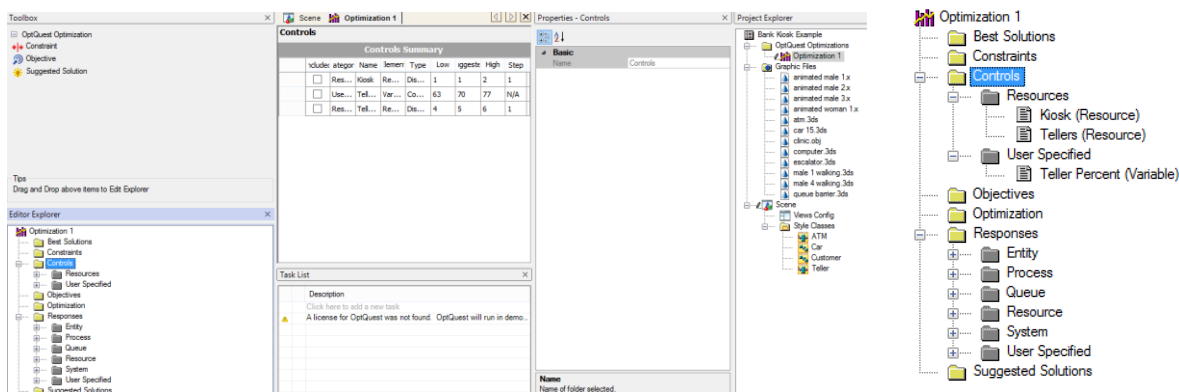
### Шта *OptQuest* ради на *Arena* моделу

Према (Laguna, 2011.) *OptQuest* аутоматизује, или управља, *Arena*-ом постављајући вредности променљивих, покреће и наставља симулацију и бележи резултате. Када се *OptQuest* покрене, изврши се провера модела и учитавају се информације из модела, укључујући и дефинисана управљања и одзиве у своју базу података. Корисник дефинише оптимизациони проблем користећи *OptQuest* кориснички интерфејс. Када се оптимизација покрене, *OptQuest* покреће симулацију коришћењем команде *start-over*. Након тога мења вредности управљачких променљивих за симулациони сценарио. Број репликација (понављања симулација) зависи од дефинисаних параметара у *OptQuest*-у. После сваке репликације *OptQuest* добија од *Arena*-е вредности одзива које се користе у *функцији циља или изразу ограничења*. Ове секвенце се понављају док се не достигне задати број покретања симулација или док корисник сам не заустави оптимизацију.

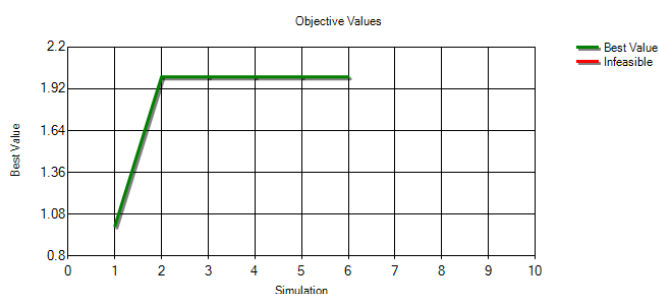
После добијања исхода модела за један дефинисан скуп управљачких променљивих, *OptQuest* користи свој алгоритам за претраживање ради задавања новог скупа управљачких променљивих и понавља симулацију процеса. Ова секвенца се понавља док се не искористи задати број покретања симулација или док корисник не заустави оптимизацију као што је већ речено. Када се изађе из *OptQuest*-а у *Arena*-у, модел задржава оригиналне вредности променљивих које су дефинисане пре оптимизације а производ је приказ варијантних решења, по рангу задовољења циља оптимизације.

Алгоритми које користи *OptQuest* за изналагање оптималног решења су: *Linear programming, Scatter Search, Tabu Search, Neural Networks*. Као допуна се користе и *Genetic Algorithms, Particle Swarm Optimization, Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation* и др.

*OptQuest* је оптимизациони алат уграђен у водеће програме за моделовање и симулације као што су *Arena, Promodel, Simul8, Simio, Crystal Ball*, и др. Кориснички мени и графички ток оптимизације су приказани на сликама 149-150.



Слика 149. Кориснички мени OptQuest-a



Слика 150. Графички ток оптимизације

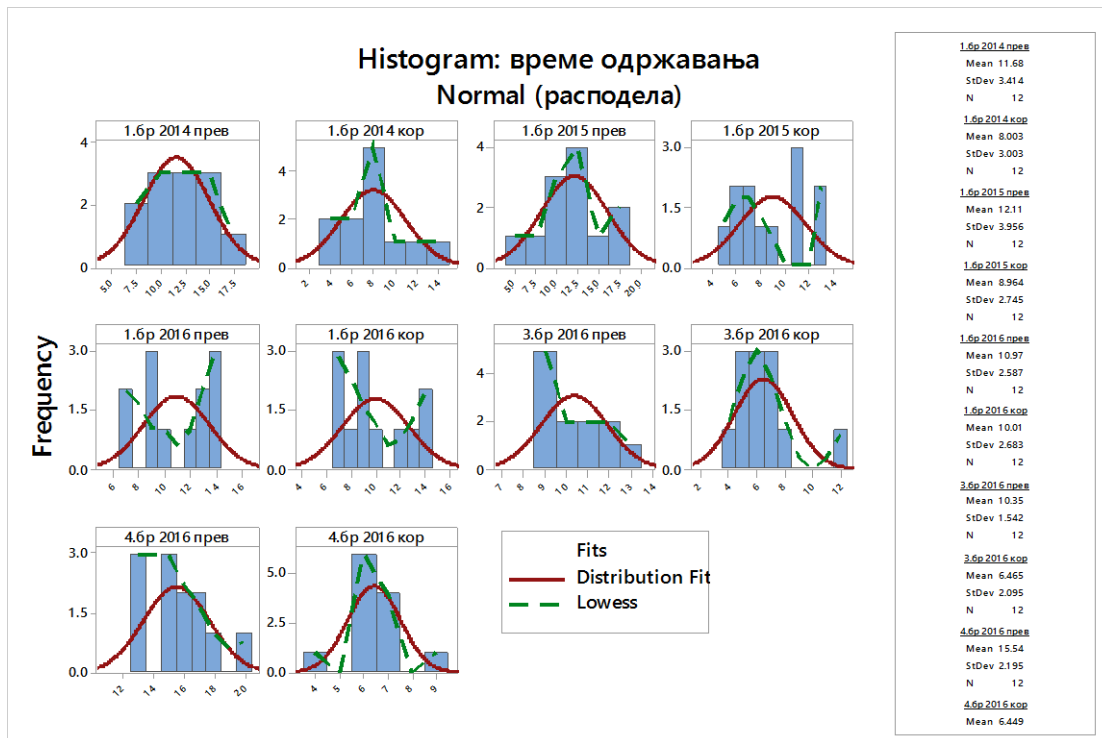
## 8.5.2. Стварни параметри модела

У табели 18 је дат преглед средњег времена одржавања MTTR у радионици за три јединице ранга бригаде, по месецима (1-12) једне године, за 3 године, за теренска возила, на основу записа из система одржавања.

Табела 18. MTTR у радионици

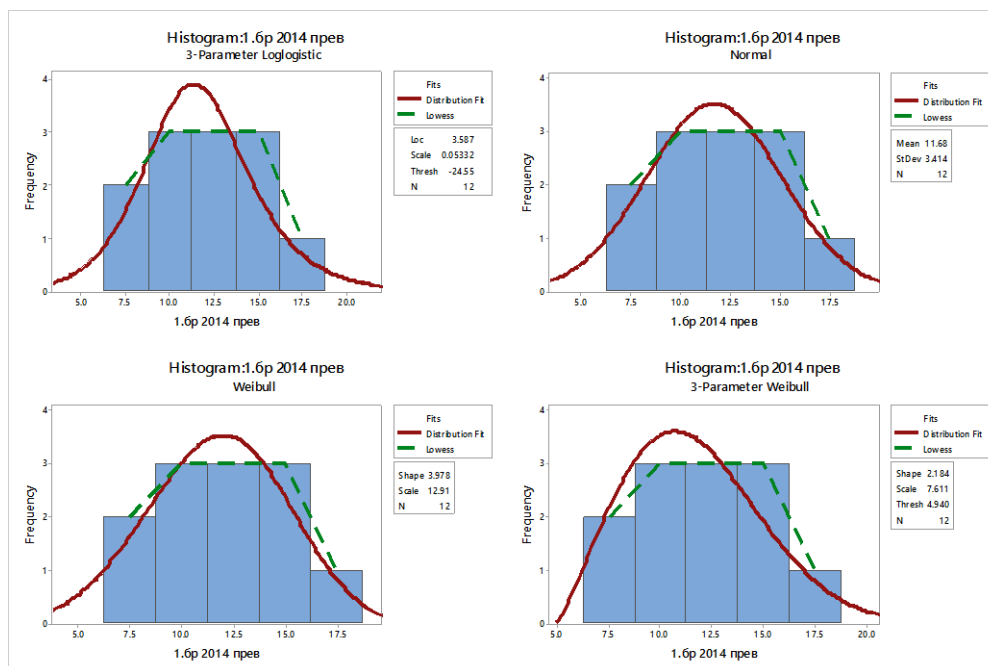
1.бр 2014 прев одр	1.бр 2014 кор одр	1.бр 2015 прев одр	1.бр 2015 кор одр	1.бр 2016 прев одр	1.бр 2016 кор одр	3.бр 2016 прев одр	3.бр 2016 кор одр	4.бр 2016 прев одр	4.бр 2016 кор одр
11.36	9.39	13.67	10.92	7.33	7.07	10.89	7.69	17.37	6.34
8.86	7.25	9.92	8.54	10.46	7.46	10.40	12.16	16.40	6.80
2.65	8.69	13.04	7.30	13.50	13.68	9.48	6.58	15.09	6.73
6.49	7.29	11.87	5.13	14.04	14.44	12.39	7.24	15.01	9.15
11.63	8.92	12.73	6.30	13.84	12.09	8.66	5.08	14.60	6.49
17.79	4.32	15.27	12.89	9.47	9.03	9.26	5.72	19.87	5.86
14.57	5.42	46.29	11.18	11.60	9.52	9.04	4.66	16.65	6.76
13.93	14.12	9.63	8.41	6.75	8.05	9.51	4.14	12.75	6.00
15.66	12.33	9.27	10.95	13.27	7.21	10.91	4.89	12.70	6.12
12.41	8.05	6.16	7.20	9.14	8.99	11.98	6.31	15.70	5.95
9.95	6.14	7.04	5.74	9.25	13.47	13.20	6.48	17.53	6.82
10.55	4.13	18.71	30.71	12.97	9.15	8.50	6.63	12.77	4.36

На основу података може се одредити са одређеним поверењем законитост времена одржавања за свако појединачно средство које „уђе“ у систем одржавања и то је приказано на слици 151.



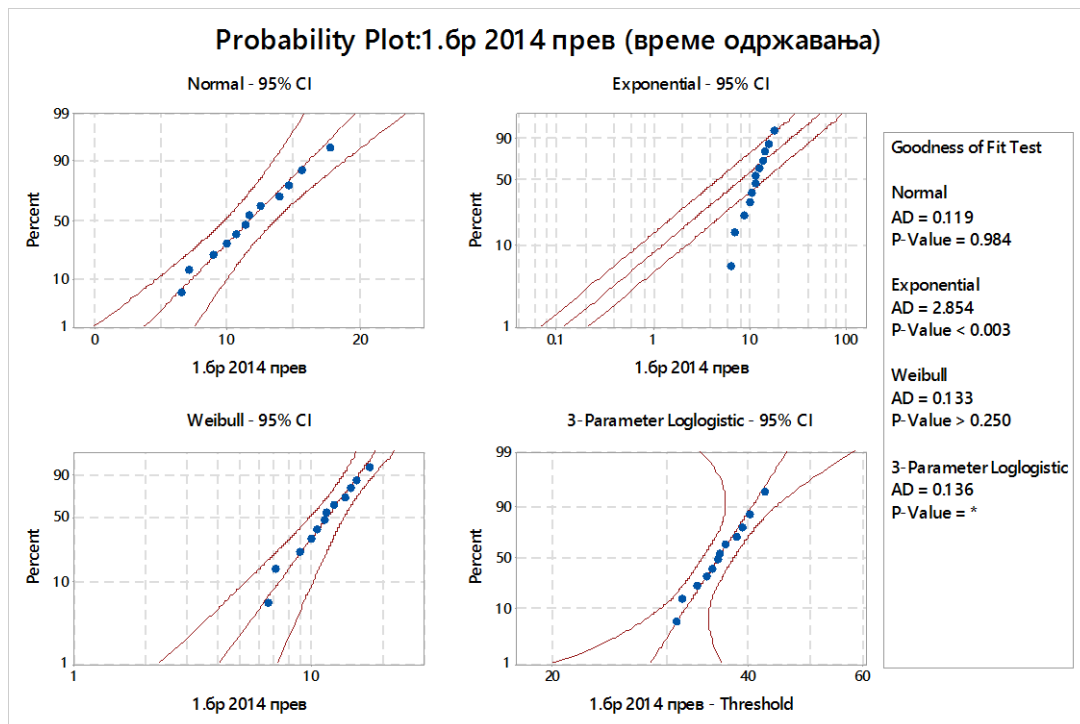
Слика 151. Одређивање теоријске расподеле за времена одржавања MTTR за возила, из табеле 18

Изабере ли се једна законитост (односно то се може радити за сваку), може се проверити која теоретска расподела је најбоље описује, што је илустровано сликама 152-153.



Слика 152. Одређивање „најбоље“ теоријске расподеле, упоређивање





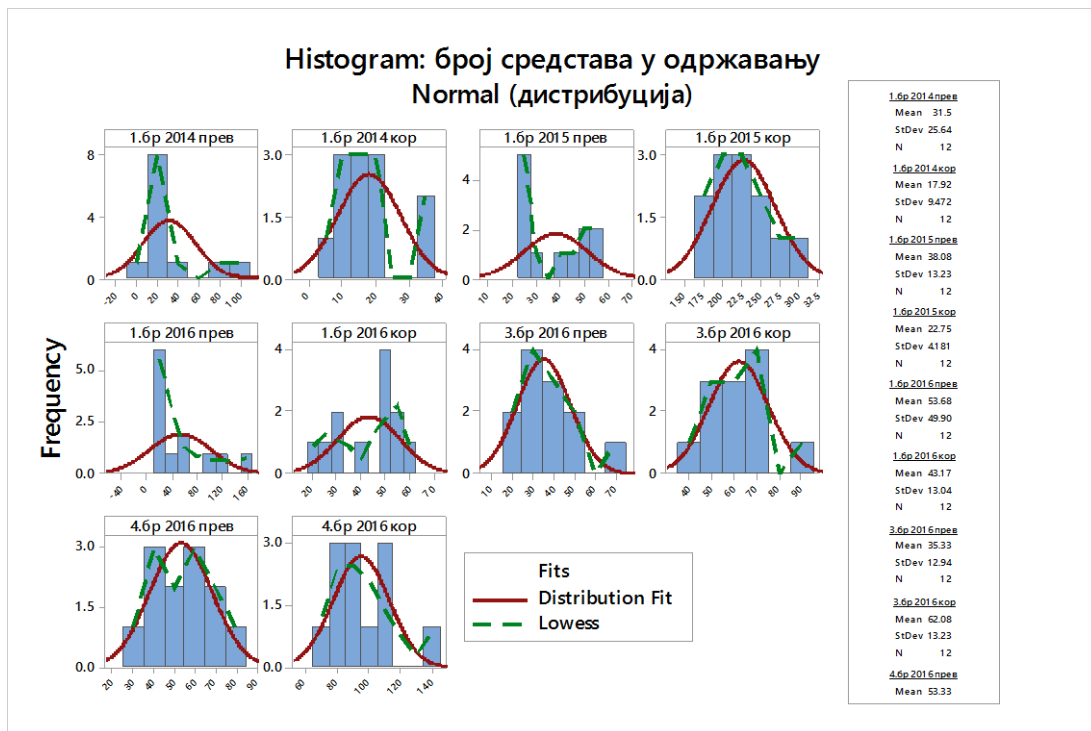
Слика 153. Одређивање најбоље теоријске расподеле, упоређивање степена доброте

У табели 19 је дат преглед броја возила подвргнутих одржавању за три јединице ранга бригаде, по месецима (1-12) једне године, за 3 године, за теренска возила, на основу записа из система одржавања.

Табела 19. Број возила у одржавању, по месецима у години

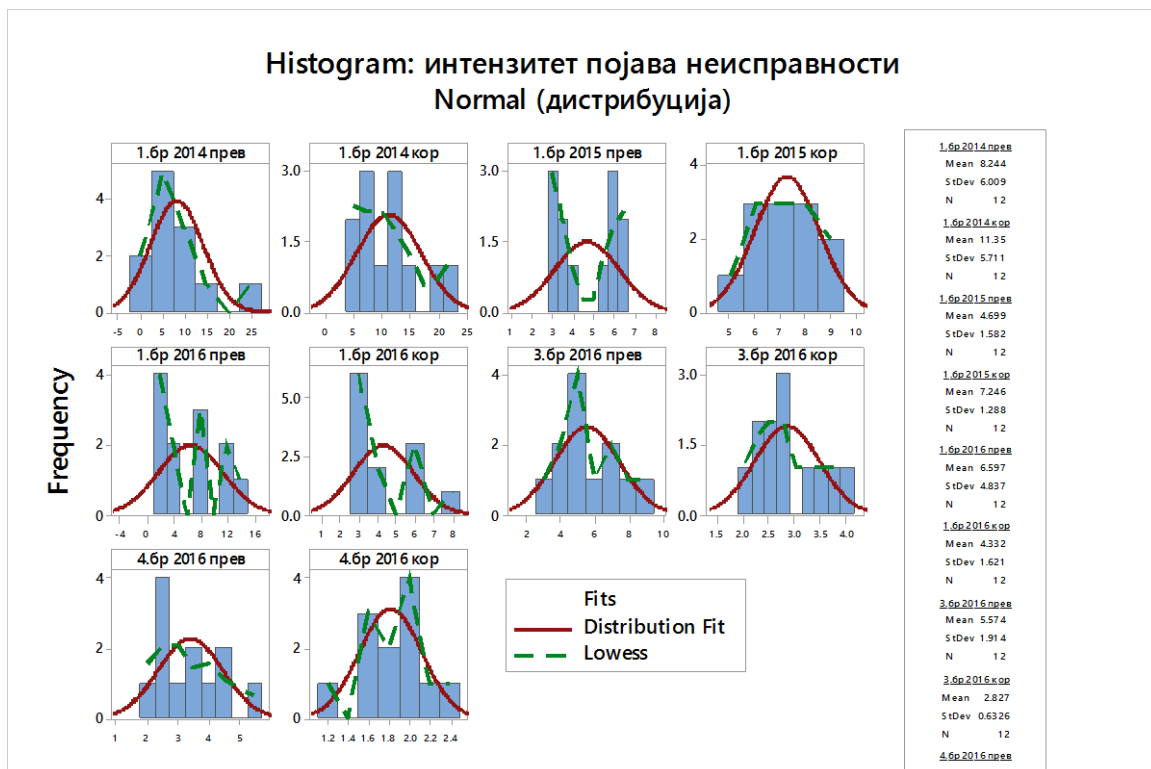
1.бр 2014 прев одр	1.бр 2014 кор одр	1.бр 2015 прев одр	1.бр 2015 кор одр	1.бр 2016 прев одр	1.бр 2016 кор одр	3.бр 2016 прев одр	3.бр 2016 кор одр	4.бр 2016 прев одр	4.бр 2016 кор одр
28	22	29	26	12	28	22	49	31	105
7	14	26	23	13	27	39	62	36	84
93	13	42	20	19	53	25	70	69	112
73	7	49	19	14	52	36	63	81	86
26	36	26	23	19	59	34	42	62	79
19	17	24	18	55	51	19	52	58	73
27	12	50	17	41	22	25	45	43	85
14	21	47	22	67	29	36	72	48	136
29	35	56	21	120	52	46	88	62	110
32	19	25	25	161	48	66	72	48	83
10	11	57	31	104	42	45	63	36	90
20	8	26	28	19	55	31	67	66	98

На основу података може се одредити са одређеним поверењем законитост броја захтева за одржавањем, за свако појединачно средство које „уђе“ у систем одржавања и то је приказано на слици 154.



Слика 154. Одређивање теоријске расподеле за број возила у одржавању из табеле 19

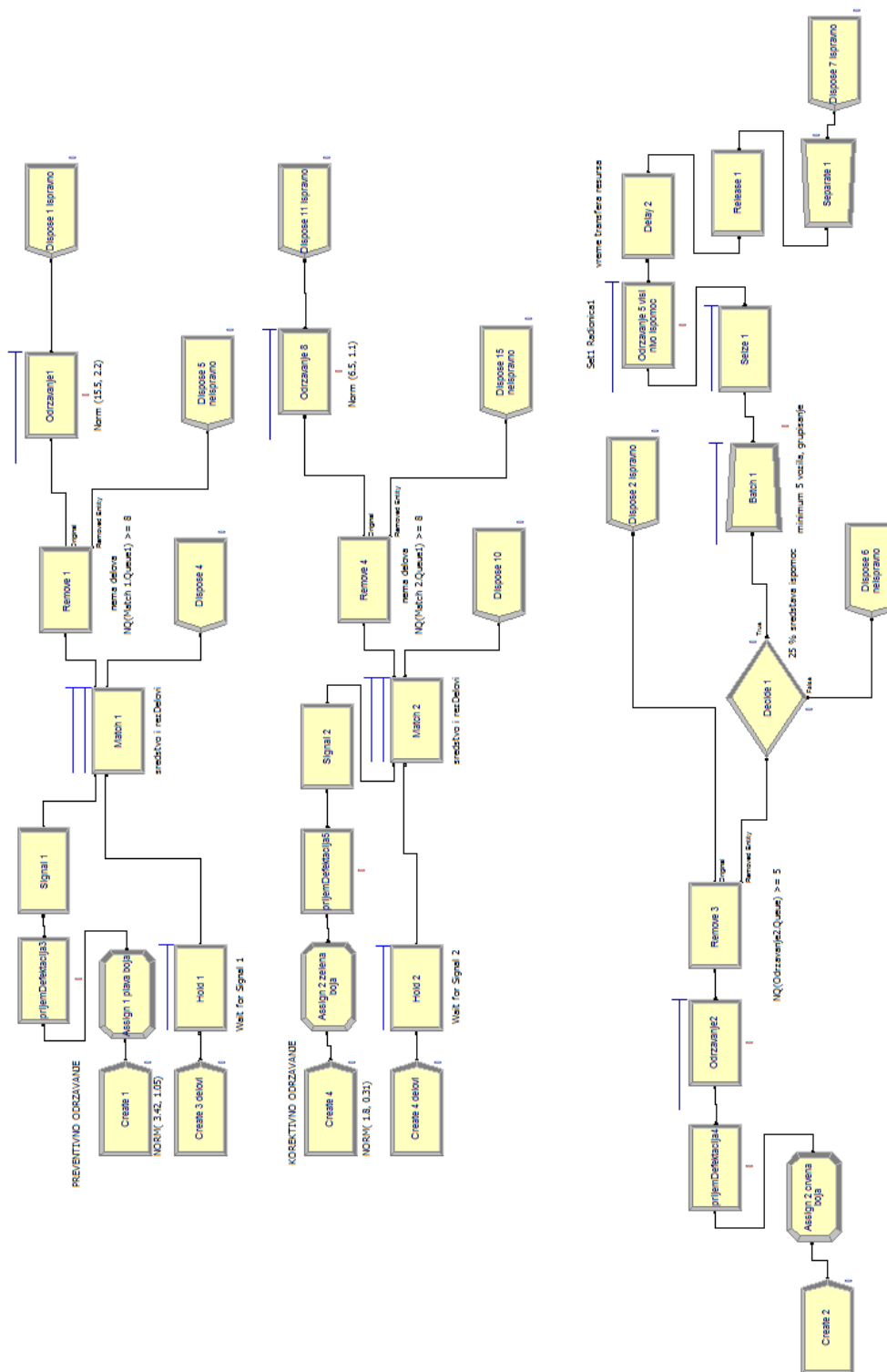
Интензитет или учесталост појава неисправности, што је аналогно броју захтева за одржавањем (и превентивно одржавање се узима у обзир) се добије дељењем броја захтева за одржавањем у месецу са бројем радних дана, тј. часова у месецу. Сматра се да се појављује једно по једно возило, али није искључено да се јави и група одједном, али је општи модел да се јавља једна по једна неисправност. Резултат је дат на слици 155 (возила).



Слика 155. Интензитет појава неисправности

### 8.5.3. Модел реалног система

Поједностављени модел, са идеалним задовољавањем захтева за резервним деловима, без времена трансфера од места појаве неисправности до радионице, ресурси са идеалним искоришћењем (поузданост максимална) је приказан на слици 156.

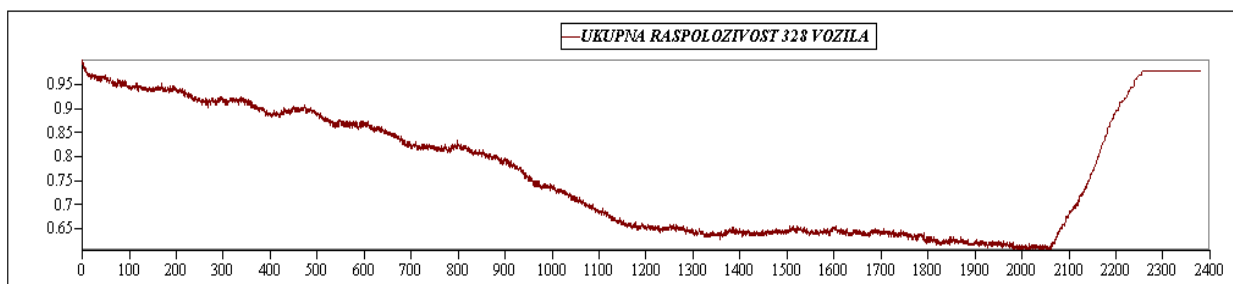


Слика 156. Модел одржавања са стварним параметрима

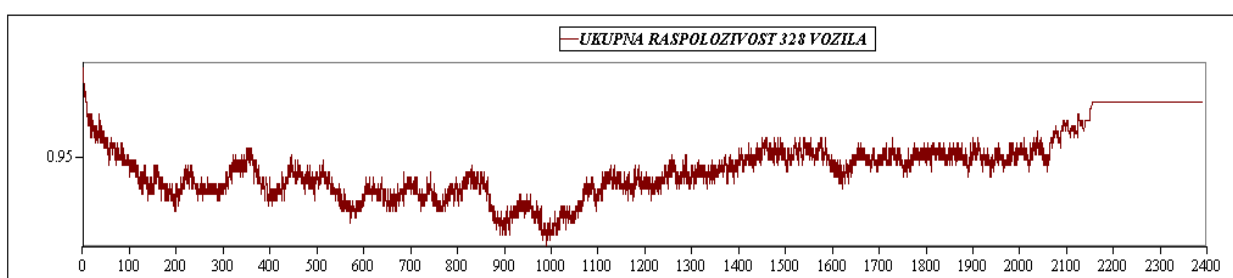
Наиме, до сада обрађени подаци и калкулације се базирају на успешно обављеним акцијама одржавања, па би такво резонување било исправно, али модел не би могао да одговори на

важна питања као што су поремећаји, предвиђање будућег стања са промењеним интензитетом захтева за одржавањем, итд.

Као такав, може да послужи за ограничене компаративне анализе као што су утицај броја механичара на расположивост опреме, уз задовољавање свих наведених претпоставки.



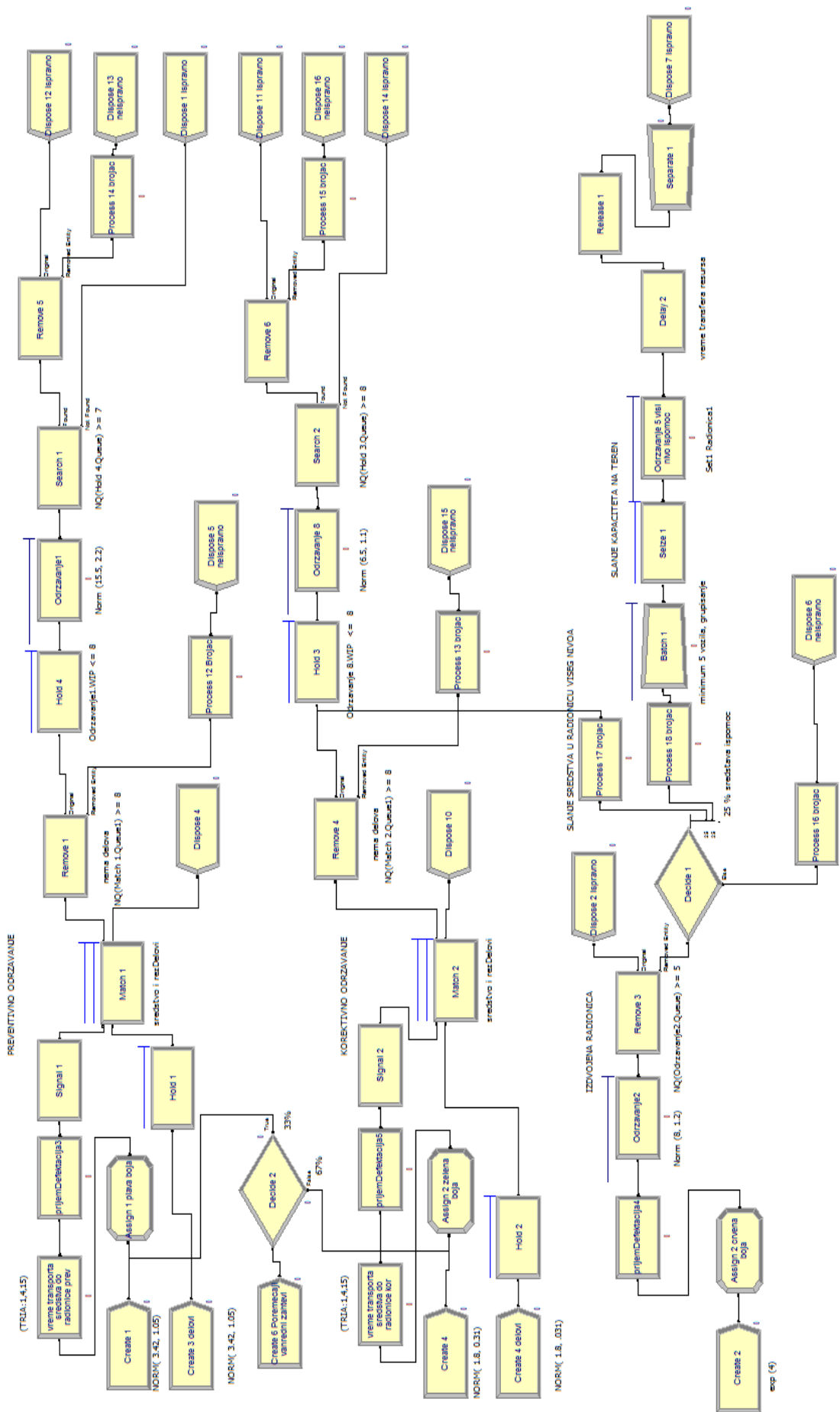
Слика 157. Распољивост, укупна, 8 механичара



Слика 158. Распољивост, укупна, 9 механичара

На сликама 157-158 је дат преглед расположивости флоте возила, зависно од броја механичара у радионици.

