

Универзитет у Новом Саду
Технички факултет „Михајло Пупин“ Зрењанин



**МОДЕЛИ ОДРЖАВАЊА НА БАЗИ РИЗИКА
И ЊИХОВ УТИЦАЈ
НА ПОУЗДАНОСТ ПАРНИХ ТУРБИНА**

**Risk-Based Maintenance Model and its Influence
on Steam Turbine Reliability**

- Докторска дисертација -

Ментор:
Проф. Др Живослав Адамовић

Кандидат:
Мр Ненад Станковић

Зрењанин, 2018. год.

ЗАХВАЛНИЦА

Посебно се захваљујем мом ментору Проф. др Живославу Адамовићу који је својим добронамерним, сугестијама и примедбама допринео подизању начног и стилског нивоа дисертације.

Захваљујем се члановима комисије за оцену и одбрану докторске дисертације, Проф. др Љиљани Радовановић, Проф. др Бранку Шкорићу, Проф. др Елеонори Десници и доценту др Јасмини Пекез на добронамерним примедбама приликом читања ове дисертације.

Моја захвалност постоји и према руководиоцима предузећа, Термоелектране-Топлане „Нови Сад“, у којем су рађена истраживања, директору Драгану Томићу дипл. инж. маш., и мр Слободану Стевановићу шефу производње, као и руководиоцима Термоелектране Костолац који су несебично лако отворали врата која су водила потребним подацима и информацијама да би дисертација угледала светлост дана.

Такође се захваљујем колеги др Бранку М. Милисављевићу, проф. на људској и моралној подршци као и добронамерним сугестијама и примедбама у току израде дисертације.

Непроцењено сам захвалан мојој породици, сину Стефану и супрузи Слађани који су имали разумевања и стрпљења током израде ове дисертације.

,

**Универзитет у Новом Саду
Технички факултет „Михајло Пупин“ Зрењанин**

Кључна документација информација

Редни број: РБР	
Идентификациони број: ИБР	
Тип документације: ТД	Монографска документација
Тип записа: ТЗ	Текстуални штампани материјал
Врста рада (дипл., маг., докт.): ВР	Докторска дисертација
Име и презиме аутора: АУ	Мр Ненад М. Станковић
Ментор (титула, име, презиме, звање): МН	Проф. Др Живослав Адамовић, редовни професор
Наслов рада: НР	Модели одржавања на бази ризика и њихов утицај на поузданост парних турбина
Језик публикације: ЈП	Српски
Језик извода: ЈИ	Српски/Енглески
Земља публикавања: ЗП	Република Србија
Уже географско подручје: УГП	АП Војводина
Година: ГО	2018.
Издавач: ИЗ	Ауторски репринт
Место и адреса: МА	Технички факултет “Михајло Пупин”, Ђуре Ђаковића б.б., Зрењанин, Република Србија
Физички опис рада: ФО	(број поглавља/страна/литература/табела/слика/ прилога, додатне табеле и слике) 10/208/203/23/69/7/13
Научна област: НО	Индустријско инжењерство, Машинство.
Научна дисциплина: НД	Управљање развојем, Технологија одржавања
Предметна одредница, Кључне речи: ПО	Ризик, модели, парне турбине, одржавање, поузданост.

УДК	
Чува се: ЧУ	У библиотеци Техничког факултета “Михајло Пупин” Зрењанин
Важна напомена: ВН	-
Извод: ИЗ	<p>У дисертацији су изучавани модели одржавања на бази ризика и њихов утицај на поузданост парних турбина.</p> <p>У првом реду тежиште дисертације чини теоријско изучавање метода и модела одржавања на бази ризика који ће се примењивати на поузданост и ризик рада парних турбина. Извршено је њихово прилагођавање како би били примењиви, као и њихов утицај на поузданост рада парних турбина.</p> <p>У дисертацији су развијени нови модели и то:</p> <p>Модел одржавања на бази ризика и његов утицај на поузданост парних турбина у виду алгоритма.</p> <p>Овај алгоритам подржава развијени математички модел пет могућих стања, као и континуално праћење одређених дијагностичких параметара. На основу величине одступања измерених од нормалних вредности дијагностичких параметара оцењује се стање (степен неисправности) парних турбина и на основу тога доноси дијагностичка одлука о даљим активностима одржавања (о наставку или заустављања рада парне турбине).</p> <p>Помоћу овог алгоритамског праћења одређују се стања: добро, задовољава, незадовољава, недозвољено</p> <p>Развијени модел могуће отказе компонената детектује у почетној фази настанка, чиме су створени услови за предузимањем правовремених одговарајућих активности одржавања.</p> <p>Откривањем деградационих стања компонената пружа се могућност да се у дијагностици стања утврде и идентификују неисправности које се у зависности од степена деградације поправљају и отклањају у што краћем року.</p> <p>Други модел који је развијен је математички модел пет стања и његова имплементација на поузданост парних турбина. У инжењерској пракси често се јављају проблеми одређивања оптималних временских интервала провере и поправке критичних склопова и компонената парних турбина, који се не могу одржавати током функционисања. Учесталост провере компонената, као што су парне турбине, довело би до непотребних високих трошкова. Међутим уколико би временски интервал између активности одржавања био превелики, постојала би опасност од отказа компоненти што може резултовати значајним економским последицама а и ризик по</p>

	<p>радно особље. Уведени модел пет могућих стања, у којима се парне турбине могу налазити, и помоћу кога се могу дефинисати стања парних турбина: оперативно стање (O), деградирано стање (D), стање дијагностиковања (DI), стање одржавања (M), и стање отказа (F), представља надоградњу Марковљевог модела четири стања, јер је уведено ново пето стање дијагностика стања (DI). Модел служи за предикцију, спречавање отказа и сметње у раду парних турбина јер су одређени и предвиђени оптимални тренутци одржавања на годишњим нивоима као и вероватноће стања у оперативном стању, деградираном стању, стању у дијагностици, стању у одржавању и стању у отказу за пет и четири могућа стања, за једну, две, три и четири године у експлоатацији парних турбина. Ово је све израчунато нумерички, затим приказано табеларно и графички на дијаграмима. На крају је одређен временски и годишњи интервал генералног ремонта посматраних парних турбина</p> <p>На крају дисертације доказана је главна хипотеза која гласи: могуће је формирати моделе одржавања на бази ризика у циљу повишења нивоа поузданости парних турбина у процесу експлоатације. У закључку као срж дисертације, примена развијених нових модела одржавања на бази ризика и њихов утицај на поузданост парних турбина доводи до више наведених закључака: Смањују број отказа и повећавају ниво поузданости парних турбина, скраћују време у застоју (прекида у раду) погна и повећавају ниво расположивости, спречавају веће отказе и хаварије, а тиме и велике материјалне трошкове (финансијске губитке), спречавају додатна оштећења и угрожавање рада целокупног погона, спречавају опасности по радно особље и околину, смањују активности класичних превентивних активности, смањују активности непланираних корективних активности, остварују оптималне планиране активности одржавања и смањују непланиране трошкове одржавања.</p>
Датум прихватања теме од стране НН већа: ДП	08.06.2011. год.
Датум одбране: ДО	

<p>Чланови комисије: (име и презиме / титула / звање / назив организације / статус)</p> <p>КО</p>	<p>Председник: Проф. Др Љиљана Радовановић, ван. проф, ужа научна област: Индустијско инжењерство, 2017., Технички факултет „Михајло Пупин“ Зрењанин.</p> <p>Члан 1: Проф. Др Бранко Шкорић, ред. проф., ужа научна област: Технологија термичке обраде и инжењерства површина, 2011., Факултет техничких наука, Нови Сад;</p> <p>Члан 2: Проф. Др Елеонора Десница, ван. проф., Индустијско инжењерство, 2016., Технички факултет „Михајло Пупин“ Зрењанин.</p> <p>Члан 3: Доц. Др Јасмина Пекез, доцент, ужа научна област: Индустијско инжењерство, 2015., Технички факултет „Михајло Пупин“ Зрењанин.</p> <p>Ментор: Проф. Др Живослав Адамовић, ред. проф., ужа научна област: Индустијско инжењерство, 1995, Технички факултет „Михајло Пупин“, Зрењанин.</p>
---	--

**University of Novi Sad
Technical faculty "Mihajlo Pupin" Zrenjanin**

Key word documentation

Accession number: ANO	
Identification number: INO	
Document type: DT	Monograph documentation
Type of record: TR	Textual printed material
Contents code: CC	Ph.D. Dissertation
Author: AU	Nenad M.Stankovic, M.Sc.
Mentor: MN	Zivoslav Adamovic, Ph.D., full time professor
Title: TI	Risk-based maintenance model and its influence on steam turbine reliability
Language of text: LT	Serbian
Language of abstract: LA	English / Serbian
Country of publication: CP	Republic of Serbia
Locality of publication: LP	AP Vojvodina
Publication year: PY	2018
Publisher: PU	The author's reprint
Publication place: PP	Technical Faculty "Mihajlo Pupin", Djure Djakovica b.b., Zrenjanin, Serbia
Physical description: PD	(chapters/pages/literature/tables/pictures/graphs/appendixes, additional tables and pictures) 10/208/203/23/69/7/13
Scientific field SF	Industrial Engineering, Mechanical Engineering
Scientific discipline SD	Management development – Maintenance Technology

Subject, Key words SKW	Risk, model stem turbine, maintenance reliability
UC	
Holding data: HD	In the library of Technical faculty "Mihajlo Pupin", Zrenjanin
Note: N	-
Abstract: AB	<p>The models of maintenance of the basis of risk, as well as their influence on reliability of steam turbines, are treated in this dissertation.</p> <p>First and foremost, the focus of the dissertation is the theoretical study of the methods and the models of maintenance on the basis of risk, which will be applied to reliability and the risk of work of the steam turbines. Their adaptation has been treated in order for them to be implemented, as well as their influence on reliability of the work of steam turbines. New models are developed in the dissertation, and they are as follows:</p> <p>Model of maintenance on the basis of risk, as well as its influence on the reliability of steam turbines in form of algorithm. This algorithm supports the developed mathematical model of the five possible states, as well as the continuous monitoring of certain diagnostic parameters. The state (the degree of malfunction) is determined on the basis of value of deviation of the measured parameters from the desired value of the diagnostic parameters. Based on this, a diagnostic decision about the further activities of maintenance will be made (about the continuation or the halt of the operation of the steam turbine). With this algorithmic tracking, the states are determined in the following manner: good, satisfying, unsatisfying, unpermitted.</p> <p>The developed model detects possible failures of the components in the initial phase of creation which creates the conditions for taking the maintenance action in a timely manner.</p> <p>By discovering the degradation states of component, there is a possibility in the domain of the diagnostics of states to determine and identify irregularities that are, depending on the stage of degradation, fixed in the shortest time possible.</p> <p>The second model that is developed is the mathematical model of five states and its implementation on steam turbines reliability. In the engineering practice, problems that often occur are related to determination of the optimum time intervals of checkups and repair of the critical circuits and steam turbine components which can't be maintained while the machine is operating. Frequent checkups of components such as steam turbines might lead to unnecessary high expenses. However, if the time interval between</p>

	<p>maintenance would be too long, the danger of the components failing would increase, and that might result in significant economic consequences, as well as put the operating personnel to risk. The introduced model of five possible states of steam turbines, using which we can define the states of the steam turbines are: the operating state (O), the degraded state (D), the diagnosis state (DI), the maintenance state (M) and the failure state (F), represents the upgrade of the Markovian model of four states, because the new fifth state, the diagnosis state (DI) has been introduced. The purpose of this model is to predict and prevent failure and break down in the functioning of the steam turbines, because the optimal moments of yearly maintenance, as well as the probability of the states in operating state, in degraded state, in diagnosis state, in maintenance state and in failure state for five and four possible states, for one, two, three and four years in the exploitation of the steam turbines, are determined and predicted. All of this has been numerically calculated, and then shown in tabular view, as well as graphically on the diagrams. In the end, the time interval and the yearly interval of general repair of the observed turbines are determined.</p> <p>In the end of dissertation, the main hypothesis is proven, and it states: it is possible to form the maintenance models on the basis of risk in order to increase the level of reliability of steam turbines in the process of exploitation, shorten the time in halt (interruption of the operating state) of the machines and they increase the level of availability, they prevent major failures and breakdowns thereby preventing major material expenses (financial loss), they prevent additional damage and endangering of the work of the factory, they prevent the danger for the operating personnel and the environment, they decrease the activities needed for the ordinary preventive activities, they decrease the activities of the unplanned corrective activities, they achieve the optimal planned activities of maintenance and decrease the unplanned expenses of maintenance.</p>
Accepted on Scientific Board on: AS	08.06.2011.
Defended: DE	
Thesis defend board: (Title/Name and Surname/Degree/ /Faculty) DB	<p>President: Ph.D. Ljiljana Radovanovic, associated professor, 2017, Technical Faculty „Mihajlo Pupin“ Zrenjanin.</p> <p>Member 1: Ph.D. Branko Skoric, full time professor, 2011, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad;</p> <p>Member 2: Ph.D. Eleonora Desnica, associated professor, 2016., Technical Faculty „Mihajlo Pupin“ Zrenjanin.</p>

	<p>Member 3: Ph.D. Jasmina Pekez, assistant, professor, 2015, Technical Faculty „Mihajlo Pupin“ Zrenjanin.</p> <p>Menthor: Ph.D. Zivoslav Adamovic, full time professor, 1955, Technical Faculty “Mihajlo Pupin”, Zrenjanin.</p>
--	--

САДРЖАЈ

1. УВОД	1
2. ПРЕГЛЕД ДОСАДАШЊИХ ИСТРАЖИВАЊА И ЛИТЕРАТУРЕ О ПРОУЧАВАНОМ ПРОБЛЕМУ	6
3. МЕТОДОЛОШКИ КОНЦЕПТ ДИСЕРТАЦИЈЕ	15
3.1 Проблем истраживања	15
3.2 Предмет истраживања	15
3.3 Циљ истраживања	15
3.4 Главна хипотеза	16
3.4.1 План рада	16
3.5 Методе истраживања	17
3.6 Научна и друштвена оправданост истраживања	17
3.7 Организација истраживања	18
4. ТЕОРИЈСКА ИСТРАЖИВАЊА	20
4.1 Развој и значај одржавања	20
4.2 Концепције одржавања	22
4.3 Историјски развој поузданости	27
4.4 Анализа ризика	28
4.5 Методе процене ризика и одржавања на бази ризика	33
4.5.1 Методе процене вероватноће ризика - PRA.....	33
4.5.2 Метод Маркова	40
4.5.3 Бајесова метода при ризику на бази условљене вероватноће	41
4.5.4 Делфи метода (Delphi).....	41
4.5.5 Методе логичке анализе	43
4.5.6 Матрице с проценом ризика	43
4.5.7 Одржавање на бази ризика и безбедност на раду	44
4.5.8 Техничка дијагностика и њен утицај на поузданост и ризик парних турбина	54
4.5.9 Дијагностика стања парних турбина.....	57
4.6 Одржавање засновано на ризику парних турбина – Toshiba	61
4.7 Модел четири стања по Маркову	63
4.7.1 Примена модела четири стања по Маркову	67
4.7.2 Могуће перформансе стања за модел четири стања по Маркову	69
4.7.3 Параметарски односи за преносне нивое	70
5. РАЗВОЈ МОДЕЛА ОДРЖАВАЊА НА БАЗИ РИЗИКА И ЊИХОВ УТИЦАЈ НА ПОУЗДАНОСТ ПАРНИХ ТУРИНА	73
5.1 Модел одржавања на бази ризика	73
5.1.1 Утицај модела одржавања на бази ризика на поузданост парних турбина	76

5.2	Развој метода процене ризика	77
5.2.1	Развој Делфи методе (Delphi)	77
5.2.2	Развој методе логичке анализе	79
5.2.3	Развој матрица са проценом ризика	81
5.3	Модел пет стања парних турбина	86
6.	ЕКСПЛОАТАЦИОНА ИСТРАЖИВАЊА	106
6.1	Имплементација модела одржавања на бази ризика	106
6.2	Имплементација математичког модела стања на поузданост парних турбина у термоелектранама и топланама	123
6.2.1	Коментар резултата сопствених истраживања	148
6.2.2	Спроведена истраживања у смањењу застоја и повишења нивоа поузданости после примене модела на парним турбинама у ТЕ-ТО „Нови Сад“ у Новом Саду	149
6.3	Анализа примене метода процене ризика	152
6.3.1	Анализа примене Делфи методе	152
6.3.2	Анализа примене логичке анализе	154
6.3.3	Анализа примене метода матрица са проценом ризика	154
6.3.4	Дискусија резултата истраживања и поређење са другим уз утврђивање међусобне сличности и разлика	157
6.4	Истраживања предности имплементације модела одржавања на бази ризика на турбогенератору у термоелектрани «Костолац»	160
6.5	Доказ главне хипотезе	164
7.	ЗАКЉУЧАК	166
7.1	Кључни закључци	169
7.2	Теоријски допринос дисертације	169
7.3	Привредни допринос дисертације	170
7.4	Друштвени допринос дисертације	170
7.5	Научни допринос дисертације	171
8.	ПРАВЦИ ДАЉИХ ИСТРАЖИВАЊА	173
9.	ЛИТЕРАТУРА	174
10.	ПРИЛОЗИ	188

1. УВОД

Као параметар који карактерише *Моделе одржавања* може се прихватити карактер информација о техничком стању и поузданости постројења који ће се користити код одређивања периодичности и обима планских активности (поступака) одржавања. Поред овога критеријуми оптималности могу бити: расположивост и трошкови одржавања.¹

Одржавање парних турбина се може дефинисати као идентификовање и ублажавање деградације функционисања постројења, али, и као враћање пројектованих функција постројења, његових компонената и структуре у отказу, у првобитно стање. Систем одржавања може да се реализује на више начина, тј. у више различитих варијанти.²

Основне активности одржавања парних турбина се дефинишу као превентивне и као корективне активности одржавања.²

Корективне активности одржавања подразумевају враћање постројења, његових компонената и структуре у првобитно стање. Подразумевају исто тако поправку, ремонт или замену делова како би постројење у отказу поново изводило функције дефинисане унутар прихватљивог нивоа.²

Превентивне активности одржавања могу бити пеориодичне, предвиђене или планиране изводе се пре него што дође до отказа парних турбина, структуре или његових компонената, како би се постројењу продужио век трајања и рада.²

Одржавање на бази ризика; Да би се објаснио концепт одржавања на бази ризика као и примена овог одржавања на поузданост парних турбина, нужно је дефинисати појам не само одржавања него и појам ризика.³

Ризик је квантитативни и квалитативни опис опасности тј. мера опасности или нивоа опасности. Пошто је отказ неке компоненте у суштини статистички процес (вероватноћа појаве), ризик је адекватна величина која може да послужи као орјентир за доношење одлука о активностима одржавања.

Евидентно је да је за одређивање потреба одржавања поред последица битна и вероватноћа појаве отказа: за одређену компоненту могу последице бити изузетно велике. Али, уколико је вероватноћа појаве овог догађаја веома мала, онда је ри-

¹. Адамовић Ж., Голубовић Т.: Тотално одржавање, Универзитет у Новом Саду, Технички факултет „Михајло Пупин“ Зрењанин, 2000.

². Vesely, W. E., Rezos, J. T.: Risk-Based Maintenance Modeling. Prioritization of Maintenance Importances and Quantification of Maintenance Effectiveness, Prepared for Division of Systems Technology Office of Nuclear Regulatory Research U. S. Nuclear Regulatory Commission Washington, September, 1995.

³. Адамовић, Ж., Воскренски, В., Тул, Р.: Одржавање на бази ризика, Друштво за техничку дијагностику Србије, Београд, 2007.

зик отказа ове компоненте мањи од отказа неке друге компоненте са мањим последицама, али већом вероватноћом појаве. Може се приметити да је потреба за одржавање једне компоненте кватификована ризиком: што је већи ризик то је већа потреба за одржавањем.³

Безбедност парних турбина треба да се надгледа и контролише ради минимизације ризика. Контрола безбедности није статистички проблем, већ је континуални процес. У том циљу потребно је креирање организоване контроле, како би се процес у парним турбинама безбедно изводио.³

Стога, **RBI** (*Risk-Based Inspection*), односно „Техничка дијагностика на бази ризика“ има за циљ спречавање катастрофалних отказа. Да би се овај циљ остварио, морају се идентификовати саставни делови једног постројења, чији отказ може довести до повреде људства и великих финансијских губитака. Задатак ове методе је да се дефинишу одговарајући програми техничке дијагностике за посматрани технички систем, тако дасе:

- идентификују, оцене и рангирају сви ризици са становишта прекида радног процеса, безбедности и сигурности радника,
- одреде мере које треба да се предузму да би се значајни ризици смањили.³

Поред критичних делова система већ у почетним фазама треба анализирати и све оне делове који имају значајан утицај на трошкове одржавања, било са становишта учестаности оправке и/или са становишта величине трошкова оправке.³

Метода **RBI** нуди два основна алата за постизање оптимизације односно између ризика и улагања у техничку дијагностику:³

- квалитативни,
- квантитативни.

Квалитативни **RBI** је важан за почетне анализе. Циљ ове анализе је да се оцењена подручја процеса ставе у једну матрицу, на пример „пет пута пет“ (пет рангова вероватноће и пет рангова последица), који рангира поједине делове система са становишта ризика.

Квантитативном **RBI** анализом треба да се одреде ризици за сваки важан или критичан део система. Тек се са информацијама овог нивоа може дефинисати ефикасан програм техничке дијагностике. Овим поступком се оцењује и ризик целог система, као и утицај сваког појединачног дела.³

Трошкови сакупљања и обраде података уопште нису занемарљиви. Само у ретким случајевима подаци су доступни у електронској форми нпр. у виду базе података. Најчешће је реч о подацима у папирној форми, тако да њихово „обличавање“ представља мукотрпан посао. То изискује и утрошак времена, самим тим и новац, али се ова инвестиција спроводи једанпут и у сваком случају гледано са више аспеката.³

У оквиру праве анализе потребно је за сваку компоненту одредити могуће типове отказа. Све различите врсте штете (повреде људства, прекиди производње) морају бити израчунате примарним моделима.³

При анализи је потребно водити рачуна да један одређени део (компонента) може да откаже на различите начине, тј. трошкови одржавања који су повезани са њиховим отказом морају бити оцењени са условном вероватноћом одређене врсте отказа, односно треба да се узме у обзир приликом одређивања ризика.³

Након одређивања величине последица и вероватноћа отказа сваке компоненте, израчунавају се одговарајући ризици. Процес (ток) **RBI** истраживања води коначно до графика ризика за целокупно постројење, у коме су представљене последице насупрот вероватноћа појаве отказа. У ту сврху се врши представљање ризика у форми једне матрице ризика. Израчунавање ризика може се утврдити дали су у појединим случајевима ризици прихватљиви у оквирима постављеним критеријума. За редуковање ризика морају бити установљене одређене мере по могућности са што мањим трошковима, тј. треба оптимизовати ефекат мера одржавања у смислу смањења ризика са трошковима њиховог спровођења.

Учинак се може сагледати посматрајући Трошковно-корисни фактор:

$$TK = \text{Ризик без мера} / (\text{Ризик након спровођења мера} + \text{трошкови извођења мера})$$

Уколико се не спроводе мере овај фактор добија вредност 1. Међутим ако се изведу ефикасне мере одржавања, долази до редуције ризика при датим мерама, односно **TK** фактор расте и достиже свој максимум и онда опет опада.³

У основи метода смањења ризика је добијање више информација о стању оштећености одређеног елемента тј. дијагностиковани елемент. Свака дијагностичка инспекција нам даје информације о степену оштећености. Инспекција је уколико ефикаснија уколико је добијена информација прецизнија.³

Без спровођења дијагностичке контроле је појава отказа (квантификована помоћу вероватноће отказа) заснована на процени експерата. Оно може бити релативно нетачно. Инспектовање је носилац знања које треба да редукује непоузданост.³

У овој *докторској дисертацији* између осталог описаће се и приступи који се могу користити за приоритизацију важности ризика при одржавању парних турбина, као и за квантиковање утицаја метода одржавања на поузданост и ризик. На овај начин могу бити процењене индивидуалне методе одржавања, укључујући планске корективне, превентивне и методе одржавања према стању. Методе одржавања могу имати значајан утицај на поузданост и ризик парних турбина, али такође могу да укључе трошење значајних ресурса. Важно је дати приоритет значају индивидуалних активности одржавања и квантификовати њихово дејство на поузданост и ризик парних турбина. На овај начин се идентификују методе које су најзначајније у контролисању ризика при експлоатацији парних турбина.

Поузданост парних турбина представља вероватноћу даће постројење успешно вршити задату функцију критеријума у пројектованом времену и датим условима околине или се још потпуније дефинише као вероватноћа са одређеним степеном поверења да ће постројење или њихови делови (компоненте) обављати функцију за коју су намењени унутар специфицираних граница перформанси у току специфицираног времена трајања задатка, када се користе на прописани начин и у сврху за коју су намењени под специфичним нивоима оптерећења, узимајући и предходно време експлоатације постројења или њихових делова.⁴

Веома битна карактеристика која се односи на поузданост парних турбина јесте безбедност током рада.

⁴ Раџаioва, Н., Raschman, P.: Reliability, Risk and Maintenance Policy, Technial University of Kosice, Kosice, 2001.

Модели поузданости се могу користити за квантификовање, како позитивних, тако и негативних ефеката одржавања на недоступне компоненте парних турбина, као и ризика за цело постројење.²

Певентивно, корективно одржавање и поправке се процењују на основу својих предности и мана. Модели поузданости могу бити коришћени у оквиру **PRA** (процена вероватноће ризика) система мера, а активности и планови одржавања се могу посматрати из перспективе поузданости и ризика. Ове анализе не укључују експлицитно трошкове, али укључују варијабле које утичу на трошкове, као што су учесталост надзора, превентивно одржавање и поправке. Такође, новији извештаји обезбеђују софтверске алате који могу бити подршка постојећим приступима за процену и побољшање ефективности одржавања.²

Модели поузданости које користи **PRA**, претпостављају да систем може бити у оперативном стању и стању отказа. Ови модели не могу да квантификују корисне ефекте одржавања зато што не узимају у обзир деградативно стање компоненти. Главна улога одржавања је поправити деградацију пре него што до оштећења дође. Корисно је како превентивно, тако и корективно одржавање. Само негативни ефективни одржавања се квантификују у оквиру **PRA**, укључујући и људске грешке у оквиру одржавања. Модели поузданости могу значајно повећати могућност оцењивања ефективности одржавања и уверити на спречавање грешака у одговарајућем складу са временом када систем није у функцији.²

Модели поузданости у оквиру стандарда **PRA** могу бити једноставно проширени укључујући деградивно стање компоненти. Ови проширени модели постоје под називом **Модели по Маркову**.²

Модели поузданости по **Маркову** или **Модели одржавања на бази ризика**, могу квантификовати успешност одржавања на основу перформанси и поузданости компоненти које су подвргнуте активностима одржавања. То се пре свега односи на откривање и кориговање деградираних стања, потом на ефекте одржавања добри или лоши, и оно што је за ово разматрање најзначајније, активности одржавања не само да могу бити објективно оцењени по својој ефективности, већ могу бити оптимизоване из угла поузданости и ризика.² Дефинисање деградационих стања компоненти како у оперативном стању, тако и у отказу, пружа се могућност да се спречи и поправи деградација пре него што дође до отказа, односно вреднује утицај одржавања на поузданост а самим тим и на ризик.²

Моделовање **по Маркову** представља стандард, односно, представљају се нове апликације, укључујући и односе који се развијају за тражене нивое, како би се обезбедила практична имплементација модела. Ефекти одржавања су квантификовани дефинисањем деградационих стања компоненти, како у оперативном стању, тако и у отказу.²

Модел одржавања **по Маркову** је продужетак стандардних модела коришћених у оквиру **PRA**. Идентификацијом деградационих стања омогућава се вредновање корисних ефеката одржавања и одређивање оптималних интервала одржавања.²

Непоузданост дефинисаних компоненти могу бити касније испитане на основу **PRA** мера, како би се оценила ризична ефективност одржавања. Демонстрацијом модела се може доказати да се ефекти одржавања могу одразити на непоузданост компоненти у одређеним ситуацијама.²

Стандардни приступи поузданости представљају два стања за сваку компоненту, стање у раду и стање у отказу. На овај начин се могу квантификовати само негативни ефекти одржавања, укључујући и могуће грешке које се могу јавити при одржавању. Корисни ефекти се претходним методама нису могли тачно утврдити, из разлога што је управо корисан ефекат одржавања да се спречи и поправи деградација пре него што дође до отказа. Главна улога Моделовања *по Маркову* је да покаже како се моделовање може користити управо за квантификовање успешних ефеката одржавања на непоузданост компоненти, јер се овом методом могу квантификовати позитивни и негативни ефекти одржавања.²

Такође, карактеристике овог приступа су нови апликациони приступи који омогућавају детерминацију преносних нивоа на основу инжењерских података и инжењерских знања. Модел одржавања *по Маркову* се може директно користити за идентификовање оптималних интервала одржавања на основу поузданости компонентата, а са становишта перформанси на основу података о одржавању постројења.²

Модел Маркова може бити моћан алат за надзор ефикасности, за суплементацију апликација одржавања и за извођење функција одржавања. Компоненте које су укључене у овај модел могу бити улаз у вредновање ризичне ефикасности одржавања уз помоћ *PRA*.²

Експлоатациона истраживања вршиће се на две парне турбине у термоелектранитоплани „Нови Сад“ у Новом Саду, и то: РТ-135/165-130/15 и Т-110/120-130-4 и Термоелектрани “Костолац“ на турбогенератору (парна турбина К-100-90 (БК 100-6), генератор ТВФ-110-2 (ЕУЗ).

2. ПРЕГЛЕД ДОСАДАШЊИХ ИСТРАЖИВАЊА И ЛИТЕРАТУРЕ О ПРОУЧАВАНОМ ПРОБЛЕМУ

У овом поглављу презентоваће се преглед досадашњих истраживања и литературе у свету и код нас о проучаваној проблематици у дисертацији.

Настанак методологије *RBM (Risk Based Maintenance)* тј. Одржавање на бази ризика које је настало 80 - тих година прошлог века као трећа генерација методологија одржавања, означава пут ка смањењу трошкова, повећању профита и безбедности на раду, редуковањем инцидената, опасни по човека и околину; остварења максималне поузданости и века трајања техничких система.

Идеја о ризику и истраживања која су вршена, као моделу оптимизације у (САД и Европи) сервисним инспекцијама је у принципу прихваћено од многих.

Први опипљиви резултати појавили су се касних 80 – тих година прошлог века када се појавио у САД концепт инспектовања на бази ризика. Нешто касније, публикован је први документ (*ASME 1991*). На крају, NRC је спровела верификацију и валидацију праксе док је у Европи, Радна група (*Working Group*) за инспекцију на бази ризика постављена унутар европске мреже за квалификацију инспекција (*European Network on Inspection Qualification*).

У Америци, 1991. године, се појавио „Захтев за надзор успешности одржавања код електрана“, где се каже да: „успешност одржавања мора бити у складу са важећом законском регулативом на начин који уверава да ће кључне структуре, системи и њихове компоненте бити способне да изводе жељене функције и да ће се моћи достићи жељени резултати“. Односно, истиче се пре свега значај ефеката одржавања на безбедност и исто тако надзор успешности одржавања, које ће обезбедити висок ниво перформанси и низак ниво ризика.

Као одговор на овај текст Савет за менаџмент и ресурсе је 1993. године издао извештај у коме су процењене различите стратегије и изложене оне које се сматрају најкориснијим. Извештај је носио назив „Индустријско упуство за надзор успешности одржавања електрана“. Он представља опште упуство за избор важних *SSC-а (Structures, Systems and Components)* и успостављање критеријума ризика и перформанси, како би постројење могло да изводи жељене функције, а одржавање било што ефикасније. Један део извештаја говори о избору *SSC-а* (структуре, системи и компоненте) и разматра се могућност коришћења *PRA (Probabilistic Risk Assessment)* мера од значаја.

Новији извештаји од 1995. године дају детаљне приступе за коришћење *PRA* мера од значаја при рангирању *SSC-а*. На овај начин се могу рангирати системи, на основу ранга њихових компоненти. Модели поузданости се могу користити за квантификовање, како позитивних, тако и негативних ефеката одржавања на недоступне компоненте и системе, као и ризик за цело постројење.

Превентивно, корективно одржавање и поправке се процењују на основу својих предности и мана. Модели поузданости могу бити коришћени у оквиру *PRA* (процена вероватноће ризика) система мера, а активности и планови одржавања се

могу посматрати из перспективе поузданости и ризика. Ове анализе не укључују експлицитно трошкове, али укључују варијабле које утичу на трошкове, као што су учесталост надзор, превентивно одржавање и поправке. Такође, новији извештаји обезбеђују алате који могу бити подршка постојећим приступима за процену и побољшање ефективности одржавања.

Нови развијени међународни стандард ИЕС/ISO 31010:2009 под називом Управљање ризиком – технике процене ризика.

Овај међународни стандард је пратећи стандард за ISO 31000, он даје смернице за избор и примену систематских техника за процену ризика. Овај стандард описује и дефинише процес управљања ризицима, може да утиче на промену осталих стандарда за системе управљања. У области коју дефинише стандард ISO 27001:2005 нема значајније промене, јер све што је садржано у ISO 31000 већ је детаљно обрађено у стандарду ISO 27005:2008, који се бави управљањем ризицима.

Једна од карактеристика стандарда ISO 31000 јесте да се према њему не може вршити сертификација. Стандард ISO 31000 је резултат добре праксе у области управљања ризицима, потврђену кроз вишегодишње искуство.

Процена ризика изведена у складу са овим стандардом доприноси осталим активностима при управљању ризиком. Уведено је низ различитих техника, са спецификованим везама са другим међународним стандардима, које су описане веома детаљно.

Стандард није намењен сертификацији, као ни регулаторној или уговорној употреби. Он не даје специфичне критеријуме за идентификацију неопходности за анализу ризика, нити одређује врсту метода анализе ризика потребну за неку посебну употребу.

Овај стандард не односи се и на све технике у управљању ризиком, као и на недостатке техника садржаних у овом стандарду, а што не значи да оне због тога не вреде. Чињеница да је метод употребљив у неким околностима, не значи да он мора обавезно и да се примењује.

Такође, овај стандард се не бави посебно сигурношћу. То је општи стандард за управљање ризиком, а нека препорука за безбедност чисто је информативне природе.

Сврха процене ризика је обезбеђивање доказа о информацијама и анализи, како би се донела одлука о томе како поступати са одређеним ризицима и да би се извршио избор између различитих опција.

Неки од главних бенефита (корисности) процене су:

- разумевање ризика и његовог потенцијалног утицаја на циљеве;
- обезбеђивање неопходних информација за доносиоце одлука;
- допринос разумевању ризика, како би се помогло у избору опције деловања;
- идентификовање важних доприноса ризику и слабим везама у системима и организацијама;
- поређење ризика у алтернативним системима, технологијама или приступима;
- обавештавање о ризицима и неизвесностима;
- помагање у утврђивању приоритета;

- припрема за превенцију инцидента засновану на истраживању после инцидента;
- избор различитих облика деловања ризика;
- сабирање регулаторних захтева;
- пружање информација које треба да помогну у процени да ли ризик треба прихватити када се пореди са унапред дефинисаним критеријумима;
- процена ризика при одлагању века трајања.

Стандард ИЕС 60300-3-9:1995 (*International Electrotechnical Commission*) за извођење анализе ризика у свом трећем поглављу даје основна упутства за процену ризика у радној средини.

У појединим случајевима ризик може бити велики и представља узрок хаварија или несрећних случајева на раду. У другим случајевима ризик је мањи, а последице не тако опасне, као и безначајни материјални губици. У радној средини узроци хаварија су обично индустријског карактера, приликом којих су људи изложени ризику са тешким последицама. За ризик од хаварија важан је локални извор опасности, јер величина настале опасности зависи од растојања од центра хаварије. Како при хаварији постројења може да настрада велики број људи, може се говорити не само о индивидуалном, већ и о социјалном ризику. У овом Стандарду су дате методе као што је Делфи метода (Delphi), која се заснива на индивидуалним проценама експерата.

Ова је метода разрађена како би се процењивала опасност производње или посебних радних операција, заснованих на типским радним операцијама. Метода се користи ради процењивања сагласности захтеваних норматива или стандарда, а такође и ради објективне процене и узимања у обзир мишљења и жеља самих радника.

Анкетама је лако служити се и оне представљају погодно средство да се обезбеди минимални могући ниво опасности у свакој радној средини. Предност је у томе што специјалиста за заштиту на раду без специјалне спреме, анализирајући информацију добијену путем анкете, може да дође до задовољавајућег резултата и добије неопходне податке за даљу пунију процену ризика. Ефективност коришћења анкета зависи од компетације и искуства њихових састављача, због чега их треба константно пресегледавати и допуњавати.

Метода логичке анализе грешака или метода „Стабла грешака“ и „Стабла догађаја“ (*Fault Tree analysis, Event Tree analysis*) су класичне методе процене.

Метода анализе грешака (MAG) је дедуктивна метода, помоћу које је могуће распознати узорке неког конкретног нежељног догађаја или грешке. То је графичка метода, која у облику дијаграма изражава могуће узајамне комбинације техничких дефеката људских грешака, природних појава и других догађаја који могу да доведу до конкретног нежељног догађаја.

Матрице са проценом ризика, могуће је користити са различитим методама и шемама. Ризике је могуће проценити *Квалитативно* и *Квантитативно*. Применом квалитативних метода ризици се, у основи, оцењују субјективно. У многим случајевима у самој основи тих метода леже такозване „МАТРИЦЕ РИЗИКА“. Ако се у процедуру процене ризика уводи систем степени или бодова, који више или мање објективно (количински) оцењује могућност догађаја и опасност последице, тада је могуће говорити о полуквантитативном методу процене. Полу-

квантитативни метод обично допуњава квалитативну анализу. Њега користе такође у почетним студијама квалитативне анализе.

Квалитативно оцењени ризик карактерише процену порекла потенцијалне претње и вида опасности. Квалитативна процена ризика фактички не одређује ни вероватноћу дешавања опасног догађаја у простору и времену, ни опсег могућих последица. А ако она чак и указује на вероватноћу и опасност последица, неопходни се параметри одређују по систему нивоа и тачака.

Када су у питању Модели одржавања на бази ризика број примењивих модела није превелик, углавном се своди на моделе одржавања који се заснивају на Марковљевој процедури, тј. на примени Марковљевих ланаца.

Један од развијених модела и који представља моћан алат за оцењивање корисних ефеката активности одржавања и одређивања оптималних интервала одржавања, на основу поузданости компонената је Модел четири стања по Маркову који ће бити примењен и прилагођен у дисертацији.

- [1] С. Derman.: (1963) Уведен је први Марковљев модел одржавања. У овом раду аутор говори о оптималној замени правила када су промењена стања Марковљева.
- [2] С. Derman.: (1970) Синтезу добијених резултата исти аутор изложио је у монографији Марковљев процес одлучивања о коначним стањима.
- [3] Y. Notoyama.: (1984) Разматране су Марковљеве процедуре на процесе одржавања на техничке системе уопште.
- [4] J. Endreny, S. H. Sim.: (1986) У овом чланку изложено је оптимално превентивно одржавање уређаја непрекидног деловања, који се поправљају током деловања.
- [5] S. H. Sim, J. Endreny.: (1988) У овом раду разматра се оптимално превентивно одржавање са поправком помоћу Марковљевих ланаца.
- [6] P. K. Samanta, W. E. Vesely, F. Hsu, M. Subudly.: (1991) Аутори су у раду дали моделовање деградације са применом на старење и ефикасне процене одржавања нуклеарних електрана.
- [7] P. K. Samanta, F. Hsu, M. Subudhi, W. E. Vesely.: (1991) Исти аутори наставили су своја истраживања где су у овом раду дали анализу деградације компонената и процена ефикасности одржавања и ефеката старења.
- [8] W. E. Vesely.: (1993) У овом раду уведено је Марковљево моделовање везано за квантификовање ефикасности одржавања при раду турбине нуклеарне електране. Приказан је Марковљев приступ за квантификовање ефеката одржавања на недоступност и ризик. Моделовање Маркова је стандардно; међутим, оно што је ново јесте нове примене које су представљене, укључујући релације које су развијене за потребе брзине транзиције које су представљене како би се омогућиле практичне имплементације модела. Ефекти одржавања се квантификују дефинисањем деградираног стања компоненте, поред оперативног стања и отказног стања. Марковљев модел одржавања, који је развијен је природно проширење стандардних модела који се користе у процени вероватноће ризика (*Probabilistic Risk Assessments-PRA*) и поједностављује се према *PRA* моделима, када се деградирано стање не разликује од оперативног стања. Идентификација деградираног стања дозвољава експлицитну процену предности одржавања и одређује оптималне интервале одржавања. Компоненте које нису утврђене, могу се касније користити у *PRA*-у да би се проценила ефикасност ризика одржавања. Приказане су при-

- мене овог модела. Приказани примери показују да ефекти одржавања на недоступне компоненте могу да буду од великог значаја у неким ситуацијама.
- [9] W. E. Vesely, J. T. Rezos.: (1995) У овом документу под називом Моделовање одржавања засновано на ризику обрађено је утврђивање приоритета код одржавања и кватификација ефикасности одржавања по поглављима. У првом поглављу дато је процењивање ефеката одржавања на поузданост и ризик. У другом поглављу дате су важне мере за примену приоритизације одржавања. У трећем поглављу извршено је квантификовање утицаја одржавања на непоузданост и ризик коришћењем моделовања по Маркову. Развијен је модел Маркова четири могућа стања, као и његова примена на турбине нукларних електрана. У четвртном поглављу дато је процењивање непоузданости компонента у нуклерним електранама насупрот интервалу одржавања.
- [10] T. M. Welte, J. Vatn, J. Heggset.: (2006) У овом чланку дат је Марковљев модел стања за оптимизацију одржавања и обновљања хидроелектрана.
- [11] G. K. Chman, S. Agarpoor.: (2006) У овом раду разматра се оптимална политика одржавања помоћу Марковљеве процедуре.
- [12] A. Baghela.: (2012) Код овог рада дата је примена Марковљевих ланаца на испитивање функционисања електрана.
- [13] J. Johansson, H. Hassel, E. Zio.: Аутори су приказали анализу поузданости и повредивости инфраструктура поређењем два приступа посматрања електрана.
- [14] D. N. Dewangan, Manoj kumar Jha, Y. P. Banjare.: (2014) У овом раду приказана су истраживања поузданости парних турбина у термоелектранама. Режим грешке при вибрацијама изазваних паром, неуравнотеженост ротирајућих елемената, неусклађеност турбинске осовине, неисправност ротора, нестабилност дебљине филма уља у лежајевима итд. су одговорни за непоузданост и неизвесност отказа у раду термоелектране. Искуство оператера, извођење плана одржавања од стране пројектаната и произвођача доводи до смањења појаве могућих отказа система. Процена поузданости заснована је на подацима о отказима током последњих пет година, за две турбине од 500 [MW]. Обе су инсталисане и пуштене у рад истовремено. Метод процене поузданости заснован је на концепту поузданости система, као што су функционално стабло развоја, применом режима отказа и анализе ефеката (*Failure Mode and Effects Analysis - FMEA*) за категоризацију критичних компоненти заснованој бази података о отказима ради побољшања поузданости система. Неопходно је побољшати индексе поузданости термоелектране са предузимањем неких мера, као што су добро планирано и рутинско одржавање опреме, као и обука и преквалификација техничких људских ресурса за већи део опреме.
- [15] J. E. Ruiz-Castro: (2016) Овај рад представља Марковљев процес набрајања и подржавања представљања сложених система подвргнутих случајним прегледима (инспекцијама).
- [16] Д. Миличић, З. Миловановић.: (2010) Ова монографија обухвата свеобухватну анализу парних турбина, где је између осталог дата експлоатација и одржавање парних турбина, основни показатељи поузданоаси рада и техничка дијагностика парних турбина.
- [17] Z. Orłowski: (1995) У овом раду развијен је општи дијагностички модел из кибернетичког модела турбине. Описан је вибродијагностички модел, што омогућава да се одреде откази са становишта вибрација и генерисања буке. Турбине су посматране као системи у којима долази до појаве сампобудних вибрација. Овакав закључак проистиче из кибернетичког модела турбине.