Зато је модел проширен до нивоа који узима у обзир све утицајне факторе на систем одржавања. Зависно од потреба, модули модела се подешавају у складу са потребама (нпр. време транспорта средства до радионице може бити 0, процењено време или стварно време према некој дефинисаној законитости). Потпун и коначан модел је приказан на слици 159.



Слика 159. Потпуни модел одржавања

## План експеримента

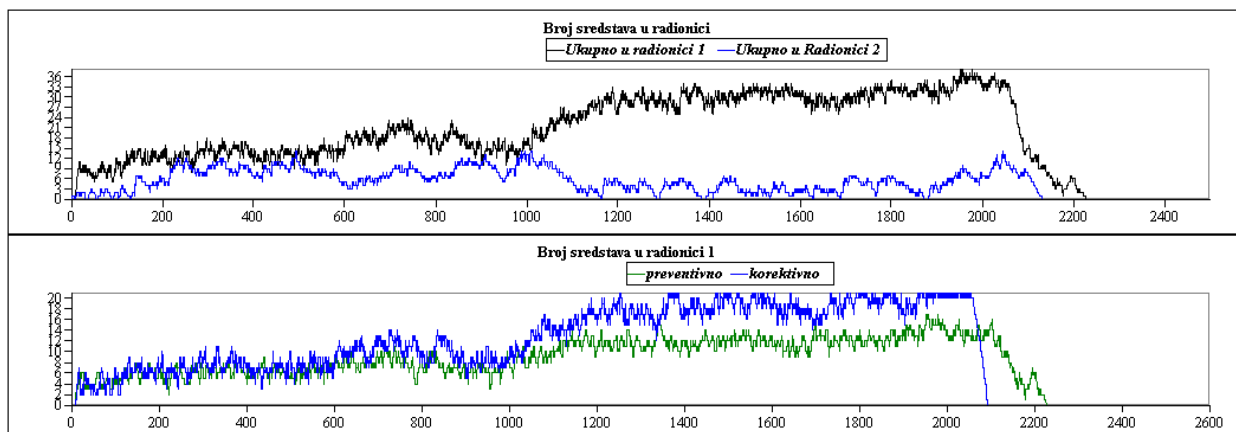
План експеримента, слика 160, служи за контролу тока самог експеримента, односно садржи варијанте мењања варијабли или параметара које се пропуштају кроз модел. Утицај једне варијабле може бити толико значајан, тако да када не би постојао план у коме су унапред јасно предвиђене варијанте или вредности варијабли које користи модел, истраживање и експеримент не би могао бити поновљен под истим условима, односно истраживач не би имао пуну контролу над процесом. Истовремено је погодно варирати 1-2 варијабле из разлога да би могао да се што боље сагледа утицај сваке од њих понаособ. Осим наведеног, овакав поступак је изабран из разлога што уз ограничени број варијанти, може да укаже у ком смеру треба да иде оптимизација, јер иако је оптимизацију теоретски могуће спровести по више критеријума, реално је могуће оптимизовати само неке параметре (на пример нема смисла оптимизовати број захтева за одржавањем). Детаљно се анализира *радионица 1*, док је *радионица 2* помоћни капацитет лоциран код корисника али је моделовано да може да утиче (што у пракси јесте појава) на радионицу 2 захтевима на које она не може да одговори. Приказују се резултати у облику графика одређених индикатора успешности.

У складу са основним опредељењем, односно најважнијим индикаторима, приказују се респективно, број средстава „у радионици“, вредност расположивости опреме и искоришћење ресурса. Временска база на хоризонталној оси (часови) репрезентује период од једне године односно број радних дана помножено са 8 часова. Нису укључени нерадни дани. На свим графиконима, јасно се види период загревања (*Warm-up*) и период растерећења модела (када захтеви за одржавање престану да стижу, а модел обрађује захтеве (ентитете) који су већ пристигли. Зато граничне вредности (почетак и крај) које се калкулишу преко једначина треба оцењивати са разумевањем, односно суштински значај за вредновање успешности одржавања имају вредности између.

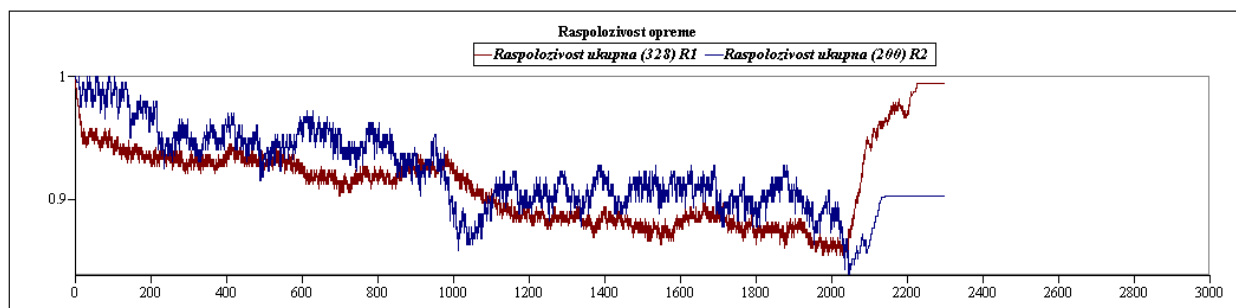
варијанта	захтеви за одрж. прев. Радоница 1	захтеви за одрж. кор. Радоница 1	захтеви за одрж. Радоница 2	обезбеђење рез. дел. прев. одр.	обезбеђење рез. дел. кор. одр.	критеријум уласка у радоницу 1 прев. одр.	критеријум уласка у радоницу 1 кор. одр.	Радоница 1 ресурси	Радоница 2 ресурси	Радоница 1 превентивно одрж.	Радоница 1 корективно одрж.	Радоница 2 одржавање	време транспорта средства за Рад
1	потп(3,42, 1,05) max 640 ком.	потп(1,8, 0,31) max 140 ком.	exp(4) max 505 ком.	0,99	0,99	WIP <= 20	WIP <= 20	8 расположивост 1	2 расположивост 1	потп(15,5, 2,2)	потп(6,5, 1,1)	потп(8, 1,2)	tra (1,4,15)
1.1													tra (2,8,30)
1.2								8 расположивост 4 механичара (4-2-4)	2 расположивост 1				
1.3				0,99									
1.4				0,6	0,6								
1.5						WIP <= 8	WIP <= 8						
1.6										потп(10,5, 1,2)			
2	потп(3,42, 1,05) max 640 ком.	потп(1,8, 0,31) max 140 ком.	exp(4) max 505 ком.	0,99	0,99	WIP <= 20	WIP <= 20	9 расположивост 1	3 расположивост 1	потп(15,5, 2,2)	потп(6,5, 1,1)	потп(8, 1,2)	tra (1,4,15)
2.1													tra (2,8,30)
2.2								9 расположивост 9 механичара (4-2-4)	3 расположивост 1 механичара (4-2-4)				
2.3				0,99	0,6								
2.4				0,6	0,6								
2.5						WIP <= 8	WIP <= 8						
2.6										потп(10,5, 1,2)			
3	потп(3,42, 1,05) max 640 ком.	потп(1,8, 0,31) max 140 ком.	exp(4) max 505 ком.	0,99	0,99	WIP <= 8	WIP <= 8	9 расположивост 1	3 расположивост 1	потп(15,5, 2,2)	потп(6,5, 1,1)	потп(8, 1,2)	tra (1,4,15)
3.1													tra (2,8,30)
3.2								9 расположивост 9 механичара (4-2-4)	3 расположивост 1 механичара (4-2-4)				
3.3				0,99	0,6								
3.4				0,6	0,6								
3.5						WIP <= 10	WIP <= 10						
3.6										потп(10,5, 1,2)			
4	<b>ОПТИМИЗАЦИЈА</b>												
4.1						ред. чекана <= 5,	ред. чекана <= 5,	варијабла која се оптимизује	варијабла која се оптимизује				
4.2						максимално ремонтних средства број средстава у радоници, превентивно и корективно одржавање <= 15,	максимално ремонтних средстава број средстава у радоници, превентивно и корективно одржавање <= 15,	варијабла која се оптимизује	варијабла која се оптимизује				
5	<b>ВАЛДАЦИЈА</b>												
5.1	Употреби модел (базиран на историји система и познати законитости) са узданим подацима (захтеви за одржавање) као у 2017. години и оценили употребљивост модела												
5.2	мултиплицирати модел за случај 4 организационе јединице (бригаде) и оценили успешност												

Слика 160. План експеримента

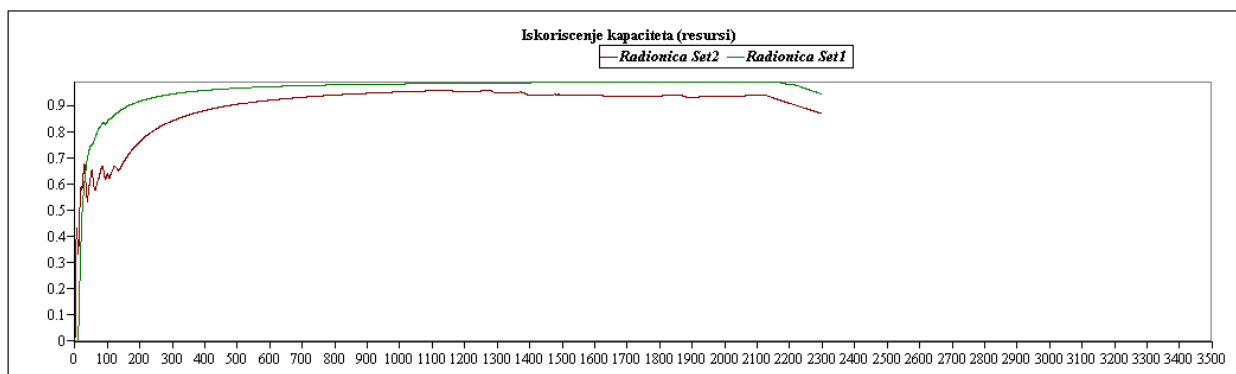
Варијанта 1 подразумева модел у коме су параметри једне организационе јединице одржавања, бригадног нивоа, за 2016. годину. Резултати симулације су дати на слици 161 (а-в).



Слика 161а. Број средстава у радионици



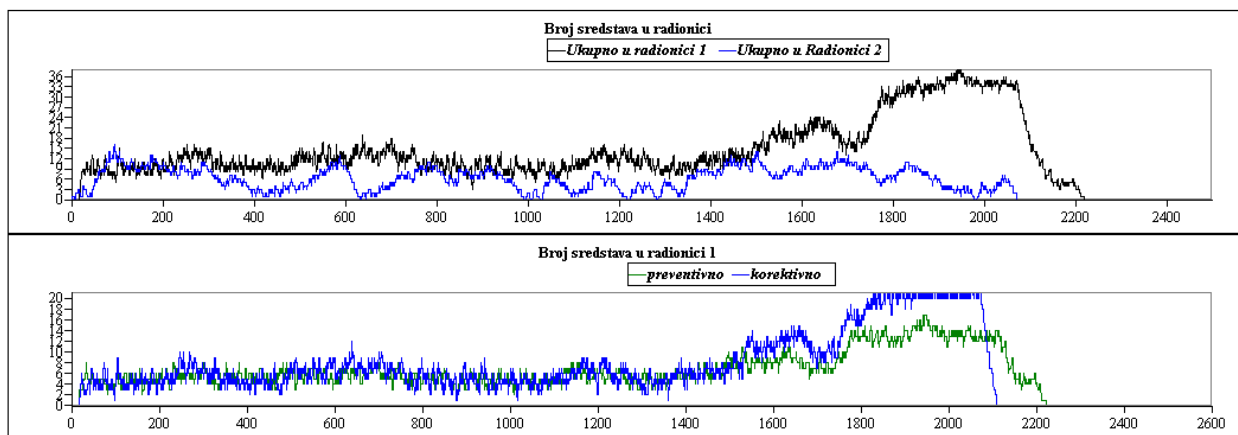
Слика 161б. Распоживост опреме



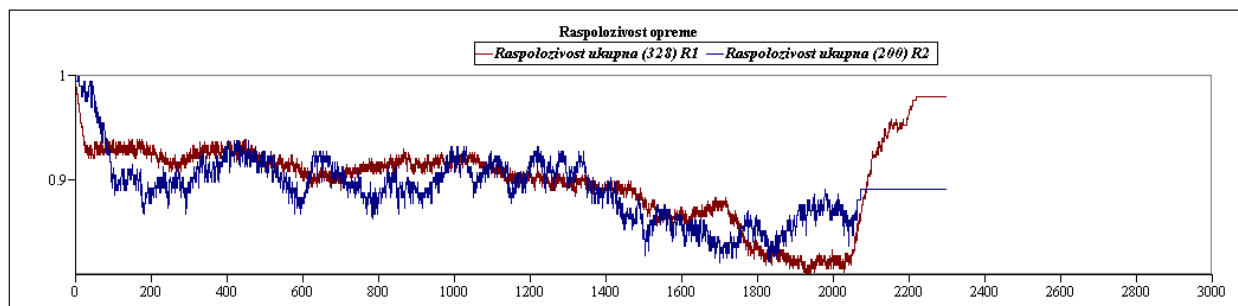
Слика 161в. Искоришћење капацитета радне снаге (ресурси)



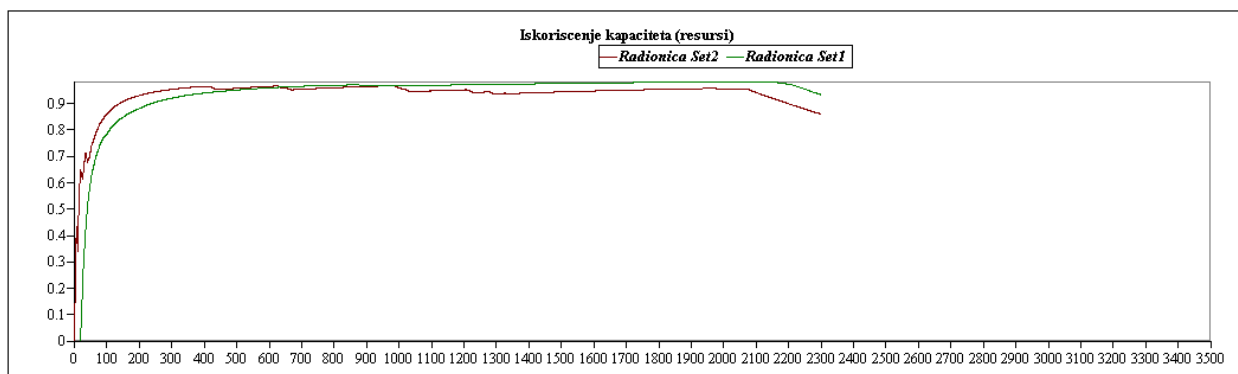
Варијанта 1.1 је аналогна варијанти 1, сем што је време транспорта средства до радионице двоструко веће. Хоризонталне вредности – *праве линије* на графицима су последица ограничења (*WIP - Work in Progress*, представљају физичко ограничење капацитета радионице - колико средстава може бити у радионици, непосредно на раду и на чекању). Резултати симулације су дати на слици 162 (а-в).



Слика 162а. Број средстава у радионици

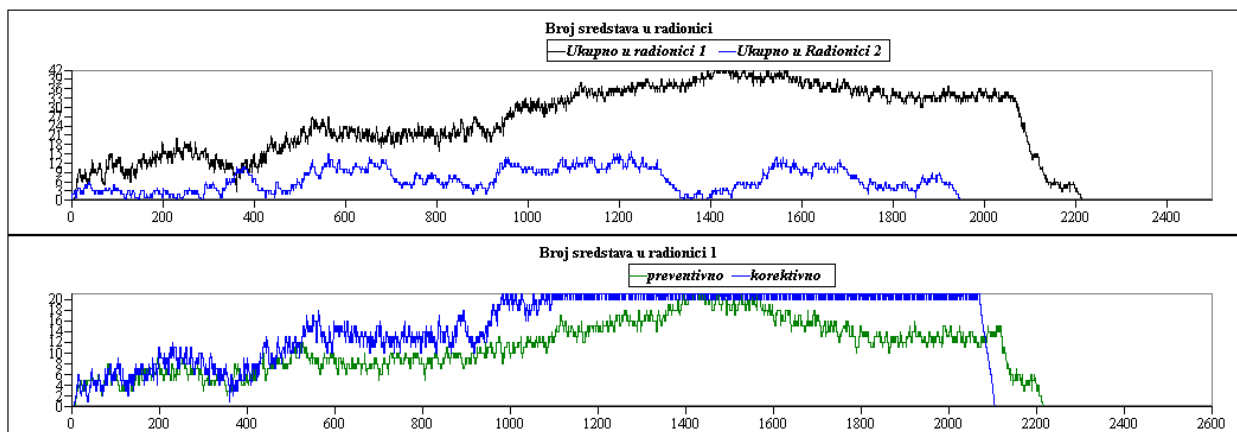


Слика 162б. Распоживост опреме

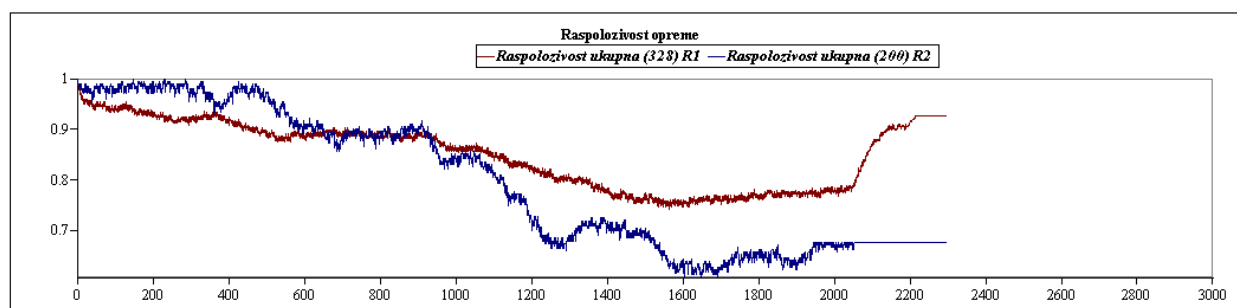


Слика 162в. Искоришћење капацитета радне снаге (ресурси)

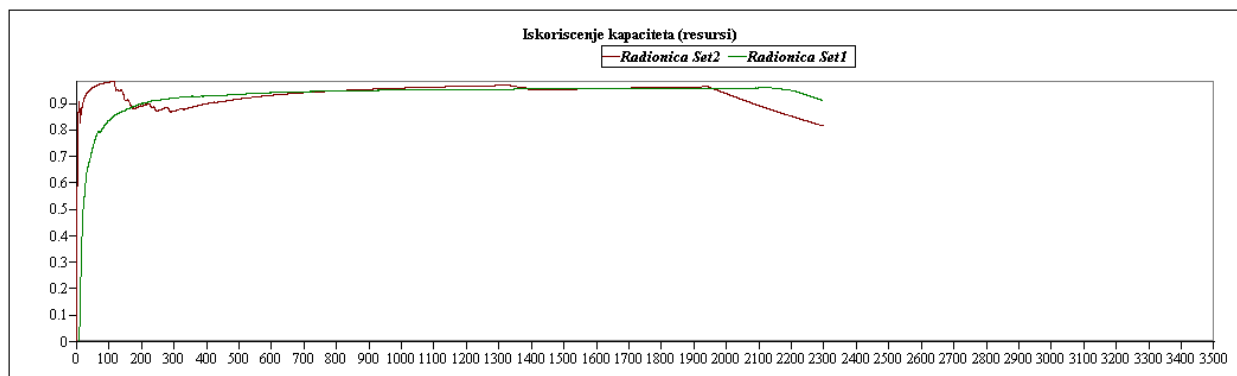
Варијанта 1.2 је аналогна варијанти 1, сем што је расположивост механичара, 4 од 8, моделована по формули 4-2-4 (на свака 4 сата, 2 сата су губици, тј. механичар не ради свој основни посао). Резултати симулације су дати на слици 163 (а-в).



Слика 163а. Број средстава у радионици

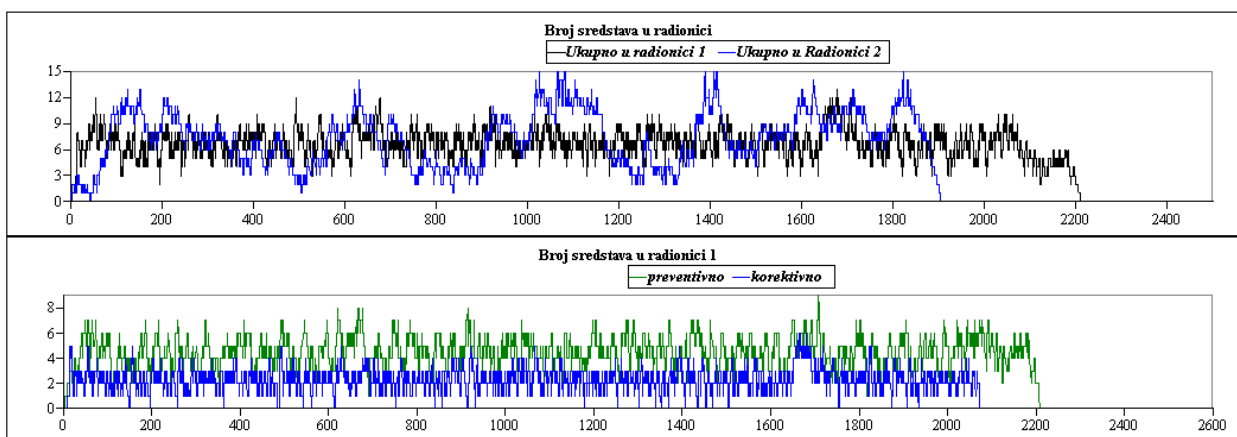


Слика 163б. Распољивост опреме

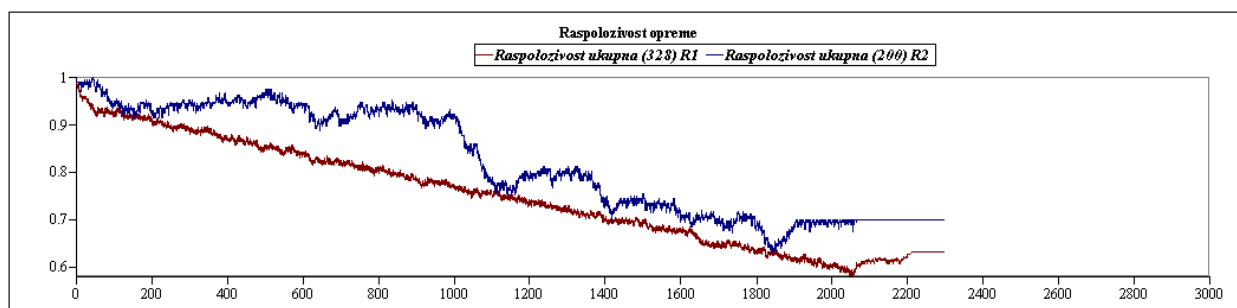


Слика 163в. Искоришћење капацитета радне снаге (ресурси)

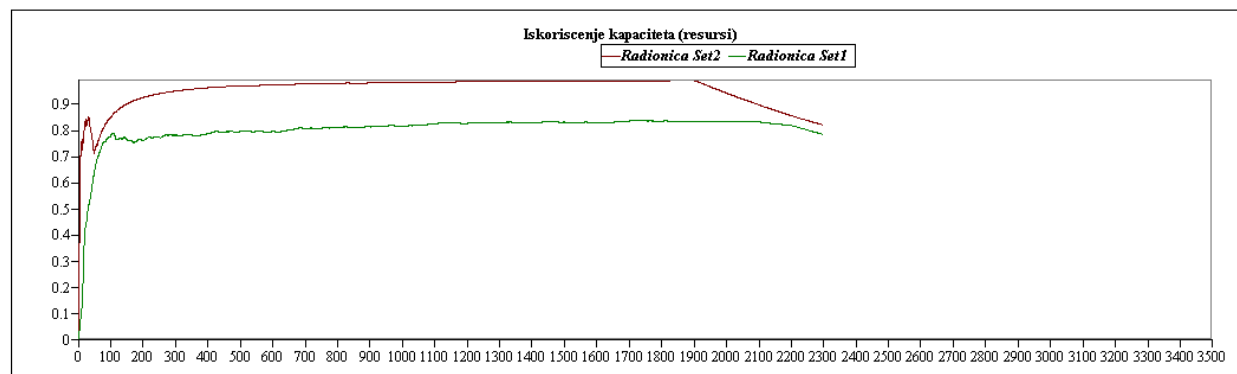
Варијанта 1.3 је варијанта 1 са степеном задовољења захтева за резервним деловима у корективном каналу од 0,66 уместо 1. Резултати симулације су дати на слици 164 (а-в).



Слика 164а. Број средстава у радионици

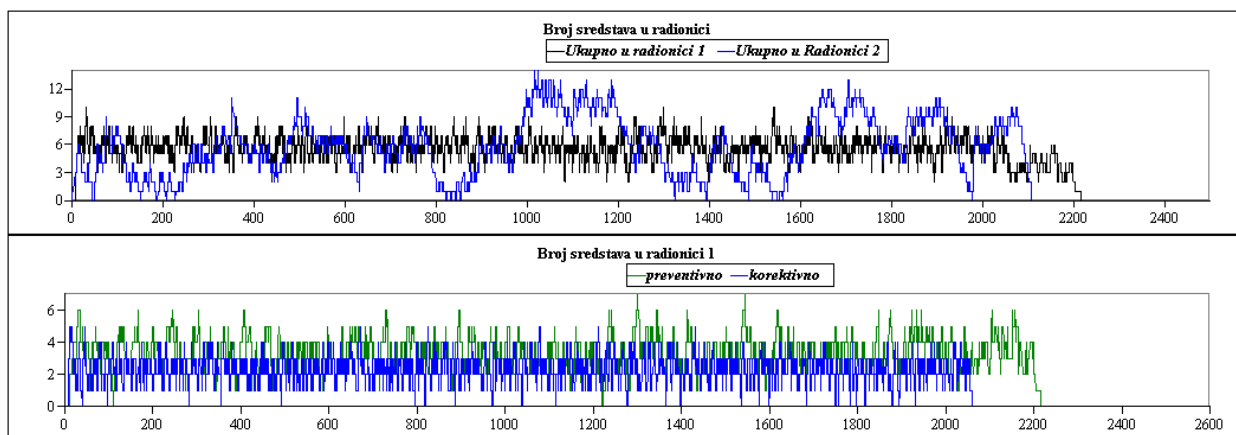


Слика 164б. Распољивост опреме

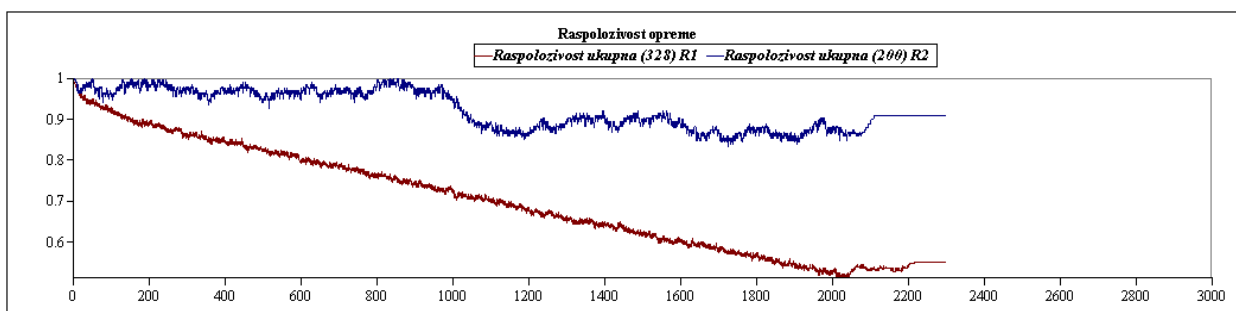


Слика 164в. Искоришћење капацитета радне снаге (ресурси)

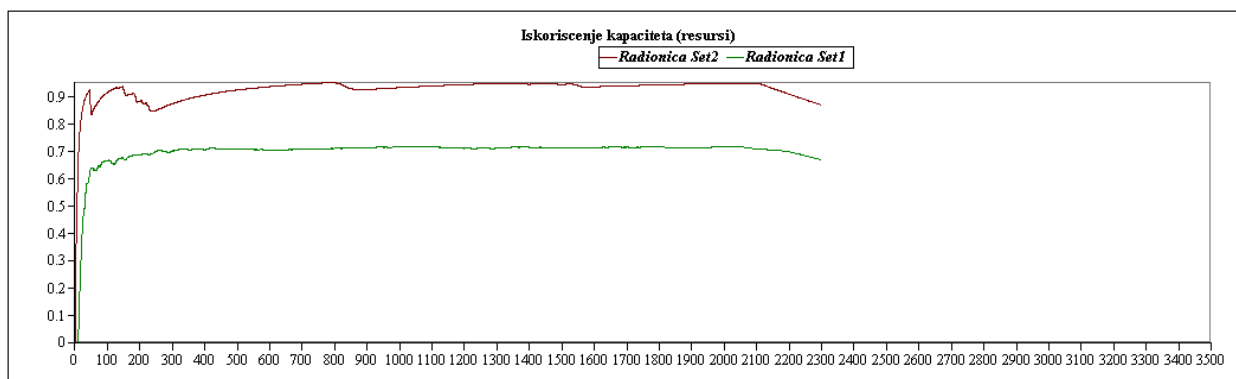
Варијанта 1.4 је варијанта 1 са степеном задовољења захтева за резервним деловима у корективном и превентивном каналу од 0,66 уместо 1. Резултати симулације су дати на слици 165 (а-в).



Слика 165а.- Број средстава у радионици



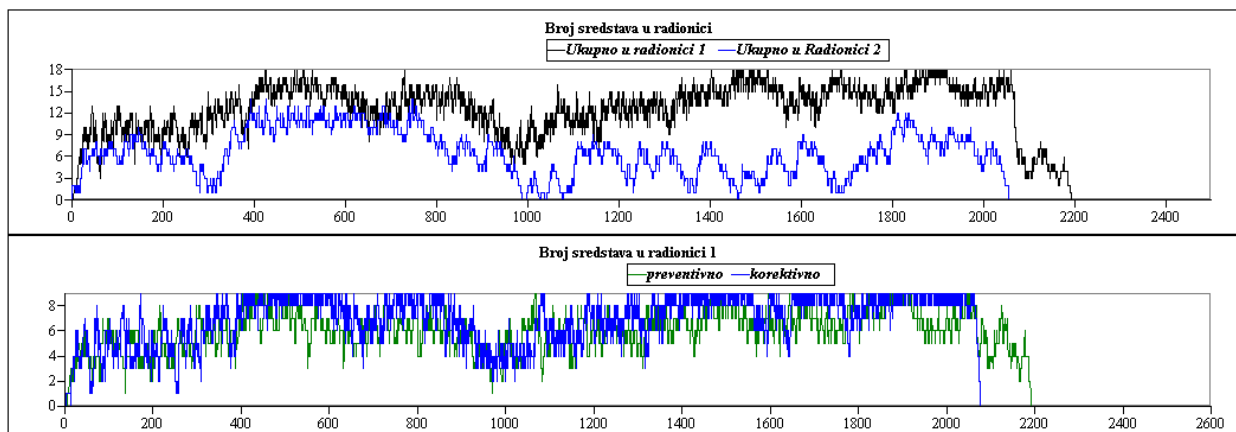
Слика 165б.- Распољивост опреме



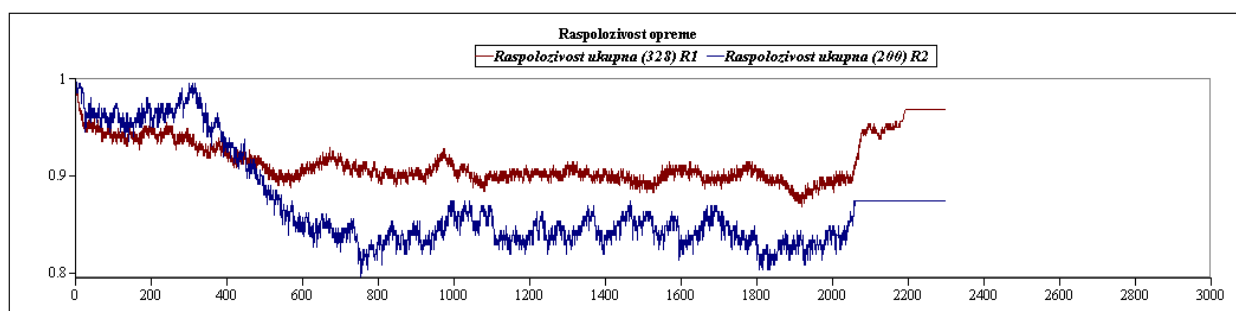
Слика 165в.- Искоришћење капацитета радне снаге (ресурси)

Слика 165б указује на последице овако недовољног обезбеђења резервних делова.