- Ово је изложено на примеру из текуће праксе, тако што је приказана веза између промена подешавања вратила турбине и амплитуде еластичног осциловања система.
- [18] Y. G. Li: (2002) Циљ овог рада је да допринесе раном откривању отказа у раду турбина. Ово се изводи коришћењем података које дају произвођачи опреме и искуством стеченим при одржавању уграђене опреме. Циљ овог рада је да изложи свеобухватан преглед анализа доступних метода за дијагностификовање отказа гасних турбина у постојећој литератури. Перформансе гасних турбина погоршавају се током рада система, чиме доводе до деградације компоненета система, што представља извор ризика за рад система. Применом различитих дијагностичких метода, које имају одређене предности и недостатке, постиже се квалитетнија анализа ризика у посматраном систему.
- [19] K. Fujiyama, S. Nagai, Y. Akikuni, T. Fujiwara, K. Furuya, S. Matsumoto, K. Takagi, T. Kawabata: (2004) У овом раду се посматра одржавање на основу ризика (*RMB - Risk Based Maintenance*), које је развијено за постројења са парним турбинама и повезано са системом брзог инспекцијског надзора. *RMB* систем користи поље отказа и инспекцијску базу података прикупљену у току 30 година. Режији отказа одређени су за сваку компоненту парних турбина и сви сценарији отказа описани су као стабла догађаја. Вероватноће отказа изражене су у облику функције непоузданости радних часова или циклуса стартовања – метод кумулативне (укупне) функције опасности. Накнадна непоузданост изведена је анализом поља података у складу са информацијама о инспекцији. У овом раду приказан је квантитативни *RMB* метод за парне турбине. Показано је да статистичка формулација вероватноће отказа као функција времена или циклуса је врло ефикасан начин за процену ризика за различите начине отказа и ланца узастопних (сукцесивних) отказа.
- [20] A.M. Rusin: (2007) Тема овог рада је процена техничког ризика укљученог у дуготрајно функционисање делова енергетских система. Извршене су детаљне анализе за компоненте парних турбина. Идентификовани су извори и последице ризика и израчунате су вероватноће отказа компоненета турбина. Извршена је и квантитативна процена ризика и дискутована је могућност његовог смањења. Контролисан је и технички ризик укључен у рад парних турбина, пре свега нивоом ризика за оштећење ротора. Цилиндри и вентили су изложени мањим ризицима. Величина ризика одређена је временом рада. Такође, праћене су промене настале у нестационарним фазама рада компоненета парне турбине посебно при стартовању. Утврђено је да при релативно кратком раду и малим бројем стартовања турбине је и ниво ризика мали.
- [21] P. Bragatto, C. D. Site, A. Faragnoli: (2012): Рад приказује метод који показује да алтернатива интервалима инспекција, долази из инспекције засноване на ризику. Инспекција заснована на ризику (*RBI*) представља ефикасан метод за смањење ризика и подизање нивоа безбедности у многим гранама индустрије. Док су у класичном детерминистичком приступу фреквенција (учесталост) инспекције и режима фиксирани, у инспекцијама заснованим на ризику за сваки део опреме, интервал контроле зависи од нивоа ризика. Инспекција заснована на ризику обезбеђује већи ниво сигурности без повећања трошкова; има доста степени слободе, због чега су могуће злоупотребе од стране предузећа која нису сигурна. Због тога су многа национална законодавства врло обазрива у примени инспекције засноване на ризику.

- Ово је случај са Италијом, где се примењује детерминистички приступ и у новој регулативи о опреми под притиском. Имплементација инспекције засноване на ризику у термоелектранама мора бити допуштена од случаја до случаја и оператори морају да покажу његову еквивалентност са детерминистичким приступом.
- [22] R Kauer, A. Jovanovic, S. Angelsen, G. Vage (2004): У раду је дат преглед европског пројекта RIMAP. Важно је схватити да способност компанија за препознавање иновативних концепата јесте одлучујућа да се задовољавају прогресивни захтеви који доприносе конкурентности. Концепти контроле и операциони концепти у комбинацији са одговарајућом стратегијом одржавања битно утичу на економску ефикасност термоелектрана на исти начин као и на квалитет њихове производње. Садашње управљање термоелектранама захтева интегрални приступ, који омогућава одлучивање, с обзиром на интеракцију између различитих система, као и на разлику између различитих фаза током радног циклуса, са фокусирањем на економску ефикасност. Стога потребно је да се стално прате стања средстава термоелектрана.
- [23] М. Djarić, Lj. Lukic, A. Pavlovic (2016): Разматра се нови приступ Европске уније увођењем новог приступа техничкој хармонизацији и стандардизацији и постигнути напредак у области техничке сигурности производње и процена њихове усклађености, кроз интегрисане сигурносних захтева за производњу у процесу развоја производа. Ово се постиже квантификавањем нивоа ризика са циљем утврђивања обима потребних мера сигурности и развоја система. Теорија вероватноће користи се као средство за моделовање неодређености у процени тог ризика. У протеклих четрдесет година развијене су нове математичке теорије које су се показале бољим у моделовању неодређености када нема довољно података о догађајима који чине неодређености, што је обично случај у развоју нових производа. Бајесове мреже заснивају се на моделовању субјективних вероватноћа и мрежа доказа заснованих на Демпстер – Шеферовој теорији функција провере показало се као одлично средство за моделовање неодређености када нема довољно информација о свим аспектима догађаја.
- [24] J.T. Selvic, P. Scarf, T. Aven (2011): У овом раду разматра се инспекцијско планирање које је важна активност у процесним индустријама. Један од кључних алата који се користе у таквом планирању јесте методологија инспекције засноване на ризику (RBI). Инспекција заснована на ризику обично се користи у планирању инспекција за стационарну механичку опрему, посебно за мреже ценовода. Приоритет инспекција заснива се на ризику, изражених као очекивана вредност, интегрисујући вероватноћу и последице неуспеха. У овом раду предлаже се проширење (RBI) методологије која одражава ризик и неизвесности изван очекиваних вредности. Аутори тврде да је такво продужење од суштинског значаја за адекватно подржавање планирања инспекције. Пример је ценовод из норвешке нафте и представљена је гасна индустрија која илуструје и дискутује о предложеном приступу.
- [25] М.С., Eti, S.O.T., Ogaji, S.D., Robert (2007): Полазећи од чињенице да је побољшање поузданости и одржавања система и њихових делова увек пожељно, аутори посматрају процес рада термоелектране. Последњих година ово је нарочито изражено, како у најразвијенијим, тако и у земљама у развоју. Поузданост, као и одржавање (RAMS), као и анализа ризика, постају

велики проблем у енергетским системима (у термоенергетици). Главни узроци незадовољства потрошача настају услед честих и неочекиваних отказа система који, опет, доводе до неочекиваних трошкова којима су изложене термоелектране. Учесталост оваквих отказа може да се смањи и њихове последице да се знатно минимизују. Користећи искуства из развијених земаља, аутори су развили поступак којим се врши интегрисање поузданости и одржавања (RAMS) и анализе ризика на термоелектране у земљама у развоју, односно у термоелектранама са чешћим отказима. Овај рад разматра примену анализе узрока отказа на анализу ефикасности и анализу појаве критичних стања, као и на повратне информације, како би се смањила учесталост и трошкови одржавања.

Литературу без коментара набрајамо у фусноти.

- ¹ C. Derman: On Optimal Replacement Rules When Changes of State Are Markovian, *Mathematical Optimization Techniques*, Edited by Richard Bellman pp. 201-210, The RAND Corporation, Santa Monica, California, 1963.
- ² C. Derman: *Finite State Markovian Decision Processes*, Academic Press, New York, (1970).
- ³ Y. Hatoiyama.: On Markov Maintenance Problems. *IEEE Transactions on Reliability*. Vol. R-33, No 4, pp. 280-283, (1984).
- ⁴ J. Endreny, S. H. Sim.: Optimal preventive maintenance for continuously operating repairable equipment. Ontario Hydro Resarch Division Report K. Government publication, State or province government publication, 1986.
- ⁵ S. H. Sim, J. Endreny.: Optimal preventive maintenance with repair. *IEEE Trans. Reliability*, 37 (1), 177, (1988).
- ⁶ P. K. Samanta, W. E. Vesely, F. Hsu, M. Subudhi.: Degradation modeling with application to aging maintenance effectiveness evaluations. Division of Systems Research, Office of Nuclear Regulatory Research, US Nuclear Regulatory Commission, March, 1, (1991).
- ⁷ P. K. Samanta, F. Hsu, M. Subudhi, W. E. Vesely.: Analyses of component degradation to evaluate maintenance effectiveness and aging effects. Brookhaven National Lab., Upton, NY (United States). Funding organization: Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC (United States), Jan. 1, (1991).
- ⁸ W. E. Vesely.: Quantifying maintenance effects on unavailability and risk using Markov Modeling. *Reliability Engineering and System Safety*, 41, 177-178, Elsevier Science Publisher Ltd. England, (1993).
- ⁹ W. E. Vesely, J. T. Rezos.: Risk-Based Maintenance Modeling. Prioritization of Maintenance Importances and Quantification of Maintenance Effectiveness. Prepared for Division of Systems Technology Office of Nuclear Regulatory Research U.S. Nuclear Regulatory Commission Washington, September, (1995)
- ¹⁰ T. M. Welte, J. Vatn, J. Heggset.: Markov state model for optimization of maintenance and renewal of hydro power components. In: *Proceedings 9th International Conference Methods Applied to Power System KTH*, Stockholm, Sweden; 11-15 June, (2006).
- ¹¹ G. K. Chan, S. Agarpoor.: Optimum maintenance policy with Markov processes. *Electr Power Syst. Res.*, 76, 432, (2006).
- ¹² A. Baghela.: Application of Markov process to improve production of power plant. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 2 (1), 200, (2012).
- ¹³ J. Johansson, H. Hassel, E. Zio.: Reliability and vulnerability analyses of critical infrastructures. Comparing two approaches in the context of power systems. *Reliability Engineering and System Safety*, 120, 27, (2013).
- ¹⁴ D. N. Dewangan, Manoj Kumar Jha, Y. P. Banjare.: Reliability Investigation of Steam Turbine Used In Thermal Power Plant, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 3 (7), 14915, (2014).
- ¹⁵ J. E. Ruiz-Castro.: Markov counting and reward processes for analysis the performance of a complex system subject to random inspectios. *Reliability Engineering and System Safety*, 145, 155, (2016).
- ¹⁶ Д. Миличић, З. Миловановић.: Енергетске Машине-Парне Турбине, Универзитет у Бања Луци, Машински факултет Бања Лука, (2010).
- ¹⁷ Z. Orlowski: A Model for Operational Diagnostics of Steam Turbines, *Mechanical Systems and Signal Processing*. 9(2), pp. 215-222, (1995).
- ¹⁸ Y. G. Li: Performance Analysis Based Gas Turbine Diagnostics: A Review, *Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 216, pp. 363-377, (2002).
- ¹⁹ K. Fujiyama, S. Nagai, Y. Akikuni, T. Fujiwara, K. Furuya, S. Matsumoto, K. Takagi, T. Kawabata: Risk-based Inspection and Maintenance Systems for Steam Turbines, *International Journal of ressure Vessels and Piping*, 81, pp. 825-835, (2004).
- ²⁰ A.M. Rusin: Technical Risk Involved in Long-term Operation of Steam Turbines, *Reliability Engineering and System Safty*, 92, pp. 1242-1249, (2007).

- ²¹ P. Bragatto: CorradoDelle Site, Angelo Faragnoli: Opportunities and Threats of Risk Based Inspections: the new Italian Legislation on Pressure Equipment Inspection. TheItalianAssociationof Chemical Engineering.Vol. 26, pp. 177 – 182, (2012).
- ²² R. Kauer, A. Jovanovic, S. Angelsen, G. Vage: Plant Asset Management RIMAP (Riska – Based Inspection and Maintenance for European Industries) The European Approach. TASME PVP Risk and Reliability and Evaluation of Components and Machinery.Vol. 488.July 25 – 29, San Diego, California, (2004).
- ²³ M. Djapic, Lj. Lukic, A. Pavlovic: Technical Product Risk Assessment: Standards, Integration in the Erm Modeland UncertaintyModeling. International Journal for Quality SearchlResearch.10(1), pp.159 – 176, (2016).
- ²⁴ J.T. Selvic, P. Scarf, T. Aven: An Extended Methodologyfor Risk Based Inspection Planning. Reliability: Theory and Applications.01(20) Vol. 2, pp. 115 – 126, (2011).
- ²⁵ M.C., Eti, S.O.T., Ogaji, S.D., Robert: Integrating reliability, availability, maintainability and supportability with risk analysis for improved operation of the Afam thermal power-station, Applied Energy, 84, pp. 202-221, (2007).

3. МЕТОДОЛОШКИ КОНЦЕПТ ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1 ПРОБЛЕМ ИСТРАЖИВАЊА

То је креирање општих модела одржавања на бази ризика и њихових утицаја на поузданост парних турбина.

Нарочити захтеви који се постављају у експлоатацији парних турбина и побољшању њихових перформанси указују да у будућности треба посветити све већу пажњу одржавању парних турбина на бази ризика.

Откази елемената парних турбина имају често непредвидиве последице на материјална и природна добра. Да би се спречили откази парних турбина потребно је да сви елементи постројења имају одговарајућу поузданост. Сваки уграђени елемент код парних турбина треба да обезбеди потребну поузданост рада турбине како би се омогућило несметано одвијање технолошког процеса.

Одржавање парних турбина у погледу динамике и садржаја спровођења мора бити базирано на ризицима. Због тога се мора спровести одржавање које ће обезбедити оптималне ефекте уз минималне трошкове рада. Основни правци одржавања на бази ризика парних турбина морају бити усмерени на дефинисању поступака и критеријума оптимизације који ће омогућити најповољније односе перформанси система одржавања, односно поузданости парних турбина и трошкова одржавања.

Имајући у виду да се код парних турбина откази и поремећаји дешавају по неким законитостима и да се може предвидети стање парних турбина, могуће је применити моделе одржавања на бази ризика.

3.2 ПРЕДМЕТ ИСТРАЖИВАЊА

То је избор најбољих параметара за формирање нових модела одржавања на бази ризика и њихових утицаја на повишење нивоа поузданости парних турбина.

Да би се потврдила претходна истраживања потребно је извршити примену датих модела одржавања на бази ризика из теорије и праксе, као и развој нових модела одржавања на бази ризика и њихових утицаја на побољшању поузданости парних турбина.

Одабраће се парне турбине које су предмет овог истраживања и пратити експериментални рад један одређени период у експлоатацији код којих постоји потреба за применом датих модела и уочити могућност примене одговарајућих модела одржавања на бази ризика, као и примена развијених модела одржавања на бази ризика и њихових утицаја на побољшању поузданости парних турбина.

3.3 ЦИЉ ИСТРАЖИВАЊА

- проучавање модела одржавања на бази ризика,
- експериментално праћење стања на одабраним парним турбинама,

На одабраним парним турбинама пратиће се стања парних турбина у одређеном периоду и одређеним временским интервалима. Анализираће се број отказа и по-

ремећаја парних турбина и предложити активности које је потребно изводити да би се смањио број отказа и застоја у циљу повећања поузданости и продужења века трајања парних турбина.

На основу добијених резултата приликом праћења и испитивања на парним турбинама, предложиће се одговарајуће мере и активности које је потребно изводити како би се у будућности смањио број застоја, повећала поузданост и смањио ризик од отказа целе парне турбине:

- примена модела одржавања на бази ризика из теорије и праксе и њихов утицај на поузданост парних турбина,
- развој и примена нових модела одржавања на бази ризика и њихових утицаја на повећање укупне поузданост целе парне турбине.

3.4 ГЛАВНА ХИПОТЕЗА

Главна хипотеза гласи: *Могуће је формирати моделе одржавања на бази ризика у циљу повишења нивоа поузданости парних турбина у процесу експлоатације.*

Модели ће бити моћан алат за надзор ефикасности, за суплементацију апликација одржавања парних турбина и за извођење функције одржавања.

Очекивани резултати истраживања допринеће развоју и практичној примени модела одржавања на бази ризика и њихових утицаја на повишење нивоа поузданости посматраних парних турбина а и на све сличне парне турбине.

Помоћне хипотезе су примена метода процене ризика и то:

- примене Делфи методе,
- примене метода логичке анализе и
- примене метода матрице са проценом ризика.

3.4.1 План рада

Истраживања планирана у овој докторској дисертацији укључиће примену савремених научних метода које ће бити наведене у наредном делу поглавља

1. Фазе истраживања:

I - ФАЗА: Упознавање са актуелним достигнућима у области теоријских модела одржавања на бази ризика.

II - ФАЗА: Експериментално праћење одређених параметара за одабрану парну турбину.

III - ФАЗА: Примена развијених модела одржавања на бази ризика из теорије и праксе на поузданост парних турбина,

IV - ФАЗА: Примена развијених нових модела одржавања на бази ризика ради повећања укупне поузданости парне турбине,

V - ФАЗА: Допринос развијених нових модела одржавања на бази ризика треба да потврди повећање укупне поузданосту парне турбине као и повећање продуктивности на годишњем нивоу, смањењу трошкова у првој години примене модела и то кроз елиминацију плаћања пенала услед непоштовања уговореног термина испоруке топлотне и електричне енергије, оптимизације профила људи и њиховог броја у служби одржавања.

3.5 МЕТОДЕ ИСТРАЖИВАЊА

У истраживању *Модела одржавања на бази ризика* и њихов утицај на поузданост парних турбина, користиће се следеће методе:

Метода анализе - Анализа ће се примењивати из разлога што предмет проучавања обавља веома сложену и одговорну функцију. Анализом стања парних турбина у раду и отказу сагледаће се врсте, узроци и последице отказа или поремећаја односно поузданости, предложити и применити модели одржавања на бази ризика ради повећања укупне поузданости парних турбина.

Метода синтезе - Захваљујући методи анализе потребно је након тога применити методу синтезе (завршну фазу) како би се постигло јединство и целина предмета уз примену информација о стеченим, методом анализе.

Статистичка метода - На основу статистичке методе ће се утврдити параметри и показатељи који ће се пратити у току анализе, показатељи преко којих се најчешће оцењују стања парних турбина. Статистичком методом пратиће се откази и поремећаји у одређеном периоду као и обрада датих података уз помоћ математичких и рачунарских програма.

Експерименталне методе - Експериментална праћења ће се вршити у Термоелектрани – Топлани „Нови Сад“ Нови Сад на две парне турбине. Експериментална испитивања започеће континуалним праћењем и анализом брзина вибрација клизних лежишта парних турбина, број обртаја ротора, континуалним праћењем температуре уља иза хладњака, притисак расхладне воде пред уљним хладњацима, температура уља испред хладњака и иза РУП (резервна уљна пумпа) и ХУП (хаваријска уљна пумпа), притисак уља за регулацију, притисак уља за подмазивања и температура метала сегмената аксијалних лежишта.

Метода моделовања

Користиће се математички и теоријски модели одржавања на бази ризика из теорије и праксе и њихов утицај на поузданост парних турбина и на основу постојећих модела развили би се и применили нових модели одржавања на бази ризика и њихов утицај на повећање укупне поузданости одабраних парних турбина, као и примена на парне турбине уопште.

Методи моделовања по Маркову

Карактеристике овог приступа моделовања су нови апликациони приступи који омогућавају детерминацију преносних нивоа на основу инжењерских података и инжењерске праксе, као и према постојећим стандардима, који се односе на рад парних турбина.

3.6 НАУЧНА И ДРУШТВЕНА ОПРАВДАНОСТ ИСТРАЖИВАЊА

С обзиром да су термоелектране важан елемент у производњи електричне и топлотне енергије, њихово стајање доводи до великих губитака. Један од могућих узрока стајања термоелектране може бити и отказ компонената парне турбине. Парне турбине спадају у критичне машине, чије заустављање истовремено значи и заустављање читаве производње.

У циљу одржавања продуктивности погона, хаварија и заустављање парних турбина се не сме дозволити. Из тих разлога се овде велики значај даје непрекидном

праћењу стања парне турбине са уграђеним мерним системима са имплементарном функцијом заштите и периодичним неуграђеним мерним системима, а самим тим и праћењу стања парних турбина.

Праћење стања парних турбина или одржавање према стању добијају се систематизовани подаци о могућим појавама отказа. Код одржавања на бази ризика парних турбина управо се користи одржавање према стању а у чијем саставу је и техничка дијагностика.

Одржавање на бази ризика парних турбина користи, повезује вероватноћу појаве отказа и последице ових отказа.

Истовремено се раде и програми за контролу рада парних турбина.

На тај начин могу се предвидети и спречити откази компонената или целе парне турбине, а смим тим и направити знатне уштеде.

Из овог се види научна и друштвена оправданост истраживања.