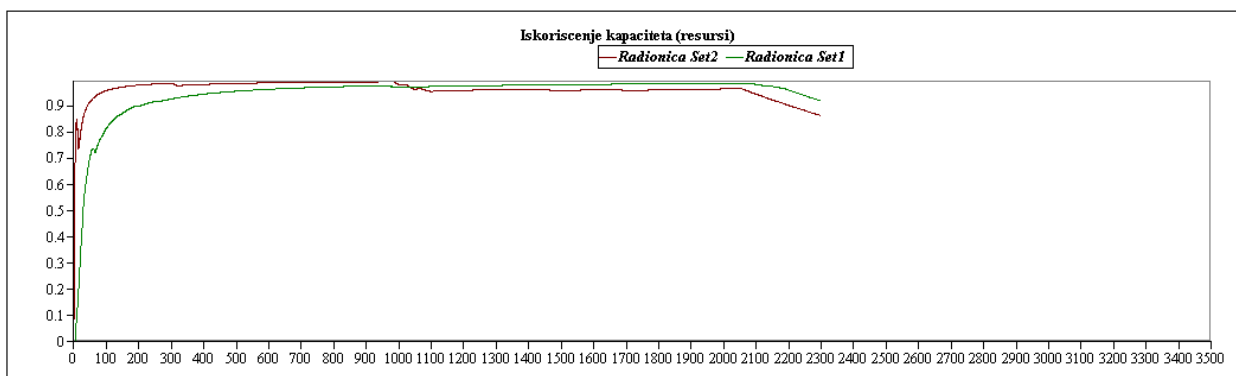
Варијанта 1.5 је варијанта 1 али је вредност *WIP - Work in Progress*, ограничена на 8 (у оба канала-превентивни и корективни) уместо 20. Резултати симулације су дати на слици 166 (а-в).



Слика 166а. Број средстава у радионици

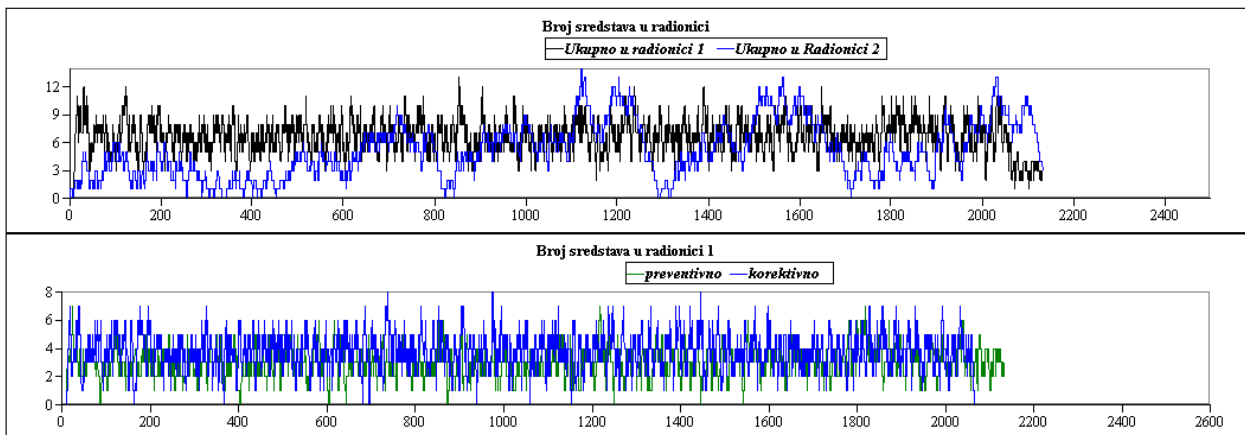


Слика 166б. Распољивост опреме

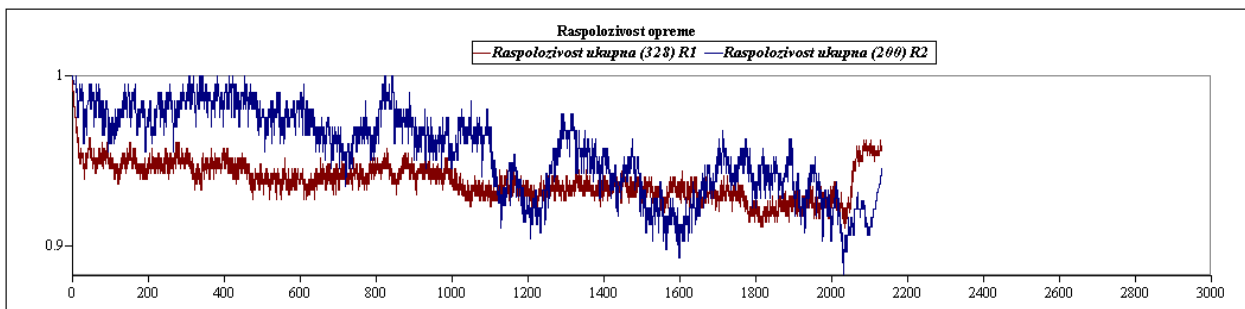


Слика 166в. Искоришћење капацитета радне снаге (ресурси)

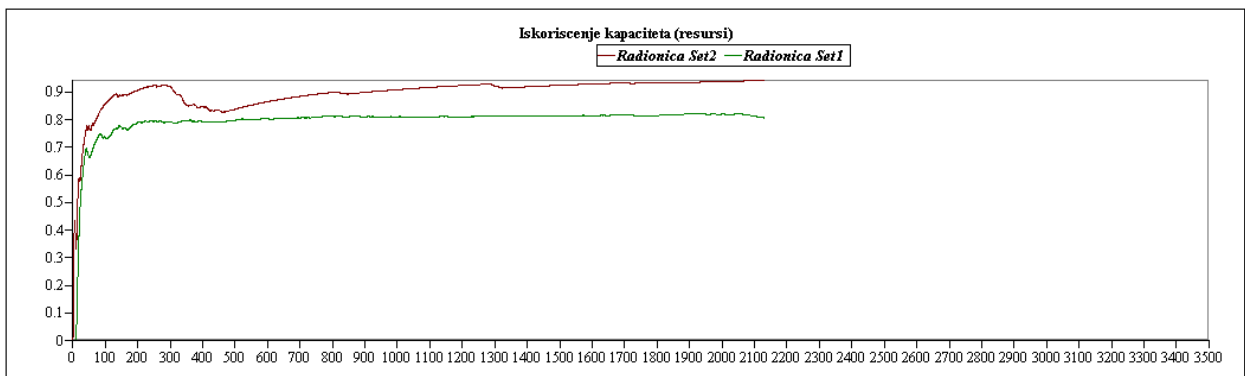
Варијанта 1.6 је варијанта 1 са смањеним временом превентивног одржавања за 1/3 што је учињено ради сагледавања ефеката (нпр. нове технологије одржавања). Резултати симулације су дати на слици 167 (а-в).



Слика 167а. Број средстава у радионици

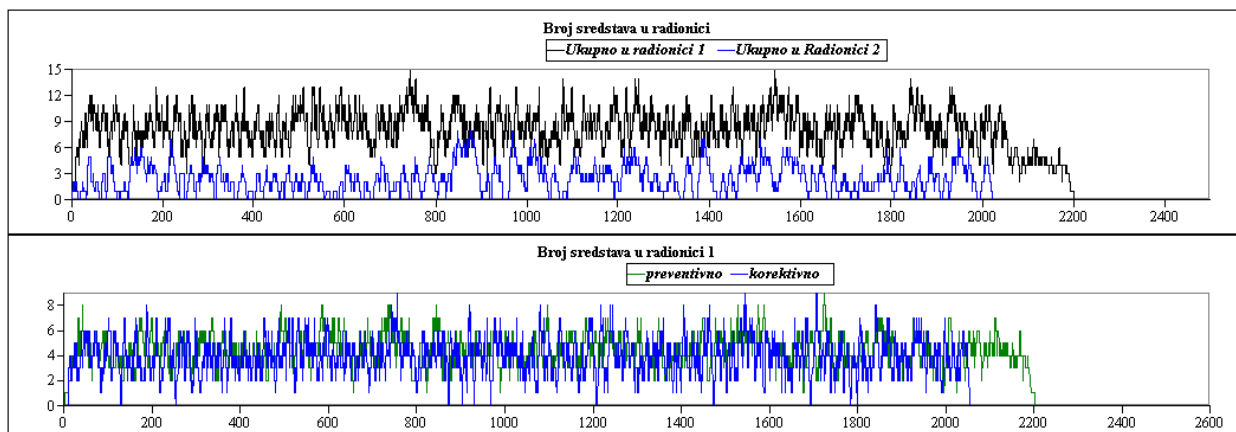


Слика 167б. Распољивост опреме

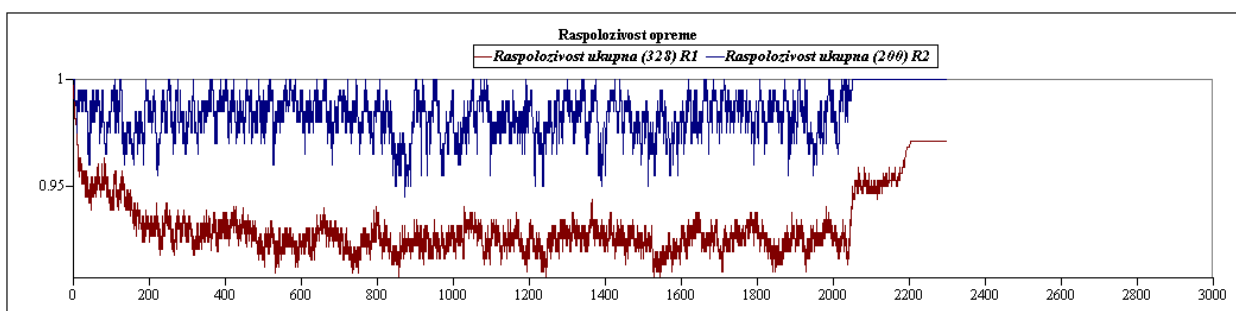


Слика 167в. Искоришћење капацитета радне снаге (ресурси)

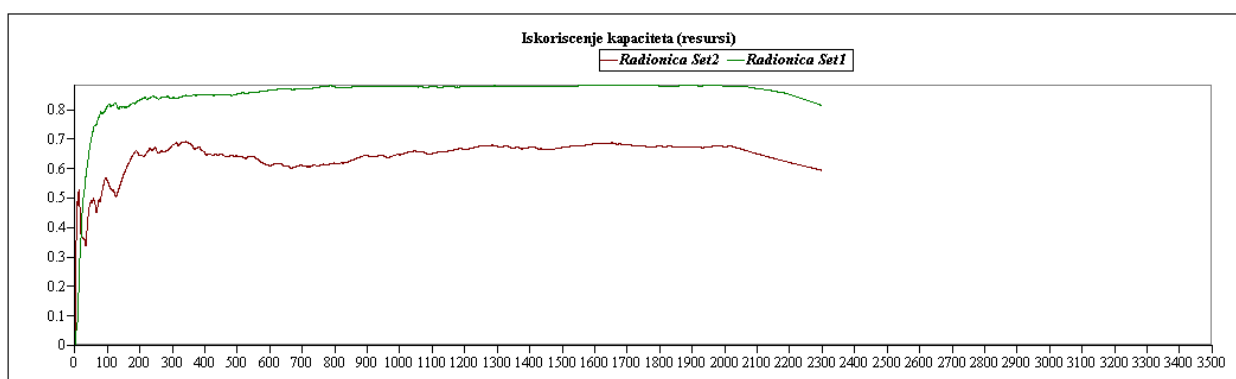
Варијанта 2 представља модел у коме су у односу на варијанту 1, ресурси у радионици 1 и радионици 2 повећани (плус један механичар). Резултати симулације су дати на слици 168 (а-в)



Слика 168а. Број средстава у радионици

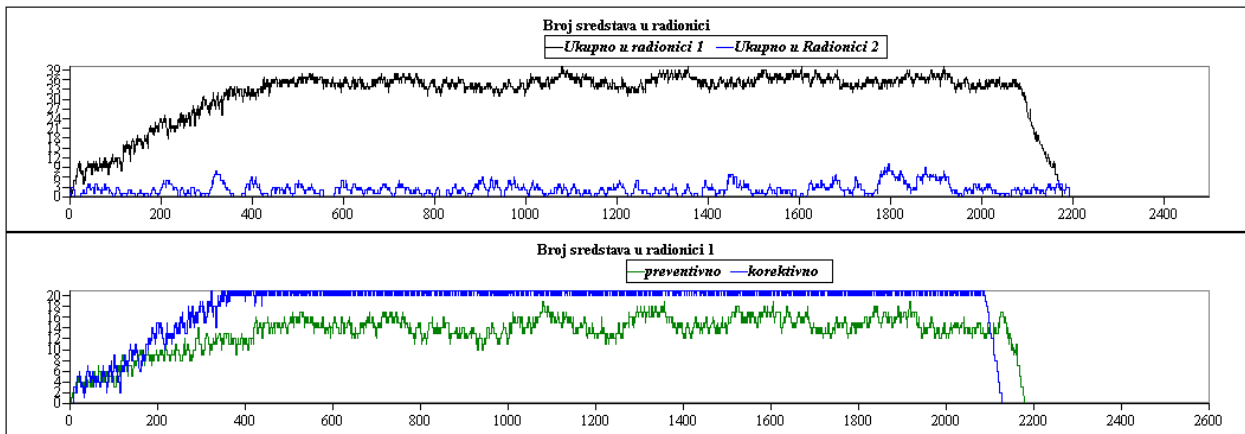


Слика 168б. Распоживост опреме

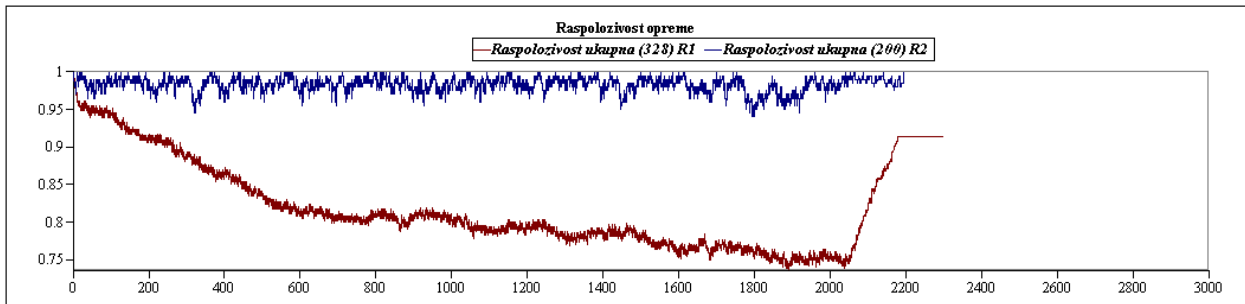


Слика 168в. Искористићење капацитета радне снаге (ресурси)

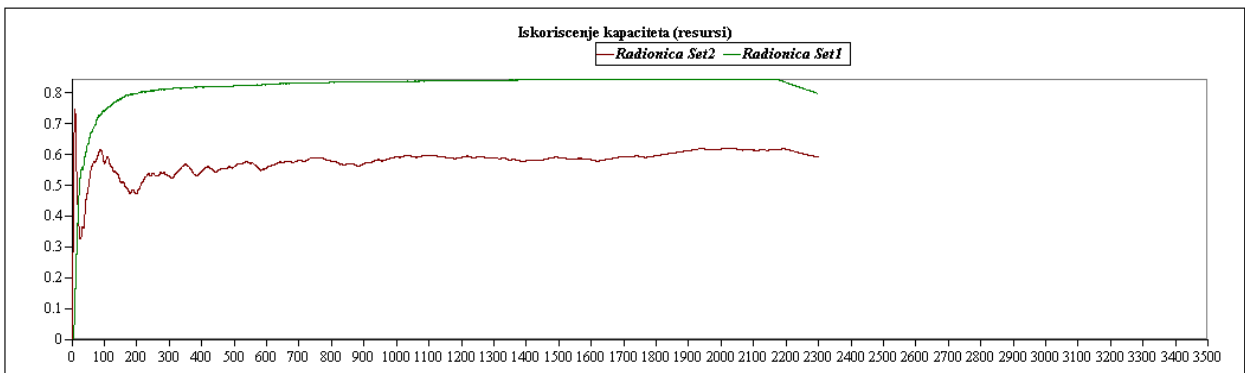
У варијанти 2.2, расположивост свих механичара у радионици 1, моделована је по формули 4-2-4 (на свака 4 сата, 2 сата су губици). Резултати симулације су дати на слици 169 (а-в).



Слика 169а. Број средстава у радионици



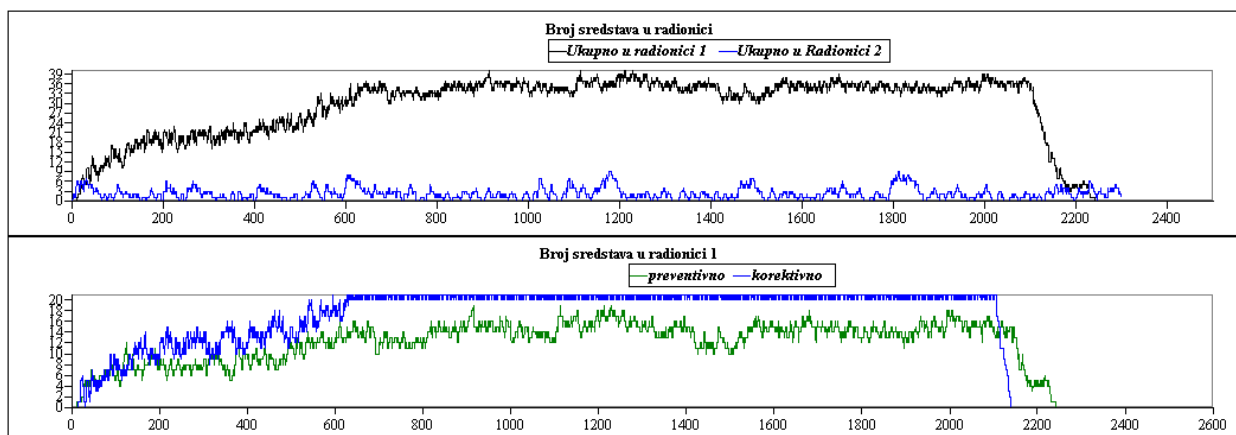
Слика 169б. Распоживост опреме



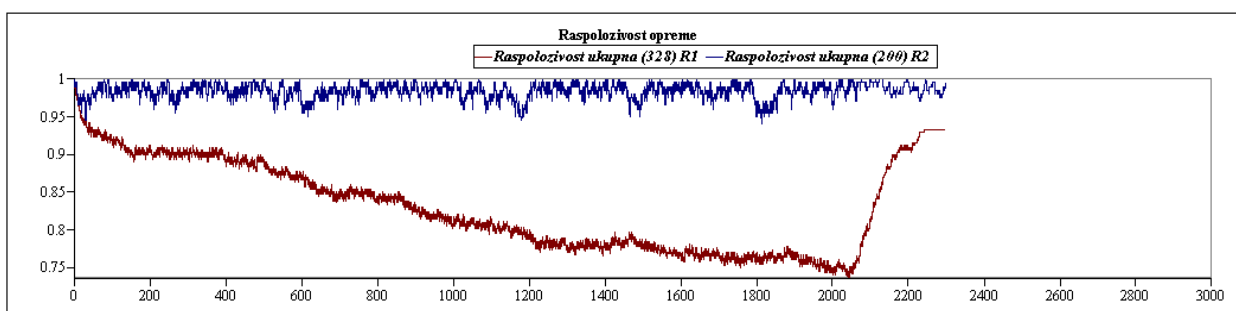
Слика 169в. Искоришћење капацитета радне снаге (ресурси)



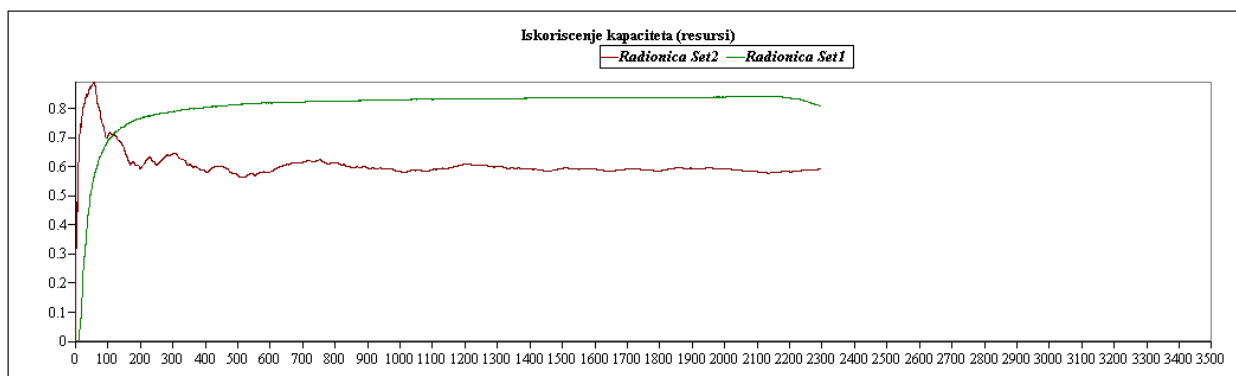
Комбинација варијанти 2.1 и 2.2 је варијанта 2.2 али је време транспорта средства до радионице двоструко веће. Резултати симулације су дати на слици 170 (а-в).



Слика 170а. Број средстава у радионици

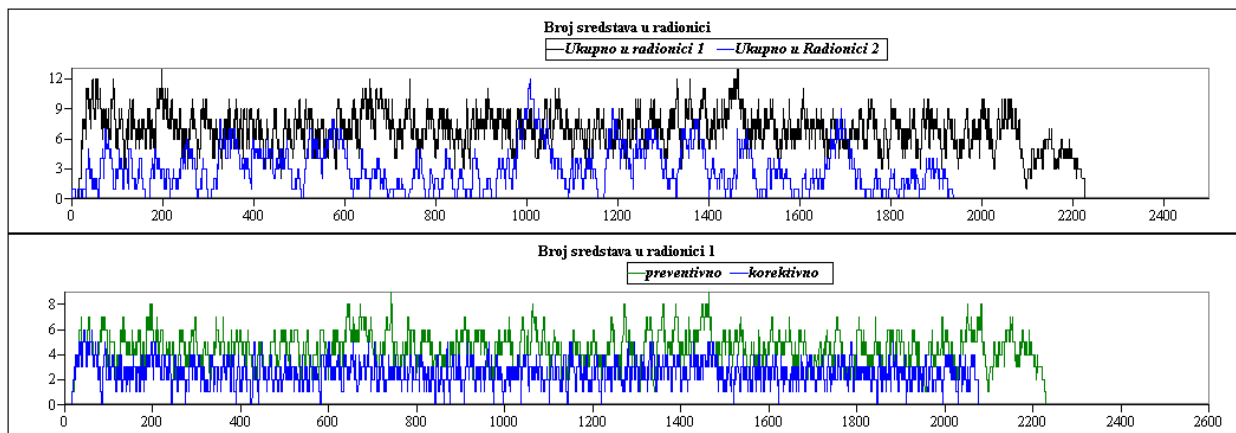


Слика 170б. Распољивост опреме

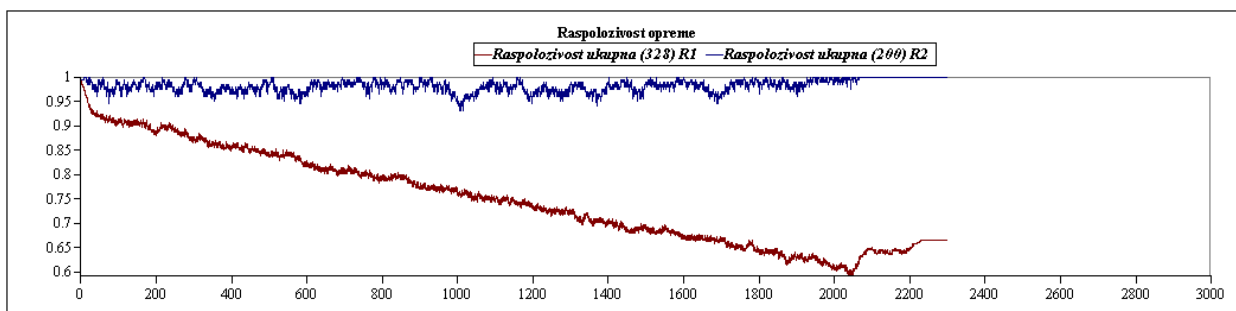


Слика 170в. Искоришћење капацитета радне снаге (ресурси)

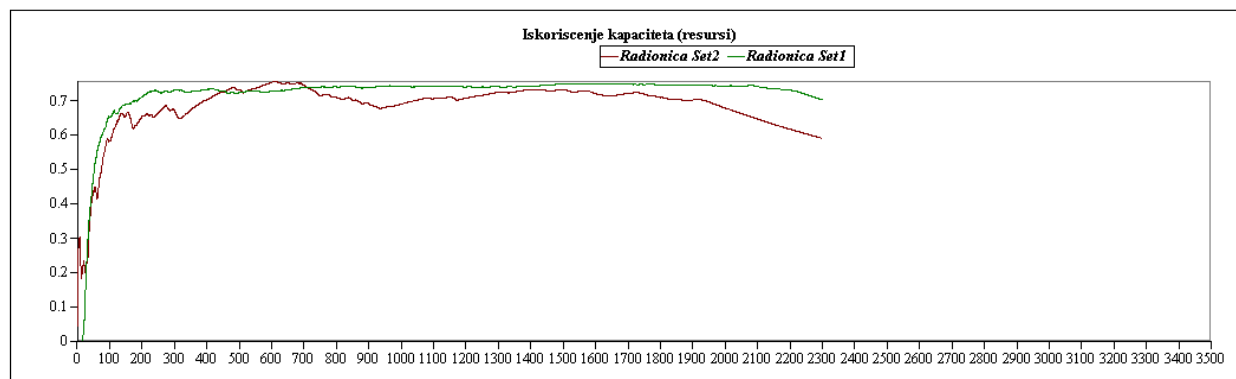
Комбинација варијанти 2.1, 2.2 и 2.3 је варијанта којој је наспрам претходне (комбинација 2.1 и 2.2), степен задовољења захтева за резервним деловима у корективном каналу од 0,66 уместо 1 (0,99). Резултати симулације су дати на слици 171 (а-в).



Слика 171а. Број средстава у радионици



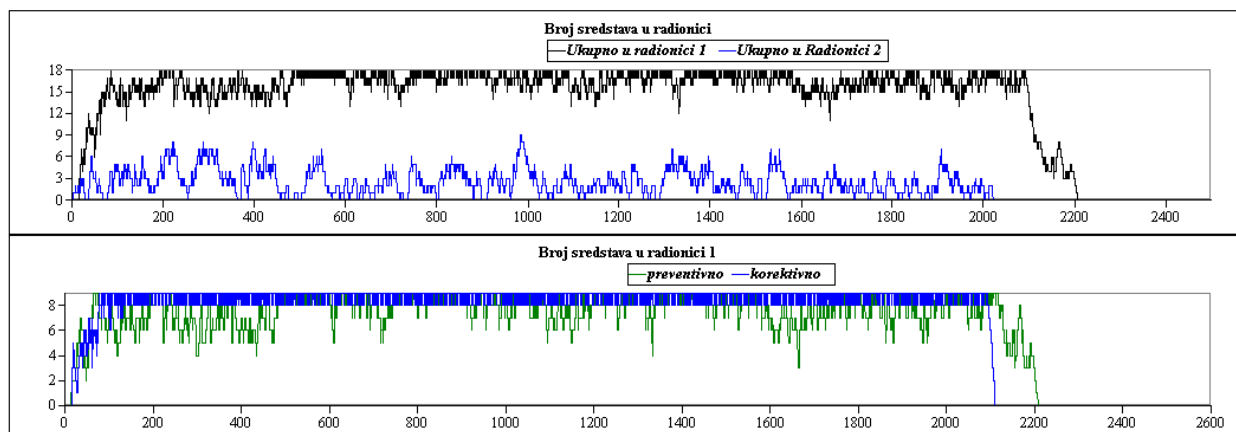
Слика 171б. Распољивост опреме



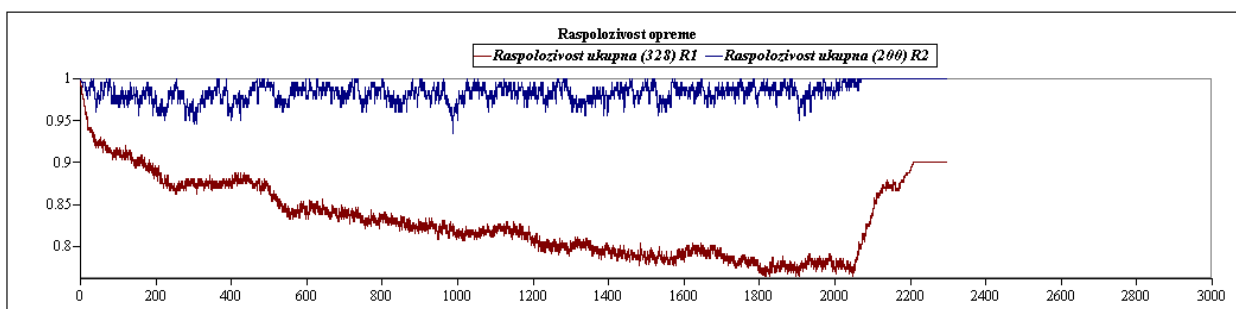
Слика 171в. Искоришћење капацитета радне снаге (ресурси)

Варијанта 3 је варијанта 1 у којој је вредност *WIP - Work in Progress*, ограничена на 8 уместо 20.