У дисертацији ће бити развијени модели одржавања на бази ризика, као и њихов утицај на поузданост парних турбина, што ће допринети смањењу појаве броја отказа на компонентама и самим тим и на целој парној турбини.

Основни циљ развијених нових модела је повећање укупне поузданости, расположивости парне турбине, смањење трошкова одржавања и гаранција целовитости опреме и сигурности (безбедности) људи.

3.7 ОРГАНИЗАЦИЈА ИСТРАЖИВАЊА

Организација истраживања у дисертацији обухвата:

- припрему за научни рад
- планирање за научни рад
- израду докторске дисертације.

У процесу организовања, прва фаза је истраживачка, а затим следи фаза планирања за научни рад.

Структура, редослед и повезаност тезе зависи од приступа главној хипотези, а она може бити:

- оправданост хипотезе
- потврђивање хипотезе.

Истраживачки и научни рад, као што је докторска дисертација, се не може почети без претходно постављених теза.

Теза као план рада ће се развијати у више нивоа:

- упознавање са актуелним достигнућима у области теоријских модела одржавања на бази ризика;
- експериментално праћење одређених параметара за одабране парне турбине;
- примена развијених модела одржавања на бази ризика из теорије и праксе на поузданост парних турбина;
- примена развијених нових модела одржавања на бази ризика ради повећања укупне поузданости парне турбине;

- допринос развијених нових модела одржавања на бази ризика треба да потврди повећање укупне поузданости парне турбине, као и повећање продуктивности на годишњем нивоу, смањењу трошкова у првој години примене модела и то кроз елиминацију плаћања пенала услед неиспоштовања уговореног термина испоруке топлотне и електричне енергије, оптимизације профила људи и њиховог броја у служби одржавања.

4. ТЕОРИЈСКА ИСТРАЖИВАЊА

У овом поглављу обрађено је: развој и значај одржавања, теоријске концепције одржавања, историјски развој поузданости, затим анализа ризика, методе процене ризика и одржавања на бази ризика, техничка дијагностика и њен утицај на поузданост и ризик парних турбине, дијагностика стања парних турбина, одржавање засновано на ризику парних турбине у свету и модел четири стања по Маркову који ће се применити на поузданост и ризик рада парних турбине.

4.1 РАЗВОЈ И ЗНАЧАЈ ОДРЖАВАЊА⁵

Одржавање на почетку индустријске цивилизације није се заснивало ни на каквим економским и техничким принципима, поготово што је тада и сама производња била далеко од тога да буде рационална, па су зато и све пратеће активности биле запуштене. Међу различитим активностима које прате производњу, одржавање данас добија све већу важност и побуђује велики интерес зато што се односи на систем у свим секторима производње, у свим могућим радним циклусима и на свим техничким и технолошким нивоима.

Прво савремено поимање и третирање одржавања заживело је у САД-у, одакле се новонастали начин размишљања пренео и у Европу после II светског рата.

Стратегија: “поправка након отказа” била је присутна све до 50-тих година прошлог века и није више могла да одговори на повећане захтеве светског тржишта.

Овај период карактерише и развој производње, појава првог IBM компјутера и представља револуцију у мониторингу и процењивању података као и захтевима за квалитетом производа. Ово је усмерило размишљања ка смањивању губитака у производњи а самим тим и редуковањем превентивних радова на одржавању машина, све док отказ није на виду.

Из потребе за смањивањем губитака у времену и повећаним захтевима за поузданошћу система, активности одржавања су постале планске и временски одређене. Став је да у овој проблематици, није довољна поправка након што је отказ наступио, већ га, уколико је то могуће треба предвидети. Тако је настало превентивно одржавање, односно активности одржавања се обављају према зацртаном плану пре него што настане отказ. Мотивисани губицима у производњи, као трошковима насталим услед лошег квалитета, менаџмент почиње да се бави конципирањем планова превентивног одржавања, којима се предвиђа, у тачно одређеним интервалима, демонтажа појединих делова техничких система ради контроле и правовремене замене компоненти и делова подложних хабању, корозији или напрезању. Замена се често врши и у случају да постојећи део задовољава постављене критеријуме, али се ипак не може предвидети да ли он може трајати до следеће ревизије. Анализа и реа-

⁵. Томић, М., Адамовић, Ж.: Поузданост у функцији одржавања техничких система, Техничка књига, Београд, 1986.

лизација планова превентивног одржавања захтева постојање специфичне организационе структуре и прецизно дефинисаних ингеренција и компетенција персонала који води посао. Због тога се организују сервиси одржавања који обједињују ове активности, планирају их, координирају и врше контролу техничке ефикасности. У исто време долази до снажног развоја електронске индустрије, авиоиндустрије и осталих специфичних грана које се одликују сложеним деловима и склоповима, чија је поузданост од великог значаја. У развијеним земљама све више се обраћала пажња на поузданост система и на континуално праћење стања у коме се налазе. Једно од решења било је ангажовање спољних предузећа у смислу извођења радова одржавања (оутсоурцинг). У почетку су предузећа тежила да све раде самостално. Одржавање се све више временом организовало као одговор на појаву све сложенијих средстава за рад, израду резервних делова, док се извођење специфичних операција одржавања постепено препуштало специјализованим предузећима. Због тога се појављују све чешће полисе осигурања које се односе на одређене ризике отказа, као и на ризике због штета услед застоја у раду. Од 70-тих година XX века, а то је време беспштедне утакмице на светском тржишту, повећане комплексности техничких система нужно се мења филозофија одржавања и унапређује.

Појављују се нови приступи у управљању функцијом одржавања као што су:

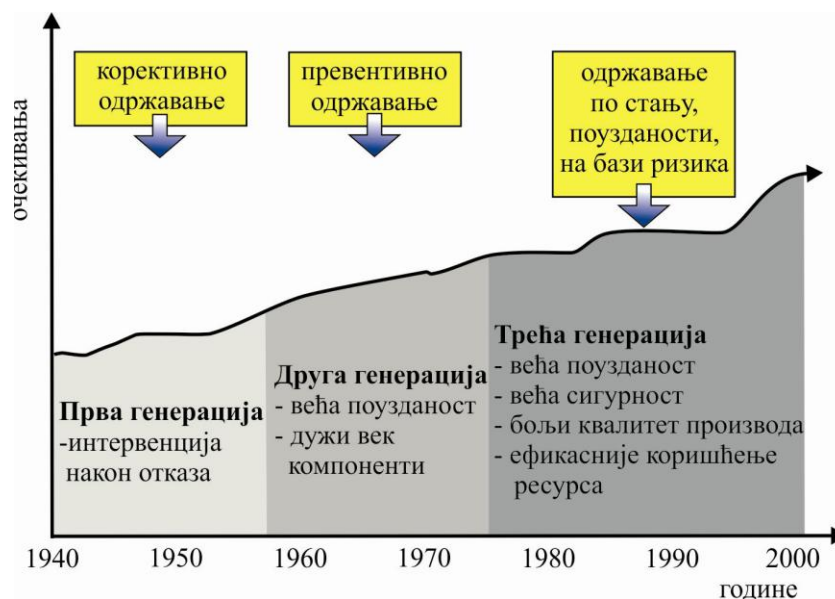
- теротехнолошки - стручњаци одржавања морају својим знањем да директно или индиректно да учествују у свим фазама животног века опреме и
- логистички - основна идеја је да се посебна пажња посвети фазама пројектовања и производње опреме, како би она имала високи степен поузданости и била погодна за одржавање.

Потреба за променом филозофије одржавања актуелизирана је и поводом неких индустријских инцидената (нпр. Чернобил) што је указало да је потребно повећати поузданост рада система, употпунити знања о техничким системима са становишта узрока и последица на научним основама као што су мониторинг, техничка дијагностика, неуронске мреже и Марков модел. Настанак нових техника и методологија као што су *RCM (Reliability Centered Maintenance)*, тј. одржавања које је засновано на поузданости, *TPM (Total Productive Maintenance)* и других омогућавају већу ефикасност техничких система, а да они при томе буду у оптималном стању. Настанак нових техника и методологија као што су *RCM (Reliability Centered Maintenance)*, тј. одржавања које је засновано на поузданости, *TPM (Total Productive Maintenance)* и других омогућавају већу ефикасност техничких система, а да они при томе буду у оптималном стању.

Интензиван развој нових научних дисциплина крајем XX века, динамичне промене, све убрзанији развој технике и технологије, посебно система аутоматског управљања, информатике и других грана системских наука, рефлектовали су се и условили даљи развој и допуњавање постојећих методологија управљања одржавањем техничких система.

Тако је настанак методологија *RBM (Risk Based Maintenance)*, тј. одржавања на бази ризика означава пут ка смањењу трошкова, повећању профита и безбедности на раду, редуковању инцидената, опасних по човека и околину; остварење максималне поузданости и века трајања техничких система.³

На сл. 4.1 приказан је развој методологија одржавања у виду трогенерациске еволуције.



Слика 4.1: Еволуција методологија одржавања⁶

Евидентно је да је развој техничких система условио и појаву нових методологија како би се одговорило савременим захтевима и условима пословања.⁶

4.2 КОНЦЕПЦИЈЕ ОДРЖАВАЊА

Данас у свету постоји неколико приступа систему одржавања (филозофије или школе) међу којима се издвајају (слика 4.2):³

На слици 4.3 приказане су концепције одржавања, на временској осци, онако како је текао историјски развој одржавања и са њим праћен интензитет (стопа) отказа.

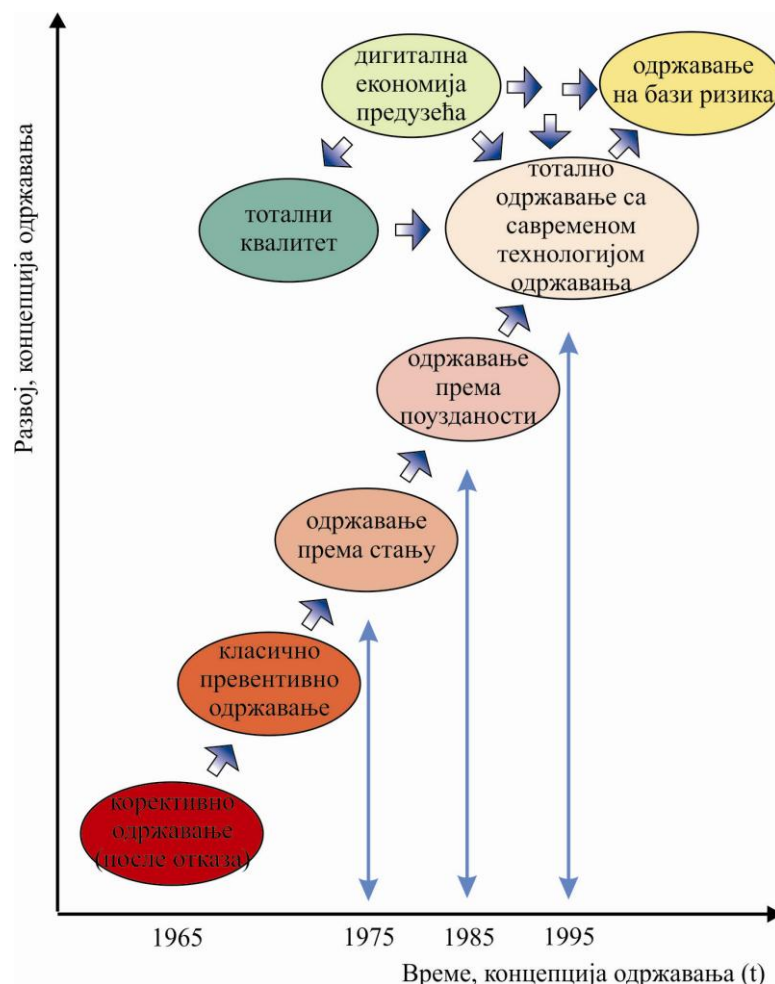
Корективно одржавање се појавило у најранијим добима, и код њега је највећа стопа интензитета отказа.

Треба напоменути, да не значи да се концепт корективног одржавања више не примењује. Он се може и даље примењивати тамо где је то економски оправдано, али оно што треба поменути је то да се избегава његова примена услед незнања или проблема услед увођења савремених концепција одржавања. Свака од ових концепција одржавања има своје предности и недостатака. Корективно одржавање има најмање предности а највише недостатака. Овде се може уочити да како је концепција одржавања савременија, опадају недостаци повећавају се предности, тако да тотално одржавање са савременом технологијом одржавања и одржавање на бази ризика имају највише предности а најмање недостатака.

Са слике 4.3. је видљиво, да треба тежити примени савремених концепција одржавања као што су предиктивно, односно одржавање према стању, који је термин чешће заступљен на нашим просторима. С обзиром да се код нас у великом броју предузећа врши корективно одржавање, а да постоји проблем и са увођењем и превентивног одржавања, мишљење је, да је проактивно одржавање, тотално одр-

⁶ Адамовић, Ж., Николић, Д.: Технологија одржавања, Универзитет у Новом Саду, Технички факултет, „Михајло Пупин“ Зрењанин, 2003.

жавање са савременом технологијом одржавања и одржавање на бази ризика исувише велики степен за развој одржавања на овим просторима, па се из тих разлога посебна пажња посвећује одржавању према стању са нагласком на техничку дијагностику која може бити веза са проактивним одржавањем, тоталним одржавањем са савременом технологијом одржавања и одржавањем на бази ризика и на тај начин одржањем везе са најсавременијим концепцијама одржавања.



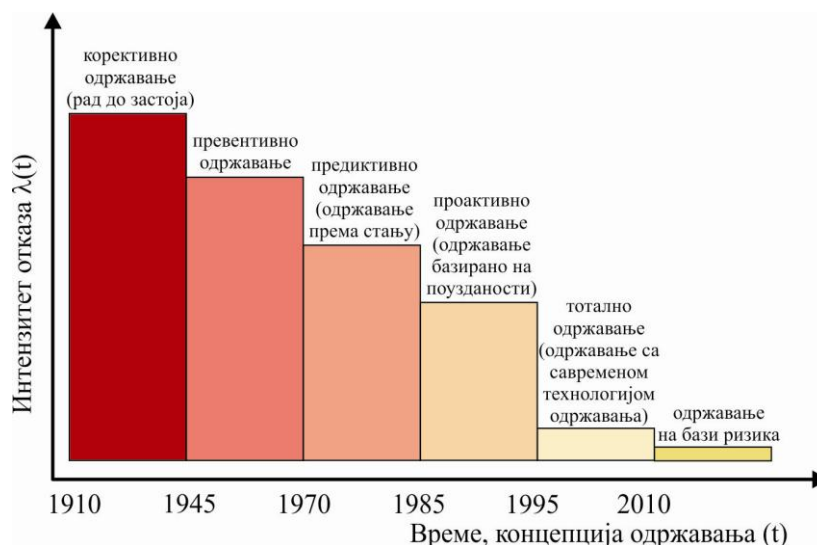
Слика 4.2: Концепције одржавања³

Проактивни приступ проблема одржавања техничких система, базиран је на сталном праћењу и контроли основних узрочника отказа и активностима на њиховом елиминисању или значајном смањењу негативног дејства. Са друге стране превентивно одржавање према стању усмерено је на откривање и праћење раних симптома отказа (вибрација, температура и продуката хабања). 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 машине "воде здрав живот" и да им се на тај начин максимално продужи век експлоатације.¹

Тотално одржавање са савременом технологијом одржавања појавило се 1995. године. Циљ овог одржавања је потпуна елиминација губитака (свођење на нулу).⁷

⁷ Адамовић, Ж., Ђурић, Ж.: Менаџмент одржавања, Универзитет у Новом Саду, Технички факултет, „Михајло Пупин“ Зрењанин, 2005.

Тотално одржавање за потребе наше индустрије које је примењено у око 30% великих предузећа у нашој земљи развио је проф. др Живослав Адамовић.



Слика 4.3: Концепције одржавања

На слици 4.4. дати су типови одржавања машина са својим основним предностима и манана.⁸

1. Одржавање након појаве отказа (енгл. *Curative maintenance*), које се по неким можда и не може назвати правим одржавањем јер се његова примена своди само на једноставну констатацију да се десио неки вид оштећења на машини и да је дошло време за извођење корективних мера на истој.

Стога његова примена са собом носи следеће последице:

- озбиљне губитке укупне продуктивности погона,
- појава оштећења и хаварије је крајње случајног (стохастичког) карактера и
- време извођења корективних мера на оштећеној машини је наметнуто.

2. Превентивно одржавање (енгл. *Preventive maintenance*), које се даље може разврстати на:

Системско одржавање или одржавање по ресурсу које се заснива на извођењу корективних мера на машини по тврдо дефинисаним интервалима на чију дужину не утиче стварно стање машине.

Оно са собом, на тај начин, носи следеће последице:

- замена исправних делова на машини и
- изузетно високи трошкови одржавања.

3. Одржавање према стању (енгл. *Conditional maintenance*) које се заснива на праћењу параметара који директно одржава тренутну радну способност опреме и машине.

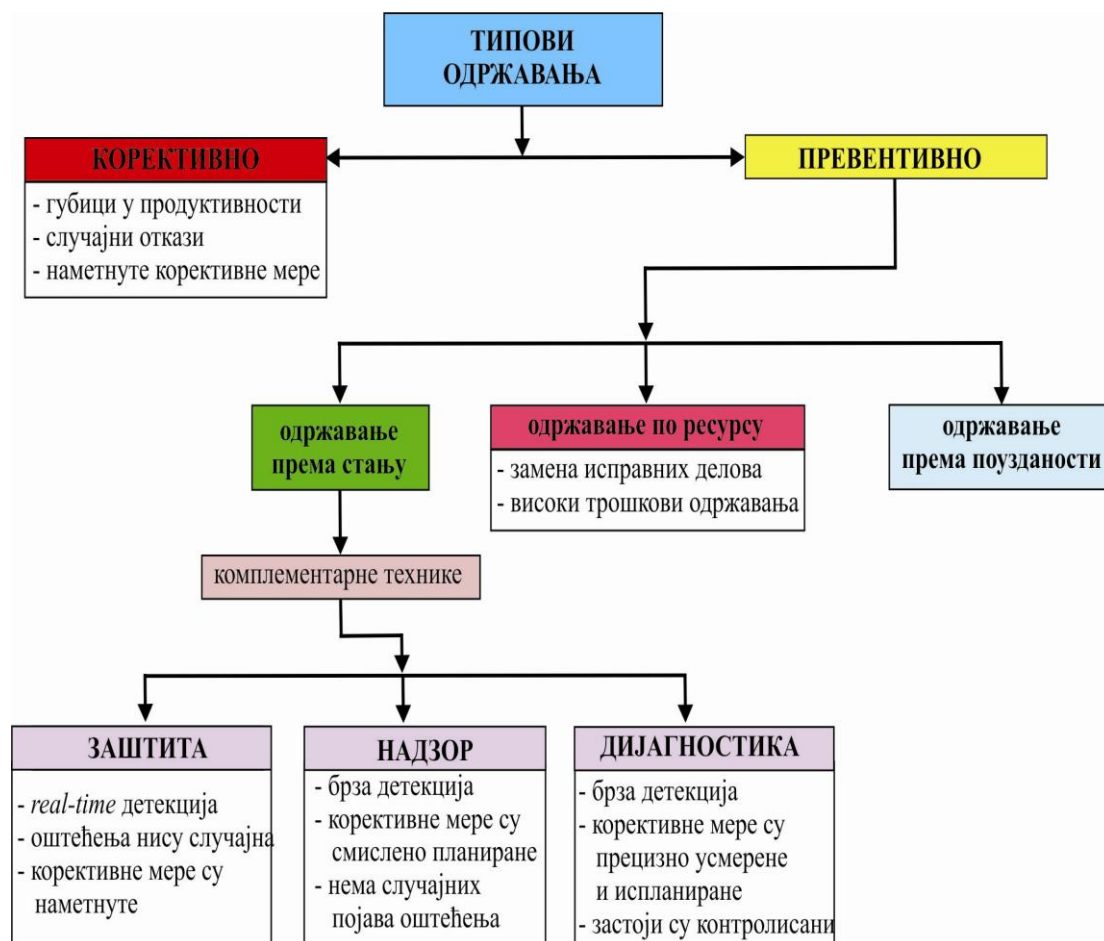
Одржавање према стању има три међусобно комплементарна нивоа и приступа:

⁸ Зубер, Н., Личен, Х.: Типови предиктивног одржавања опреме на бази мерења и анализе вибрација, Стратегије имплементације, Пример, XX Конференција са међународним учешћем, Тара, 2006.

Први ниво - ЗАШТИТА

Обезбеђује брзу детекцију појаве критичних стања по машину:

- Време извођења корективних мера је наметнуто, с обзиром да су системи који имају искључиво функцију заштите углавном једноставни системи који механичку вибрацију приказују као општи скаларни параметар (*RMS, peak...*) на основу кога се не може извршити озбиљнија дијагностика оштећења ротирајуће машине.



Слика 4.4: Типови одржавања машина са својим основним предностима и манам⁸

Други ниво - НАДЗОР

- Обезбеђује моменталну (*realtime*) детекцију угрожености машине, обзиром да су системи са уграђеном функцијом заштите, системи перманентног мониторинга машине.
- Појава оштећења није случајног карактера.
- Време извођења корективних мера, за разлику од система са искључиво уграђеном функцијом заштите, није наметнуто већ је планирано из разлога што су надзорни системи за аквизицију и анализу вибрација системи *ON-LINE* надзора: подаци се континуално не само мере, већ се истовремено и прослеђују на пример *PC*-у на коме оператор у сваком моменту има увида у тренутно стање на машини. За разлику од надзорних система, системи заштите су најчешће онлине аквизициони али они не прослеђују податке, њихо-

ва улога се своди на континуално мерење вибрација и њихово поређење са алармним вредностима. У случају достизања алармних вредности аквизициони систем може или да активира неки од реалних излаза или рецимо да искључи погон ротирајуће машине и на тај начин да заштити машину. Како се код система са искључиво уграђеном функцијом заштите никад не може предвидети активација заштите, самим тим је и, код њихове примене, време извођења корективних мера наметнуто. Код система који имају и функцију надзора, време извођења корективних мера се планира али се природа корективних мера (балансирање, центрирање вратила, поравнање ременице) не зна, са обзиром да систем не поседује способности вибродијагностичке анализе.