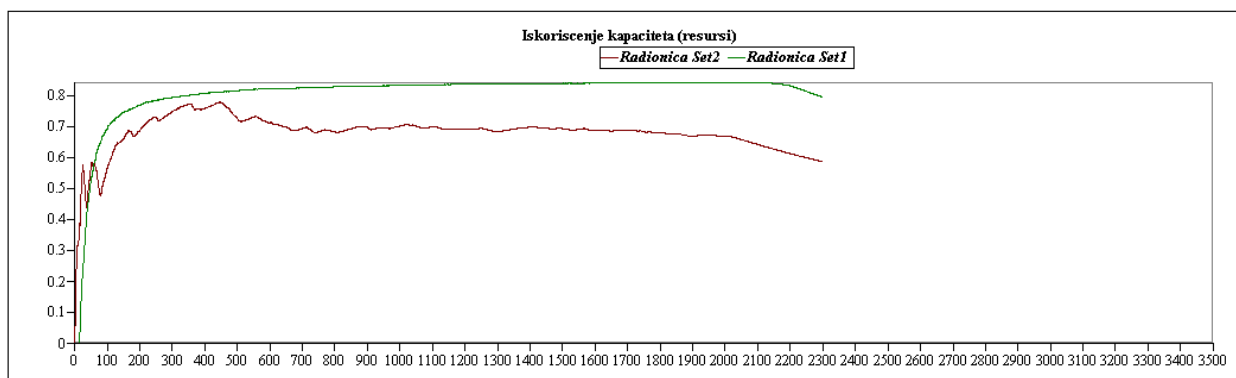
Комбинација варијанти 3, 3.1 и 3.2 је варијанта 3 уз време транспорта средства до радионице двоструко веће (од почетне варијанте 3) и што је расположивост свих механичара у радионици 1, моделована по формули 4-2-4 (на свака 4 сата, 2 сата су губици, тј. механичар не ради свој основни посао). Резултати симулације су дати на слици 172 (а-в).



Слика 172а. Број средстава у радионици

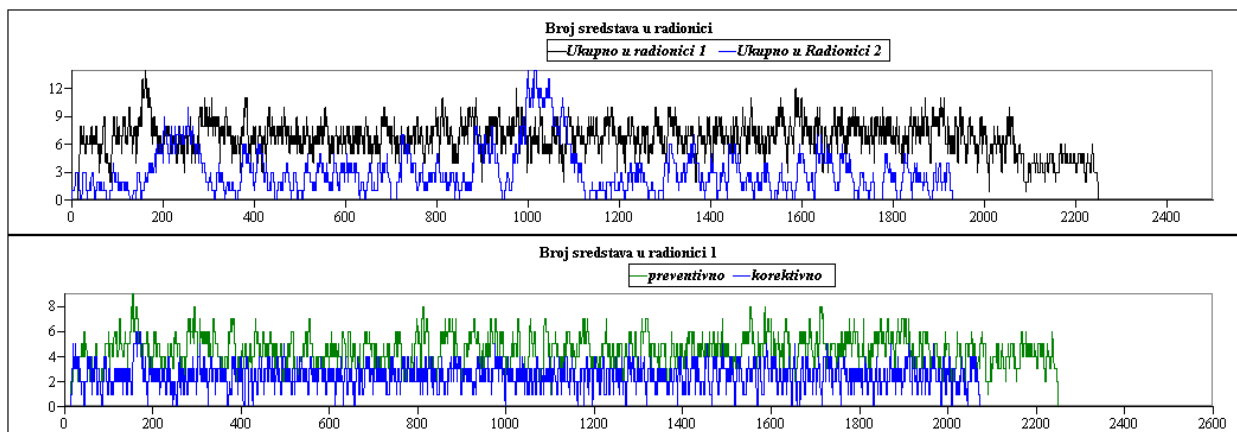


Слика 172б. Распоживост опреме

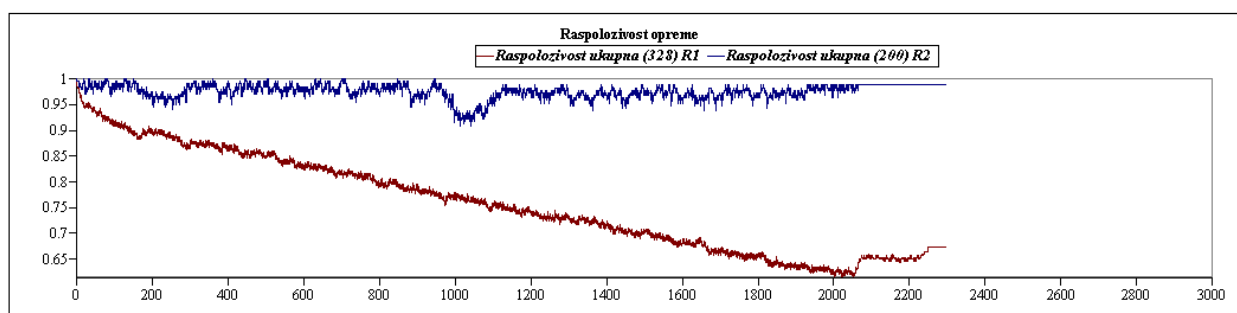


Слика 172в. Искоршићење капацитета радне снаге (ресурси)

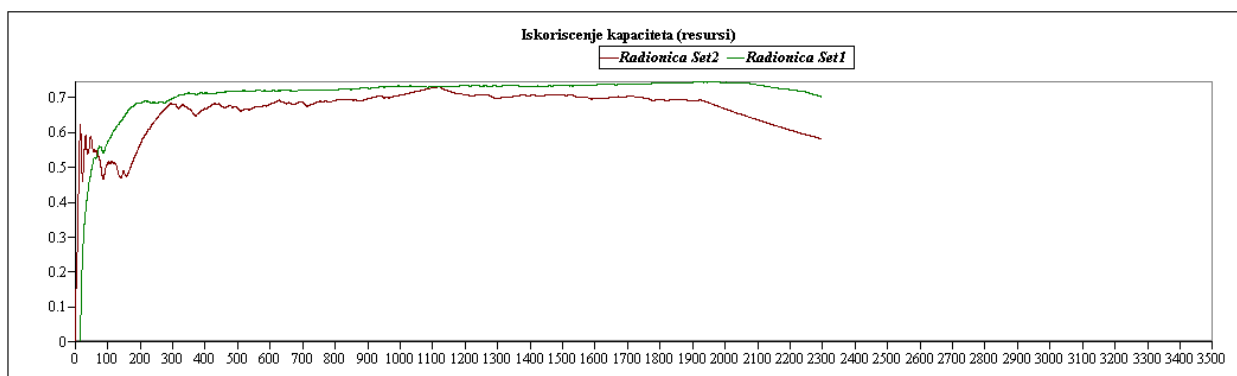
Комбинација варијанти 3, 3.1, 3.2 и 3.3 је варијанта у којој је у односу на претходну (комбинација 3, 3.1 и 3.2) степен задовољења захтева за резервним деловима у корективном каналу од 0,66 уместо 1 (0,99). Резултати симулације су дати на слици 173 (а-в).



Слика 173а. Број средстава у радионици



Слика 173б. Распољивост опреме



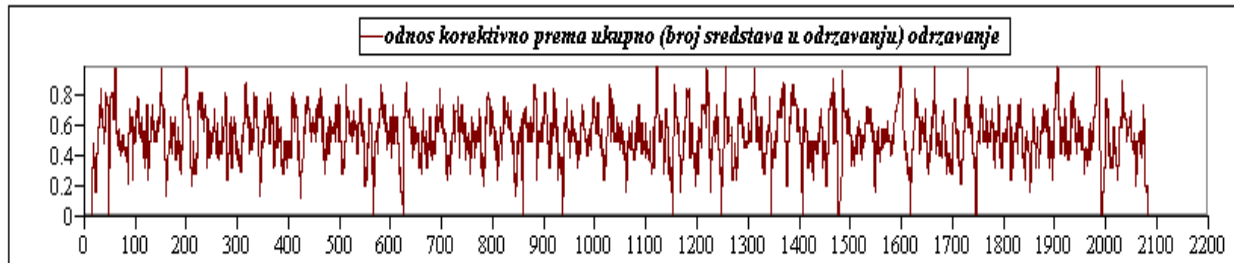
Слика 173в. Искоришћење капацитета радне снаге (ресурси)

Из приказаног се могу извести закључци:

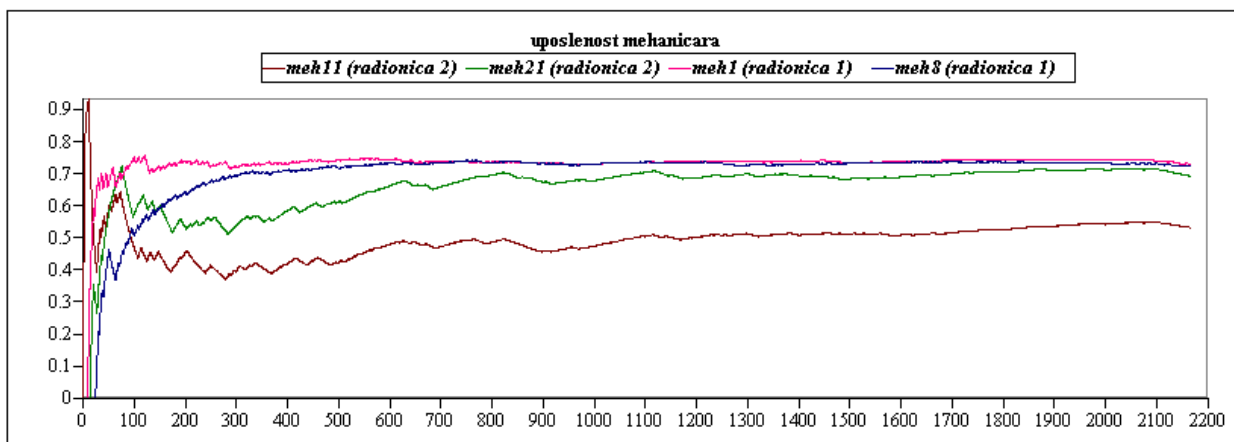
- Висока средња расположивост се постиже када је искоришћење ресурса 0,65-0,8;
- Искоришћење ресурса преко 0,9 није уједно и показатељ високе расположивости, већ напрезања ресурса (загушење система) и тада било која грешка у планирању или застој у снабдевању резервним деловима утиче на значајан пад расположивости;
- Удаљеност средства које је потребно одржавати до капацитета за одржавање (начелно исказано кроз време потребно за долазак средства у радионицу 100-300% више од времена одржавања не утиче битно на расположивост) уз напомену да је ово специфичност конкретног модела и да се не разматрају трошкови транспорта;
- Лоша логистика (обезбеђење резервних делова) утиче на велики пад расположивости (варијанте 1.3., 1.4, 2.3, 3.3);
- Велики је значај ресурса, повећање броја за 1 значајно доприноси расположивости система (нпр. варијанта 1.2 према 2.2/3.2);
- Већи ресурси (већи број механичара) су толерантнији на непоузданост самих ресурса (говори се о разлици 1-2 механичара на укупно 10 (10 према 12));
- Превентивно одржавање (према сакупљеним подацима) има мање варијација у броју комада у току године и временима одржавања.

Осим наведених индикатора успешности система одржавања, могуће је одредити и друге у циљу детаљније оцене успешности система одржавања.

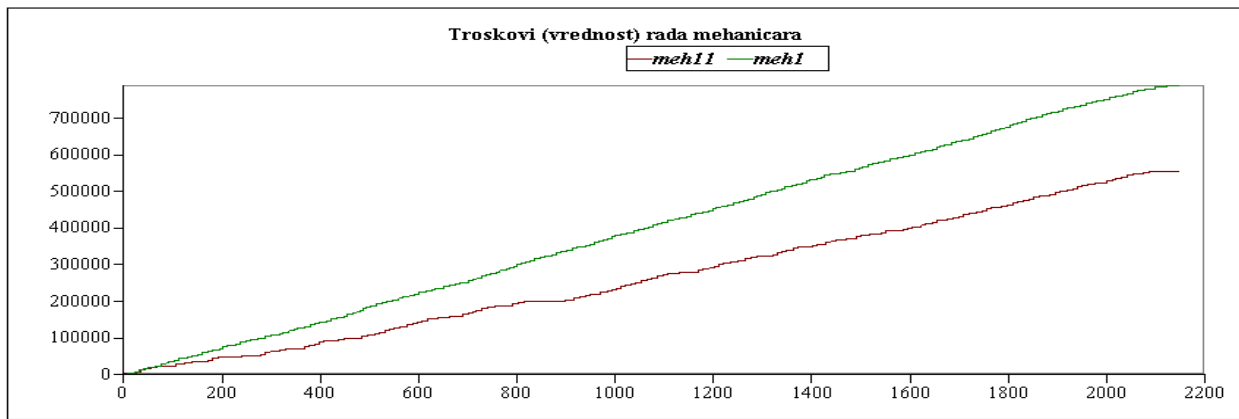
На пример (варијанта 3 и 3.1 и 3.2), дате су вредности различитих индикатора перформанси одржавања на сликама 174-177.



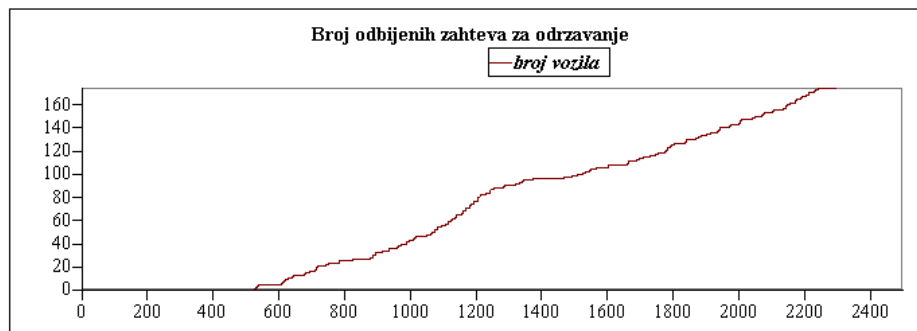
Слика 174. Однос корективно одржавање према укупном броју средстава у одржавању



Слика 175. Искоришћење капацитета радне снаге (појединачно механичари)



Слика 176. Трошкови рада механичара



Слика 177. Нереализовани захтеви за одржавањем, број

#### 8.5.4. Оптимизација

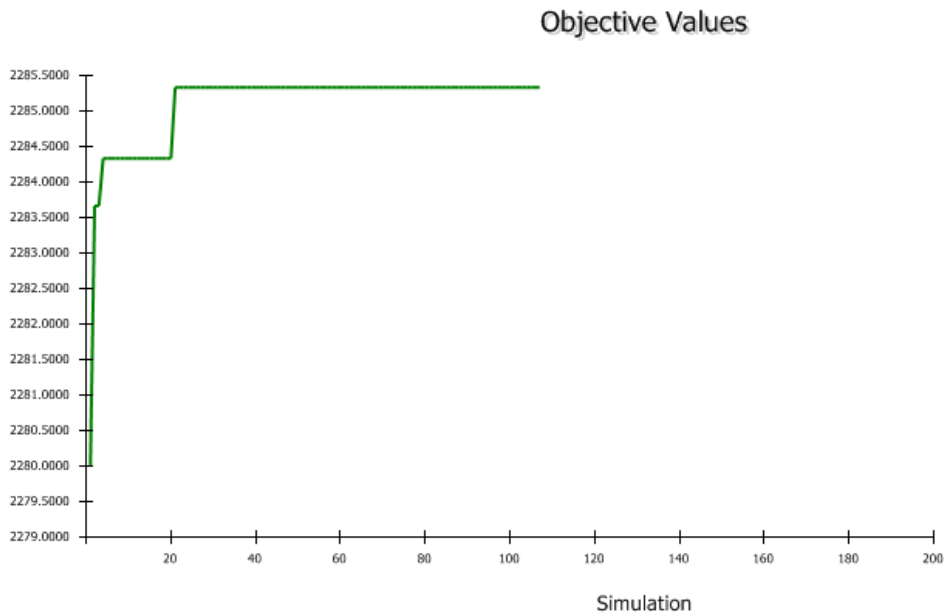
Већ је речено да је оптимизација процес који се врши са циљем добијања најбољих резултата под одређеним околностима, односно или да се минимизира потребан напор или да се максимално остваре жељени резултати. OptQuest се користи за аутоматско трагање за оптималним решењем у оквиру Arena симулационих модела.

Циљ (*Objective*) је извршити што већи број акција одржавања, а у синтакси коришћеног програма то је исказано на начин: „*maximize ([Kamion.NumberOut] + [Kamion2.NumberOut])*“.

Ограничење (*Constraints*) је дефинисано као број средстава која чекају поправку (захтеви на чекању) пре уласка средстава у радионицу, што је у синтакси коришћеног програма исказано на начин: „*[Hold 3.Queue.NumberInQueue] <= 5, [Hold 4.Queue.NumberInQueue] <= 5*“ (параметри модула Hold 3 су Odrzavanje 8.WIP <= 9“, а параметри модула Hold 4 су „Odrzavanje1.WIP <= 9“).

Оптимизује се број механичара да задовољи наведене услове.

Резултати симулације су дати на сликама 178-179 (укупно симулација 107, најбоља симулација 21, број репликација по симулацији 3).



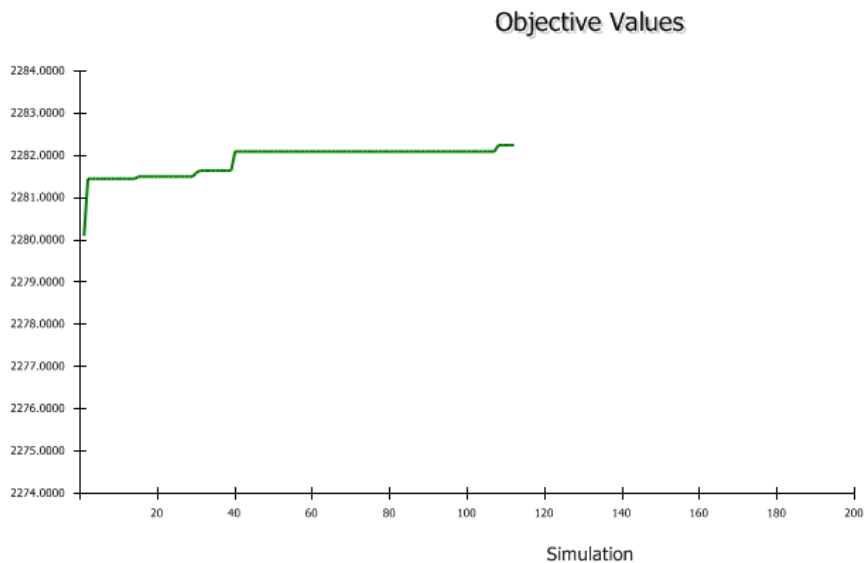
Слика 178. Ток симулације и оптимизације

**Best Solutions**      **Stopped due to the Auto Stop option.**

Best Solutions															
Select	Simulation	Objective Value	Status	Meh 11	Meh 21	Meh 31	Meh1	Meh2	Meh3	Meh4	Meh5	Meh6	Meh7	Meh8	Meh9
<input checked="" type="checkbox"/>	21	2285.333333	Feasible	1	2	1	1	1	2	2	2	2	2	1	1
<input type="checkbox"/>	38	2285.333333	Feasible	1	1	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2
<input type="checkbox"/>	101	2285.000000	Feasible	1	2	2	1	2	2	2	1	1	1	1	2

Слика 179. Приказ најбољег решења (прво у рангу)

За случај повећања броја репликација са 3 на 20 (свако решење се пропушта кроз симулацију више пута, односно укупно симулација 112, најбоља симулација 108, број репликација по симулацији 20), резултат је дат на сликама 180-181.

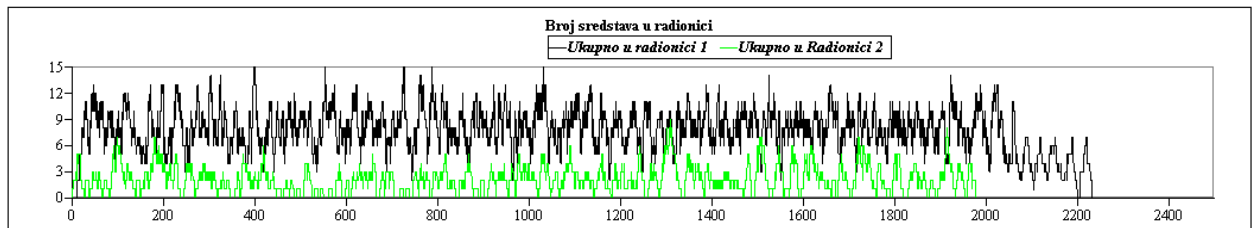


Слика 180. Ток симулације и оптимизације са већим бројем репликација

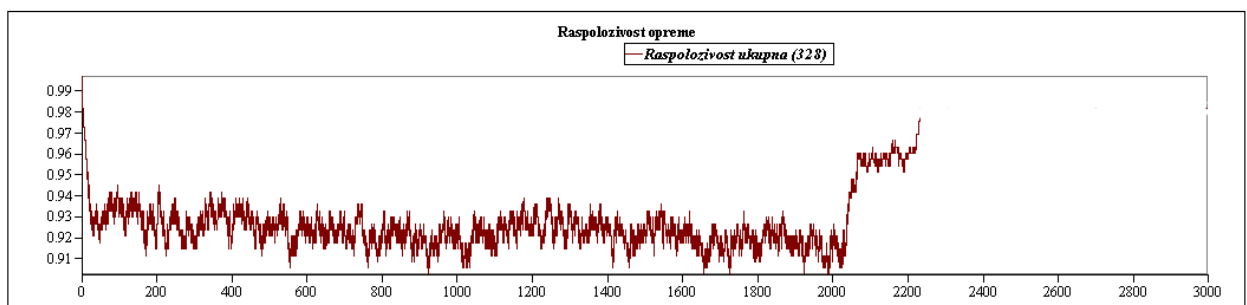
Best Solutions		Stopped due to the Auto Stop option.													
Best Solutions															
Select	Simulation	Objective Value	Status	Meh 11	Meh 21	Meh 31	Meh1	Meh2	Meh3	Meh4	Meh5	Meh6	Meh7	Meh8	Meh9
<input checked="" type="checkbox"/>	108	2282.250000	Feasible	1	2	2	2	1	2	1	2	1	2	2	1
<input type="checkbox"/>	40	2282.100000	Feasible	1	1	2	1	2	1	1	2	2	2	1	1
<input type="checkbox"/>	70	2282.100000	Feasible	1	2	1	1	2	1	2	2	2	1	2	2

Слика 181. Приказ најбољег решења (прво у рангу), са већим бројем репликација

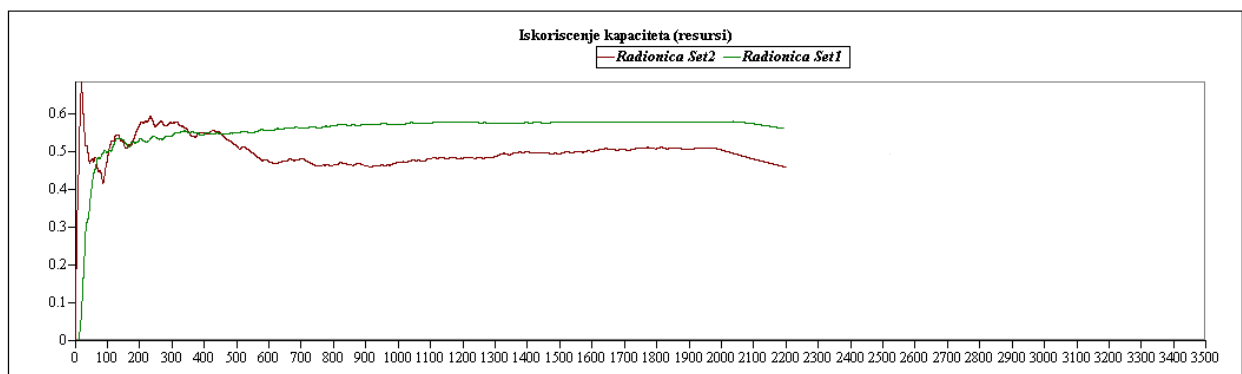
Ако би се одлучили за најбољи резултат оптимизације (додатних 4 механичара у радионици 1 и 2 у радионици 2) резултат би био следећи, односно систем одржавања би имао следећу меру успешности исказану кроз одабране индикаторе, што је приказано на сликама 182-184.



Слика 182. Број средстава у радионици



Слика 183. Распољивост опреме



Слика 184. Искоришћење капацитета радне снаге (ресурси)

Успешно би било према дефинисаним ограничењима и функцији циља поправљено свих 2285 од 2285 средстава (односно успешно би се реализовало толико захтева за одржавањем, у овом моделу једно средство се у току године подвргава превентивном одржавању 1-2 пута и корективном одржавању до 4 пута).

Међутим сасвим је прихватљиво и „мање“ оптимално решење из скупа решења, нарочито из разлога што се захтева мање „додатних“ ресурса (слика 185).

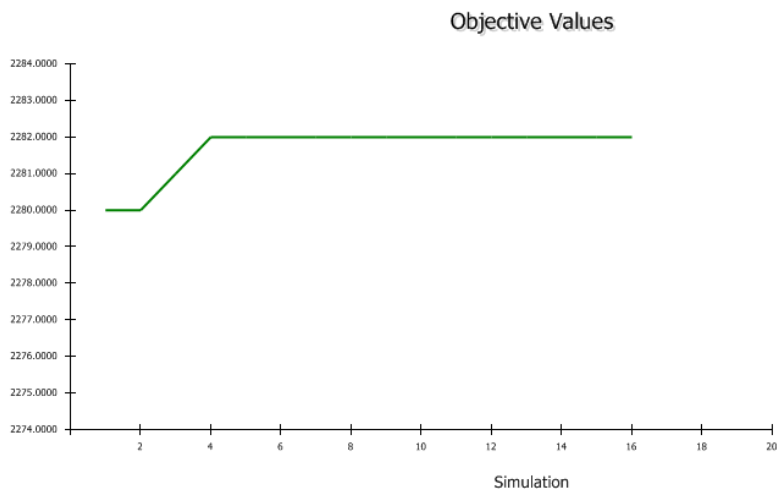


**Best Solutions**      **Stopped due to the Auto Stop option.**

Best Solutions															
Select	Simulation	Objective Value	Status	Meh 11	Meh 21	Meh 31	Meh1	Meh2	Meh3	Meh4	Meh5	Meh6	Meh7	Meh8	Meh9
<input type="checkbox"/>	21	2285.333333	Feasible	1	2	1	1	1	2	2	2	2	2	1	1
<input type="checkbox"/>	38	2285.333333	Feasible	1	1	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2
<input type="checkbox"/>	101	2285.000000	Feasible	1	2	2	1	2	2	2	1	1	1	1	2
<input type="checkbox"/>	56	2284.666667	Feasible	2	2	1	2	2	1	1	2	2	1	2	1
<input type="checkbox"/>	84	2284.666667	Feasible	2	2	1	1	2	1	1	1	1	1	2	1
<input type="checkbox"/>	4	2284.333333	Feasible	2	1	1	1	2	2	1	2	2	1	1	2
<input type="checkbox"/>	14	2284.000000	Feasible	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
<input type="checkbox"/>	26	2284.000000	Feasible	2	1	1	2	1	2	1	2	1	2	1	1
<input checked="" type="checkbox"/>	103	2284.000000	Feasible	1	1	2	1	1	1	1	1	2	1	2	1
<input type="checkbox"/>	2	2283.666667	Feasible	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
<input type="checkbox"/>	28	2283.666667	Feasible	2	1	1	2	1	2	2	1	1	1	2	2
<input type="checkbox"/>	18	2283.333333	Feasible	2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	1	2
<input type="checkbox"/>	59	2283.333333	Feasible	2	1	2	2	2	1	1	2	2	1	2	2
<input type="checkbox"/>	63	2283.333333	Feasible	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2
<input type="checkbox"/>	81	2283.333333	Feasible	1	2	2	2	2	2	1	2	2	1	1	1
<input type="checkbox"/>	15	2283.000000	Feasible	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
<input type="checkbox"/>	71	2283.000000	Feasible	1	2	2	2	2	2	2	1	2	1	2	2
<input type="checkbox"/>	83	2283.000000	Feasible	2	1	1	1	1	1	1	2	1	2	2	2
<input type="checkbox"/>	90	2283.000000	Feasible	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2

Слика 185. Приказ свих решења (извод)

Ограничи ли се могућност промене варијабле која се оптимизује - број механичара (максималне вредности), оптимизациони поступак даје резултат приказан на слици 186 и 187.



Слика 186. Ток симулације и оптимизације са лимитираним вредностима променљиве варијабле

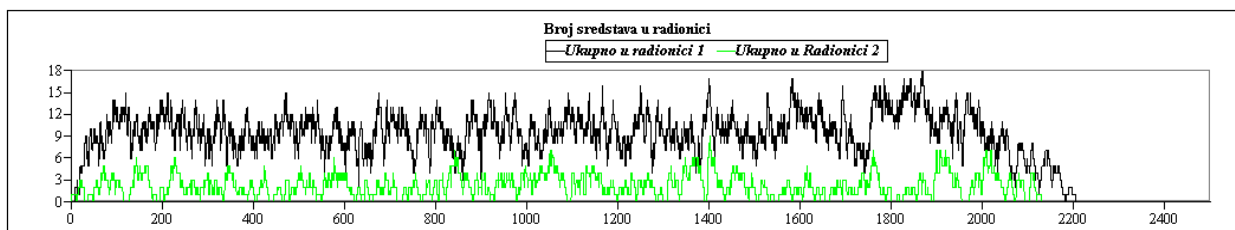
**Best Solutions**      **Optimal solution found.**

Best Solutions															
Select	Simulation	Objective Value	Status	Meh 11	Meh 21	Meh 31	Meh1	Meh2	Meh3	Meh4	Meh5	Meh6	Meh7	Meh8	Meh9
<input type="checkbox"/>	15	2280.000000	Feasible	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	1	2
<input type="checkbox"/>	6	2279.666667	Feasible	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1
<input type="checkbox"/>	8	2279.666667	Feasible	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1
<input type="checkbox"/>	11	2279.333333	Feasible	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<input type="checkbox"/>	12	2279.000000	Feasible	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1
<input type="checkbox"/>	16	2279.000000	Feasible	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2
<input type="checkbox"/>	2	2278.666667	Feasible	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	2	2
<input type="checkbox"/>	10	2278.666667	Feasible	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1
<input type="checkbox"/>	9	2278.000000	Feasible	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	2	2
<input checked="" type="checkbox"/>	13	2277.666667	Feasible	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2

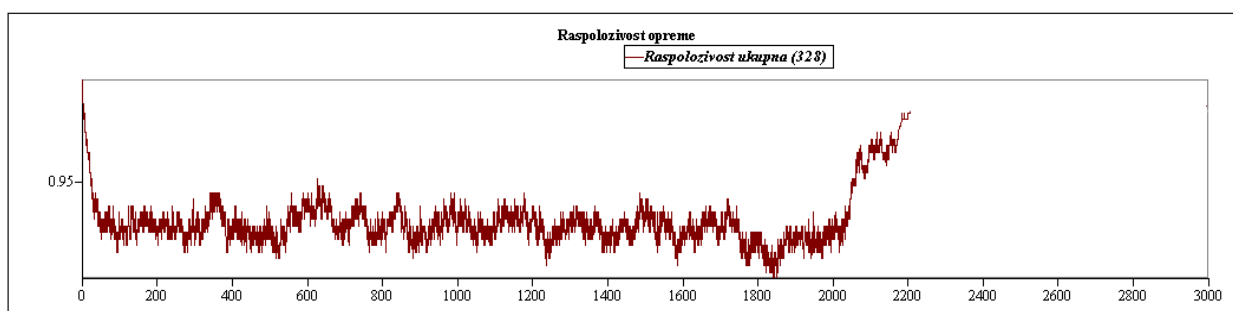
Слика 187. Приказ свих решења (извод)

Дакле, повећање ресурса (броја механичара) за 1 да би 2277 од 2285 средстава било поправљено, што је и даље врхунски резултат.

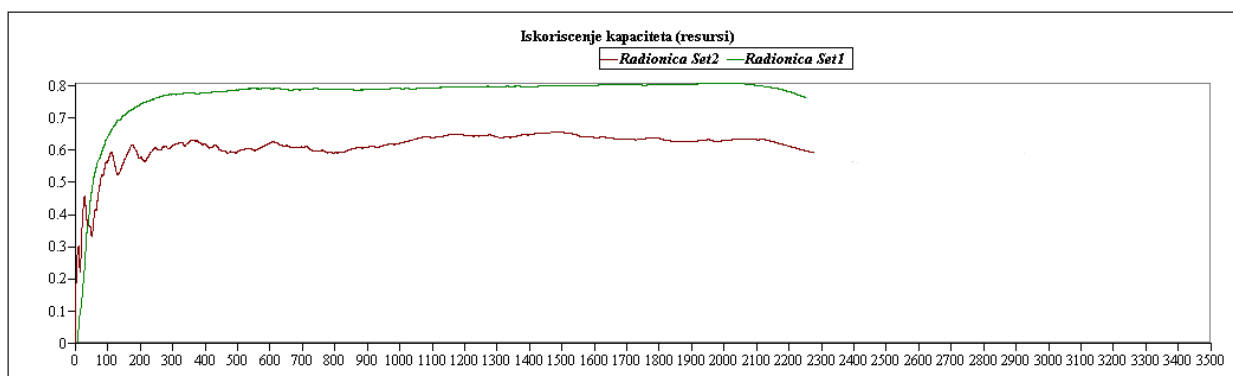
Ако би се одлучили за резултат оптимизације (додатно само 1 механичар у радионици 1), резултат би био следећи, односно систем одржавања би имао следећу меру успешности исказану кроз одабране индикаторе приказане на сликама 188-190.



Слика 188. Број средстава у радионици



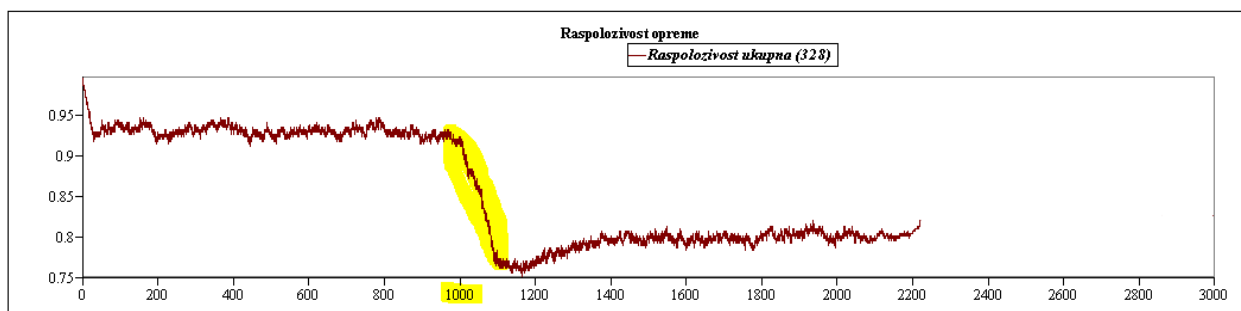
Слика 189. Распољивост опреме



Слика 190. Искоришћење капацитета радне снаге (ресурси)

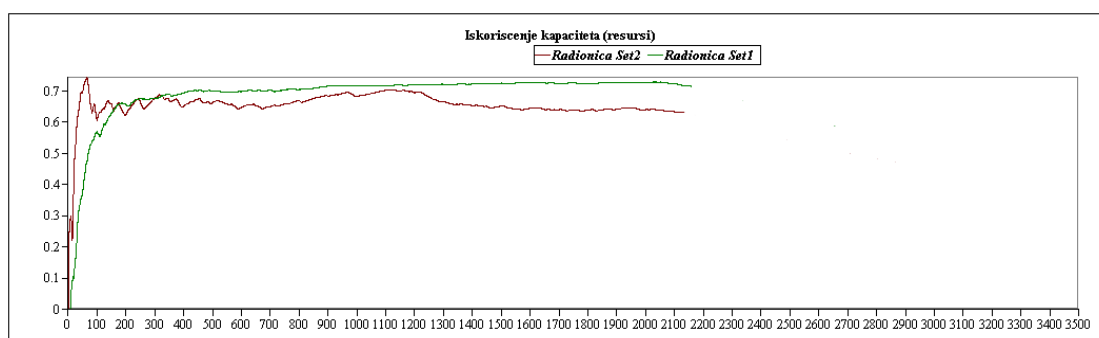
Приказ наведене оптимизације важи за почетне услове како је наведено за варијанту 1 експеримента. То је прихватљив поступак и тако моделован систем може описати стварни систем. Сваки већи поремећај, односно одступање, ће изазвати различите ефекте. **Изненадна појава већег број захтева за одржавањем директно ће се одразити на ефикасност система одржавања.**

Ако се на половини периода симулације ( $t=1000$ ) појави 50 захтева за одржавање (што је на моделу који обухвата 328 средстава велики проценат), по закону ехр (2), резултат симулације приказан преко вредности расположивости флоте возила је дат на слици 191.



Слика 191. Расположивост опреме за случај изненадних додатних захтева

Ако би примена нових технологија одржавања скратила време одржавања за 10%, резултат симулације приказан као искоришћење капацитета радне снаге је приказан на слици 192.



Слика 192. Искоришћење капацитета радне снаге (ресурси)

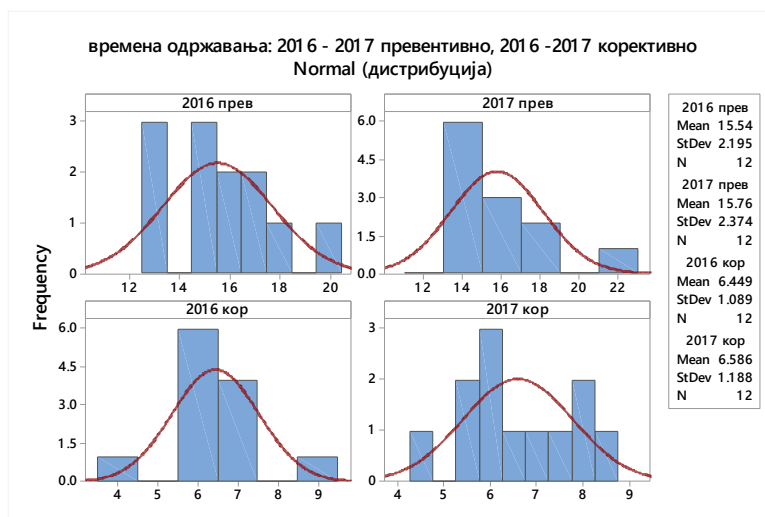
**Овај део истраживања је јасно показао да је могуће моделовати систем одржавања једне организације уз услов да постоје поуздани записи о историји одржавања.** Обухваћено је око 75% опреме. Статистичка контрола процеса је употребљена за почетну оцену како се одвија процес. Уједно су обезбеђени подаци, односно одређене законитости појава које су употребљене у симулацији. Поступак је показао да је могуће развити кредибилан модел који може да се употреби за две основне намене: да се детаљно анализира одвијање већ завршеног процеса и да се омогући предвиђање понашања система у будућности. Ово друго је истовремено и алат за проверавање различитих варијанти подешавања система.

### 8.5.5. Валидација у контексту оперативне употребе модела

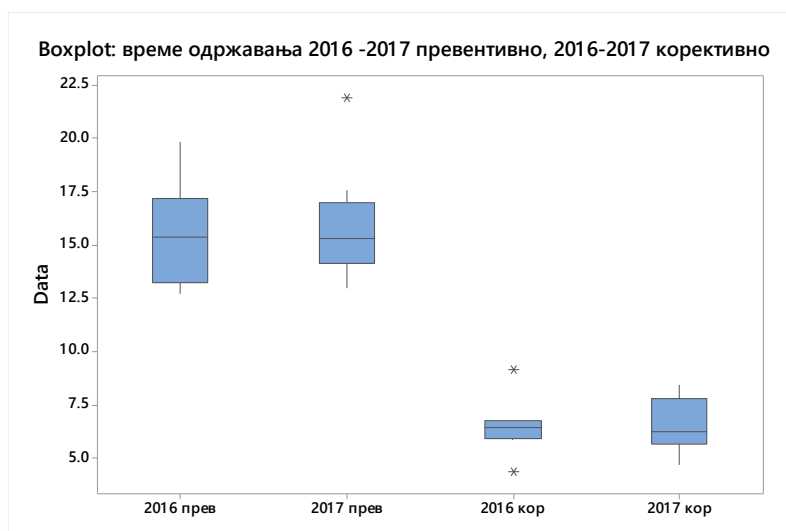
Ако би разматрали модел који је подешен према стварним параметрима (подаци из историје одржавања), могу да се релативно лако одреде релевантни фактори који негативно или позитивно утичу на успешност одржавања. Могуће је релативно лако предложити и побољшања. Главно је питање, да ли тај и такав модел може бити употребљен за предвиђање будућег стања, односно тражи се одговор на питање да ли би модел био делотворан ако је потребно предвидети понашање система у 2017. години на основу података о понашању система у времену 2014.-2016. У досадашњем делу истраживања су коришћени записи о одржавању за период 2014.-2016. године, а записи из 2017. године се користе као контролни и за оцену способности модела да предвиди понашање система одржавања.

За изабрану јединицу („А“ бригада), а и за друге јединице, приказани су подаци о времену одржавања (слике 193-196), броју средстава у одржавању (слике 197-200) и законитост појава захтева за одржавање на сликама 201 и 202. У форми *Voxplot*, исти параметри су приказани из разлога да се сагледају промене ових параметара у времену, односно да се

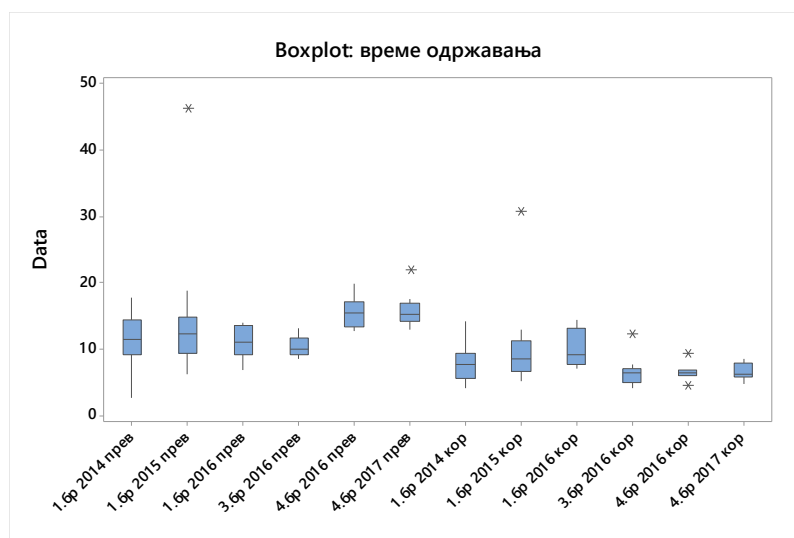
закључи понашање у времену и одлучи са колико поверења може да се претпостави будуће понашање система одржавања.



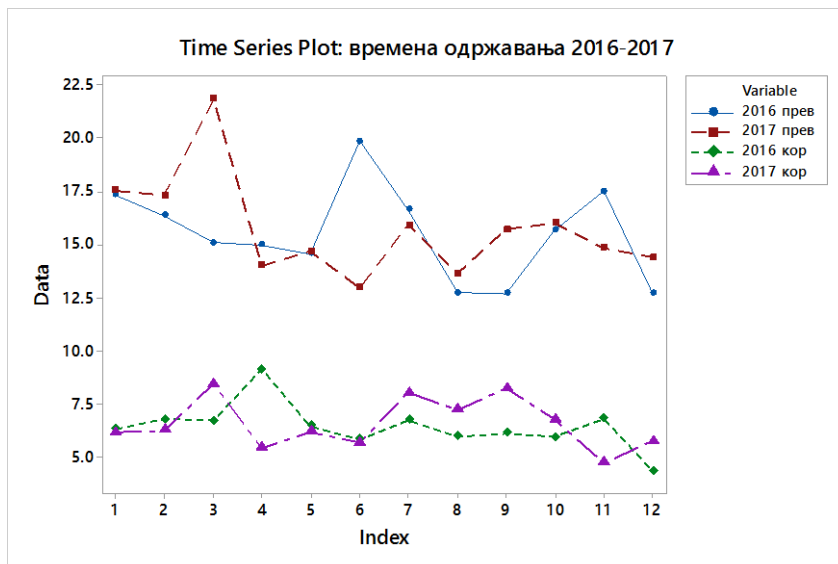
Слика 193. Дистрибуција времена одржавања у 2016. и 2017. години, „А“ бригада



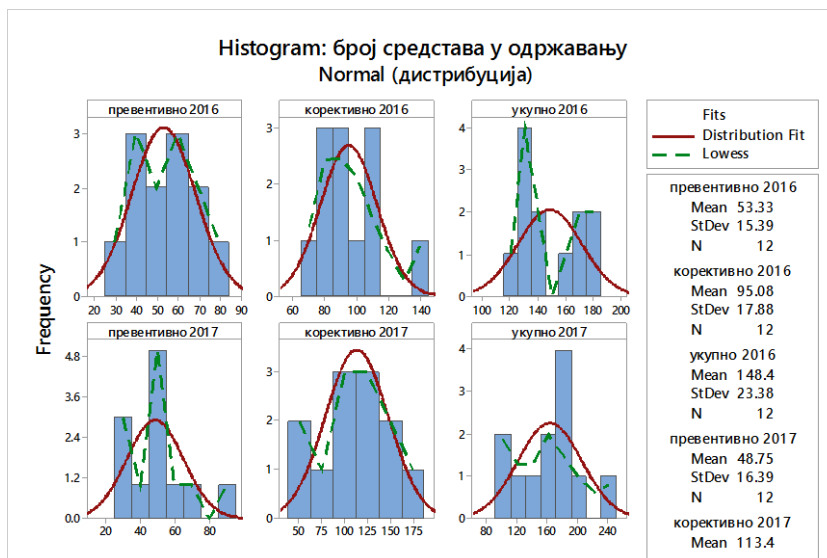
Слика 194. Време одржавања у 2016. и 2017. години у форми Boxplot, „А“ бригада



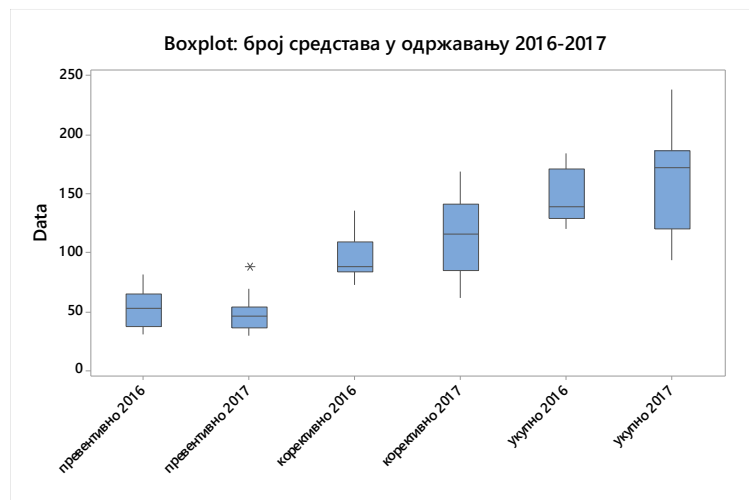
Слика 195. Време одржавања за више јединица



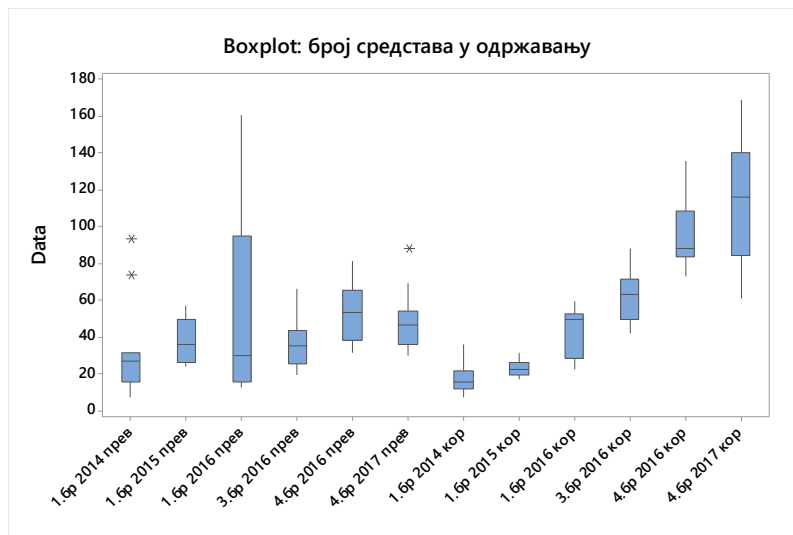
Слика 196. Време одржавања по месецима



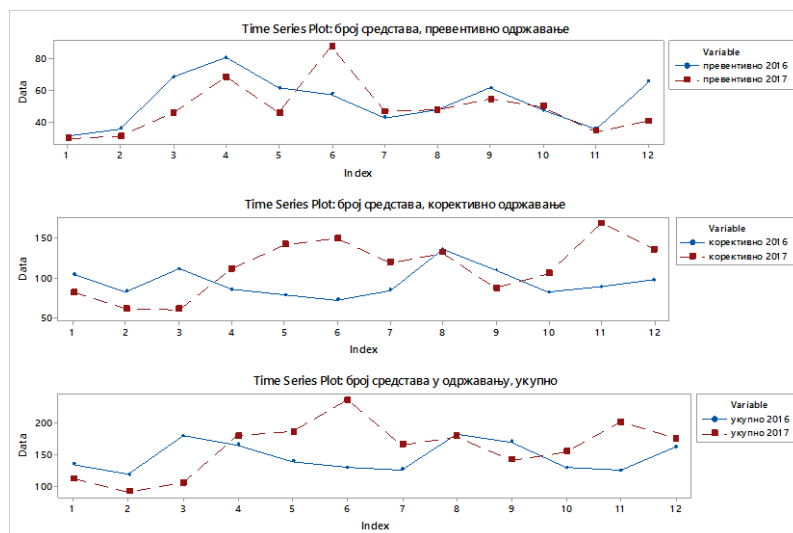
Слика 197. Дистрибуција броја средстава у одржавању, „А“ бригада



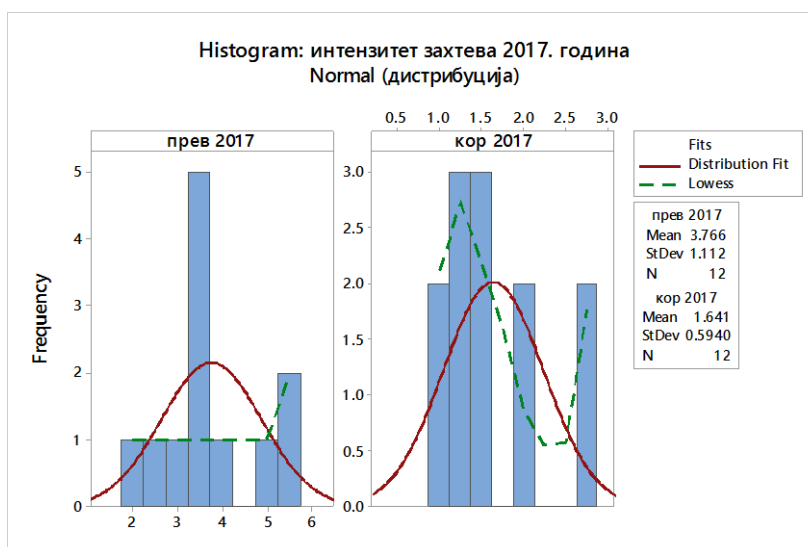
Слика 198. Број средстава у одржавању у 2016. и 2017. години у форми Вохplot, „А“ бригада



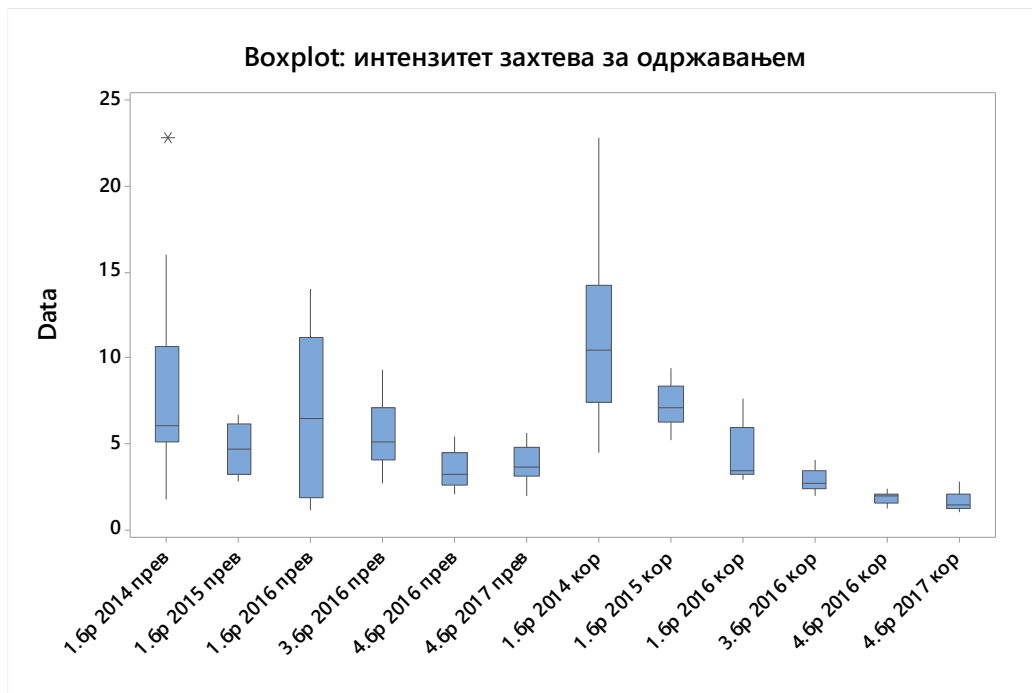
Слика 199. Број средстава у одржавању за више јединица



Слика 200. Број средстава у одржавању по месецима



Слика 201. Интензитет захтева за одржавањем, 2017. година, „А“ бригада



Слика 202. Интензитет захтева за одржавањем, више јединица

### Тест валидности модела

Циљ је да се провери да ли дизајнирани модел може да се употреби за оцену понашања или предвиђање понашања система одржавања једне организационе јединице одржавања на основу постојећих података и провери тачност упоређивањем са стварним подацима. Већ је напоменуто да су подаци из 2017. године употребљени за контролу.

Сценарио је следећи:

Параметри модела према подацима за 2016. годину су према варијанти 1 Плана експеримента. Разрађено је 5 (додатних) варијанти.

Упоредно значење слика 203-208, респективно графикони 1 до 5 на свакој слици, је следеће: 1) „стварно стање 2016.“; 2) „прогнозирано стање 2017.“ са стварним (рецимо претпостављеним) бројем захтева који су стварни у 2017., и времена одржавања по законима из 2016.; 3) „стварно стање у 2017.“, стварни број захтева, стварна учесталост појава и стварна времена одржавања; 4) „стварно стање 2017. године“ и уважена препорука оптимизације (додат један механичар у радионицу 1); 5) „велики поремећај“, почетно стање као под 4, са циљем провере реакције система одржавања на изненадне захтеве.

Параметри су дати како следи.

1) Радионица 1: број захтева за превентивно одржавање 640, број захтева за корективно одржавање 1140, радионица 2: број захтева за одржавање 510.

*Резултат:* Радионица 1: успешно 630 захтева за превентивним одржавањем, 975 захтева за корективним одржавањем; реализовано 10 захтева за помоћ на терену („слање капацитета“) радионици 2, радионица 1 је „преузела“ 18 средстава за одржавање из радионице 2.

2) Под истим условима, провера успешности за стварне захтеве у 2017. години: број захтева за превентивно одржавање 585, број захтева за корективно одржавање 1361, радионица 2: број захтева за одржавање 510. Закони расподеле времена одржавања као у 2016.

*Резултат:* Радионица 1: успешно 552 захтева за превентивним одржавањем, 1118 захтева за корективним одржавањем; реализовано 10 захтева за испомоћ на терену („слање капацитета“) радионици 2, радионица 1 је „преузела“ 12 средстава за одржавање из радионице 2.

3) „стварно стање у 2017.“, стварни број захтева, стварна учесталост појава и стварна времена одржавања.

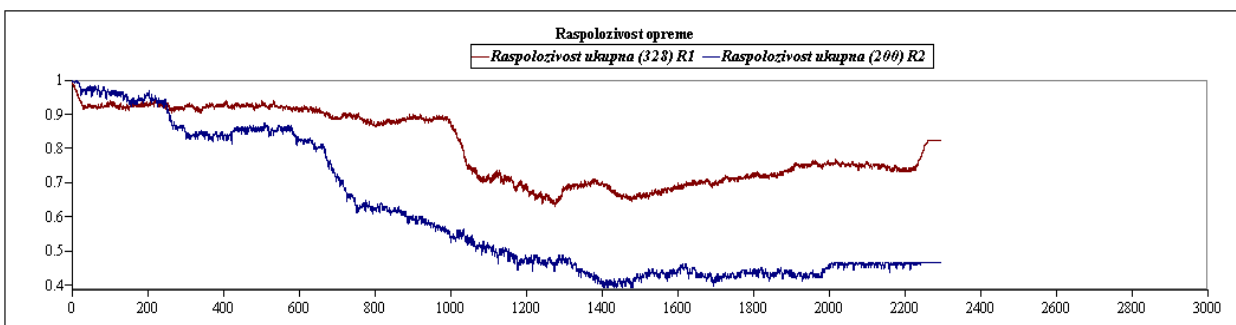
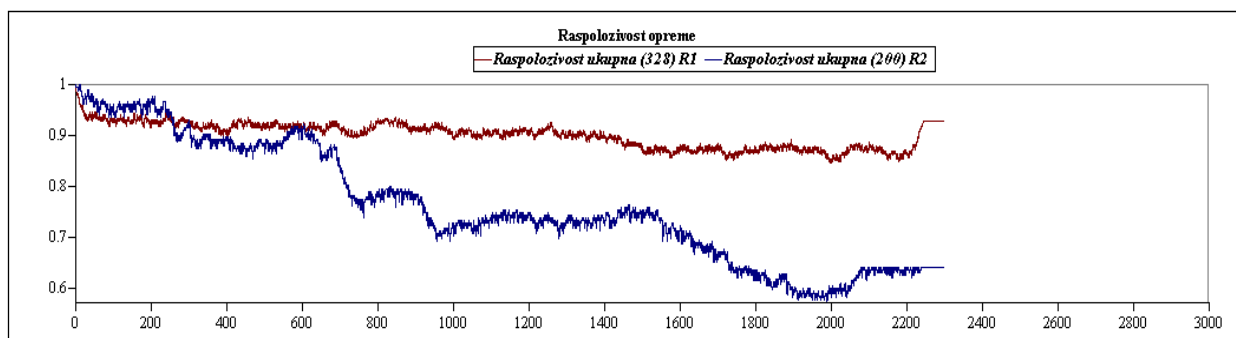
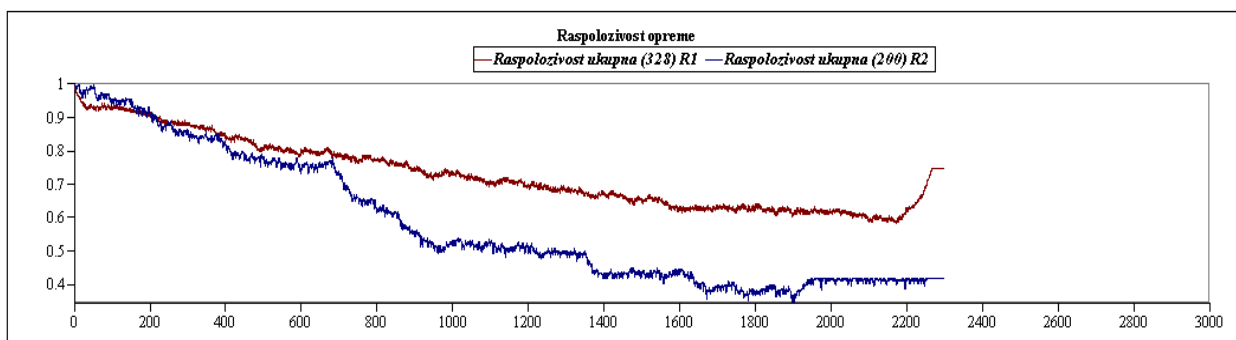
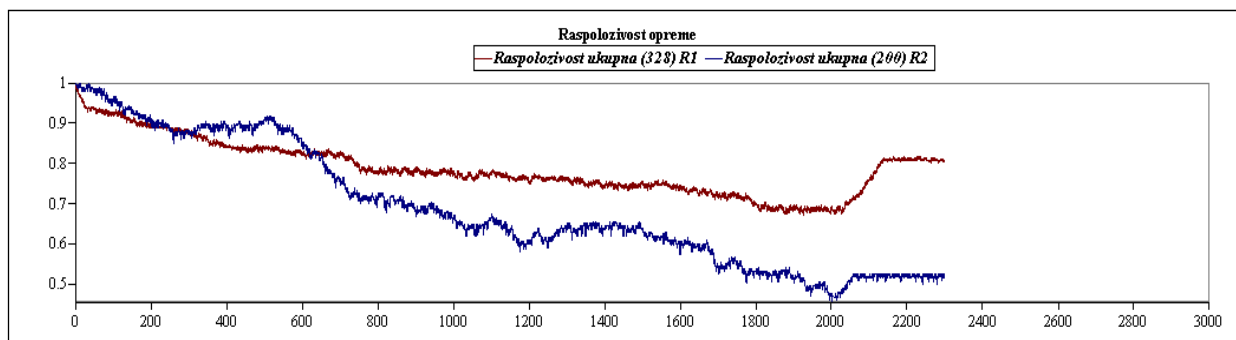
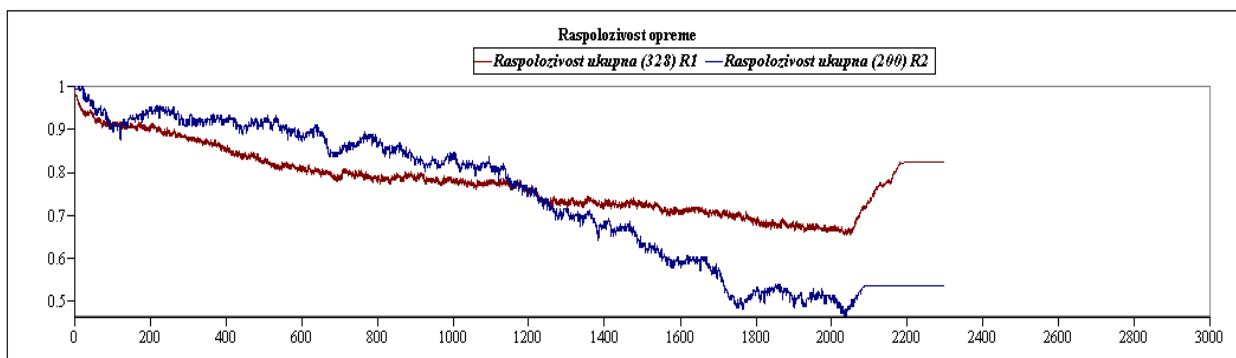
*Резултат:* Радионица 1: број захтева 585/успешно 560 захтева за превентивним одржавањем, 1361 захтева за корективним одржавањем/успешно 1148; реализовано 15 захтева за испомоћ на терену („слање капацитета“) радионици 2, радионица 1 је „преузела“ 19 средстава за одржавање из радионице 2.