Трећи ниво - ДИЈАГНОСТИКА

Обезбеђује моменталну (реалтима) детекцију угрожености машине:

- Време извођења корективних мера се планира. Осим тога и врста корективних мера се планира са обзиром да се дијагностика фреквентног спектра и временског записа вибрација може да изолује главног узрочника повишених нивоа вибрација.
- Самим тим што се зна узрочник повишених нивоа вибрација и сами застоји су планирани.

4. Проактивно одржавање - одржавање базирано на поузданости (енгл. *Proactive maintenance*) представља капитализацију техника одржавања.

Овај се приступ базира на праћењу свих оштећења која су се јавила до узрока који су довели до њихове појаве. Сваки од отказа се анализира и након чега се изводе проактивне мере са задатком поновног спречавања појаве тог узрока и оштећења.

Најчешће коришћена техника која се ту користи је *RCFA (Root Cause Failure Analysis)*.

Технике одржавања машине се могу поредити са техникама вођења рачуна о сопственом здрављу. (Табела 4.1.).⁸

Стратегија одржавања	Потребна техника	Паралела са људским телом
Проактивно одржавање	Мониторинг и анализа корених узрочника повишених вибрација	Мерење и контрола крвног притиска и строга контрола уноса хране
Предикативно одржавање	Мониторинг вибрација, саосности, стања уља, температуре лежајева	Детекција срчаних болести применом ЕКГ-а
Превентивно одржавање	Периодична замена делова	Операција трансплантације срца
Корективно одржавање	Изузетно високи трошкови одржавања	Срчани/мождани удар

Табела 4.1: Техника одржавања и паралела са људским телом⁸

4.3 ИСТОРИЈСКИ РАЗВОЈ ПОУЗДАНОСТИ⁹

У комплексној анализи техничких система (машина и постројења), није довољно познавати само њихове техничке карактеристике у ужем смислу, већ је нужно разматрати и функционисање система током експлоатације како би се установила законитост појављивања отказа делова или система у целини.

О поузданости се почело говорити између I и II светског рата, када су се појавили први авиони са више мотора и када се поставило питање њиховог успешног коришћења у некој мисији - узимајући у обзир различите системе пропулзије.

У САД су почели да се баве поузданошћу посебно за време корејског рата. Откази који су тада настајали на електронским системима бомбардера узроковали су велике штете, а годишњи трошкови одржавања прелазили су вредност самог електронског уређаја.

После рата, о поузданости се почело говорити, не само на војном, већ и на цивилном пољу, а посебно на подручју авијације и истраживања свемира.

Даљим развојем, због повећаних технолошких и продукционих потреба, рад на утврђивању поузданости се толико развија и проширује да постаје незаменљив и саставни део пројектовања, управљања и одржавања техничких система.

Историјски гледано, једна од првих области поузданости у којој су постигнути одређени резултати при математичком решавању - јесте област опслуживања система (А. У. Minčín, 1932; С. Palm, 1943.).

Примена теорије обнављања и њено прерастање у посебну математичку дисциплину јавља се у периоду од 1939. до 1949. године (А. Ј. Lotka, 1939; W. Feller, 1947.). Модели са Вејбуловом расподелом настају 1939. године (W. Weibul, 1939), а модели са нормалном и гама расподелом настају 1945. године (N. E. Daniels, 1945.).

Једна од првих књига из ове области, која се појавила 1961. године, јесте »Теорија и примена поузданости« Игорa Безовског.

Међутим, последњих година у свету су се појавиле не само комплетне монографије из теорије поузданости и приручници са упутствима за примену, него је покренут и велики број часописа који специјалистички разматрају проблеме везане за теорију поузданости.

Мотиви који упућују истраживаче на проучавање и примену технике поузданости су у следећем:

- технички системи се све више шире и траже да буду што сложенији, услед чега расте вероватноћа отказа и немогућност одржавања система на нивоу максималне поузданости,
- настојање да се смањи тежина и запремина производа као и сигурност њиховог функционисања,
- настојање да се повећа трајност производа (техничких система),

⁹ Адамовић, Ж., Станковић, Н., Савић, Б.: Поузданост машина и постројења, Stylos Art, Нови Сад, 2011.

- тешкоће у одржавању које се могу појавити код теже приступачних делова система као и оних система који морају дуже да раде без могућности оправке,
- жеља да се елиминира ризик било људских било материјалних губитака,
- економска штета која настаје због лошег функционисања једног техничког система (било зато што су системи све скупљи, било зато што су намењени већем обиму производње),
- пораст поузданости обезбеђује квалитет система у целини, а то значи и успешно освајање тржишта.

Поузданост делова и система дефинише се посебним нормама и прописима. У САД је 1973. године уведен *Закон о сигурности и поузданости техничких система*. У СССР-у је 1974. године донет јединствен комплекс тзв. ГОСТ-стандарда и других докумената који се односе на поступке за утврђивања поузданости, планирање одржавања, техничку дијагностику, контролу квалитета и др.

Код нас, такође, постоје одређене одредбе о поузданости, с тежњом да се поузданост производа прилагоди намени, деловању, изради, веку трајања, складиштењу итд.

Данас у развијеним земљама, па и на нивоу одговарајућих међународних асоцијација, дошло је до промена у неким битним термиолошким и појмовним одређењима. То се, пре свега, односи на документе и стандарде *IEC*, као и на здружене *ISO/IEC* стандарде, који служе као основа и за одговарајуће националне стандарде.

При томе треба да се напомене да стандарди асоцијације *IEC*, који се, пре свега, баве системима електротехнике и електронике, самостално или у сарадњи са *ISO* асоцијацијом, која исте послове обавља у области машинства, важе практично за све техничке системе, па и за све врсте машинских система.

4.4 АНАЛИЗА РИЗИКА³

1. Дефиниција ризика³

Људи су одувек доносили одлуке засноване на ризику: иницијално, директно, на бази искуства, а касније користећи историјске податке који су се генерацијски преносили.

Термин *ризик* потиче од италијанске речи "*rissiko*" и француске "*risique*". Овај термин је имао више значења тако да у литератури постоји више различитих дефиниција термина ризик, из разлога што постоје бројни различити концепти анализе, у зависности од тога за коју се професионалну област врши анализа.

Rowe (1997) дефинише ризик као могућност да се реализују негативне последице догађаја.

Davidsson (1997) је дао три различите дефиниције ризика коришћених у различитом контексту:

- вероватноћа појаве нежељеног догађаја,
- негативне последице догађаја или
- измерена процена вероватноће и последица.

Постављањем питања "Колики је ризик", реално су постављена три питања:

- Шта може да се догоди?

- Колико често се то дешава?
- Уколико се то догоди, какве су последице?

Прво питање упућује на могући нежељени сценарио, друго на вероватноћу да се тај сценарио догоди, док је треће повезано са његовим последицама. Ова питања нашла су своје место и у *IEC (International Electrotechnical Commuision)* стандарду за извођење анализе ризика (*IEC 60300-3-9:1995*), који дефинише ризик као "комбинацију фреквенције или вероватноће појаве и последица специфицираног случајног догађаја".

Термин ризика се не може дефинисати само на основи настале штете услед испада одређене компоненте у процесу рада, већ је од значаја и вероватноћа појаве овог нежељеног догађаја. Из тог разлога дефиниција ризика обухвата обе ове величине: „последицу испада система” и „вероватноћу” његове појаве:³

$$\text{ризик} = \text{последица} \times \text{вероватноћа}$$

За већину инжењера, ризик је једноставно друга реч за вероватноћу појаве дефинисаног догађаја.

2. Основе анализе ризика³

У последњој декади XX века јавља се велико интересовање у правцу истраживања побољшања способности управљања неизвесношћу, а посебно њеним негативним утицајем на организационом нивоу. То је довело до развоја и примена алата, техника процеса и методологија које се квалификују термином менаџмент ризика.

Анализа ризика је поступак којем је циљ установити "рањивости" система, уочити потенцијалне опасности (ризике), те на одговарајући начин квантификовати могуће последице да би се могао одабрати најделотворнији начин заштите, односно проценити оправданост увођења додатних "противмера".

Анализом ризика морају се утврдити следеће чињенице:

- критични ресурси и њихова вредност (релативна или новчана);
- преглед могућих опасности и вероватноће њихове појаве;
- потенцијални губици које проузрокује остварење опасности;
- препоручене противмере (надзор) и заштита.

На темељу добијених резултата потребно је одлучити какве противмере треба предузети.

Постоје три могућности деловања које нису међусобно искључиве:

- смањење ризика,
- пренос ризика,
- прихватање ризика.

Смањење ризика представља процес у којем се на темељу проведене анализе ризика настоје провести одговарајуће противмере и увести сигурносни надзор да би се заштитили ресурси организације. У том поступку настоји се смањити вероватноћа опасности и/или њен утицај на процес. Једини приступ који у управљању ризиком није прихватљив је игнорисање или занемаривање ризика. Треба знати да

је управљање ризиком континуалан процес, те да се однос вредности ресурса, рањивости и опасности с временом мења.¹⁰

Постоје два основна приступа анализи ризика: квалитативна анализа и квантитативна анализа.

Квалитативни критеријуми користе речи као што су вероватно, могуће, немогуће често, ретко како би се описала вероватноћа појаве и речи као што су незнатно, катастрофално итд., како би се описале последице догађаја.

Квантитативни критеријуми користе нумеричке вредности како би описали вероватноћу и последице догађаја.

3. Квалитативни приступ (матрица ризика)³

Овај метод започиње додељивањем квалитативних вредности вероватноћама догађаја и последица које се касније користе при детерминисању квалитативног фактора ризика.

Кључне карактеристике овог метода су да:

- омогућава независно одређивање вероватноћа и последица ризика,
- обезбеђује квалитативно дефинисање ризика и његове тежине.

Методологија се одвија у корацима:³

- 1) Адресирање сваке ризичне ситуације на основу појединачних форми за одређивање ризика.
- 2) Детерминисање квалитативне вероватноће појаве (P) за сваки ризик на подесан начин и на основу реалног критеријума. У табели се приказују типични критеријуми за установљавање квалитативних вредности вероватноћа.
- 3) Детерминисање квалитативних вредности последица појаве (C) за сваки ризик на подесан начин и на основу реалног критеријума.

У зависности од активности и способности да се издиференцира ниво ризика, могу се конструисати матрице различитих нивоа "осетљивости".

4. Квантитативни приступ³

Овај метод се заснива на додељивању квантитативних вредности вероватноћама појаве и последицама догађаја, које се користе за детерминисање квантитативног фактора ризика. Кључне карактеристике метода огледају се у следећем:

- омогућава квалитативно дефинисање ризика, али на основу квантитативних података о нивоу ризика,
- пружа финију издиференцираност унутар нивоа ризика.

Метод је користан за дефинисање приоритета активности, посебно у случају када постоји велики број идентификованих ризичних ситуација.

Методологија се заснива на једначини за фактор ризика:

¹⁰ Arnold, J.: Vorsorgen mit quantitativen Risikoanalysen von Prozessan-Lagen; DNV consulting, Esen, 2005.

$$RF = (P \times C)$$

где су:

RF - фактор ризика,

P - вероватноћа појаве,

C - последице појаве.

Методологија се одвија у следећим корацима:

- 1) Адресирање сваке ризичне ситуације на основу појединачних форми за одређивање ризика;
- 2) Детерминисање квантитативне вероватноће појаве (P) за сваки ризик на подесан начин и на основу реалног критеријума. Вероватноћа се изражава као децимални број;
- 3) Детерминисање квантитативних вредности последица појаве (C) за сваки ризик на подесан начин и на основу реалног критеријума. У табели се приказују типични критеријуми за установљавање квантитативних вредности последица.
- 4) Коришћењем формуле $RF = P \times C$, детерминише се фактор ризика за сваки идентификовани ризик;
- 5) На основу добијених вредности одређује се ниво ризика за сваки идентификовани ризик.

5. Дефиниција процеса управљања ризиком³

Примарни циљ било које анализе поузданости или безбедности је да се идентификују опасности, како би били у могућности да редукујемо или елиминишемо вероватноћу појаве нежељеног догађаја и његове консеквенце по човека, његову околину или економију. До овога долази када је иницијални догађај праћен грешком система.

Kumamoto и *Henley* (1996) су навели догађаје који су узрочници основних типова отказа:

- догађаји који су последица људског фактора, тј. грешке у дизајну и одржавању,
- догађаји кој су последица хардвера, нпр. цурење вентила,
- догађаји који последице утицаја околине (земљотреси, поплаве).

Термин „управљање ризиком“ се генерално користи како би се обухватио целокупан процес укључујући квалитативне и квантитативне методе, не само да се идентификује опасност и процени ризик, већ да се он редукује, односно редукују трошкови укупне очекиване штете и смањи вероватноћа, последице појаве догађаја или обоје, заједно са имплементацијом и мониторингом.

Управљање ризиком проналази своје место у убрзаном развоју технологија и порасту опште бриге о безбедности и загађењу, и обезбеђује процедуре за процењивање и управљање ризиком. Иако је сврха управљања ризиком иста за различите области и дисциплине да заштити друштво од утицаја опасних средстава и догађаја, не постоји експлицитна дефиниција процеса управљања ризиком. У сваком случају, он у себи инкорпорира активности: идентификације опасности, одређивања ризика, процењивања ризика и анализе ризика.

6. Управљање ризиком у области техничких система³

На пољу инжењеринга, где се разматра ризик техничких система (машина и постројења), управљање ризиком има корене у индустрији са комплексном, високоразвијеном технологијом и захтевима у смислу безбедности, као што су термоелектране-топлане, електроцентралне, хемијска индустрија, аеронаутика и електронска индустрија.

Дефиниција процеса управљања ризиком садржана је у стандарду *SS-EN 1050:1996* везаном за безбедност техничких система. Такође, већ поменути стандард *IEC 60300-3-9:1995* у анализи ризика садржи исте односе између активности, као процес управљања ризиком.³

Први корак анализе ризика даје дефиниције везане за систем и идентификацију опасности, што упућује на квалитативну анализу ризика.

Квантитативна анализа ризика се врши ради естимације ризика, при чему се последице вероватноће и ризик квантификују. Амерички институт хемијских инжењера (*AICHE*) развио је сличну методологију квантитативне анализе ризика (*CPQRA*), која помаже у евалуацији целокупног процеса безбедности процеса у хемијској индустрији.

Основно интересовање *PRA (Probabilistic Risk Analysis)* је на критичним догађајима који могу довести до катастрофалних последица. Методологија је заснована на *NUREG* процедурама, а *PRA* развијена од стране Комисије за нуклеарну регулативу САД, примењена је у америчкој нуклеарној индустрији.

У сваком случају, методологија садржи исте кораке у процесу анализе ризика.¹¹

Циљ одређивања ризика јесте да обезбеди потребне информације као подршку управљању ризиком у доношењу одлука. Уколико је ризик неприхватљив, редукација ризика ће бити разматрана даље са анализирањем новог могућег нежељеног догађаја.

Комплетан опис ризика је итеративан процес, који обично почиње са применом квалитативних метода које, ако је потребно, прелазе у квантитативне. Уколико се спроведе квантитативна анализа ризика, тада мора бити установљен модел система. Када се одреди модел система и подаци, може се започети са прорачуном како би се проценио ризик и идентификовале критичне компоненте и догађаји.

То се најчешће ради помоћу аналитичких метода или *Monte Carlo simulacije*.

Приказана дефиниција процеса управљања ризиком се користи у области безбедности техничких система, али у овом облику уз мање адаптације примењива је и у хемијској, нуклеарној, као и у грађевинској индустрији.¹¹

Анализа узрочног ланца ризичних догађаја указује на то да стању отказа претходи стање ризика система. Због тога је проучавање стања ризика од изузетног значаја за одржавање техничких система. С једне стране оно побољшава квалитет одржавања према стању, а са друге, пружа неопходне информације за планирање превентивног одржавања. Корективно одржавање посматрано на нивоу система смањује губитке због материјализације ризичног догађаја у виду отказа система.

¹¹ Ljungquist, K.: A Probabilistic Approach to Risk Analysis, Lulea, University of Technology, 2005.

4.5 МЕТОДЕ ПРОЦЕНЕ РИЗИКА И ОДРЖАВАЊА НА БАЗИ РИЗИКА

4.5.1 Методе процене вероватноће ризика – PRA³

Основне активности одржавања парних турбина дефинишу се као превентивне, (одржавања према стању) или као корективне активности одржавања. Оне могу имати значајан утицај на поузданост и ризик, али такође могу да повлаче са собом битан утрошак ресурса. Од велике је важности дати приоритет значају индивидуалних активности одржавања (укључујући и корективне и превентивне) и квантификовати њихово дејство на поузданост и ризик.

У процесној индустрији менаџмент ризика је традиционално фокусиран на разматрање вероватноће специфичних догађаја или хаваријских ситуација вероватноћа прегревања парних турбина, дисфункције система заштите од пожара. У енергетским постројењима која представљају најзначајније поље примене, од 70-тих година прошлог века у САД је уведен структурирани приступ за идентификацију сценарија отказа и конципирање математичких алатки у нумеричком процењивању ризика - *PSA (Probabilistic safety assessment - Процена вероватноће ризика)*.

Системи у процесној индустрији су обично добро дефинисани и омогућавају примену софистицираних средстава за анализу. Користе се поменуте методе за идентификацију критичних догађаја или секвенци догађаја, као што су *Failure mode and effect analysis (FMEA)*, *Hazard and Operability study (HAZOP)*, матрица реакције. Методе за одређивање вероватноће догађаја и ефеката потенцијалних активности укључују анализу стабла грешака и стабла догађаја. Такође, нека од мера важности компоненти (*Fussell-Vesely, Birnbaum*) су веома корисна у покушају да се повећа поузданост система.

Мерења важности су алати од изузетног значаја за квантификовање критичности појединих компоненти унутар дизајна система. Она се нашироко користе као средства за идентификацију "слабости" система и приоритизацију активности на повећању поузданости. Такође, обезбеђују драгоцене информације о безбедности и функционисању система.

Традиционална теорија поузданости базирана је на претпоставци бинарног "понашања" система. Систем и његове компоненте су у стању "рада" или "отказа". Према томе, у бинарном случају, компоненте система се могу рангирати сходно њиховом утицају на свеукупну поузданост система одређивањем мере важности. Међутим, неки системи се понашају далеко комплексније. Неке од компоненти могу бити оперативне и у деградационом стању, односно да делимично обезбеђују функционисање система.

Генерално, код оваквих система, елементи се деградирају постепено, смањујући његове перформансе. За опис поузданости оваквих система користе се *multi-state* модели, који су далеко сложенији.

Као критеријум приоритетности користи се фреквенција катастрофалног отказа (*FKO*) где се користе две најчешће методологије: *детерминисање важности чинилаца ризика* и *смањење важности ризика* (коришћењем минималних секвенци отказа).

Први приступ даје предност одржавању базираном на вредновању ризика на опери која се одржава, док се други приступ базира на утицају неефективног одржавања на ризик. Такође треба споменути и додатну идентификацију одржавања,

које има небитан утицај на ризик, помоћу квантификовања пораста ризика. Наиме, ово вредновање је одређено на основу утицаја на ризик, у случају да је настао отказ дела система. Уколико дође до појаве отказа дела енергетског система, он неће значајно утицати на функционисање система са становишта ризика.

Циљ је да се помоћу ових начина квантификовања утицаја ризика на одржавање идентификују приоритети у поступцима одржавања, дефинишу битне и небитне активности одржавања, односно опише критеријум за употребу значајних мера одржавања.

1. Детерминисање важности чинилаца ризика при одржавању^{2,3}

Један од начина да се дефинише потреба за одржавањем на основу нивоа ризика на енергетском систему јесте да се идентификују чиниоци који у највећој мери утичу на ризик на опреми која се одржава тј. да се идентификују критичне компоненте. Квантификовање ризика на опреми, сходно томе, дефинисаће потребу за одржавањем.²

Стандардно се при вредновању ризика приоритети одређују квантификовањем ризика на основу минималних секвенци отказа. Наиме, минимална секвенца отказа представља минималну комбинацију основних догађаја који уколико се реализују резултују катастрофалним отказом (или другим нежељеним догађајем, који има велику тежину у матрици ризика).³

У *FTA (Fault Tree Analysis)* прорачун вероватноће појаве вршног догађаја код сложених енергетских система представља, због величине стабла грешака, тежак задатак. У том случају, много је ефикаснији приступ прорачунавања поузданости система на основу минималних секвенци отказа.

Минималне секвенца отказа се често користе за описивање важних петљи у оквиру система.

За комплексне системе број минималних секвенци отказа може бити изузетно велики, што изискује утрошак времена и додатни напор.

Код одређивања минималних секвенци догађаја треба имати у виду чињеницу да секвенце које садрже један или два догађаја имају знатно већу вероватноћу појављивања него секвенце са већим бројем елементарних догађаја. На пример, ако један елементарни догађај има вероватноћу појављивања 10^{-3} , онда *MSO* са два догађаја има вероватноћу појављивања реда величине 10^{-6} . Дакле, у смислу повећања сигурности и поузданости система треба као један од циљева имати елиминисање или смањивање појављивања *MSO* са само једним догађајем.

Пребројавање *MSO* је основни корак у рачунању поузданости система. Интерпретација *MSO* даје нам низ квалитативних резултата као што су: слабости система, лажне редуванције, критичне елементе или ефекте одређене компоненте на поузданост целог система. За једноставне системе могу се веома једноставно (помоћу *FTA*) одредити *MSO*, док је за комплексне системе тешко из дијаграма уочити догађаје који проузрокују вршни догађај.

Постоји неколико метода за генерисање минималних секвенци отказа од којих ћемо споменути коришћење алгоритма базираном на принципу претраге од "вршног ка основном" догађају.³

1. Означити јединствено све логичке капије.
2. Означити сваки основни догађај.

3. Поставити низ од две празне ћелије:

4. Постави ознаку вршног догађаја у први ред, прве колоне:

Отказ система	
---------------	--

5. Прегледати сваки ред с лева на десно и при том:

- за сваку *ИЛИ* капију вертикално записивати улазне догађаје у капију,
- за сваку *И* капију хоризонтално записивати улазне догађаје у капију.

6. Уколико није преостала ниједна логичка капија, сваки добијени ред представља секвенцу отказа.

7. Одбацити све не-минималне комбинације секвенци догађаја, тако да преостану само минималне секвенце отказа.

8. Израчунати вероватноћу појављивања за сваку минималну секвенцу отказа као производ вероватноћа догађаја.

9. Израчунати вероватноћу појављивања за вршни догађај као суму вероватноћа појављивања свих минималних секвенци отказа

На пример у пракси пуцање цеви као иницијални догађај и комбинација отказа компоненти или других основних догађаја који би довео до губитка потребних безбедоносних функција у спречавању катастрофалног отказа, представљао би једну минималну секвенцу отказа.

Аналогно *MSO* дефинишу се и секвенце рада система ("*path set*"). Оне представљају скуп елементарних догађаја чије појављивање обезбеђује рад система. Минимални *path set* је онај *path set* у коме све компоненте морају бити функционалне да би систем радио. Систем је у стању отказа уколико су сви минимални *path set*-ови у отказу. Једноставно речено, минималне секвенце рада су скупови догађаја који показују све путање на којима систем функционише, за разлику од *MSO* које указују на које све начине систем може да откаже.

Рангирањем минималних секвенци догађаја се врши од највеће до најмање, сходно *FKO*, све до тачке прекида. Једна од основних претпоставки је да тотална *FKO* представља суму *FKO* минималних секвенци отказа. Расподела минималних секвенци отказа обезбеђује директан пут ка идентификацији потреба за одржавањем на основу степена ризика. Овај приступ којим се детерминишу секвенце неповољних догађаја по степену ризика и на основу њих адекватни поступци одржавања назива се и приступ у одређивању приоритета на основу минималних секвенци отказа.³

Потребан је критеријум при дефинисању границе за оне битне минималне секвенце које су од значаја и оне које су маргиналне.

Обично се при томе дефинише удео у тоталној *FKO* који обухватају значајне секвенце (нпр. 90%, док се осталих 10% занемарују).³

У следећим корацима дефинисана је методологија за напред поменути приступ.³

- рангирање минималних секвенци отказа на основу њиховог удела у збирној *FKO*;
- нормирање минималних секвенци отказа (дељење са збирном *FKO* и множење са 100%), како би се добио њихов релативан допринос;
- прављење листе значајних и по ризик маргиналних секвенци узимајући за границу процентални удео у збирној *FKO*, нпр. 90%;
- дефинисање потреба за одржавањем на техничком систему на основу основних догађаја (делови опреме, компоненте) у минималним секвенцама отказа који су сврстани у групу ризичних тј. идентификација компоненти које суделују у изабраним сценаријима догађаја.

Количник вероватноће суме свих минималних секвенци отказа које садрже основни догађај који се посматра и вероватноће суме свих минималних секвенци отказа детерминише важност тог догађаја.

Дакле, важност неког догађаја A се дефинише на следећи начин:

$$I(A) = \frac{P(\cup \{\text{минималне секвенце отказа које садрже основни догађај } A\})}{P(\cup \{\text{све минималне секвенце отказа}\})} \times 100$$

Често се овој листи додају компоненте (делови) које су на основу искуства или услед њихове застарелости означене као критичне.¹²

На слици 4.6 је приказана поменути методологија.³

2. Детерминисање утицаја одржавања на ризик^{2,3}

Други приступ детерминише утицај неефикасног одржавања на ризик. Наиме, приоритетне су оне активности одржавања које уколико нису ефикасно изведене имају значајан утицај на ризик.

Потребно нам је да моделујемо утицај неефективног одржавања компоненте (дела) у циљу детерминисања одговарајућег ризика.

Општа формула која повезује фреквенцију катастрофалног отказа са минималним секвенцама отказа је:

$$FKO = \sum_{i=1}^n Q_i$$

где је:

Q_i - допринос i -те минималне секвенце отказа,

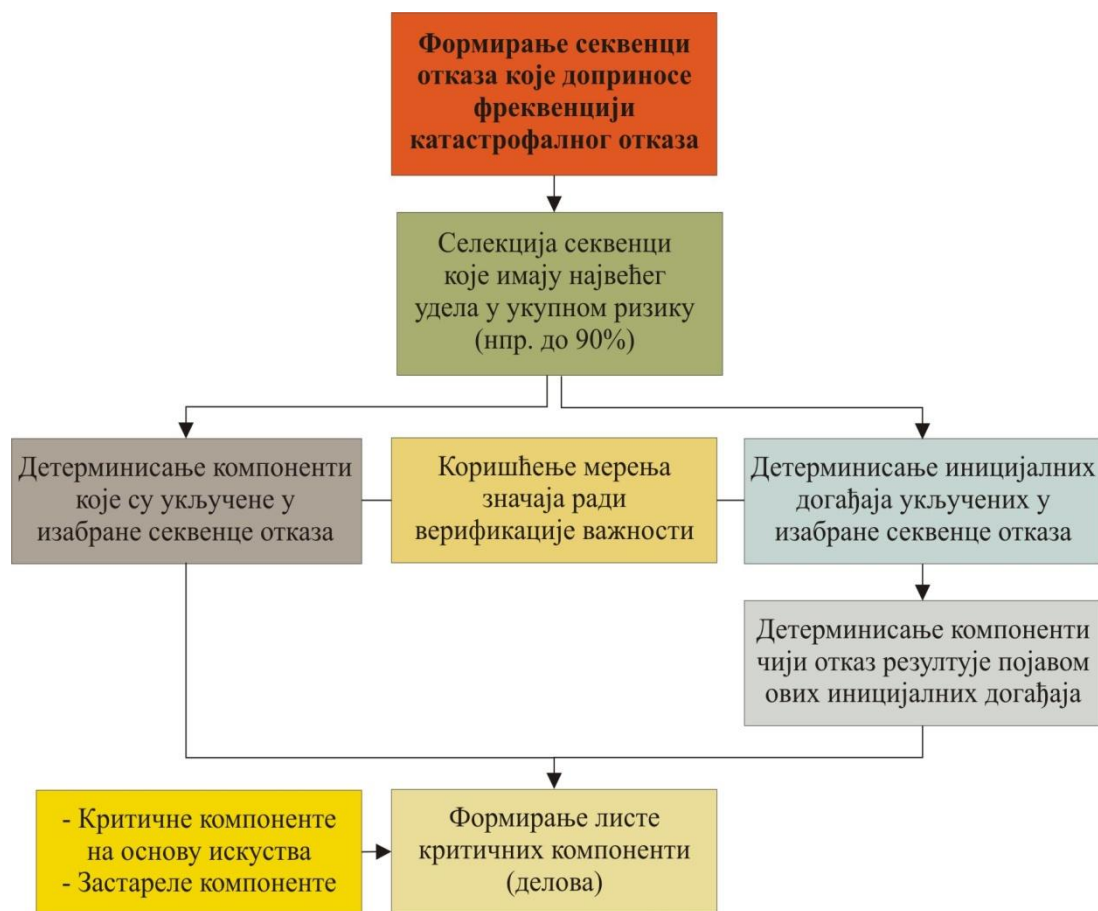
n - укупан број минималних секвенци отказа.

Допринос Q_i минималне секвенце догађаја представља производ нерасположивости основних догађаја у минималној секвенци догађаја.

Претпоставимо да су индивидуалне нерасположивости компоненти основних догађаја настале као последица неефикасног одржавања.

У том случају ће нова нерасположивост компоненти бити увећана за општи фактор пораста f , односно за фактор $(1+f)$ пута оригинална нерасположивост.

¹² Lofgren, E. V., Cooper, S. E., Phillips, L. B.: A process for Risk-Focused Maintenance, Februar, 1991.



Слика 4.6: PRA процес одређивања критичних компоненти (делова)³

Према томе, нови допринос i -те минималне секвенце Q_i' , можемо приказати у облику:³

$$Q_i' = Q_i (1 + f)^{n_i}$$

при чему је n_i број компоненти у минималној секвенци отказа над којима се спроведе активности одржавања.

Претходну једнакост можемо приказати у развијеном облику:³

$$Q_i' = Q_i \left(1 + n_i f + \binom{n_i}{2} f^2 + \dots + f^{n_i} \right)$$

Сада можемо доћи до израза за новодобијену вредност фреквенције катастрофалног отказа:³

$$FKO' = FKO + \sum_{i=1}^n r_i f + \sum_{i>j} r_{ij} f^2 + \dots + \sum_{i_1>\dots>i_k} r_{i_1\dots i_k} f^k$$

Коначно, пораст фреквенције катастрофалног отказа у условима неефикасног одржавања је разлика FKO и FKO' , тј.:

$$\Delta FKO = \sum_{i=1}^n r_i f + \sum_{i>j} r_{ij} f^2 + \dots + \sum_{i_1>\dots>i_k} r_{i_1\dots i_k} f^k$$

где су:

- r_i - сума доприноса минималних секвенци отказа које садрже компоненту i ,
- r_{ij} - сума доприноса минималних секвенци отказа које садрже компоненту i и j ,
- $r_{i_1 \dots i_k}$ - сума доприноса минималних секвенци отказа које садрже компоненте $i_1 \dots i_k$,
- k - дужина најдуже минималне секвенце отказа.

Сам назив и приступ смањења ризика потиче од тога што упућује на редукцију ризика, односно FKO , ако су одговарајуће нерасположивости компоненти сведене на нулу.

Због тога се поменуте суме доприноса називају и:

- r_i - важност редукције ризика компоненте i
- r_{ij} - важност редукције ризика компоненти i и j
- $r_{i_1 \dots i_k}$ - (заједничка) важност редукција ризика компоненти $i_1 \dots i_k$.

Ако неефективно одржавање различитих компоненти резултује различитим повећањем нерасположивости, тада можемо за f узети максимални фактор пораста и у том случају би имали максимални пораст FKO .

Да би смо идентификовали чиниоце који значајно утичу на пораст ΔFKO . Потребно је детерминисати чиниоце сваког израза са десне стране једнакости.³

Први израз представља допринос деградационог утицаја индивидуалних компоненти: а други израз $\sum_{i=1}^n r_i f$ представља допринос ΔFKO деградационог утицаја индивидуалних компоненти услед неефикасног одржавања. Квантификовање утицаја индивидуалних компоненти може се спровести посматрањем суме $\sum_{i=1}^n r_i$ индивидуалних редукција ризика.³

Ово се може постићи рангирањем r_i - почев од највећег до најмањег. Ако нормализујемо сваку индивидуалну редукцију у односу на укупну суму индивидуалних редукција, онда можемо да ову суму представимо процентуално до неке тачке прекида (обично 95% или више).

Обухваћене компоненте постају на овај начин компоненте значајне за ризик, односно, активности на одржавању тих компоненти могу се означити ризичним уколико нису ефикасно изведене.

Чиниоци другог и виших редова репрезентују додатни утицај више компоненти у смислу симултаног неефикасног одржавања већег броја компоненти. Нпр. $r_{ij} f^2$ представља утицај на FKO ако су активности одржавања неефикасно спроведене на обе компоненте i и j повећањем нерасположивости за фактор f . Чиниоци вишег реда представљају интеракцију утицаја одржавања. Уколико је значајан део утицаја укључен у први израз, онда нема потребе додатно идентификовати изразе вишег реда.

Методологија приступа:³

- одређивање индивидуалних смањења ризика основних догађаја,
- рангирање у опадајућем низу,

- нормализовање/дељење са сумом смањења ризика,
- прављење листе релативних смањења ризика и одређивање тачке прекида изражену високим процентом, како би се идентификовали догађаји важни за ризик и одржавање,
- провера да ли је потребно нека додатна активност као последица интеракције, тј. утицај израза вишег реда.

3. Детерминисање одржавања које нема утицаја на ризик^{2,3}

Одржавање се може класификовати на оно које је значајно за ризик, маргинално и оно које нема значаја за ризик. Веома је корисно идентификовати оно одржавање које је неважно са становишта ризика.²

Један од најједноставнијих начина за идентификовање ових активности одржавања је идентификација оних компоненти које и када су у стању отказа имају мали утицај на ризик. Наиме, ако је компонента у отказу и има мали утицај на ризик, тада и активности на одржавању перформанси ових компоненти нису значајне.²

Стандардни показатељ утицаја компоненти које су у отказу на ризик јесте прираштај важности ризика компоненти, која се често назива и вредност остварења ризика *RAW Burnbaum*-ова важност.³

$$I_{Burnbaum}(A) = FKO(P_A = 1) - FKO(P_A = 0)$$

Полазећи од *FKO* као мерила ризика, прираштај важности ризика компоненти је у *PRA* детерминисан прираштајем *FKO* када је компонента у отказу. Прираштај важности ризика је једнак суми прираштаја минималних секвенци отказа који садрже ову компоненту у отказу, чија нерасположивост има вредност један.

Прираштај важности ризика се може детерминисати за основне догађаје и рангирати од највећег ка најмањем. Они основни догађаји који имају малу вредност прираштаја важности ризика мању од 1% *FKO* могу се сматрати неважним за ризик. Одржавање које се изводи на овим компонентама се дакле може дефинисати као за ризик неважно.

При интерпретацији резултата, приликом одређивања прираштаја важности ризика, морају се узети у обзир две ствари:³

- Кумулативни прираштај *FKO* - уколико дође до симултаног отказа две или више компоненти које су у истој секвенци неповољних догађаја, кумулативни прираштај може бити значајно већи од суме прираштаја индивидуалних *FKO*. Стога је потребно уверити се да је кумулативни прираштај такође незнатан. Ово се може постићи постављањем услова да компоненте буду у различитим секвенцама неповољних догађаја или процењивањем прираштаја *FKO* под претпоставком отказа свих компоненти које су означене као неважне за ризик;
- Конфигурација постројења - прираштај важности *FKO* се рачуна на основу прорачунатих просечних вредности нерасположивости компоненти постројења. Ако су извесне вредности умањене, тада прираштај важности *FKO* може бити значајно већи од процењеног. Компоненте које могу довести до већих негативних ефеката могу се занемарити. Мора постојати уверење да ће ове нежељене конфигурације бити контролисане и избегнуте.

Методологија приступа идентификације одржавања са неважним прираштајем ризика:³

- детерминисање прираштаја индивидуалних ризика основних догађаја у оквиру *PRA*,
- рангирање прираштаја ризика од највећег ка најмањем на основу *FKO*,
- идентификовање оних компоненти и одржавања који су неважни за ризик користећи критеријум да им је прираштај ризика мањи од задате минималне вредности *FKO*,
- пре имплементације, проверити кумулативне ефекте и тако их конфигурирати да се обезбеди да прираштај и даље остане мали.

4.5.2 Метод Маркова

Метод Маркова се користи у извођењу анализе расположивости инжењерских система.³

Основне поставке ове методе су:

- вероватноћа прелаза система из једног стања у друго у коначном временском интервалу Δt , дата је са $\alpha \Delta t$, при чему је α коефицијент прелаза из једног стања система у друго,
- сви догађаји су независни један од другог,
- вероватноћа појаве више од једног прелаза из једног стања система у друго у коначном временском интервалу Δt је незнатна тј. $(\alpha \Delta t)(\alpha \Delta t) \rightarrow 0$.

У одређеном тренутку времена систем се налази у једном од коначног броја стања.

Пример: Претпоставимо да систем може да из нормалног радног стања пређе у стање отказа на безбедан и небезбедан начин. Коефицијенти преласка су λ_b и λ_{nb} респективно. На дијаграму су представљена стања система (слика 4.7).



Слика 4.7: Просторни дијаграм стања³

Уз помоћ модела Маркова могу се написати једначине стања приказаног система:

$$P_o(t + \Delta t) = P_o(t)(1 - \lambda_{nb} \Delta t)(1 / \lambda_b \Delta t)$$

$$P_1(t + \Delta t) = P_o(t) \cdot \lambda_{nb} \Delta t + P_1(t)$$

$$P_2(t + \Delta t) = P_o(t) \cdot \lambda_b \Delta t + P_2(t)$$

где су:

- $P_i(t + \Delta t)$, $i = 0, 1, 2$ – вероватноће i -тог стања система у тренутку $(t + \Delta t)$,
- $P_i(t)$, $i = 0, 1, 2$ – вероватноће i -тог стања система у тренутку t ,

- $\lambda_{nb} \Delta t$ – вероватноћа безбедног отказа система у коначном временском интервалу t ,
- $\lambda_b \Delta t$ – вероватноћа небезбедног отказа система у коначном временском интервалу t .

4.5.3 Бајесова метода при ризику на бази условљене вероватноће³

Бајес је разрадио методу одлучивања при ризику на бази условљене вероватноће.

Обележимо два очекивана догађаја са A и B , као и њихове вероватноће наступања са $P(A)$ и $P(B)$, респективно. Условљену вероватноћу наступања догађаја A под претпоставком да је настао догађај B означавамо са $P(A/B)$.

Уколико је $P(B) > 0$, онда је:

$$P(A/B) = \frac{P(AB)}{P(B)}$$

где је $P(AB)$ вероватноћа настанка догађаја A и B .

Ако су A_1, A_2, \dots, A_N догађаји од којих ће један и само један наступити, а B је други догађај, тада је по Бајесу:

$$P(A_1/B) = \frac{P(A_1)P(B/A_1)}{\sum_{i=1}^N P(A_i)P(B/A_i)}$$

где је:

$$P(A_i) > 0, i = 1 \dots N$$

$$P(B) > 0$$

$P(A_i)$ је вероватноћа *a priori* и изражава вероватноћу наступања догађаја A_i , када још не знамо да ли је наступио догађај B , док је $P(A_i/B)$ вероватноћа *a posteriori* и изражава вероватноћу настанка догађаја A_i након настанка догађаја B .

4.5.4 Делфи метода (DELPHI)¹³

Делфи метода се заснива на индивидуалним проценама експерата. Исто тако, ако се при обради резултата анкете појављују приличне разлике у мишљењима сазива се експертска комисија, како би се колективно пресудили и прецизирали критеријуми процене. Након процене од стране комисије процедура се понавља.

Метода анкете је разрађена како би се процењивала опасност производње или посебних радних операција, заснованих на типским радним операцијама. Метода се користи ради процењивања сагласности захтеваних норматива или стандарда, а такође и ради објективне процене и узимања у обзир мишљења и жеља самих радника.

¹³ Стандард ИЕС 60300-3-9:1995

Анкетама је лако служити се и оне представљају погодно средство да се обезбеди минимални могући ниво опасности у свакој радној средини. Предност је у томе што специјалиста за заштиту на раду без специјалне спреме, анализирајући информацију добијену путем анкете, може да дође до задовољавајућег резултата и добије неопходне податке за даљу пунију процену ризика. Ефективност коришћења анкета зависи од компетације и искуства њихових састављача, због чега их треба константно пресегледавати и допуњавати.

У анкету је пожељно укључити питања која се тичу односа радника према постојећим ризицима у радној средини (постојећа микроклима, има ли буке, вибрација или других физичких фактора, присуства хемијских и биолошких фактора, психосоцијални проблеми итд.), као и питања која отварају могућност да се одреди радникова професија, професионални стаж и узраст и пол, или да се добије каква друга важна информација

Присуство ергономских фактора одређује радно оптерећење, дизање и премештање терета итд. Зато је у питању потребно укључити сазнање о тежини предмета или терета који се подиже или премешта, број изведених операција током смене, информацију (могуће ју је приказати графички) о неудобности или осећању бола у појединим деловима тела на крају смене, као и чињеница одговора ли или не дужина пауза за одмор итд. сл.

Тако има разних анкета па их ваља разрађивати индивидуално за сваки вид делатности (професије). Може се навести неколико примера који пружају неопходну информацију, уз процењивање услова рада у радној просторији, као и неопходност избора средстава индивидуалне заштите.

Извештај о безбедности је уведен како би се одређивали и описивали услови, који могу да буду узрок несрећних случајева с људским жртвама и штетама за имовину. Овај квалитативни метод користи се у суштини за описивање посебних радионица, лабораторија, магацина, технолошких операција, помоћних операција, као и предузећа у целини. Извештај о безбедности омогућава убеђење да поредак производње и унутрашње контроле одговара условима рада и нормативним захтевима. Извештај о безбедности објективно указује на могуће опасности, омогућава регуларну проверу технолошких процеса, доприноси појашњењу промене уређаја или процеса који могу да створе нове претње, предложи увођење нових технологија. Обично извештај о безбедности вреди 5 до 10 година, након чега га је неопходно обнављати.

У предузећима повишене опасности састављају се једном у 2 до 3 године. Особље које изводи ову проверу мора да зна стандарде безбедности, треба да има посебна техничка знања о процесима и уређајима, сировинама хемијским супстанцама и др. Извештај садржи интервју (засебан на анкетирању или контролним питањима) са многим људима укљученим у производњу: са операторима, услужним особљем, инжењерима, руководиоцима, специјалистима заштите на раду итд.

У извештаји су приказане главне опасне ситуације. При састављању извештаја о безбедности ваља узети у обзир однос особља (радника) према озбиљним опасностима или проблемима, односно према психосоцијалним и организационим факторима. У извештај о безбедности пожељно је укључити политику предузећа у сфери заштите на раду, резултате аудита, информацију о испољавању фактора ризика-све то уз шематско приказивање радних места изложених ризику (шема је истовремено и информативни материјал за лабораторију)-а такође и бројчану

информацију о томе, рецимо, колико је радника изложено економским и другим ризицима.