4) као под 3, додат 1 механичар у радионици 1 (преорука оптимизације).

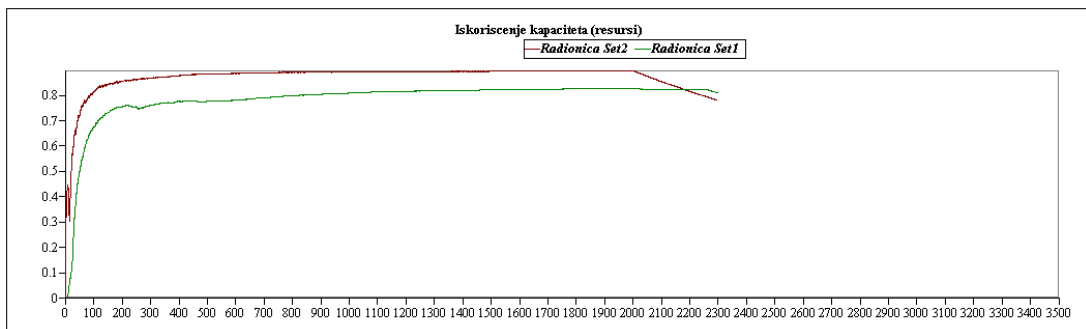
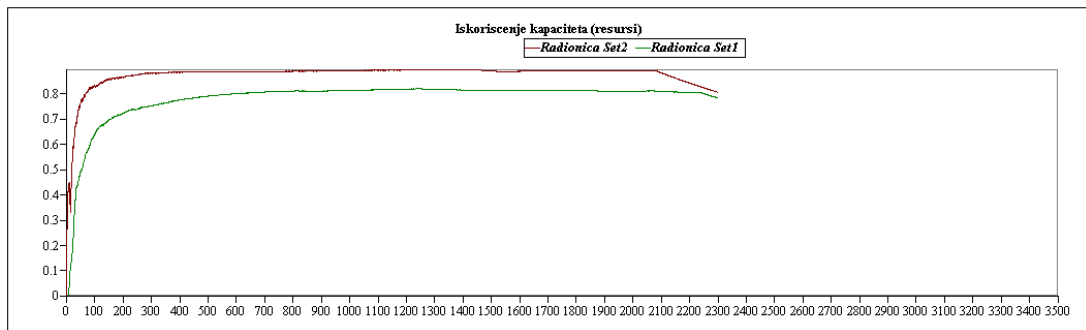
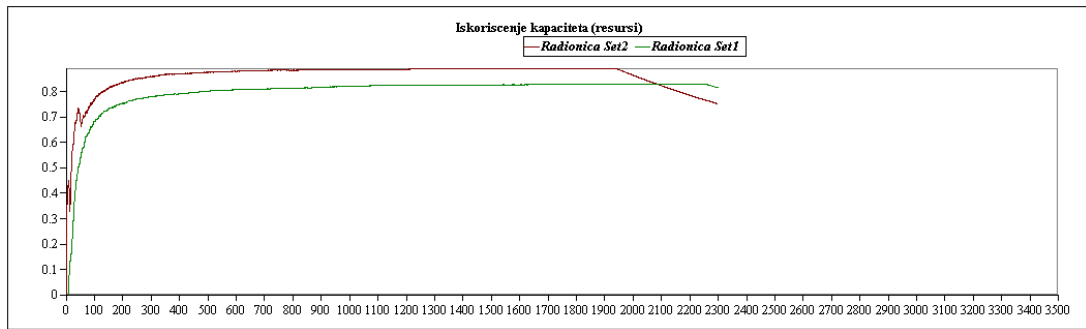
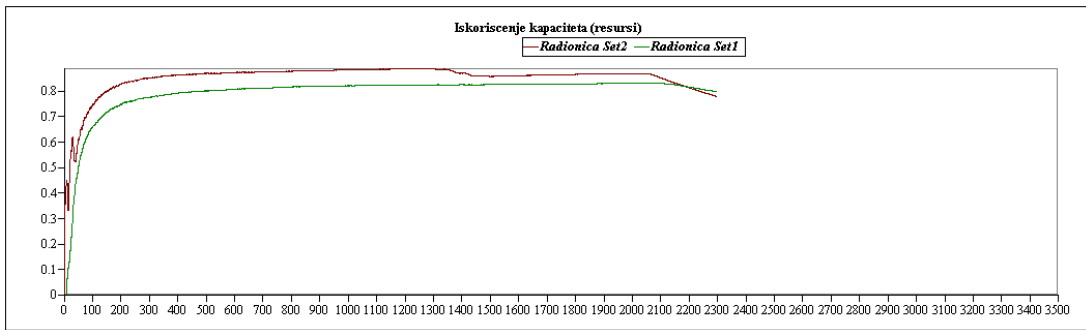
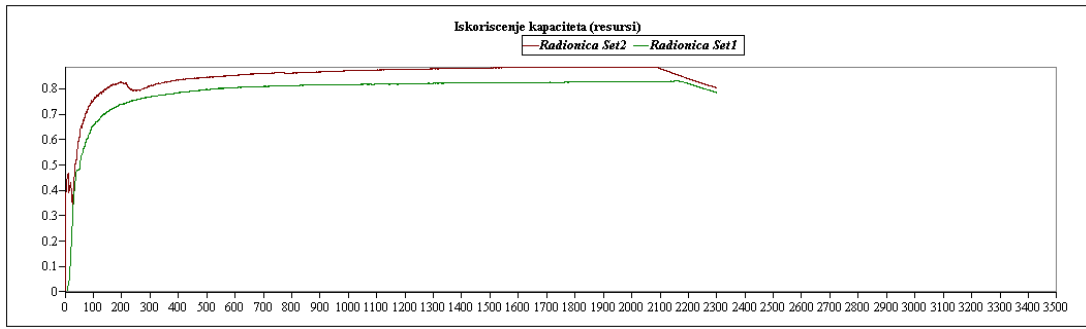
*Резултат:* Радионица 1: број захтева 585/успешно 565 захтева за превентивним одржавањем, 1361 захтева за корективним одржавањем/успешно 1375 (преузето 14 из радионице 2); реализовано 5 захтева за испомоћ на терену („слање капацитета“) радионици 2, радионица 1 је „преузела“ 14 средстава за одржавање из радионице 2.

5) као под 4, „утицај поремећаја од 200 захтева за одржавањем, 1/3 превентивно, 2/3 корективно), у тренутку  $t=1000$ .

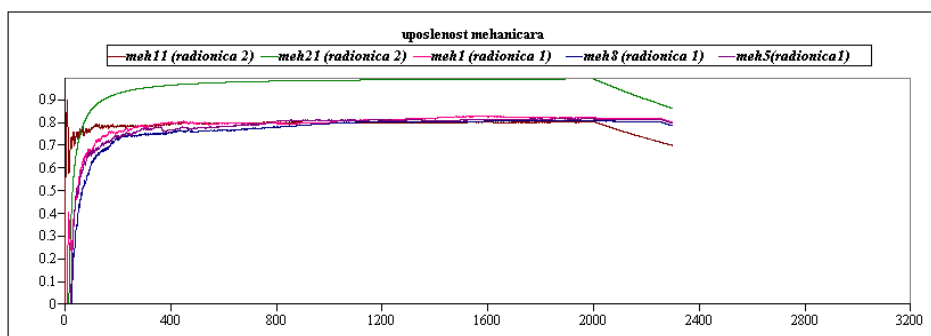
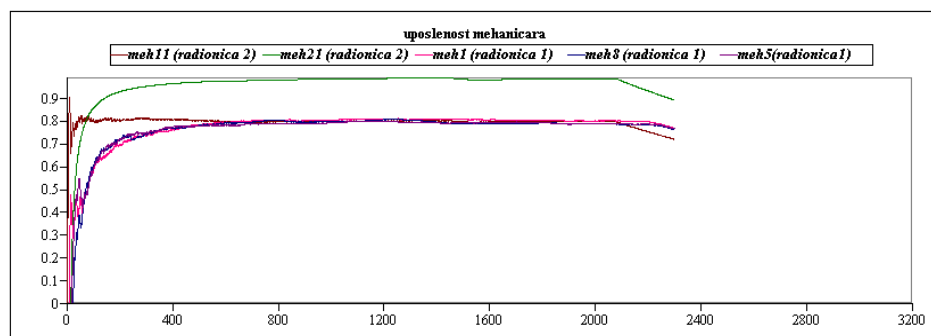
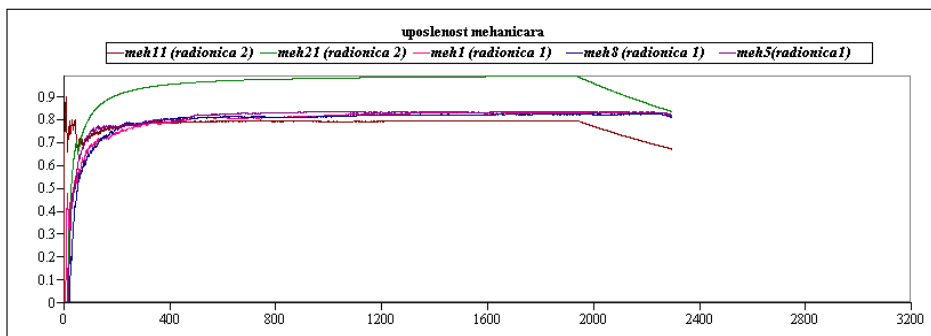
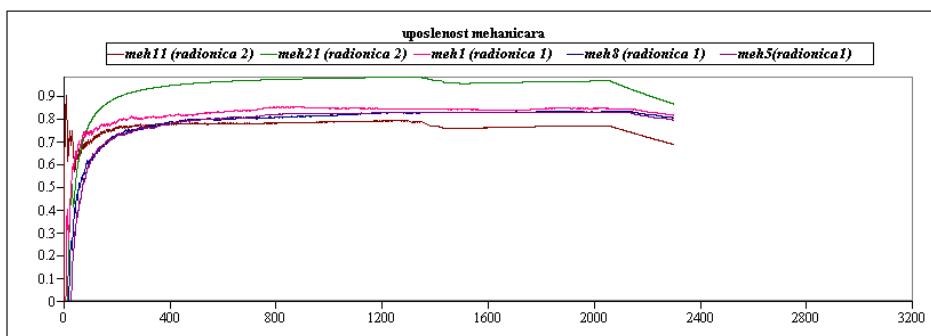
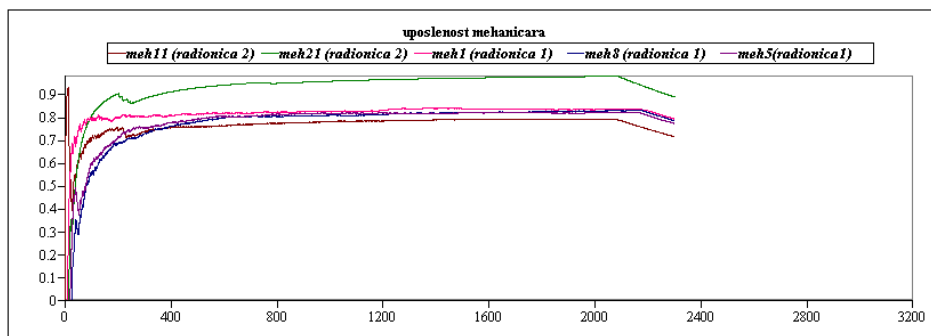




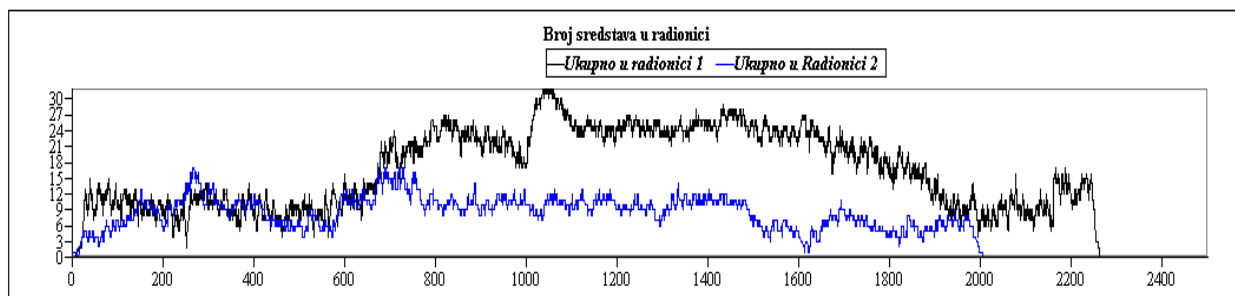
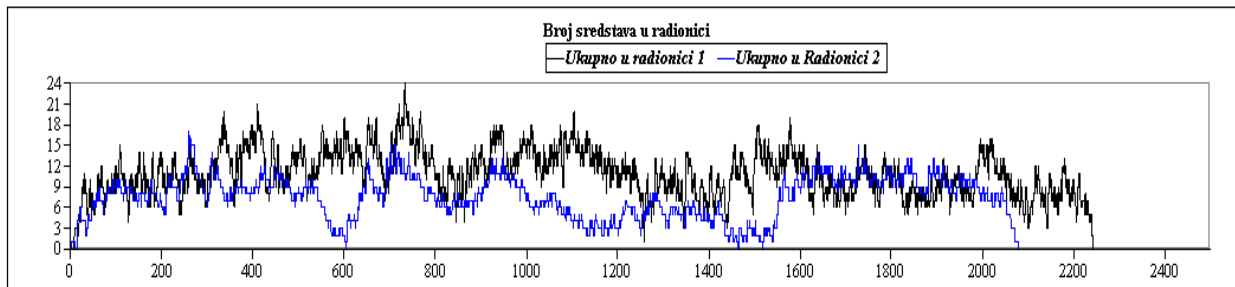
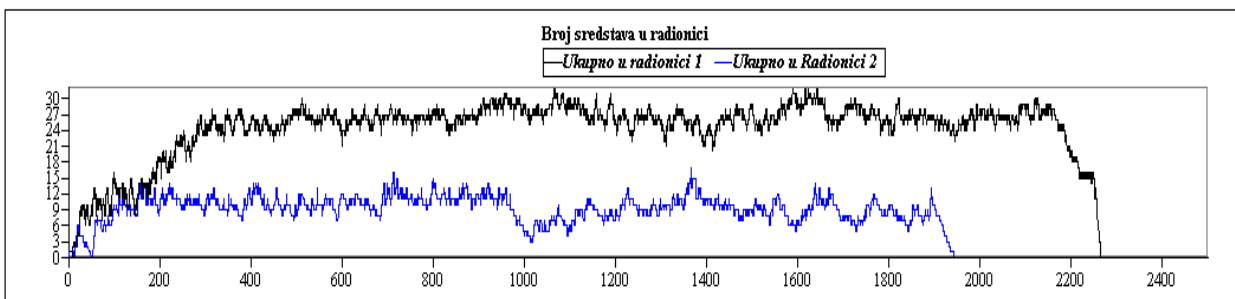
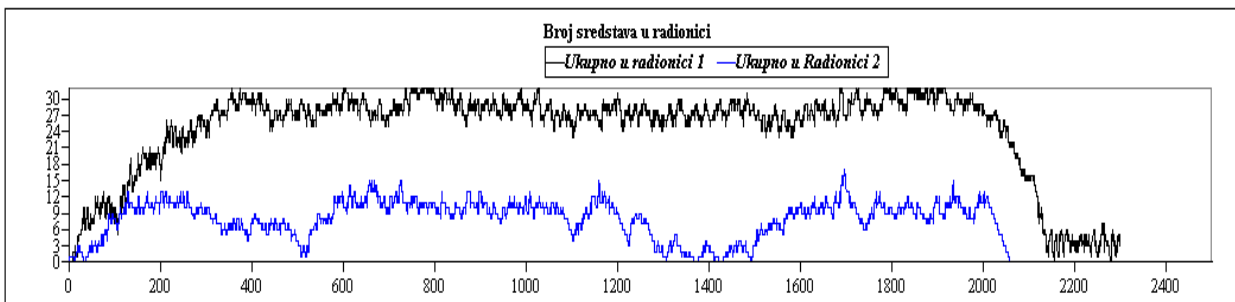
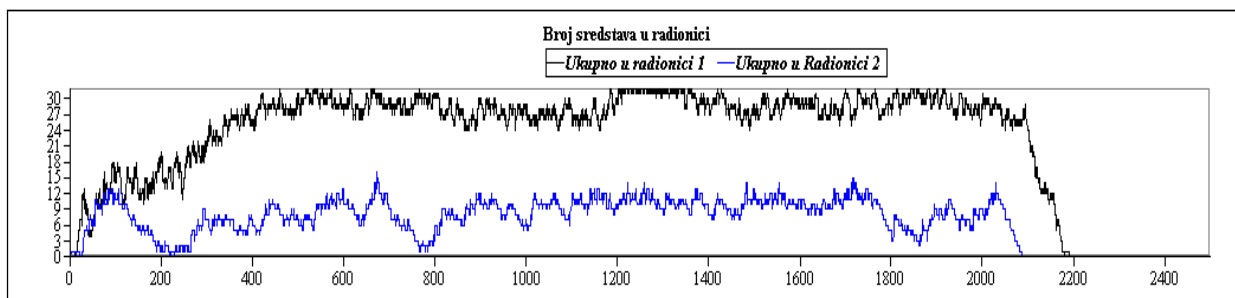
Слика 203. Показатељи расположивости опреме



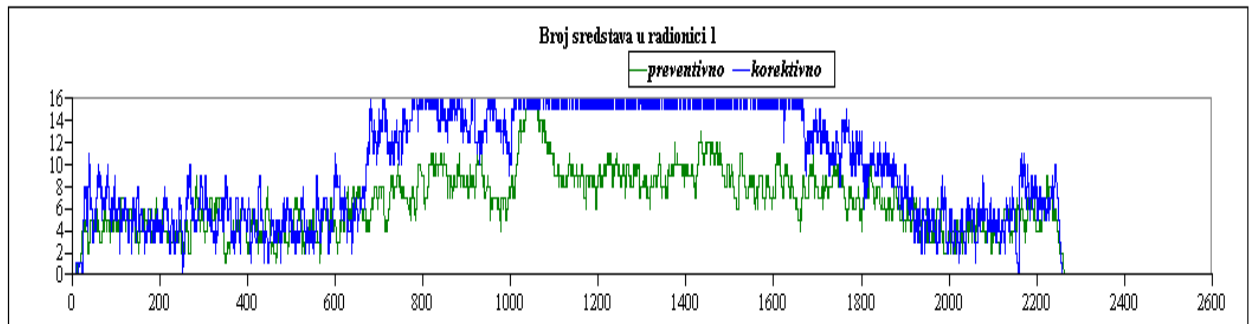
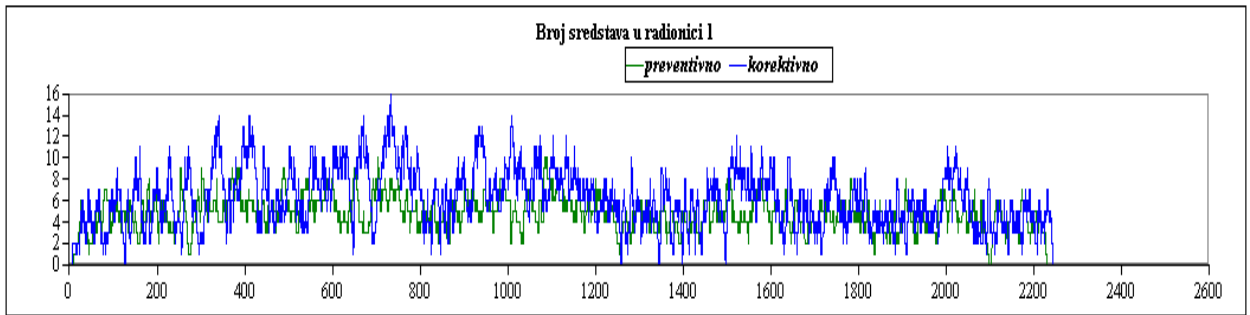
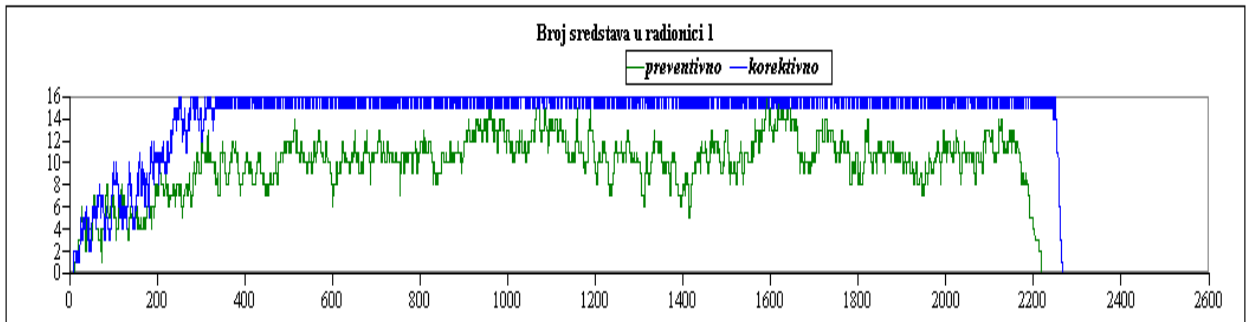
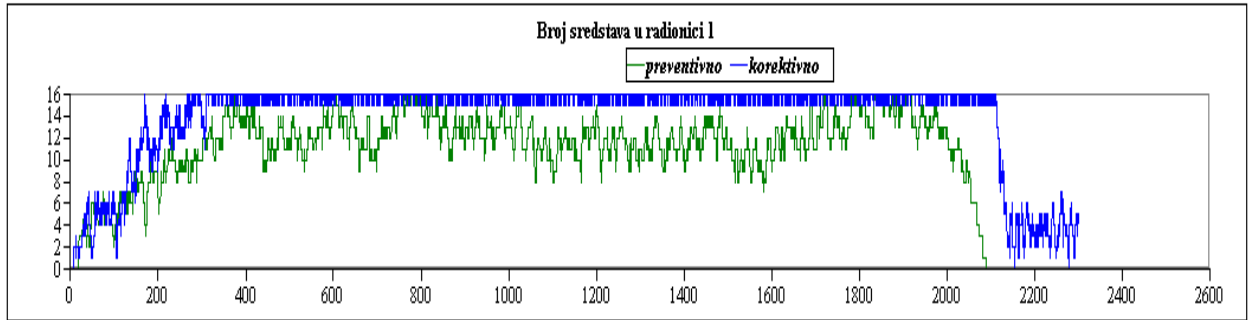
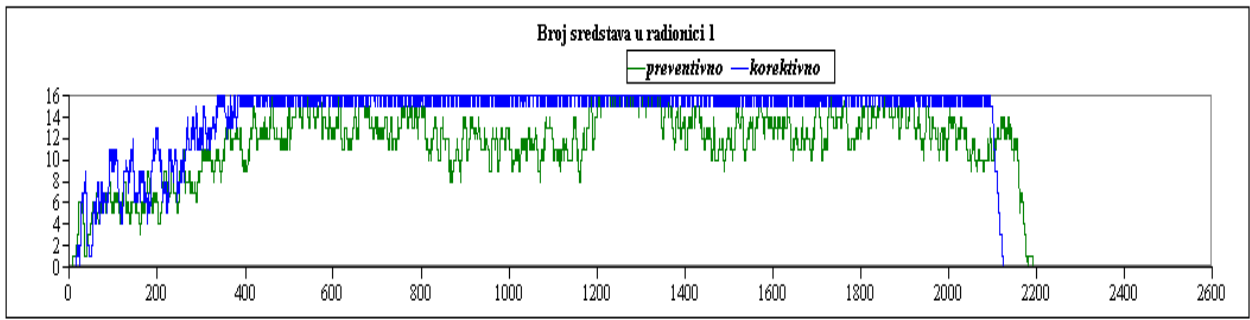
Слика 204. Показатељи искористићења капацитета у радионици



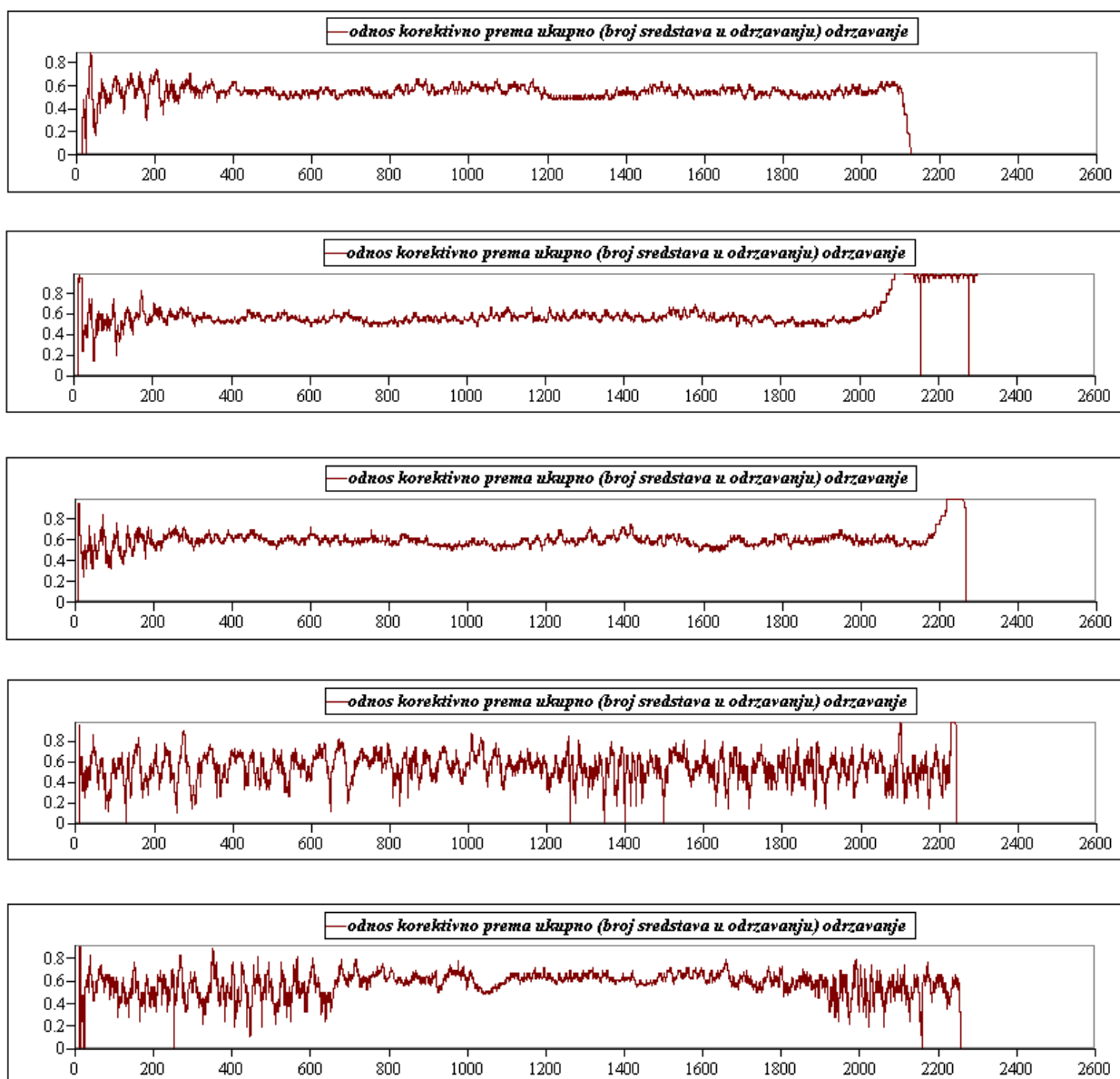
Слика 205. Показатељи искоришћења капацитета појединачно за механичаре



Слика 206. Број средстава у радионици (радионица 1 и 2)



Слика 207. Број средстава у радионици 1



Слика 208. Показатељ однос броја средстава корективно одржавања/укупно у одржавању

На основу резултата, нарочито приказаних на слици 203 и 208 (други и трећи график), *може да се закључи да се дизајнирани модел може употребити за предвиђање стања понашања система одржавања са великим поверењем*. Мора се уважити да су се захтеви за одржавањем променили за 166 у односу на почетне параметре, што је разлика од 9,3%.

## Дискусија

Специфична анализа сложеног система одржавања је извршена свеобухватним приступом. У првој фази је извршено мерење перформанси система одржавања да би се сагледало његово понашање са аспекта стабилности и способности. Показаће се да је ова фаза дала изванредне показатеље за наредне фазе, а то су законитости различитих појава у систему одржавања, било да су законитости изведене из узорка или су изведене на основу целог скупа података. Следећа фаза, израда модела система одржавања и симулација, омогућила је реконструкцију понашања система и сагледавање детаљније слике о стању и понашању система и објективну оцену утицајних фактора на успешност одржавања. У овој фази је могућа и оптимизација система. Тиме су створени објективни услови за унапређење или

побољшање система одржавања, ако се примене резултати, односно препоруке, проистекле из истраживања. Из истраживања је проистекао општи модел за унапређење система одржавања који се састоји из 4 фазе: **измери, моделуј и симулирај, унапреди, предвиди.**

Оптимизација било ког процеса је захтеван задатак, нарочито реалних процеса који су комплексни. Примењен је концепт *оптимизација помоћу симулација*. Овакав приступ се сусреће са неколико важних проблема а то су: параметри модела односно варијабле које се мењају током симулације се често процењују са недовољно прецизности и тачности; потребно је знатно време за извршење симулације и истовремено оптимизације; комплексна логика модела је тешка за дизајн и разумевање.

Развијени симулациони модел је флексибилан, универзалан, проширив и способан да се примени уз разне сценарије: различити захтеви за одржавање, различит број и врсте опреме за одржавање, различити ресурси за одржавање, различите стратегије одржавања итд. Функционалност модела је демонстрирана кроз посебну студију. Симулациони модел је коришћен за експериментисање. Изабрани су само неки показатељи успешности система одржавања за оцену система, али је демонстрирано да ту практично нема ограничења, тј. критеријуми успешности се могу дефинисати у складу са потребама. Целокупна метода евалуације система одржавања применом *SPC* стратегије и стратегије примене моделовања система и симулације је способна да буде евалуациони алат, оптимизациони алат, алат за подршку одлучивању и алат за предикцију понашања система у будућности.