Информација се може обрадити коришћењем различитих програма за обраду статистичке информације, док је добијене податке могуће приказати и графички.

Извештај о безбедности може бити допуњен другим методама процене опасности: РНА; HAZOP; FMEA; FTA; What-if i dr.

4.5.5 Методе логичке анализе¹³

Метода логичке анализе грешака или метода „Стабла грешака“ и „Стабла догађаја“ (*Fault Tree analysis, Event Tree analysis*) су класичне методе процене.

Метода анализе грешака (MAG) је дедуктивна метода, помоћу које је могуће распознати узорке неког конкретног нежељног догађаја или грешке. То је графичка метода, која у облику дијаграма изражава могуће узајамне комбинације техничких дефеката људских грешака, природних појава и других догађаја који могу да доведу до конкретног нежељног догађаја.

У основи методе налазе се појашњење логичких веза између елементарних догађаја. Анализа почиње тако што се одређује главни нежељени догађај и установљавају логичке везе између средишњег догађаја првог, другог ... н-тог степена, па све тако до основног (покретачког) догађаја.

4.5.6 Матрце са проценом ризика¹³

Ради процене ризика могуће је користити се различитим методама и шемама. Ризике је могуће проценити *квалитативно и квантитативно*. Применом квалитативних метода ризици се, у основи, оцењују субјективно. У многим случајевима у самој основи тих метода леже такозване „МАТРИЦЕ РИЗИКА“. Ако се у процедуру процене ризика уводи систем степени или бодова, који више или мање објективно (количински) оцењује могућност догађаја и опасност последице, тада је могуће говорити о полуквантитативном методу процене. Полуквантитативни метод обично допуњава квалитативну анализу. Њега користе такође у почетним студијама квалитативне анализе.

Квалитативно оцењени ризик карактерише процену порекла потенцијалне претње и вида опасности, као на пример: у близини запаљивог елемента који се загрева могуће опећи се, етар може да букне, термоенергетски систем под притиском може да експлодира итд. Квалитативна процена ризика фактички не одређује ни вероватноћу дешавања опасног догађаја у простору и времену, ни опсег могућих последица. А ако она чак и указује на вероватноћу и опасност последица, неопходни се параметри одређују по систему нивоа и тачака.

Количински или квантитативна процена ризика има следеће предности:

- добијена количинска процена ризика пружа основу да се објективно суди о степену претње и да се она упоређује са захтевима норматива;
- даје могућност разраде система контроле ризика при чему би та контрола одговарала самом степену ризика.

Само је количински оцењене ризике могуће међусобно упоређивати, без обзира на различиту природу њиховог порекла и негативног испољавања. Могуће је на пример, упоређивати ризике који се јављају након хаварије и токсичног деловања неке супстанце, могуће је одредити приоритете, неки од напоменутих процеса

може се одвијати брже а деловање некога од њих може да изазове већу опасност (већу количину последица, већа нарушавања здравља итд.).

Квалитативна процена ризика

У којим случајевима довољна квалитативна процена, а у којим ће неопходан бити квантитативни прорачун ризика. Одговор на ово питање могу да дају компетентни експерти, зато што оно зависи од величине предузећа, вида делатности, производне технологије, параметара конкретног опасног објекта и окружења у којем се он налази. На пример, загревајуће инсталације (уређаји) са инфрацрвеним зрачењем могу да се разликују по типовима инсталација, по систему техничке контроле и опслуживања, по систему безбедности, интензивност експлоатације, брзине других уређаја итд.

У пракси се квалитативне методе процене ризика користе много чешће, будући да поседују бројне предности у односу на квантитативне методе.

Оно што је код њих најважније је њихова једноставност. Те методе се лако користе, не захтевају дубља знања или помнију анализу матријала услед чега се оцена продукује веома брзо а уз то је још и финансијски повољна. Разрађене су методе за различите струке и за сваки конкретни ризик. У многим су земљама разрађене матрице ризика, које осетно олакшавају процес класификације извора ризика.

Знајући критеријуме скале вероватноће како о пореклу хаварије, као и озбиљности последица, извор ризика се класификује као елемент одређене ћелије матрице (S) одговарајућим мерама безбедности.

Даље ће се набројати неке о основних матрица са проценом ризика.

- Матрица (VII) (NASA; Hjuston Teksas, 2003),
- Матрица 5x5 у зависности вероватноће хаварије или отказа и последица.

4.5.7 Одржавање на бази ризика и безбедност на раду³

Одржавање је саставни део процеса производње. Све активности и поступци одржавања имају за циљ да обезбеде високу ефикасност и безбедност основног процеса производње.

Из тог разлога потребно је применити нове методе одржавања које су у могућности да изведу анализу ризика и у том смислу елиминишу озбиљне отказе са последицама на сигурност производње и особља одржавања.

Да би се објаснио концепт одржавања на бази ризика нужно је дефинисати појам не само одржавања него и појам ризика.

Привредни ризици су присутни у сваком предузећу, па самим тим и у сваком производном процесу. Њихово оцењивање и узимање у обзир у сваком случају није ново. Оно је неопходно за живот сваког предузећа. Ко не процени коректно привредне или техничке ризике, рескира његов опстанак.

Евидентно је да је за одређивање потреба одржавања поред последица битна и вероватноћа појаве отказа које за одређену компоненту могу бити изузетно велике. Али, уколико је вероватноћа појаве овог догађаја веома мала, онда је ризик отказа ове компоненте мањи од отказа неке друге компоненте са мањим последицама, али већом вероватноћом појаве. Може се приметити да је потреба за одржавањем једне компоненте квантификована ризиком - што је већи ризик то је већа потреба за одржавањем.

Поставља се питање који је ризик прихватљив?

Уколико се посматра ово питање на нивоу техничког система, могу се сви појединачни ризици делова система сабрати, ради добијања укупног ризика, што би сигурно довело до новчаног износа који је финансијски неприхватљив за предузеће. Стога је на менаџменту да одлучи, од случаја до случаја, који ниво ризика је прихватљив.

Безбедност техничких система треба да се надгледа и контролише ради минимизације ризика. Контрола безбедности није статички проблем, већ је континуални процес. У том циљу потребно је креирање организоване контроле, како би се операције на машинама безбедно изводиле.

Стога *RBI (Risk based inspection)* техничка дијагностика на бази ризика има за циљ спречавање катастрофалних отказа. Да би се овај циљ остварио морају се идентификовати саставни делови једног постројења, чији отказ може довести до повреде људства и великих финансијских губитака. У *RBI* се монетарне величине, а исто тако и потенцијални утицај на људско здравље примењују као критеријум за оцењивање.

Трошкови сакупљања и обраде података уопште нису занемарљиви. Само у ретким случајевима подаци су доступни у електронској форми, нпр. у виду базе података. Најчешће је реч о подацима у папирној форми, тако да њихово "уобличавање" представља мукотрпан посао. То изискује и утрошак времена, а самим тим и новца, али се ова инвестиција спроводи једанпут и у сваком случају гледано са више аспеката.

Пошто *RBI* такође испитује могуће последице, морају се исто тако и економски параметри, као нпр. трошкови прекида производње и покривање трошкова у глобалу, збирно посматрати. Често су ови подаци лакше расположиви од одговарајућих података о отказима.

У оквирима праве анализе потребно је за сваку компоненту одредити могуће типове отказа. Све различите врсте штете (повреде људства, прекиди производње итд.) морају бити израчунате примереним моделима.

При анализи је потребно водити рачуна да један одређени део (компонента) може да откаже на различите начине, тј. трошкови одржавања који су повезани са њиховим отказом морају бити оцењени са условном вероватноћом одређене врсте отказа, односно треба да се узму у обзир приликом одређивања ризика.

У многим случајевима морају се посматрати и даља гранања тока догађаја, као нпр. код запаљивих течности. У овом случају могуће је да се материја након ослобађања брзо запали и изгори.

За сваки од ових случајева морају се израчунати могуће последице (штете) и са емпиријски познатим условним вероватноћама за сваку грану квантификовати.

На основу овог разматрања је јасно да израчунавање свих могућности представља у *RBI* знатан трошак. Овај прорачун се не може ручно израчунати, тј. потребан је за то рачунарски програм, који би узео све могућности у обзир. Такви програми се могу наћи на тржишту (нпр. „*ORBIT*”). Они уопштено стављају на располагање вредности које квантификују поузданост компоненти и граде интерфејс са осталим софтверима за одржавање (нпр. *PM modul* у *SAP R/3*).

Након одређивања величина последица и вероватноћа отказа сваке компоненте, израчунавају се одговарајући ризици. Процес (ток) *RBI* истраживања води коначно до графика ризика за целокупно постројење, у коме су представљене последице насупрот вероватноћа појава отказа.

У ту сврху се врши представљање ризика у форми једне матрице ризика.

Израчунавањем ризика може се утврдити да ли су у појединим случајевима ризици прихватљиви у оквирима постављених критеријума. За редуковање ризика морају бити установљене одређене мере, по могућности са што мањим трошковима, тј. треба оптимизовати ефекат мера одржавања у смислу смањења ризика са трошковима њиховог спровођења.³

Учинак се може сагледати посматрајући *трошковно-корисни фактор*:³

$$TK = \frac{\text{Ризик без мера}}{\text{Ризик након спровођења мера} + \text{Трошкови извођења мера}}$$

Уколико се не спроводе мере, овај фактор добија вредност 1. Међутим, ако се изведу ефикасне мере одржавања, долази до редукације ризика при датим мерама, односно *TK* фактор расте и достиже свој максимум, а након тога опет опада. Овај максимум је уједно и оптимум, тј. уколико се улаже више новца у поступке одржавања, користи ће бити све мање. Ако је овај оптимум прихватљив са становишта ризика за предузеће, онда није рентабилно даље улагати у мере одржавања. Циљ менаџмента одржавања је остварен: са оптималним утрошком средстава достигнути жељени ниво ризика.

Међутим, уколико ризик није прихватљив, онда је логично инвестирати више финансијских средстава за одржавање техничког система. При томе, треба одабрати поступке одржавања који ће довести до најповољнијег *TK* фактора.

У основи метода смањења ризика је добијање више информација о стању оштећености одређеног елемента, тј. дијагностификовати елемент.

Свака дијагностичка инспекција даје информације о степену оштећености (нпр. ултразвучно мерење дебљине зида посуде).

Инспекција је утолико ефикаснија уколико је добијена информација прецизнија.

Без спровођења дијагностичке контроле је појава отказа (квантификована помоћу вероватноће отказа) заснована на процени експерата. Оно може бити релативно нетачно. Инспектовање је носилац знања које треба да редукује непоузданост.

Статистичке методе омогућавају да се преостала неодређеност након инспекције са одређеним ефективитетом и самим тим и прецизнијом вероватноћом појаве отказа израчунају. Као што се може и очекивати, не може се вероватноћа појаве отказа вишеструким дијагностиковањем и даље по жељи смањивати.

Ако ни дијагностичким контролама достигнути ниво преосталог ризика није прихватљив, прелази се на алтернативне методе.

Ово је нарочито изражено код прекида процеса, где је у таквим случајевима пожељно имати редундантни систем. Нпр. уколико једна пумпа откаже, аутоматски се укључује резервна која преузима њену функцију.

Тиме је обезбеђено одвијање процеса, али на супрот томе имамо трошкове постављања и одржавања редувантне компоненте. Помоћу описане трошковно-корисне анализе могуће је проверити да ли је постојање редувантног елемента (елемента у паралелној вези) исплативо.

Једна од могућих метода смањења ризика је метода замене компоненти. Ова могућност је прикладна за компоненте које имају велику вероватноћу отказа, односно код којих старењем она расте. Ако се замена врши са компонентом новог типа са бољим карактеристикама, то такође води до смањења вероватноће отказа и може се исто тако прорачунати смањење ризика применом ове методе на супрот додатним трошковима.

Ризик се данас посматра као озбиљан економски, јавни и политички проблем. Он има своју тржишну вредност, тржиште, купце и продавце. Они који инвестирају у смањење ризика очекују економски мерљиве користи.

Из овога произилази да је важније ризик идентификовати и са њиме на прави начин управљати, него инсистирати на елиминацији ризика "по сваку цену".

То је нова филозофија управљања сложеним системима, тзв. *Управљање на бази ризика*.³

Анализама ризика се поклања све већа пажња у свим областима живота. Методе засноване на анализи ризика наметнуле су се као допуна или замена управљачким методама у великом броју сектора живота.

Логично је да се концепт ризика примени и у управљању одржавањем техничких система. У табели 4.2. дат је приказ приоритета у различитим индустријским гранама по питању ризика.

	Примарни приоритет	Преглед ситуације
Енергетска постројења	- безбедност - расположивост	Лидери крајем 70- тих и почетком 80- тих (<i>Epri, ASME</i>), иницијални импулс делимично изгубљен.
Петрохемијска индустрија	Економски - продужење животног века, поправке, одлуке о замени компоненти, планирање инспекција.	Скорашњи, установљен касних 90 - тих (<i>АСМЕ</i>), стално добија на значају, у САД постоји на располагању регулатива.
Процесна постројења	Економски - безбедност окружења, продужење животног века, поправке, одлуке о замени компоненти, планирање инспекција	У развоју, иновативни покушаји (<i>АПИ, КИИИТ</i>) да се категорија ризика инкорпорира са економским и безбедносним параметрима.
Посуде под притиском	Безбедност и примарни дизајн. Обезбеђење прилагођења приступу ЕУ	На располагању је Европска директива (<i>ICS 1998 и ICS 1998b</i>).
Контролни, дијагностички и системи за мониторинг	Обезбеђење поузданости критичних система идентификација критичних елемената. Обезбеђење комплетног животног циклуса система.	Пораст интересовања и интензиван рад на усклађивању <i>TQM</i> , нови <i>IEC 61508</i> стандард.

Табела 4.2: Приказ приоритета у различитим индустријским гранама по питању ризика¹⁴

¹⁴ Jovanović, A.: Risk-based Life Management in ALIAS, MPA Stuttgart.

1. Методе управљања одржавањем на бази ризика³

Одржавање на бази ризика је приступ унапређења система управљања одржавањем. Предност *RBM* у односу на остале приступе је у томе што заснива програм активности одржавања на ризику, као основи за давање приоритета и побољшању дијагностичког програма.

Овај приступ се користи ради неаранжирања ресурса одржавања усмеравањем пажње (учесталијим инспекцијама или одржавањем) високо-ризичних компоненти и смањивањем ризика целокупног енергетског система. Стога *RBM* омогућава ефикасније искоришћење ресурса одржавања, одржавањем високог нивоа безбедности.¹⁵

Као даљи развој метода *RCM*, одржавање на бази ризика укључује коришћење техника које естимирају "стање" опреме. Помоћу информације о стању, вероватноће отказа и последица отказа детерминише се ризик који карактерише отказ посматраног дела енергетског система.

Методе одржавања на бази ризика не представљају замене за постојеће методе, већ суштински њихову важну и корисну допуну. Наиме, управљање одржавањем на бази ризика усмерено је првенствено на превентивно одржавање и то на превентивно одржавање према стању, које се заснива на осмишљеним техничким прегледима посматраног система. На основу резултата прегледа доносе се одлуке о потребним поступцима одржавања, као и о томе шта, где како и када треба прегледати у наредном периоду. Пошто ризик једног догађаја има две компоненте, технички преглед треба да је тако дефинисан да се њиме смањује једна или обе компоненте ризика (сл. 4.8).

Метода *RBLM* ("*Risk-Based Life Management*"), односно "Управљање веком на бази ризика" развијена на *MPA* институту при Универзитету у Штутгарту представља једну практичнију верзију метода *RBI*. Она је фокусирана на управљање веком трајања критичних компонената сложених техничких система. Њен циљ је дефинисање оптималних програма техничких прегледа, с тежиштем на критичне елементе највишег ризика.

Као и код методе *RBI*, анализирају се ризици за све компоненте система, па се рангирањем, тј. "*screening*"-ом дефинишу критичне компоненте на које треба да се обрати посебна пажња.

Суштина овог прилаза се налази у одговорима на следећа питања:

- како да се одреди ризик,
- како да се оцени ризик,
- како да се донесе одговарајућа одлука на бази ризика,
- како да се омогући ефикасно управљање системом одржавања на бази ризика.

То подразумева одређивање приоритета и критичних места, затим дефинисање начина решавања ових проблема, односно начина оптимизације (табела 4.3) посматраног енергетског система, укључујући одлуке о спровођењу одговарајућих поступака одржавања, као и одлука о временском периоду када треба да се обави следећа

¹⁵ Тодоровић, Ј.: Управљање одржавањем на бази ризика, ПРР - Истраживања и пројектовања за привреду 1/2003.

дијагностика. Ово захтева и одређену организацију рада, односно адекватне надлежности, али и одговорности.

Предмет	Решење
Шта - приоритети	<i>RBI/RBLM</i> Дијагностика на бази информације о ризику; Одржавање и стратегија управљања системом
Где – критичне локације	
Колико – оптимизација прегледа	
Зашто – одлука о стању компоненти	
Када – Оптимизација терминисања следећег прегледа	Организација
Ко – јасна идентификација одговорности	

Табела 4.3: Одређивање приоритета, критичних места, дефинисање начина решавања ових проблема, односно начина оптимизације³

У пракси, метода се своди на одређивање ризика за сваку важну, односно критичну компоненту помоћу Δ -модела, односно *RCLM* поступка ("*Rusk Informed Component Life Management*"). Апликација *ALIAS* ("*Advanced modular untelligent Life Assessment Software System*") даје податке који имају употребну вредност.

RBLM оптимизује следеће одлуке:

- шта треба да се инспектује? (приоритет),
- како треба да се инспектује? (које методе, обим),
- када треба да се дијагностификује?
- такође, дефинише ко и зашто доноси одлуке?

Метода *MACRO* ("*MAaintenance Cost Rusk Optimusatuon*"), односно "Оптимизација одржавања са становишта трошкова и ризика" је пројекат започет 1999. године у оквиру глобалног пројекта ЕУ - *EUREKA*. Конципиран је као општи пројекат за све врсте техничких система.

На основу метода развијених помоћу овог пројекта велики број компанија (нпр. *RAILTRACK*) је значајно смањило трошкове одржавања уз повећање сигурности и безбедности.

Метода *RBI* ("*Rusk-Based Inspectuon*"), односно "Техничка дијагностика на бази ризика" је развијена на Америчком институту за нафту и дефинисана је стандардом *API 581*. Задатак ове методе је да се дефинишу одговарајући програми техничке дијагностике за посматрани технички систем, тако да се:

- идентификују, оцене и рангирају сви ризици са становишта прекида радног процеса, безбедности и сигурности радника,
- одреде мере које треба да се предузму да би се значајни ризици смањили.
- Поред критичних делова система већ у почетним фазама треба анализирати и све оне делове који имају значајан утицај на трошкове одржавања, било са становишта учестаности оправке и/или са становишта величине трошкова оправке.

Метода *RBI* нуди два основна алата за постизање оптимизације односа између ризика и улагања у техничку дијагностику: квалитативни и квантитативни.

Квантитаивни *RBI* је важан за почетне анализе. Циљ ове анализе је да се оцењена подручја процеса ставе у једну матрицу, на пример "пет пута пет" (пет рангова

вероватноћа и пет рангова последица), који рангира поједине делове система са становишта ризика.

Тотално одржавање	- користе се сви поступци одржавања - укључени су сви запослени у предузећу - посебно се користи техничка дијагностика
Одржавање према стању са контролом нивоа поузданости	- праћење рада турбине путем рачунара - статистичко праћење
Одржавање према раду	- одлуке се поред статистичког праћења доносе на основу резултата рада система, резултата радних процеса и расположивих података о поузданости - коначне одлуке доносе стручњаци
Одржавање на бази ризика	- користи (повезује) вероватноћу појаве отказа и последице ових отказа - истовремено се користи одржавање према стању - раде се посебни програми

Слика 4.8: Основне особине савремених методологија одржавања³

Квантитативном *RBI* анализом треба да се одреде ризици за сваки важан или критичан део система. Тек се са информацијама овог нивоа може дефинисати ефикасан програм техничке дијагностике.

Овим поступком се оцењује и ризик целог система, као и утицај сваког појединачног дела.

Метода *RIMAP* ("*Risk-Based Inspection and Maintenance Procedures*"), односно "Поступци техничке дијагностике и одржавања на бази ризика", представља следећи корак у развоју метода управљања одржавањем на бази ризика - пројекат који се реализује почев од 2001. године под покровитељством ЕУ.¹⁶

У пројекат *RIMAP* укључен је конзорцијум од преко тридесет фирми, које представљају битан сегмент Европске индустрије, које су се удружиле да би развиле смернице за доношење одлука заснованих на ризику, а за планирање одржавања и контроле.¹⁷

Ту спадају: *Del Norske Veritas*, *Bureau Veritas*, *Exxon Mobil Chemical Ltd.*, *Energie Baden - Wurttemberg AG*, *Siemens AG*, *MPA Stuttgart*, *Solvay S.A.* и друге.

Треба имати у виду да се у САД овом проблематиком бави више моћних организација као што су *API*, *ASME*, *PVRC* и друге, чији је основни мотив профит.

У Европи се на ову тему гледа са становишта правне или нормативне регулативе. Циљ *RIMAP* пројекта је да:

- развије уједињени приступ у планирању поступака одржавања и дијагностификовања на бази ризика,

¹⁶ Rimap, Report on current Proctice, Rimap Consortium, 2004.

¹⁷ Results and Experience from use of Risk Based Methods in Maintenance of Power Plants, Rimap-Nas Workshop, Beograd, 2002.

- постави захтеве везане за анализу, квалификације људства, средства,
- обезбеди базу за будућу стандардизацију у оквиру одржавања и дијагностике на бази ризика.