Истраживањем уз примену статистичке контроле процеса и моделовања и симулације је обухваћен широк спектар опреме по броју и врсти. Обухваћени су и различити организациони састави који су корисници опреме и имају своје системе одржавања. Из скупа опреме, издвојена је једна група која је детаљно анализирана. Модел одржавања је дизајниран за ту групу опреме, али је потпуно примењив на било коју другу, уз адекватна подешавања параметара. Експериментисање се односи на једну организациону јединицу одржавања, али ако се модел једноставно мултиплицира, онда може да репрезентује цели систем одржавања, укључујући и интерконеције између организационих јединица одржавања. Посебна вредност модела и симулације је што се динамички квантификују утицајни фактори који се тичу система одржавања. Нестационарност процеса одржавања и карактеристике захтева за одржавање се боље и лакше сагледавају применом ових методологија, за разлику од класичних прегледа исправности или ангажовања радне снаге. Идентификовани проблеми се онда требају решавати применом одговарајућих поступака. На пример, недостатак радне снаге се може превазићи применом савремених, бржих и економичних поступака одржавања ако постоје. Примена нових технологија (површинска заштита, нано технологије, адитиви за уља и горива и др.) могу бити правац за решавање оваквог проблема и чак могу да умање учесталост захтева за одржавањем. Примена квалитативних методологија за унапређење одржавања нарочито на првом нивоу одржавања (корисници опреме) такође могу да унапреде процес одржавања. Квалитетан информациони систем може да рангира неисправности по врсти и интензитету и да се онда предузму корективне мере, чиме се коначно може смањити укупан број захтева за (корективним) одржавањем.

### **Закључци:**

- Висока средња расположивост се постиже када је искоришћење ресурса 0,65-0,85;
- Искоришћење ресурса преко 0,9 није уједно и показатељ високе расположивости, већ напрезања ресурса (загушење система) и тада било која грешка у планирању или застој у снабдевању резервним деловима утиче на значајан пад расположивости;
- Удаљеност средства које је потребно одржавати до капацитета за одржавање не утиче критично на општу расположивост у великом систему, уз услов да се одржавање и

транспорт економично планирају;

- Лоша логистика (обезбеђење резервних делова) утиче на велики пад расположивости;
- Велики је значај ресурса, губици у ресурсима од 10-15% (капацитета) умањују општу расположивост за више од 20%;
- Већи ресурси (већи број механичара) су толерантнији на непоузданост самих ресурса;
- Превентивно одржавање има мање варијација у броју комада у току године и времену трајања одржавања;
- Различит је интензитет захтева за одржавањем између организационих јединица које користе опрему (и имају своје системе одржавања) и успешност њихових система одржавања.

Почетне претпоставке у виду хипотеза су јасно и недвосмислено доказане. Детаљна теоретска разматрања су послужила као темељ за избор правца истраживања који није могао бити само интуитивна претпоставка или склоност аутора. У циљу провере актуелности, научне заснованости и оригиналности истраживања, дати су детаљнији прегледи теорије одржавања, без обзира што та област еволуира и нема радикалних промена или унапређења. Затим је редом следило сагледавање актуелних истраживања на пољу мерења перформанси одржавања, концепта квалитета у пословним процесима и пословних процеса као универзалне платформе за опис, дизајн или редизајн процеса који је предмет истраживања. Научној заснованости и оправданости примене оптимизационих поступака и нарочито симулационе технике дат је посебан значај. Ове области се у раду неумитно непрекидно преплићу и тешко је било издвојити их у одвојена поглавља. Последично, две примењене стратегије истраживања не следе као поглавља једна другу, већ се појављују након детаљног образлагања основаности примене.

Анализом доступне литературе није нађено да је до сада примењен овакав концепт, односно да истраживање обухвати овако велику организацију по броју и врсти средстава која се одржавају. Постоје у математичко-аналитичком смислу веома квалитетни радови у области одржавања, али се мора констатовати да су изузетно апстрактни или да су проблеми сведени на екстремно мали узорак проблема.

Овај рад односно истраживање се природно сврстава у квантитативне технике за побољшање стања односно решавање проблема. Ипак, мора се констатовати да и квалитативне технике као што је, на пример, концепт сталног побољшања применом филозофије *Тотално продуктивно одржавање* или *Lean* приступ имају велики значај и не губе на актуелности.

## Могућа побољшања

Дефинисани симулациони модел је лако проширив и прилагодљив. Студија на бази једне јединице војске или било које организације (производња, услуге) није лимитирана само на тај субјекат, односно нема препрека да се модел мултиплицира, прилагоди, „обогати“, конкретизује или унапреди. Потребна су само специфична подешавања параметара модела. Развијени општи модел за унапређење система одржавања дефинисан као: *измери, моделуј и симулирај, унапреди, предвиди* је уједно и доказ о достизању циља овог истраживања.



## 9. Закључак и правци даљих истраживања

### 9.1. Закључак

Војни програм свеобухватног управљања средствима базиран је на реалности да ће задаци управљања и одржавања све старијом опремом у будућности бити све захтевнији и изискивати све веће капиталне инвестиције. Зато се одлучно мора спровести интелигентно, дугорочно стратешко планирање са циљем паметног инвестирања у продужење корисног животног века опреме. Неопходан предуслов успешне и прилагодљиве стратегије управљања средствима је утврђивање њиховог стварног стања и функционалне поузданости, као и идентификовање ризика и последица лоших перформанси или квара. Исто важи и за систем одржавања који је задужен за опрему.

Одржавање сложених техничких система обухвата поступке који се предузимају с циљем да системи буду што дуже у исправном, односно функционалном стању, које се још назива и „стање у раду“, да током животног циклуса раде на потребном нивоу поузданости и да свој животни век заврше безбедно. Одржавање је веома сложен проблем који, да би био решен у потпуности, захтева детаљну анализу могућих извора отказа у свим фазама развоја и експлоатације система, од дефинисања и пројектовања, преко развоја прототипа, израде система, уградње и експлоатације у реалним и безбедним условима, што подразумева системски приступ.

Потреба за усавршавањем и побољшањем постојећег система одржавања настала је као последица научних достигнућа из области превентивног инжењерства и инжењерства одржавања, технолошког развоја објеката одржавања, развоја технолошких елемената примењених у одржавању, развоја система квалитета као посебне научне дисциплине, као и жеље за повећањем готовости и смањења укупних трошкова одржавања, стварањем безбедних услова рада у радној и животној средини.

Технички системи су, у току животног века, подложни настанку отказа. Ова чињеница, указује на потребу да се зна, колико дуго могу да раде а да не откажу. Техничке системе потребно је пројектовати тако да што мање отказују, а ако и откажу, да не представљају опасност по кориснике и да не произведу штету, уколико им привремено нестану функционалне способности. Затим да их је могуће за што краће време и што једноставније поправити. Поставља се питање, да ли је циљ одржавања да отклони могућност појаве свих потенцијалних отказа, или само да превентивно утиче на њихову појаву. Одговор на постављено питање представља екстремно тумачење циљева стратегије - тотално продуктивно одржавање или жеља руководства да послује са системима без отказа у току експлоатације, односно да систем свој животни век заврши безбедно. У војним системима, поготово у изразито техничким, недовољна поузданост и безбедност могу да имају катастрофалне последице по готовост техничких система и извршавање задатака за које су намењени, као и за људство које њима рукује. Потпуно исти принципи важе за индустрију производње, добијања енергије, транспорт и др.

Управо су ова питања и проблеми, предмет теорије поузданости, теорије погодности за одржавање, теорије безбедности и теорије одржавања. Одржавање прате значајни трошкови. Поузданост и погодност за одржавање се разматрају у свим фазама животног циклуса техничких система, у пројектовању, производњи и експлоатацији. Примарни проблем није да се по сваку цену спречи појава отказа техничког система, већ како да се

избегну последице које тај отказ изазива у појединим карактеристичним случајевима, а то се постиже одржавањем.

Одржавање није само себи циљ, већ је то отклањање штетних последица које отказ техничког система или неког његовог дела може да нанесе конкретном техничком систему и послужоцима. Да би се ово постигло, технички систем током периода експлоатације мора да испуњава предвиђене функције, са задовољавајућим нивоом поузданости и погодности за одржавање.

Поузданост и погодност за одржавање, су различите али и комплементарне особине сложених техничких система. Поузданост се односи на способност техничког система да ради без отказа или значајнијег опадања карактеристика, у току одређеног периода времена. Погодност за одржавање се везује за време отклањања отказа, или време обављања других поступака одржавања, као и за примену мера безбедности, у току обављања тих поступака. Заједно, карактеристике поузданости и погодности за одржавање техничких система одређују оперативну готовост, односно оперативну расположивост и омогућавају одговарајућу ефективност техничког система у извршавању специфицираних задатака. Значај карактеристика погодности за одржавање је у доприносу смањењу времена застоја и повећању расположивости техничких система. Задатак погодности за одржавање је да обезбеди максималну оперативну готовост, на такав начин да се технички систем одржава, у најкраћем времену у складу са осталим захтевима, уз минималан утрошак материјалних и кадровских ресурса у процесу одржавања.

Пројектанти, корисници и одржаваоци, у свим наведеним фазама, морају да раде заједно, како би решили проблем утицаја фактора конструкције техничких система, који нису засновани само на уграђеним карактеристикама, него и на условима окружења. Унапређења треба да доведу до усвајања поступака одржавања, којима ће се смањити број отказа како у постојећим, односно већ коришћеним, тако и у системима који су на почетку животног циклуса. При свему томе треба знати, да се промене не могу уводити у системима који „нису спремни“ за њих. Пре увођења побољшања одржавања неопходно је усавршити постојећи систем планирања радњи одржавања, развити информациони систем и увести систем за објективно оцењивање успешности рада и ефикасности самог процеса одржавања.

Примена техника моделовања система и симулације је један од начина за свестрану анализу понашања система одржавања, нарочито сложених система. Када се сагледају утицајни и доминантни фактори који позитивно или негативно утичу на понашање система, могу да се предузму конкретне акције у технолошком, организационом или неком другом пољу како би се систем унапредио.

## 9.2. Правци даљих истраживања

Предлог даљих истраживања треба да има неколико праваца, а у овом случају то су:

### а) Посебни правци истраживања, повезани са овим истраживањем:

1. Унапређење методологија за мерење перформанси система у сложеним системима одржавања;
2. Разрада симулационих модела према конкретним проблемима;
3. Идентификација фактора који утичу на скраћење времена одржавања:
  - идентификација утицаја примене савремених дијагностичких алата/опреме који скраћују време задржавања средстава у радионици (у превентивном и корективном одржавању);

- квантификација и квалификација нових технологија у одржавању која скраћују време задржавања средстава у радионици;
  - радикално унапређење метода управљања залихама резервних делова, материјала и репроматеријала;
  - унапређење планирања процеса одржавања;
4. Избор методологије за дигитализацију техничке документације која се користи у одржавању и методологије за израду техничких приручника и упутстава за одржавање у реалном времену заједно са увођењем опреме у употребу;
  5. Дефинисање захтева за примену, избор и имплементацију модерног информационог система одржавања, који ће омогућити оцену успешности система одржавања у реалном времену и примену различитих квалитативних и квантитативних оптимizacionих техника на основу записа о одржавању и *тотално управљање одржавањем*.

#### б) Општи правци истраживања:

1. Даља разрада примарног концепта *e-maintenance*;
2. Даља разрада и операционализација примене *Augmented Reality Applications* у одржавању;
3. Примена техника и технологија типа:
  - *Additive Manufacturing Technologies* - директне производне технологије, као комбинованог поступка дизајна и производње посебним методама (фото-очвршћавање, синтеровање, штампање и др.), које се одликују брзим дизајном (или копирањем постојећег), брзим развојем прототипа и производњом, што је посебно важно са аспекта обезбеђења резервних делова у одржавању;
  - *Industry 4.0* и *Internet of Things (IoT)*- интеграција класичних и савремених производних технологија са комуникационим и информационом технологијама са циљем да се задовоље појединачни захтеви, масовна серијска производња се ставља у други план;
  - *Non-destructive Evaluation (NDE)* технике у одржавању - неструктивне методе испитивања, дефектације и дијагностике директно могу допринети процесу одржавања, у свим активностима, укључујући превентивне прегледе, дијагностику, контролу поправке, интеграцију са напредним управљањем и одржавањем (по стању и др.).

### 9.3. Преглед научних доприноса у дисертацији

Развијен је и одређен моделско-симулациони оквир за оптимизацију сложеног система одржавања. Примењив је у пракси, у различитим системима одржавања. Развијени модел одржавања омогућава сагледавање понашања система одржавања, оцену ефикасности и ефективности одржавања, његово побољшање и оптимално одлучивање.

Модел се може лако прилагодити најсавременијим приступима у одржавању. На основу развијеног модела могуће је развијати већи број алтернатива одржавања.

## 10. Литература

1. A. Crespo **Marquez**, P. Moreu de Leon, J.F. Gomez Fernandez, C. Parra Marquez, M. Lopez Campos (2009). The maintenance management framework A practical view to maintenance management. *Journal of Quality in Maintenance Engineering* Vol. 15 No. 2, 2009 pp. 167-178.
2. **Abdessamad** Ait El Cadi, Ali Gharbi, Abdelhakim Artiba (2016). MATLAB/SIMULINK - VS- ARENA/OPTQUEST: OPTIMAL PRODUCTION CONTROL OF UNRELIABLE MANUFACTURING SYSTEMS. Proceedings of the 11th International Conference on Modeling, Optimization and Simulation - MOSIM'16, August 22-24.
3. Abdullah A. **Alabdulkarim**, Peter D. Ball, Ashutosh Tiwari (2013). Applications of Simulation in Maintenance Research. *World Journal of Modelling and Simulation* Vol. 9 No.1: 14-37.
4. Abdullah **Alrabghi**, Ashutosh **Tiwari** (2015). State of the art in simulation-based optimisation for maintenance systems. *Computers & Industrial Engineering* Volume 82: 167–182.
5. Abdullah Omar **Alrabghi** (2015). SIMULATION-BASED OPTIMISATION OF COMPLEX MAINTENANCE SYSTEMS [Dissertation].CRANFIELD UNIVERSITY-SCHOOL OF ENGINEERING, <https://www.cranfield.ac.uk>.
6. Abhinav **Saxena** (2007). Knowledge based Architecture for integrated Condition based Maintenance of Engineering Systems [Dissertation]. Georgia Institute of Technology, 2007.
7. Aditya **Parida** and Uday **Kumar** (2009). Maintenance Productivity and Performance Measurement. Handbook of maintenance management and engineering, 2009 Springer, ISBN: 978-1-84882-471-3
8. Aditya **Parida**, Uday Kumar, Diego Galar, Christer Stenström (2015). Performance measurement and management for maintenance: a literature review. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 21 Iss 1 pp. 2 – 33.
9. Adriaan **Van Horenbeek**, Liliane **Pintelon** (2014). Development of a maintenance performance measurement framework—using the analytic network process (ANP) for maintenance performance indicators election. *Omega* 42:33–46.
10. Ahmed E. **Haroun**, Salih O. **Duffuaa** (2009). Maintenance Organization, Handbook of maintenance Management and Engineering, ISBN 978-1-84882-471-3.
11. Alessandro **Birolini** (2014). Reliability Engineering Theory and Practice. Springer-Verlag. ISBN 978-3-642-39534-5
12. Alexandre **Muller**, Adolfo Crespo Marquez, Benoit Iung (2008). On the concept of e-maintenance: Review and current research. *Reliability Engineering and System Safety* 93:1165–1187.

13. Alexandros **Bousdekis**, Babis Magoutas, Dimitris Apostolou, Gregoris Mentzas (2015). A proactive decision making framework for condition-based maintenance. *Industrial Management & Data Systems*, Vol. 115 Iss 7:1225 - 1250.
14. Ali **Rastegari**, Antti **Salonen** (2013). Strategic maintenance management: Formulating strategy. *Proceedings of the COMDEM 2013 11-13 june 2013, Helsinki*.
15. **Alrabghi A.**, **Tiwari A.** (2016). A novel framework for simulation based optimization of maintenance systems. *Int simul model* 15 (1):16-28.
16. Amik **Garg**, S.G. **Deshmukh** (2006). Maintenance management: literature review and directions. *Journal of Quality in Maintenance Engineering* Vol. 12 Iss 3: 205 – 238.
17. **Ämitava Mitra** (2008). *FUNDAMENTALS OF QUALITY CONTROL AND IMPROVEMENT*, ISBN 978-0-470-22653-7, 2008.
18. Andrew **Starr**, Basim Al-Najjar, Kenneth Holmberg, Erkki Jantunen, Jim Bellew, Alhussein Albarbar (2010). *Maintenance Today and Future Trends*. In: Jose Baptista, editor. *E-maintenance*. Springer, ISBN: 978-1-84996-9.
19. Anthony **Kelly** (2006). *Maintenance Systems and Documentation* 1<sup>st</sup> ed. Butterworth-Heinemann ISBN 13: 978 0 75 066994 8.
20. Antti **Puurunen**, Jukka Majava, Pekka Kess (2014). Exploring incomplete information in maintenance materials inventory optimization. *Industrial Management & Data Systems*, Vol. 114 Iss 1 pp. 144 – 158.
21. **Apte U.**, **Kang K.** (2008). *Lean Six Sigma for Reduced Cycle Time and Costs, and Improved Readiness*. In: *Lean Six Sigma: An Introduction*. Hyderabad, India: ICFAI, 2008. (107-127).
22. **Arts J. J.**, **Basten R. J. I.** (2016). Single-item models with minimal repair for multi-item maintenance optimization. (BETA publicatie: working papers; Vol. 513). Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven.
23. Atabak **Taher**, Iraklis Lazakis, Osman Turan (2014). Integration of Business and Technical Aspects of Reliability and Maintenance. *Proceedings of the ICMT2014, 7th-9th July 2014, Glasgow, UK*.
24. Björn **Haffke**, Riccardo Möller, Tobias Melz, Jens Strackeljan (2015). Validation of Simulation Models without Knowledge of Parameters Using Differential Algebra. *Mathematical Problems in Engineering*, Volume 2015, Article ID 793216, 9 pages.
25. **Boussaïd I.**, Lepagnot J., Siarry P. (2013). A survey on optimization metaheuristics. *Information Sciences*, 237, pp. 82-117.
26. Branislav **Jeremić**, Ivan Mačuzić, Petar Todorović (2007). STRATEGIJA ODRŽAVANJA TEHNIČKIH SISTEMA I KVALITET RADNOG MESTA I RADNE OKOLINE, 34. Национална конференција о квалитету Фестивал Квалитета, Крагујевац 08.-11.05.2007.
27. Branko **Davidović** (2005). SIMULACIONA TEHNIKA KAO ALAT ZA OBEZBEĐENJE KVALITETA U LOGISTICI. *Zbornik radova* 32. Nacionalna konferencija o kvalitetu, Kragujevac, 19-21.05.2005.
28. Catherine M. **Banks** (2010). *Modeling and Simulation Fundamentals: Theoretical Underpinnings and Practical Domains*. John Wiley & Sons ISBN 978-0-470-48674-0.
29. **CIBSE Guide** - Maintenance engineering and management (2008). [Online]: <https://www.breeam.nl/sites/breeam.nl/files/hulp/CIBSE%20Guide%20M.pdf,978-1-903287-93-4>
30. Claudia **Major** (2011). *Logistical Challenges in EU Military Operations*. German Institute for International and Security Affairs -Berlin, June 2011.

31. D. K. **Pace** (2004). Modeling and Simulation Verification and Validation. JOHNS HOPKINS APL TECHNICAL DIGEST, VOLUME 25, NUMBER 2.
32. Damjan **Maletič**, Matjaž Maletič, Boštjan Gomišček (2014). The impact of quality management orientation on maintenance performance. International Journal of Production Research, 2014 Vol. 52, No. 6, 1744–1754.
33. Damjan **Maletič**, Matjaž Maletič, Viktor Lovrencic, Basim Al-Najjar, Bostjan Gomiscek (2014). An application of analytic hierarchy process (AHP) and sensitivity analysis for maintenance policy selection. Organizacija, vol. 47, no. 3, pp. 177-188, No3 2014
34. David J **Smith** (2011). RELIABILITY, MAINTAINABILITY AND RISK, Elsevier, ISBN 978-0-08-096902-2
35. Davor B. **Vujanović** (2013). PRILOG RAZVOJU UPRAVLJANJA PROCESOM ODRŽAVANJA VOZNIH PARKOVA [Disertacija]. SAOBRAĆAJNI FAKULTET, UNIVERZITET U BEOGRADU.
36. Davor **Vujanović**, Vladimir Momčilović, Nebojša Bojović, Vladimir Papić (2012). Evaluation of vehicle fleet maintenance management indicators by application of DEMATEL and ANP. Expert Systems with Applications 39 (2012):10552–10563.
37. Dragan A. **Milošević** (2015). MODELI OBEZBEĐENJA POUZDANOSTI SLOŽENIH POSTROJENJA U TERMOELEKTRANAMA [Disertacija]. Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin“, Zrenjanin.
38. **Dunn S.** (2009). The fourth generation of maintenance. Plantmaintenance. [http://www.plantmaintenance.com/articles/4th\\_Generation\\_Maintenance.pdf](http://www.plantmaintenance.com/articles/4th_Generation_Maintenance.pdf). Pristupljeno 12.04.2017. godine
39. Ehsan **Lesani**, Habibollah **Javanmard** (2015). Evaluation of optimum maintenance and repair strategy by multi-criteria decisionmaking method in textile industry. Cumhuriyet University Faculty of Science Science Journal (CSJ), Vol. 36, No: 3 Special Issue (2015) ISSN: 1300-1949.
40. Elisabet **Wright** (2010). Defense Acquisition management: A Reader. US Naval Postgraduate Schools, ISBN 978-1-4502-2610-3.
41. Erkki **Jantunen**, Christos Emmanouilidis, Aitor Arnaiz and Eduardo Gilabert (2011). IFAC Proceedings Volumes, Volume 44, Issue 1, January 2011, Pages 453-458.
42. Fatma **Aksu**, Koen Vanhoof, Liesbet De Munc (2010). INTELLIGENT DECISION MAKING SYSTEMS – EVALUATION AND COMPARISON OF BUSINESS PROCESS MODELING METHODOLOGIES FOR SMALL AND MIDSIZED ENTERPRISES. 2010 IEEE International Conference on Intelligent Systems and Knowledge Engineering, Hangzhou, China, 15-16 Nov. 2010. DOI: 10.1109/ISKE.2010.5680772
43. Frederick S. **Hillier**, Gerald J. **Lieberman** (2001). Introduction to Operations research, McGraw-Hill, ISBN 0072321695.
44. Gholamreza **Esmailian**, Maryam Hamedi, Behnam Zandi Lak, Asghar Tahan (2015). Presenting an assessment model and prioritizing quality indices of maintenance by improving quality function development through Analytical Network Process. International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR) Volume-3, Issue-9.
45. Godfrey C. **Onwubolu**, B. V. **Babu** (2008). New Optimization Techniques in Engineering, ISBN 978-3-642-05767-0.
46. **Goossens A. M. J.**, **Basten R. J. I.** (2014). Exploring maintenance policy selection using the analytic hierarchy process : an application for naval ships. BETA publicatie : working papers; Vol. 464. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven.

47. Gopalakrishna **Palem** (2013). CONDITION-BASED MAINTENANCE USING SENSOR ARRAYS AND TELEMATICS. International Journal of Mobile Network Communications & Telematics ( IJMNCT) Vol. 3, No.3.
48. Goran **Petrović** (2013). Višekriterijumska optimizacija procesa održavanja tehničkih sistema primenom verovatnosnih metoda i veštačke inteligencije [Disertacija]. Mašinski fakultet Univerziteta u Nišu, Niš.
49. Goyal Ravi **Kumar**, Maheshwari **Kapil** (2013). Maintenance: From Total Productive Maintenance to World Class Maintenance. IJSRR 2013, 2(1), 1-23 ISSN: 2279-0543.
50. **Guizzi** G., Gallo M., Zoppoli P. (2009). Condition Based Maintenance: simulation and optimization. Proceeding of the 8th WSEAS International Conference on System Science and Simulation in Engineering, Cambridge UK, pp. 319-325.
51. Haifeng **Ge** (2010). MAINTENANCE OPTIMIZATION FOR SUBSTATIONS WITH AGING EQUIPMENT [Dissertation]. University of Nebraska at Lincoln, <http://digitalcommons.unl.edu/elecengtheses/7>.
52. Hasnida Abdul **Samat**, Shahrul Kamaruddin, Ishak Abdul Azid (2011). Maintenance Performance Measurement: A Review. J. Sci. & Technol. 19 (2): 199– 211 (2011), ISSN: 0128-7680 Universiti Putra Malaysia Press.
53. Hasnida Abdul **Samat**, Shahrul Kamaruddin, Ishak Abdul Azid (2011). Maintenance Performance Measurement: A Review. Pertanika J. Sci. & Technol. 19 (2): 199– 211.
54. Hasnida Ab-Samat, Shahrul **Kamaruddin** (2014), Opportunistic maintenance (OM) as a new advancement in maintenance approaches. Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 20 Iss 2 pp. 98 – 121.
55. J. **Zhang**, J. Zhuang (2015). Validation, Verification, and Uncertainty quantification for Models with Intelligent Adversaries. Handbook of Uncertainty Quantification, Springer International Publishing Switzerland 2015, DOI 10.1007/978-3-319-11259-6\_44-1
56. J.F.**Wang**, Peter W. Tse, L.S. He, RickyW. Yeung (2004). Remote sensing, diagnosis and collaborative maintenance with Web-enabled virtual instruments and mini-servers. Int J Adv Manuf Technol (2004) 24: 764–772.
57. J.M. **Simões**, C.F. Gomes, M.M. Yasin (2011). A literature review of maintenance performance measurement: A conceptual framework and directions for future research. Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 17 Iss: 2, pp.116 – 137.
58. Jaakko **Tättilä**, Pekka Helkiö, Jan Holmström (2014). Exploring the performance effects of performance measurement system use in maintenance process. Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 20 Iss 4 pp. 377 – 401.
59. Jan M. van **Noortwijk**, Dan M. Frangopol (2004). Deterioration and maintenance models for insuring safety of civil infrastructures at lowest life-cycle cost. In: D.M. Frangopol, E. Brühwiler, M.H. Faber, B. Adey, editors. Life-Cycle Performance of Deteriorating Structures: Assessment, Design and Management, pages 384-391, Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers (ASCE)
60. Jarmo **Alanen**, Kari Haataja, Otto Laurila, Jukka Peltola, Isto Aho (2006). Diagnostics of mobile work machines. ISBN 951-38-6799-4.
61. Javid **Koochaki**, Jos A.C. Bokhorst, Hans Wortmann Warse Klingenberg (2012). Condition based maintenance in the context of opportunistic maintenance. International Journal of Production Research Vol. 50, No. 23, 1 December 2012, 6918–6929.
62. Jianwen **Guo**, Zhenzhong Sun, Hong Tang, Xuejun Jia, Song Wang, Xiaohui Yan, Guoliang Ye, Guohong Wu (2016). Hybrid Optimization Algorithm of Particle Swarm Optimization

- and Cuckoo Search for Preventive Maintenance Period Optimization. *Discrete Dynamics in Nature and Society* Volume 2016, Article ID 1516271, 12 pages <http://dx.doi.org/10.1155/2016/1516271>
63. Jie **Xu**, Edward Huang, Chun-Hung Chen, Loo Hay Lee (2015). Simulation Optimization: A Review and Exploration in the New Era of Cloud Computing and Big Data. *Asia-Pacific Journal of Operational Research* Vol. 32, No. 3 DOI: 10.1142/S0217595915500190.
  64. Joao **Abreu**, Paula Ventura Martins, Silvia Fernandes, Marielba Zacarias (2013). Business Processes Improvement on Maintenance Management: a Case Study. *Procedia Technology* 9: 320 – 330.
  65. Juraj **Grencik** (2009). HARMONISATION OF MAINTENANCE PERFORMANCE INDICATORS. *DIAGNOSTYKA* 2(50)/2009
  66. K. **Mahmood**, T. Otto, E. Shevtschenko, T. Karaulova (2016). PERFORMANCE EVALUATION BY USING OVERALL EQUIPMENT EFFECTIVENESS (OEE): AN ANALYZING TOOL. *Proceedings of the International Conference on Innovative Technologies, IN-TECH 2016, Prague, 6.-8.9.2016.*
  67. K.G. **Papakonstantinou**, M. **Shinozuka** (2014). Optimum inspection and maintenance policies for corroded structures using partially observable Markov decision processes and stochastic Physically based models. *Probabilistic Engineering Mechanics* 37(2014):93–108.
  68. Karim **Charaf**, Huifang **Ding** (2015). Is Overall Equipment Effectiveness (OEE) Universally Applicable? The Case of Saint-Gobain. *International Journal of Economics and Finance* Vol. 7, No. 2.
  69. Liliane **Pintelon**, Alejandro Parodi-Herz (2008). Maintenance: An Evolutionary Perspective. *Complex System maintenance Handbook, 2008, ISBN: 978-1-84800-010-0*
  70. Lin **Qi**, Li Zhi (2013). Credibility Evaluation of Simulation Models. *Proceedings of the 2nd International Conference On Systems Engineering and Modeling ICSEM-13, 2013.*
  71. Lukáš **Hrčka**, Pavel Važan, Zuzana Šutova (2014). Basic Overview of Simulation Optimization. *Research Papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology, Volume 22, Issue 341, Pages 11–16, 2014, ISSN (Online) 1338-0532, DOI: <https://doi.org/10.2478/rput-2014-0001>.*
  72. Ljiljana **Radovanović** (2011). *METODOLOGIJE ODRŽAVANJA SA ASPEKTA NJIHOVE PRIMENE U INDUSTRIJI [Disertacija]. Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin“, Zrenjanin.*
  73. Manuel **Laguna** (2011). *OptQuest - Optimization of Complex Systems. OPTTEK SYSTEMS, INC.*
  74. **Martis** M.S. (2006). Validation of Simulation Based Models: A Theoretical Outlook. *The Electronic Journal of Business Research Methods* Volume 4 Issue 1, pp 39 -46.
  75. Mehdi **Vasili**, Tang Sai Hong, Napsiah Ismail, Mohammadreza Vasili (2011). Maintenance optimization models: a review and analysis. *Proceedings of the 2011 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Kuala Lumpur, Malaysia, January 22 – 24, 2011.*
  76. Metin **Öner** (2017). *JMASM 49: A Compilation of Some Popular Goodness of Fit Tests for Normal Distribution: Their Algorithms and MATLAB Codes (MATLAB). Journal of Modern Applied Statistical Methods* 16(2):547-575 doi: 10.22237/jmasm/1509496200
  77. Mira **Kajko-Mattsson**, Anita Mirijamdotter, Ramin Karim (2010). Fundamentals of the eMaintenance Concept. *Proceedings of the 1st international workshop and congress on eMaintenance 2010, 22-24 June, Luleå, Sweden, ISBN 978-91-7439-120-6.*



78. **Montgomery** Douglas C (2009). Introduction to Statistical Quality Control, Sixth Edition, John Wiley & Sons Inc., New York 978-0-470-16992-6.
79. Nasser Y. **Mahamoud**, Pierre Dehombreux, Marc Pirlot, Hassan E. Robleh (2015). Maintenance policy selection from a limited number of decision criteria A case study: an application of the ELECTRE II method for selecting the best maintenance policy for hydraulic couplings. Proceedings of the 11th CONGRES INTERNATIONAL DE GENIE INDUSTRIEL – CIGI2015 Québec, Canada, 26-28 octobre 2015.
80. Noemi **Jiménez-Redondo**, Sergio Escriba Marín, Francisco García Benítez, Noelia Cáceres (2013). Maintenance Performance Indicators (MPI) Measurement technologies. ACEM-Rail -265954, [2013/4/29]
81. O. **Ulgen**, J. Black, B. Johnsonbaugh, R. Klunge (2002). SIMULATION METHODOLOGY A PRACTITIONER'S PERSPECTIVE. [Online] en: [https://www.pmc Corp.com/Portals/5/ Downloads/SimulationMethodology\\_APractitioner%27sPerspective.pdf](https://www.pmc Corp.com/Portals/5/Downloads/SimulationMethodology_APractitioner%27sPerspective.pdf)
82. **Oakland** S.J. (2003). Statistical Process Control, 5th ed. Butterworth-Heinemann, London, 2003.
83. Olegas **Vasilecas**, Aidias Smaizys, Audrius Rima (2013). Business Process Modelling and Simulation: Hybrid Method for Concurrency Aspect Modelling. Baltic J. Modern Computing, Vol. 1 (2013), No. 3-4:228-243.
84. Olga **Ristić**, Aleksandar Marić, Sandra Milunović (2011). UPRAVLJANJE ODRŽAVANJEM PROIZVODNIH SISTEMA – MODELIRANJE I SIMULACIJA TROŠKOVA ODRŽAVANJA PROIZVODNIH LINIJA. IMK-14 Istraživanje i razvoj XVII, broj 40, 3/2011.
85. P. Rama **Murthy** (2007). Operations research. New age international, 2007, ISBN (13) : 978-81-224-2944-2.
86. **Patil** R., Shukla N, Kiridena, S. (2016). Simulation-based evaluation of an integrated planning and scheduling algorithm for maintenance projects. Proceedings of the 23rd EurOMA Conference 2016.
87. Paula Andrea, Potes **Ruiz**, Bernard Kamsu-Foguem, Daniel Noyes (2013). Knowledge reuse integrating the collaboration from experts in industrial maintenance management. Knowledge-Based Systems 50 (2013):171–186.
88. **Peito**, F., Pereira, G., Leitão, A., Dias, L. (2011). Simulation as a decision support tool in maintenance float systems. Proceedings of the 17th European Concurrent Engineering Conference (ECEC 2011). London, England.
89. **Pereira** Guilherme, Peito Francisco, Leitão Armando, Dias Luis (2011). Simulation as a decision support tool in maintenance float systems: system availability versus total maintenance cost. Proceedings of the 10th International Conference on Modeling and Applied Simulation 2011.
90. Petar **Stanojević**, Vasilije **Mišković** (2003). Strategije održavanja tehničkih Sistema. Vojnotehnički glasnik 6/2003.
91. Petar **Stanojević**, Vasilije Mišković, Vladimir Bukvić (2002). Pristup kvantifikaciji uticajnih faktora na sistem održavanja. Naučnotehnički PREGLED, vol. LII, br.1, 2002., UDK: 623.48:658.58:658.818.3(047)=861.
92. Peter **Muchiri**, Liliane **Pintelon** (2008). Performance measurement using overall equipment effectiveness (OEE): Literature review and practical application discussion. International Journal of Production Research July 2008 DOI: 10.1080/00207540601142645

93. Peter **Muchiri**, Liliane Pintelon, Ludo Gelders, Harry Martin (2011). Development of maintenance function performance measurement framework and indicators. *Int. J. Production Economics* 2011, vol. 131, issue 1, pp. 295-302.
94. Peter **Poór**, Nikol Kuchtová, Michal Šimon (2013). Machinery Maintenance as Part of Facility Management. *Proceedings of the 24th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, 2013*, *Procedia Engineering* 69 ( 2014 ) 1276 – 1280.
95. R. Keith **Mobley** (2008). *MAINTENANCE FUNDAMENTALS*, ISBN: 0-7506-7798-8, 2004, Elsevier
96. R. Keith **Mobley**, Lindley R. Higgins, Darrin J. Wikoff (2008). *MAINTENANCE ENGINEERING HANDBOOK* 7th ed, 2008, DOI: 10.1036/0071546464.
97. R. M. Aguilar **Chinea**, I. Castilla Rodríguez, R. C. Muñoz González (2009). Hospital Resource Management. In: Merkurjev, Y., Merkurjeva, G., Piera, M.A., Guasch Petit, A. editors. *Simulation-Based Case Studies in Logistics*. Springer, ISBN 978-1-84882-186-6, DOI 10.1007/978-1-84882-187-3
98. R. **Roy**, R. Stark, K. Tracht, S. Takata, M. Mori (2016). Continuous maintenance and the future – Foundations and technological challenges. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 65: 667–688.
99. Rajiv Kumar **Sharma**, Rajan Gopal **Sharma** (2014). Integrating Six Sigma Culture and TPM Framework to Improve Manufacturing Performance in SMEs. *Qual. Reliab. Engng. Int.* 2014, 30 745–765
100. **Rajpurohit** J., Sharma T.K., Abraham, A., Vaishali, Y. (2017). Glossary of Metaheuristic Algorithms. *International Journal of Computer Information Systems and Industrial Management Applications*, 9, pp. 181-205.
101. Ramesh **Gulati** (2013). *Maintenance and Reliability Best Practices*. Industrial Press, Inc, ISBN 978-0-8311-3434-1, 2013
102. Ratapol **Wudhikarn** (2013). A Framework for Integrating Overall Equipment Effectiveness with Analytic Network Process Method. *International Journal of Innovation, Management and Technology*, Vol. 4, No. 3.
103. Riccardo **Palmarini**, John Ahmet Erkoyuncu, Rajkumar Roy, Hosein Torabmostaedi (2018). A systematic review of augmented reality applications in maintenance. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 49 (2018):215–228.
104. Robert G. **Sargent** (2010). *VERIFICATION AND VALIDATION OF SIMULATION MODELS*, *Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference Baltimore, Maryland, USA, 5 - 8 December 2010*. 978-1-4244-9864-2/10/\$26.00 ©2010 IEEE
105. Rommert **Dekker** (1996). Applications of maintenance optimization models: a review and analysis. *Reliability Engineering and System Safety* 51 : 229-240.
106. Rosmaini **Ahmad**, Shahrul **Kamaruddin** (2012). An overview of time-based and condition-based maintenance in industrial application. *Computers & Industrial Engineering* 63: 135–149.
107. Ruth Sara **Aguilar-Saven** (2004). Business process modelling: Review and framework. *Int. J. Production Economics* 90: 129–149.
108. S. Anil **Kumar**, N. **Suresh** (2009). *OPERATIONS MANAGEMENT*, ISBN (13) : 978-81-224-2883-4, 2009.

109. S. **Bagavathiappan**, B.B. Lahiri, T. Saravanan, John Philip, T. Jayakumar (2013). Infrared thermography for condition monitoring – A review. *Infrared Physics & Technology* 60:35–55.
110. S. **Takata**, F. Kimura, F.J.A.M. van Houten, E. Westkämper<sup>4</sup>, M. Shpitalni, D. Ceglarek, J. Lee (2004). Maintenance: Changing Role in Life Cycle Management. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* Volume 53, Issue 2, 2004, pp. 643-655.
111. S.K. **Ong**, J. **Zhu** (2013). A novel maintenance system for equipment serviceability improvement. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 62 (2013): 39–42.
112. Satyajith **Amaran**, Nikolaos V. Sahinidis, Bikram Sharda, Scott J. Bury (2016). Simulation optimization: a review of algorithms and applications. *Ann Oper Res* (2016) 240:351–380, doi 10.1007/s10479-015-2019-x.
113. Sherif **Mostafa**, Sang-Heon Lee, Jantane Dumrak, Nicholas Chileshe, Hassan Soltan (2015). Lean thinking for a maintenance process. *Production & Manufacturing Research*, 3:1, 236-272, DOI: 10.1080/21693277.2015.1074124.
114. Siew Hong **Ding**, Shahrul Kamaruddin (2015). Maintenance policy optimization-literature review and directions. *Int J Adv Manuf Technol* 76:1263–1283.
115. Singiresu S. **Rao** (2009). *Engineering Optimization Theory and Practice*, ISBN 978-0-470-18352-6.
116. Slavko **Pokorni** (2011). POUZDANOST, RASPOLOŽIVOST I ODRŽAVANJE INFORMACIONO KOMUNIKACIONIH SISTEMA, Zbornik radova sa konferencije INFOTEH-JAHORINA Vol. 10, Ref. E-III-12, p. 641-646, Mart 2011.
117. Snezana **Nestic**, Aleksandar Djordjevic, Aleksandar Aleksic, Ivan Macuzic, Miladin Stefanovic (2013). Optimization of the Maintenance Process Using Genetic Algorithms. *CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS* VOL. 33, 319-324, 2013, ISBN 978-88-95608-24-2; ISSN 1974-9791.
118. **Stapenhurst** T. (2005). *Mastering Statistical Process Control*. Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford, 2005,
119. Steven **Borris** (2006). *Total Productive Maintenance*. The McGraw-Hill. DOI: 10.1036/0071467335. eBook 0-07-158926-0.
120. Theodore T. **Allen** (2006). *Introduction to Engineering Statistics and Six Sigma*. Springer-Verlag London Limited. ISBN-13: 978-1-85233-955-5.
121. Tomer **Toledo**, Haris N. Koutsopoulos (2004). Statistical Validation of Traffic Simulation Models, *Transportation Research Record. Journal of the Transportation Research Board*, No. 1876, TRB, National Research Council, Washington, D.C. pp. 142–150.
122. Toshio **Nakagawa** (2008). *Advanced Reliability Models and Maintenance Policies*. Springer, ISBN-13: 9781848002937, DOI 10.1007/978-1-84800-294-4.
123. U. **Kumar**, D. Galar, A. Parida, C. Stenström, L. Berges (2013) Maintenance Performance Metrics: A State of the Art Review. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 19 Issue: 3, pp.233-277, doi: 10.1108/JQME-05-2013-0029, ISBN 978-91-7439-379-8.
124. Veljko P. **Petrović**, Veselin L. Mrdak, Branka R. Luković (2013). ANALIZA RADA SISTEMA ODRŽAVANJA PRIMENOM TEORIJE MASOVNOG OPSLUŽIVANJA. *VOJNOTEHNIČKI GLASNIK*, 2013., Vol. LXI, No. 2
125. William T. **Truscott** (2003). *Six Sigma: Continual Improvement for Businesses*. Elsevier, ISBN 0 7506 57650.

126. **Xiang X.**, Kennedy R., Madey G., Cabaniss S. (2005). Verification and validation of agent-based scientific simulation models. In: Yilmaz L., editor. Proceedings of the 2005 Agent-Directed Simulation Symposium, April 2005. The Society for Modeling and Simulation International 2005;37:47–55.ADS 05, ISBN-1-56555-291.
127. Yasmine **Nagm-Aldeen**, Manal A.Abdel-Fattah, Ayman El-Khedr (2015). A Literature Review of Business Process Modeling Techniques. International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering, Volume 5 Issue 3.
128. Yu **Zhou**, Gang Koub, Daji Ergu (2015). Analysing Operating Data to Measure the Maintenance Performance. Qual. Reliab. Engng. Int. 31:251–263.
129. Zachary **Taylor**, Subramanyam **Ranganathan** (2014). DESIGNING HIGH AVAILABILITY SYSTEMS: DESIGN FOR SIX SIGMA AND CLASSICAL RELIABILITY TECHNIQUES WITH PRACTICAL REAL-LIFE EXAMPLES. John Wiley & Sons 2014, ISBN 978-1-118-55112-7.
130. Živoslav **Adamović**, Goran Nestorović, Mileta Radojević, Ljubivoje Paunović (2008). MENADŽMENT INDUSTRIJSKOG ODRŽAVANJA, ISBN 978-86-86917-00-4.
131. Živoslav **Adamović**, Ljiljana **Radovanović** (2008). MODELI ODRŽAVANJA NA VAZI TEHNIČKE DIJAGNOSTIKE. TEHNIČKA DIJAGNOSTIKA (BROJ 3).
132. Биљана **Јовановић** (2006). У сусрет системима оджавања четврте генерације. Техничка дијагностика 1-2006.
133. Василије **Мишковић**, Владимир Буквић, Петар Станојевић (2003). Квантификација и облик утицаја снабдевености резервним деловима на исправност техничких система. Војнотехнички гласник 2/2003
134. Војкан **Радоњић** (2015). ДЕТЕРМИНИСАЊЕ МОДЕЛА ТЕХНОЛОГИЈЕ ОДРЖАВАЊА РАДИО-РЕЛЕЈНИХ УРЕЂАЈА СА АСПЕКТА УНАПРЕЂЕЊА ТЕХНОЛОШКИХ ПРОГРАМА [Disertacija]. ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА У ЧАЧКУ, УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ.
135. Горан **Петровић**, Жарко Ћојбашић, Драган Маринковић, Зоран Маринковић, Данијел Марковић (2011). ВИШЕ-КРИТЕРИЈУМСКА ОПТИМИЗАЦИЈА ПРОЦЕСА ОДРЖАВАЊА ПРИМЕНОМ НАПРЕДНИХ ЕВОЛУТИВНИХ МЕТОДА, Proceedings of the THE FOURTH SYMPOSIUM WITH INTERNATIONAL PARTICIPATION TRANSPORT AND LOGISTICS Serbia, Nis 27.5.2011. Ниш, Србија

## 11. Биографија



Саша Петровић рођен је у Лесковцу 11.08.1971. године.

Основну школу је завршио у Лесковцу а Војну гимназију Иво Лола Рибар у Загребу. Војно-техничку академију, специјалност Мотори и моторна возила, завршио је у Београду (1991.-1995. године) и Мастер студије на програму Управљање и примењено рачунарство 2011. године на Машинском факултету у Нишу. Запослен је у Војсци Србије.

Од 1995. године до данас бави се одржавањем техничких система, најпре у извршном делу а касније у управном и организационом делу. Учествовао је и учествује у наменским програмима развоја или модификација специјалних војних возила, израде посебних техничких правилника, правила, упутстава и стандарда.

Носилац је ордена за заслуге у одбрани и безбедности III степена.

## Изјава 1.

### ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Изјављујем да је докторска дисертација, под насловом:

#### **„Развој модела система одржавања применом симулације“**

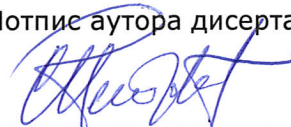
која је одбрањена на Машинском факултету Универзитета у Нишу:

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да ову дисертацију, ни у целини, нити у деловима, нисам пријављивао/ла на другим факултетима, нити универзитетима;
- да нисам повредио/ла ауторска права, нити злоупотребио/ла интелектуалну својину других лица.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци, који су у вези са ауторством и добијањем академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада, и то у каталогу Библиотеке, Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Нишу, као и у публикацијама Универзитета у Нишу.

У Нишу, 22.12.2018

Потпис аутора дисертације:



Петровић Саша

**Изјава 2.**

**ИЗЈАВА О ИСТОВЕТНОСТИ ЕЛЕКТРОНСКОГ И ШТАМПАНОГ ОБЛИКА  
ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

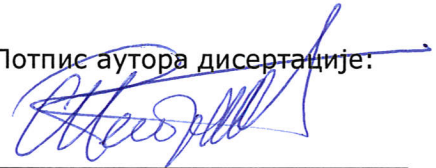
Наслов дисертације:

**„Развој модела система одржавања применом симулације“**

Изјављујем да је електронски облик моје докторске дисертације, коју сам предао/ла за уношење у **Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу**, истоветан штампаном облику.

У Нишу, 22.12.2018

Потпис аутора дисертације:



Петровић Саша

### Изјава 3:

#### ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Никола Тесла“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу унесе моју докторску дисертацију, под насловом:

#### „Развој модела система одржавања применом симулације“

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском облику, погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију, унету у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу, могу користити сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons), за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство **(CC BY)**
2. Ауторство – некомерцијално **(CC BY-NC)**
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде **(CC BY-NC-ND)**
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима **(CC BY-NC-SA)**
5. Ауторство – без прераде **(CC BY-ND)**
6. Ауторство – делити под истим условима **(CC BY-SA)<sup>4</sup>**

У Нишу, 22.12.2018.

Потпис аутора дисертације:



Петровић Саша

<sup>4</sup> Аутор дисертације обавезан је да изабере и означи (заокружи) само једну од шест понуђених лиценци; опис лиценци дат је у наставку текста.



**ИЗВЕШТАЈ О ОЦЕНИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

**ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ**

Презиме, име једног родитеља и име	Петровић Миодраг Саша
Датум и место рођења	11.08.1971. године, Лесковац

**Основне студије**

Универзитет	Универзитет Војске Југославије
Факултет	Војно-техничка академија
Студијски програм	Моторна возила
Звање	Дипломирани машински инжењер
Година уписа	1991.
Година завршетка	1995.
Просечна оцена	7,73

**Мастер студије, магистарске студије**

Универзитет	Универзитет у Нишу
Факултет	Машински факултет
Студијски програм	Управљање и примењено рачунарство
Звање	Дипломирани машински инжењер, мастер
Година уписа	2010.
Година завршетка	2011.
Просечна оцена	9,80
Научна област	Машинско инжењерство
Наслов завршног рада	Могућности побољшања процеса одржавања техничких система у Војсци Србије

**Докторске студије**

Универзитет	Универзитет у Нишу
Факултет	Машински факултет
Студијски програм	Производно-информационе технологије и индустријски менаџмент
Година уписа	2011.
Остварен број ЕСПБ бодова	150
Просечна оцена	9,75

**НАСЛОВ ТЕМЕ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

Наслов теме докторске дисертације	Развој модела система одржавања применом симулације
Име и презиме ментора, звање	Проф. др Пеђа Милосављевић, редовни професор, Универзитет у Нишу Машински факултет
Број и датум добијања сагласности за тему докторске дисертације	НСВ број 8/20-01-002/18-015 од 19.02.2018. године

**ПРЕГЛЕД ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

Број страна	225	<p>МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ У НИШУ</p> <p>Прегледено: 21.12.2018.</p> <p>Орг. јед. Број: 612-80-536/18</p>
Број поглавља	9 (девет)	
Број слика (шема, графикана)	208 (двестаосам)	
Број табела	19 (деветнаест)	
Број прилога	-	

**ПРИКАЗ НАУЧНИХ И СТРУЧНИХ РАДОВА КАНДИДАТА  
који садрже резултате истраживања у оквиру докторске дисертације**

Р. бр.	Аутор-и, наслов, часопис, година, број волумена, странице	Категорија
1	<p><b>Petrovic Sasa, Milosavljevic Pedja, Sajic Lozanovic Jasmina, Rapid Evaluation of Maintenance Process Using Statistical Process Control and Simulation, International Journal of Simulation Modelling 2018 17 (1):119-132, <a href="https://doi.org/10.2507/IJSIMM17(1)424">https://doi.org/10.2507/IJSIMM17(1)424</a></b></p> <p>У раду је приказан концепт оцењивања успешности и унапређења система одржавања комбинованом применом техника статистичке контроле процеса и симулације. Посебно је наглашено да се недовољно изучава проблем побољшања комплексних система одржавања. Констатовано је и да је оптимизација у проблемима овакве врсте изузетно сложен задатак. Развијени симулациони модел је флексибилан и може се користити за динамичко одређивање индикатора успешности, проверу различитих варијанти и за подршку у одлучивању. Модел је прилагодљив и може се користити у различитим областима где се одржава велики број различите опреме.</p>	M22
2	<p><b>Saša Petrović, Peđa Milosavljević, Jasmina Lozanović Šajić, Optimization via Simulation: A Maintenance Problem Study, Proceedings of the 7th International Symposium of Industrial Engineering - SIE 2018, 27.-28. September 2018., Belgrade, Serbia.</b></p> <p>Приказан је модел система одржавања са освртом на проблем оптимизације по дефинисаном критеријуму. Истакнут је проблем недовољног изучавања тзв. <i>field maintenance</i>, односно система одржавања опреме која није примарно производна и разуђена је географски и по интензитету употребе. За дизајн симулационог модела се користи комерцијално софтверско решење за моделовање процеса са уграђеним оптимизационим „engine“-ом.</p>	M33
3	<p><b>Saša Petrović, Peđa Milosavljević, Jasmina Lozanović Šajić, Simulation Optimization: The Field Maintenance Problem Study, Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering. In press 2019.</b></p> <p>Нагласак у раду је на проблему оптимизације система одржавања. Упоредјују се тзв. класични оптимизациони проблеми са проблемом налажења оптималног решења описаног симулационим моделом. Дата је категоризација основних метода односно апроксимативних алгоритама за оптимизацију сложених оптимизационих проблема. На конкретном примеру, приказан је ток оптимизације када се у симулационом моделу варирају ограничења и контролне варијабле. Као правац даљих истраживања је предложена компаративна анализа комерцијалних симулационих софтвера са уграђеним оптимизационим апаратом, са аспекта примене у одржавању.</p>	M51
4	<p><b>Saša Petrović, Sreten Perić, Simulation and System Modeling in Logistic: Planning a Military Operation, one Example on the Maintenance Support, Proceedings of the Scientific Conference - Impact of Changes in Operational Environment on Preparation and Execution (Design) of Operations – РОКО 2017, 02.-03. November 2017., Belgrade, Serbia.</b></p> <p>У раду је приказан симулациони модел одржавања скупа техничких система у ограниченој војној операцији. Посебно је приказан случај када се опрема одржава у наменској радионици и у теренским условима, односно извршено је упоређење и приказан је утицај повећања логистичких времена у одржавању и повећања времена одржавања у теренским условима.</p>	M33
5	<p><b>Saša Petrović, Peđa Milosavljević, Jasmina Lozanović Šajić, The Thermal Imaging in Maintenance, Proceedings of the 18th Symposium on Thermal Science and Engineering of Serbia - SIMTERM 2017, 17.-20. October 2017., Sokobanja, Serbia.</b></p> <p>У раду је описан значај термографије као поступка дефектације стања техничких система. Као недеструктивна метода испитивања дефектације и дијагностике у одржавању техничких система. Она пружа могућност унапређења одржавања техничких система на начин да може да омогући предикцију отказа или отклањање сумње, односно да значајно допринесе смањењу броја акција одржавања и времена трајања одржавања. Тиме се смањују потребе за ангажовањем ресурса одржавања. Примена ове технике је један од најсавременијих трендова у одржавању.</p>	M33

**НАПОМЕНА:** уколико је кандидат објавио више од 3 рада, додати нове редове у овај део документа

**ИСПУЊЕНОСТ УСЛОВА ЗА ОДБРАНУ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

Кандидат испуњава услове за оцену и одбрану докторске дисертације који су предвиђени Законом о високом образовању, Статутом Универзитета и Статутом Факултета.	<b>ДА</b>	<b>НЕ</b>
<p>Именовани испуњава услове за одбрану докторске дисертације сагласно Закону о високом образовању, Правилнику о поступку припреме и условима за одбрану докторске дисертације на Универзитету у Нишу, СНУ број 8/16-01-005/18-014 од 04.06.2018. године и Статуту Машинског факултета у Нишу (Број: 612-234-2/2018 од 24.04.2018. године), односно:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- кандидат је на основу положених испита и самосталних истраживачких радова остварио 150 ЕСПБ бодова,</li> <li>- на захтев кандидата за одобравање теме докторске дисертације дата је сагласност Научно-стручног већа за техничко-технолошке науке Универзитета у Нишу, одлуком НСВ број 8/20-01-002/18-015 од 19.02.2018. године,</li> <li>- кандидат је поднео захтев за именовање Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације Машинском факултету у Нишу 07.11.2018. године,</li> </ul>		

- Катедра за менаџмент у машинском инжењерству Машинског факултета у Нишу предложила је Комисију за оцену и одбрану докторске дисертације на седници Већа Катедре 07.11.2018. године,
- Наставно-научно веће Машинског факултета усвојило је предлог Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације на седници Наставно-научног већа 09.11.2018. године,
- Научно-стручно веће за техничко-технолошке науке Универзитета у Нишу именовало је Комисију за оцену и одбрану докторске дисертације одлуком НСВ број 8/20-01-010/18-016 од 17.12.2018. године.

Именованом је усвојен захтев за задржавање статуса студента у школској 2017/2018. години сходно акту Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије Број: 612-00-02337/2017-06 од 06.10.2017. године.

Именованом је Решењем број 612-80-335-1/2018 од 01.10.2018. године одобрен продужетак рока за одбрану докторске дисертације до 28.02.2019. године.

## ВРЕДНОВАЊЕ ПОЈЕДИНИХ ДЕЛОВА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Кратак опис појединих делова дисертације (до 500 речи)

Основни текст рада садржи девет поглавља.

Прво поглавље – *Увод*, садржи објашњење предмета и проблема истраживања, као и његових циљева и задатака.

У њему су дефинисане хипотезе и презентоване примењене научне методе. Дат је приказ структуре истраживања.

У другом поглављу – *Преглед истраживања и литературе*, систематски је дат преглед актуелних истраживања у предметној области и референтне литературе. Посебно је важно истаћи да је кандидат имао у виду мултидисциплинарност проблема истраживања, да је користио новију и релевантну литературу (дато је 135 референци, од којих је 107 из последњих 10 година, а 22 референце од цитираних су према SCI индексу ранга M21, M22 и M23).

Треће поглавље – *Развој одржавања*, посвећено је општем прегледу развоја одржавања, односно приказује како се одржавање развијало, гледано из више углова. Посебно су третиран најсавременији приступи у одржавању. Тиме је кандидат, укључујући и претходно поглавље, јасно показао да је истраживање научно утемељено, актуелно и оригинално.

У четвртном поглављу – *Одржавање усмерено на поузданост*, приказан је високо структурирани метод за планирање одржавања и један од водећих приступа у одржавању. Једно од основних својстава приступа је што инсистира на побољшању процеса, односно да се може нормално користити за вредновање скоро сваког процеса тако што обезбеђује логичку и методолошку интерпретацију процеса.

Пето поглавље – *Војни системи одржавања – Систем одржавања у Војсци Србије*, описује конкретан систем који је предмет истраживања. Из конкретних система проистекли су подаци о историји одржавања који су коришћени за оцену успешности одржавања и подешавање симулационог модела, тј. дефинисање његових параметара.

У шестом поглављу – *Модел и вредновање успешности процеса одржавања*, дато је опште утемељење за моделовање процеса и приказане пратеће технике. Даље је приказан концепт мерења перформанси система помоћу индикатора успешности.

Седмо поглавље – *Анализа стабилности и способности процеса одржавања*, уз ближе објашњење примењене технике, представља оцену успешности конкретних система одржавања применом стратегије статистичка контрола процеса. Према параметрима број средстава у систему одржавања и време одржавања, за више врста опреме, у периоду од једне и три године, донет је закључак о способности система одржавања. Уједно су измерене законитости одређених појава и извршено статистичко закључивање о систему одржавања на основу узорка. Важност овог дела истраживања, осим што даје објективну оцену способности и стабилности система одржавања, је и у томе што су прикупљени и анализирани подаци послужили за развој модела одржавања, а затим и експериментисање путем симулационог модела. Ово поглавље садржи и анализу проблема оптимизације (система одржавања).

У осмом поглављу – *Симулација*, кандидат систематски разматра проблем примене симулационе технике на конкретан проблем. Симулација се употребљава као подршка при решавању управљачких задатака или алат за оптимизацију. Не занемарујући семантичку прецизност дефиниције оптимизације, концепт оптимизације путем симулација примењен је за налажење оптималног решења проблема описаног симулационим моделом. Да би се симулација применила, развијен је модел система одржавања који на кредибилан начин осликава реалан систем. Симулациони модел је употребљен за експериментисање, а резултати симулација су приказани у форми упоредних графикана различитих параметара односно индикатора успешности процеса. Ово поглавље представља највреднији део дисертације у смислу научног доприноса и потврду полазних хипотеза.

У деветом поглављу – *Закључак и правци даљих истраживања*, дати су закључци проистекли из научног истраживања, извршена је оцена научне оправданости истраживања. Указано је и на могуће правце даљег истраживања.

## ВРЕДНОВАЊЕ РЕЗУЛТАТА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Ниво остваривања постављених циљева из пријаве докторске дисертације (до 200 речи)

У целости је остварен циљ истраживања постављен при пријави докторске дисертације. Помоћу комплексног симулационог модела, развијена је методологија која успешно може да квантификује успешност сложеног и конкретних система одржавања. Симулациони модел верно описује процес, обезбеђује проверу алтернатива и представља прогностички алат. Другим речима, добијено решење служи за опис система, реконструкцију система, контролу понашања система и предикцију понашања у будућности. На основу резултата симулационог експеримента могу врло јасно да се донесу закључци о начинима унапређења система.

Вредновање значаја и научног доприноса резултата дисертације (до 200 речи)

Развијени модел може бити уопштен, али и прилагођен другим системима одржавања.

Дисертација је јасно конципирана и формулисана, научно заснована и представља заокружену истраживачку целину. Научни доприноси који су остварени у дисертацији представљају унапређење научних знања у научној области Машинско инжењерство. Примена резултата овог истраживања је широка, како у теоријском тако у практичном смислу. Развијен је и одређен моделско-симулациони оквир за оптимизацију сложеног система одржавања као проблема описаног симулационим моделом. Примењив је у пракси, у различитим системима одржавања. Развијени модел одржавања омогућава сагледавање понашања система одржавања, оцену ефикасности и ефективности одржавања, његово побољшање и у функцији је подршке одлучивању. Модел се може лако прилагодити најсавременијим приступима у одржавању. На основу развијеног модела могуће је развијати већи број алтернатива одржавања.

Оцена самосталности научног рада кандидата (до 100 речи)

Аутентичним приступом дефинисању проблема истраживања, избором релевантне литературе, прегледом савремених истраживања у области, комплетним методолошким приступом истраживању, специфичном комбинацијом употребе техника статистичке контроле процеса и моделовања и симулације, уз систематичност истраживања и детаљан и јасан приказ добијених резултата, кандидат је демонстрирао висок степен самосталности и компетентности.

Кандидат је показао способност за научно-истраживачки рад путем истраживања у изради саме дисертације, као и објављивањем резултата истраживања у оквиру докторске дисертације у научним радовима у часопису међународног значаја, домаћим часописима и зборницима и саопштењима са конференција.

### ЗАКЉУЧАК (до 100 речи)

На основу анализе дисертације кандидата Саше Петровића, дипл. инж., Комисија констатује да је дисертација написана у складу са одобреном темом. Дисертација задовољава научне критеријуме и пружа допринос научној области Машинско инжењерство, ужој научној области Производно-информационе технологије и индустријски менаџмент и научној дисциплини Индустријски менаџмент, као и научни допринос који се односи на развој нових приступа и примени резултата истраживања у савременој пракси одржавања техничких система.

На основу свега наведеног, Комисија предлаже Наставно-научном већу Машинског факултета Универзитета у Нишу и Научно-стручном већу за техничко-технолошке науке Универзитета у Нишу да се докторска дисертација под називом: „Развој модела система одржавања применом симулације“ кандидата Саше Петровића, дипл. инж., прихвати, а кандидат позове на усмену јавну одбрану.






### КОМИСИЈА

Број одлуке ННВ о именовању Комисије

НСВ број 8/20-01-010/18-016

Датум именовања Комисије

17.12.2018.

Р. бр.	Име и презиме, звање	Потпис
1.	др Радо Максимовић, редовни професор Производни системи, организација и менаџмент (Научна област) Факултет техничких наука Универзитета у Новом Саду (Установа у којој је запослен)	председник 
2.	др Пеђа Милосављевић, редовни професор Индустријски менаџмент (Научна област) Машински факултет Универзитета у Нишу (Установа у којој је запослен)	ментор, члан 
3.	др Весна Спасојевић Бркић, редовни професор Индустријско инжењерство (Научна област) Машински факултет Универзитета у Београду (Установа у којој је запослен)	члан 
4.	др Меланија Митровић, редовни професор Математика и информатика (Научна област) Машински факултет Универзитета у Нишу Установа у којој је запослен)	члан 
5.	др Драган Темелковски, редовни професор Производни системи и технологије (Научна област) Машински факултет Универзитета у Нишу (Установа у којој је запослен)	члан 

Датум и место:

20.12.2018.

Нови Сад, Београд, Ниш