Карактеристике европског приступа у одржавању на бази ризика *MPA Stuttgart* је током 1999. и почетком 2000. године спровео истраживање у циљу утврђивања потреба Европске индустрије у области *RBI/RBLM*.¹⁶

Директним контактима и интервјуима са компанијама прикупљене су следеће информације о:

- правној основи: нормама, стандардима, регулативама,
- инспекцијама удружења: прихватљивошћу и очекивањима,
- практичном имплементацијом,
- будућем развоју: у току, планирано, очекивано.

Идеја о ризику као моделу оптимизације у сервисним инспекцијама је у принципу прихваћена од многих, први опипљиви резултати појавили су се касних 80-тих година прошлог века када се појавио у САД концепт инспектовања на бази ризика. Нешто касније публикован је и први документ (*ASME 1991*) на бази ризика.

На крају, *NRC* је спровела верификацију и валидацију праксе док је у Европи радна група (*Working Group*) за инспекцију на бази ризика постављена унутар европске мреже за квалификацију инспекција (*European Network on Inspection Qualification*).

У табели 4.4 дат је преглед постојећег софтвера који пружа подршку имплементацији инспекцијама заснованим на ризику.¹⁸

Треба напоменути да поред поменутог софтвера, постоји и велики број индивидуалних софтвера развијених у фирмама за потребе одржавања.

Софтвер	Примена	Карактеристике
Aliyas (MPA)	Енергетска постројења	Модел за <i>RBLM</i> – фокус је на критичним компонентама

Табела 4.4: Преглед софтвера који пружа подршку имплементацији инспекцијама заснованим на ризику¹⁸

Разматрајући управљање одржавањем на бази ризика, увиђамо да је потребно посебну пажњу посветити оним ситуацијама и сценаријима догађаја у производним погонима који као последицу могу имати повреде на раду, инвалидност, па све до трагичног завршетка по људски живот.

Праћење бројности и узрока инцидената у погонима датира од 70-тих година 20-тог века, када је у САД установљен акт о безбедности и здрављу. На основу података из 90-тих година прошлог века, у САД 8% радника је сваке године доживело неку врсту повреде на радном месту, а исто тако сваког сата је долазило до губитка људског живота.¹⁸

¹⁸ Batson, R. G., Ray, P. E., Wanquan, C. S. P.: How preventive maintenance impact plant safety, University of Alabama.

Развој аутоматике довео је до све комплекснијих безбедоносних функција на техничким системима, што захтева и далеко сложеније поступке одржавања. Утицај одржавања на безбедност постројења постао је од пресудног значаја. Радници у одржавању су задужени за превентивно отклањање небезбедних услова рада у производном погону. Правилно управљано одржавање има кључну улогу у контроли и идентификацији опасности.

OSHA (Occupational Safety and Health Administration) је 1989. године објавила *Lockout/Tagout* стандард и при томе је агенција проценила да је просечно било 122. људске жртве, 28400 изгубљених радних дана због повреда на раду сваке године, узимајући у обзир одржавање, сервисирање опреме. Скоро 75% тих инцидената дошло се у производним погонима. Највећи део (88% повреда је проузрокован покретним деловима машина, мешалица, покретних трака, ножева, дизалица и узрок тога је 63% људских жртава.¹⁸

Емпиријски подаци из производних погона показују да је у одржавању било 13.9 % повреда од укупног броја повреда, док је у производним одељењима достигао 27.1 %.

У сваком случају, просечан број повреда на раду у одељењу одржавања био је већи него у производном делу, јер је и број радника у одржавању далеко мањи. И због саме природе посла, радници на одржавању техничких система су изложенији инцидентним ситуацијама. Оправдано је тврдити да је рад у одржавању много опаснији него рад у производном сектору.

Од ризичних места треба навести карактеристична:

- места где се врши пресовање, сечење (проклизавање алата током ручне манипулације алатом или машинама),
- затворена места на којима се у технолошком процесу користе гасови (недостатак кисеоника, токсични гасови),
- места на којима се налазе судови под притиском итд.

Евидентна је корелација између степена технолошке развијености и броја инцидената. Што је виши степен технолошког развоја, то је већи процентуални удео активности одржавања, тј. већи је и број инцидената током спровођења ових активности.

Глобално посматрана статистика повреда на раду говори о 35% повреда током дијагностичких активности, 63% током радова на поправкама и 2% током механичких радова на одржавању.

На слици 4.9 приказани су типични извори опасности за персонал одржавања.

У принципу, наведени извори опасности представљају 80% узрока свих инцидената током извођења активности одржавања.

Знатан број повреда током извођења радова на одржавању може се објаснити следећим узроцима:

- низак ниво механизације и аутоматизације за извођење радова,
- диспропорција између захтева и могућности одржавања,
- лоша организација током припреме, тј. недостатак технологије одржавања,
- велики удео мануелних активности.



Слика 4.9: Извори опасности за особље одржавања³

Посматрање безбедности на раду у корелацији са процесом одржавања на бази ризика може се извршити са два аспекта (слика 4.10):³

Управљање одржавањем на бази ризика, налази веома битну област примене "резонанца" са становишта ризика управо у стварању безбедног радног окружења, тј. у случају одржавања - осигурању безбедног извођења поступака одржавања.

- са прве тачке гледишта је то повећање безбедности на раду као последица предиктивног одржавања заснованог на компоненти ризика, тј. најважније је обезбедити функционисање свих сигурносних система на постројењу и свих његових конструкционих делова (карактеристика поузданости),
- са друге тачке гледишта је то број инцидената (повреда), односно најважније је безбедно извођење процеса одржавања; учесталост инцидената може се минимизовати реализацијом техничких или организационих мера које укључују фактор ризика.



Слика 4.10: Корелација безбедности на раду и одржавања³

Идентификација и анализа ризика и доношење рационалних одлука на бази познатог ризика (*Risk Assessment Process*) је најбоље превентивно средство у рукама одржавања за сигурно и успешно извођење активности одржавања. Познавање ризика омогућава предузећу да максимизује ефикасност безбедносног програма и смањења отказа.

Производни погони са активностима одржавања базираним на критеријуму ризика имаће мању фреквентност инцидентних догађаја, а самим тим-и мањи број изгубљених радних дана због повреда (хипотеза).

Кораци у спровођењу одређивања ризика активности одржавања:

- 1) Идентификација ризика,
- 2) Анализа ризика.
 - дефинисање потенцијалне опасности,
 - фреквентност појављивања инцидента,
 - идентификација редукције ризика,
- 3) Имплементација поступака редукције ризика,
- 4) Табеларни приказ фактора ризика.

Након што је ризик редукован или елиминисан може особље одржавања да извршава задатке одржавања са познатим, прихватљивим степеном ризика.¹⁹

Класификовањем и анализом прикупљених података о карактеру извора повреда на радном месту, може се закључити да треба посебну пажњу усмерити на активности одржавања у следећим областима:

- провера струјних сигурносних кругова заштите енергетских система,
- механичке заштите на постројењу,
- посуде под притиском,
- заштита од високог напона.

Да би се квантитативно утврдио утицај одржавања на бази ризика на безбедност у производном погону, развијају се технике за мерење ефеката одржавања у погону (провере и ревизије праксе одржавања, тзв. "*mauntenance audut*"), а затим вреднује учесталост инцидентних догађаја.

На основу добијених резултата за више различитих производних погона, може се израчунати корелација одржавања на бази ризика и учесталости инцидентних догађаја. Претпоставка је да ће погон са боље оцењеним одржавањем имати мањи број инцидентата (хипотеза).

Посматрано из угла безбедности на радном месту, управљање одржавањем на бази ризика представља главни ресурс у превенцији могућих инцидентата. Оно ставља акценат на детерминисање критичних петљи, тако да радне инструкције и поступци одржавања засновани на идентификацији опасности могу на време да спрече појаву нежељених догађаја и самим тим воде ка повећању безбедности и здрављу на раду.

4.5.8 Техничка дијагностика и њен утицај на поузданост и ризик парних турбина²⁰

Техничка дијагностика парних турбина са пратећом опремом представља све активности које се врше ради оцене тренутног стања или давања прогнозе пона-

¹⁹ Smith, R.: Risk Assessment for Maintenance; Life Cycle Engineering, 2003.

²⁰ Миличић, Д., Миловановић, З.: Енергетске машине – Парне турбине, Универзитет у Бања Луци, Машински факултет, Бања Лука, 2010.

шања система парне турбине у одређеном временском периоду. При томе користи све расположиве алгоритме, правила и моделе који су неопходни за одређивање стања система, са циљем правовременог предвиђања појаве неисправности.

На тај начин се повећава поузданост, расположивост и ефективност постројења парне турбине са пратећом опремом.

Пошто још увек у већини случајева не постоји општи концеп формирања дијагностичког система на термоелектранама, неопходно је истаћи следеће:

- техничка дијагностика представља значајно средство за повишење поузданости, економичности и сигурности у експлоатацији система парне турбине са својом пратећом и основном опремом;
- највећи ефекат примене средства техничке дијагностике добија се њеним усклађивањем са методама за краткорочну и дугорочну прогнозу поузданости и њену оптимизацију, најчешће по економском критеријуму;
- основни задаци техничке дијагностике на парној турбини у склопу система термоелектране најчешће се формулишу као:
 - а) прогноза и мера за спречавање хаварија,
 - б) смањење броја и дужине трајања испада, кроз благовремено предвиђање,
 - в) откривање и праћење развоја узрока отказа,
 - г) скраћивање обима планских и непланских ремонта на рачун усавршавања и примене метода техничке дијагностике,
 - д) спречавање или отклањање у процесу експлоатације услова рада, који представљају генератор оштећења и појаве отказа, као и
 - ђ) рачунаром подржано праћење радних ресурса и ефективности производње система парне турбине у оквиру термоелектране.

Примена метода техничке дијагностике и погодности за контролу стања парне турбине значајно утиче на погодност одржавања као и на његову унутрашњу карактеристику (његове целине или елеменате), односно на стање функционисања при дефинисаним условима у тачно одређеном периоду времена функционисања, при чему предпоставља да се одржавање обавља у складу са поступцима планираним и прописаним поступцима. Овај утицај се огледа преко одређених фактора, од којих посебно треба напоменути динамику, карактеристике настанка отказа, способност саставних елемената система парне турбине и система термоелектране у целини да одрже радну способност према намени и сигурности уз могућност процене стања елемената и утврђивање узрока настанка отказа.

Могућност испитивања и прегледа или његове саставне целине (елемената) у процесу контроле стања система парне турбине планира се већ у етапи разраде и пројектовања кроз прецизирање елемената за обављање главних и помоћних функција на нивоу пројектованих величина (са дозвољеним одступањима), као и елемената сигурности, заштите на раду, заштите од пожара и заштите животне средине. Свака од поступака процене техничког система-парне турбине, који обухватају анализу објекта испитивања, постављање теорије и метода испитивања, израде одговарајућих алгоритама програма испитивања, одређивање начина и средства за проучавање одређених својстава и карактеристика техничког система у целини, својим специфичностима утиче на разне начине на погодност одржавања.

Од посебног значаја је разматрање самог режима испитивања у оквиру процеса експлоатације овог система или у време прекида рада, начина његове реализације и степена аутоматизације базе података (могућност примене информационих технологија).



Слика 4.11: Методе техничке дијагностике за анализу стања парних турбина²⁰

Развој техничке дијагностике на парним турбинама ишао је у правцу остваривања функција које турбина треба да обезбеди. Провера исправности, радне способности и функционалности турбинског постројења, уз лоцирање места отказа на најнижем хијерархијском нивоу, елементи су на бази са које се врши процена преосталог века коришћења или тренда појаве неисправности.

Значајни економски ефекти и снижење експлоатационих трошкова кроз правовремено откривање могућих узрока отказа компонената турбинског постројења, могуће је остварити кроз примену метода и средства техничке дијагностике. При томе, прогноза и дефинисање узрока отказа могу се остварити у току саме експлоатације турбинског постројења или у оквиру застоја и времена за ремонт постројења и опреме, па се разликују *експлоатациона* (радни режим) и *ремонта* (стационарни режим) *техничка дијагностика*, као саставни елемент одржавања према стању турбинског постројења у оквиру електране, као вишег хијерхијског система.

Значајна примена техничке дијагностике је и код давања краткорочне и дугорочне поузданости система парне турбине са пратећом опремом и њене оптимизације, најчешће по економским критеријумима.

Важност примењених метода дијагностике у угроженом простору, у смислу повећања сигурности таквих погона, је у правовременом откривању отказа на опреми у простору угроженом експлозијом, са циљем спречавања настанка већих хаварија, ризика за саму термоелектрану-топлану, радно особље, као и њену околину. При томе, свако прекомерно загревање опреме или дела опреме је знак грешке или отказа.

Дијагностичке методе имају велики утицај на поузданост и ризик парних турбина јер се помоћу њих у раној фази могу открити деградациона стања компоненти парних турбина.

Најзаступљеније дијагностичке методе које се могу користити како на електро, тако и на машинској опреми су, свакако, *вибрациона дијагностика и дијагностика инфрацрвеном термографијом*.

Обе ове методе припадају техници испитивања без разарања материјала (*Non Destructive Testung- NDT*)

Методе техничке дијагностике парно турбинског постројења у радном режиму набројане су на слици 4.11:²⁰

4.5.9 Дијагностика стања парних турбина

Задачи дијагностичких контрола парних турбина (слика 4.12) су:²¹

- провера исправности парних турбина током њене израде,
- провера радне способности парне турбине током њене експлоатације обухвата:
 - тражење узрока неисправности (отказа),
 - утврђивање степена оштећености и
 - антиципација стања парне турбине (прогнозирање понашање стања парне турбине у будућности)
- провера правилности функционисања парне турбине.

На слици 4.12 дати су задачи дијагностичких контрола парне турбине²²

Дијагностика стања парних турбина је јако важна зато што је у деградацији тешко одредити да ли су компоненте за отказ, поправку или ремонт.

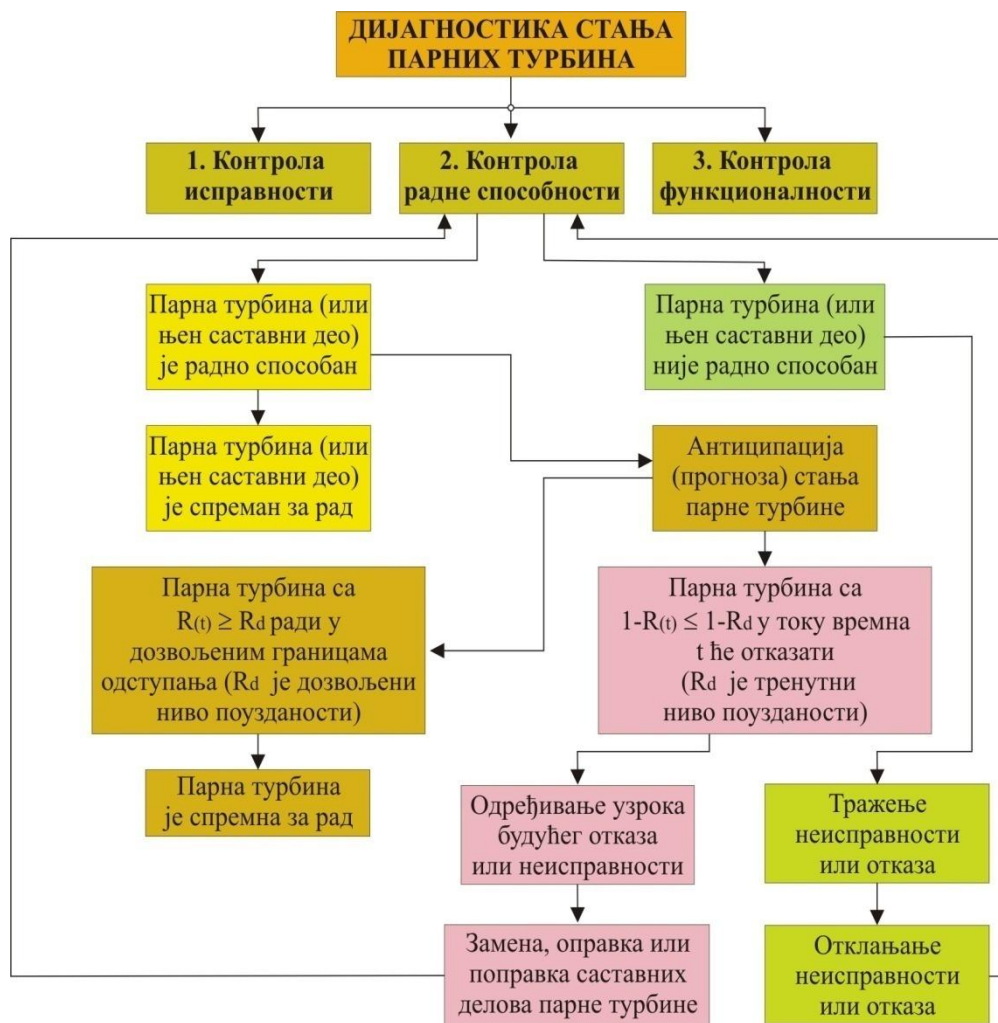
Дијагностичке контроле ради провере исправности, радне способности и правилности функционисања, као и тражење узрока неисправности (отказа) представљају основне задатке дијагностике стања парних турбина.

1. Дијагностичке контроле ради провере исправности парних турбина

Дијагностичке контроле ради провере исправности парних турбина током њене израде омогућавају да се сазна да ли систем има дефектне делове, који понекад могу бити и последица грешака у монтажи.²³

²¹ Адамовић, Ж., Илић, Б., Савић, Б., Јевтић, М.: Термографија - поуздана дијагностичка метода, Рад book, Нови Сад, 2011.

²² Адамовић, Ж.: Техничка дијагностика, Завод за уџбенике и наставна средства, Београд, 1998.

Слика 4.12: Задаци дијагностичких контрола парне турбине²²

2. Дијагностичке контроле ради провере радне способности парних турбина

Дијагностичке контроле ради провере радне способности парних турбина омогућавају да се утврди да ли парна турбина у току експлоатације остварује функцију за коју је предвиђена (пројектована).²⁴

Радна способност је стање парне турбине при коме је она способна да изврши своју функцију са параметрима утврђеним условимама нормативно-техничке документације, односно способна да врши функцију критеријума у одеђеним условима у току одређеног времена реалног процеса експлоатације.²⁵

Ако је стање парне турбине тако да вредности најмање једног параметра, који карактерише способност извођења задате функције, не одговара захтевима утврђе-

²³ Адамовић, Ж., Илић, Б., Вуловић, С., Станковић, Н., Вуловић, М.: Техничка дијагностика електрана и топлана: Поуздано одржавање термоелектрана, хидроелектрана, соларних електрана, ветроелектрана и топлана, Друштво за техничку дијагностику - Адам институт, Смедерево, 2014.

²⁴ Илић, Б., Адамовић, Ж., Савић, Б., Пауњорић, П.: Аутоматизовани дијагностички системи електричних машина, Српски академски центар, Нови Сад, 2012.

²⁵ Адамовић, Ж., Илић, Б.: Наука о одржавању техничких система, Српски академски центар, Нови Сад, 2013.

ним нормативно-техничком документацијом, постројење се сматра радно неспособним.

Радна способност парних турбина може бити обновљена (повишена) његовим одржавањем, а може се показати и да је то технички немогуће или економски неоправдано. Као показатељ техничких могућности и економске оправданости обнављање радне способности постројења узимају се трошкови времена, и средства за одржавање и они зависе од конструкционих карактеристика постројења.²⁶

Дијагностичке контроле ради провере радне способности парних турбина, подразумевају предходно дефинисане критеријуме дозвољеног и недозвољеног стања. На основу тих критеријума, уз помоћ одговарајућих мерних средстава (инструмената) или чулних запажања дијагностичара, врши се оцена стања парних турбина.

Данас се за аутоматску контролу радне способности производе специјални аутоматски системи контроле. Засновани су на предпоставци да се стања постројења јављају као детерминисана, тј. да сваком стању парне турбине одговара њена потпуна одређена спољашња манифестација и, супротно, да свакој спољашњој манифестацији (дијагностичком сигналу) одговара потпуно одређено стање парне турбине.²⁷

Аутоматски системи распознавања отказа мора укључивати улазни уређај који прима све параметре радног процеса, затим уређај за примање решења, који употређује постојећу ситуацију са раније фиксираном и прима решења о присуству те или друге појаве, као и уређај који управља системом за распознавање отказа.^{27,28}

а) Дијагностичке контроле ради тражења неисправности (отказа) парних турбина

Тражење неисправности (отказа) један је од основних задатака дијагностике стања парних турбине, проводи се са циљем да укаже на месту и узроке појаве неисправности парних турбина.

Тражењем неисправности показује потребу рашчлањивања парних турбина на класе групе. Број група зависи од степена детаљности поделе парне турбине на делове. Такав начин тражења узрока неисправности назива се дубинска дијагностика. Дубинска дијагностика се примењује када неко постројење или његов део претрпи хаварију или ако се место отказа не може одмах да утврди.

Дубинска дијагностика се најчешће примењује за утврђивање места отказа у оквиру планираних испитивања или у случају хаварије, као и за одређивање количине и обима активности одржавања пре редовних интервала одржавања. При тражењу узрока неисправности који ометају правилно функционисање постројења. Дубина дијагностике и начин рашчлањивања постројења у пракси могу бити различити.²⁴

²⁶ Илић, Б., Петров, Т., Адамовић, Ж., Савић, Б., Станковић, Н.: Врсте и узроци оштећења клизних и котрљајућих лежајева машина у процесној индустрији, Техничка дијагностика, вол. 4, № 3-4, Бања Лука, 2012, стр. 11-16.

²⁷ Адамовић, Ж., Илић, Б., Бурсаћ, Ж.: Вибродијагностичко одржавање машина и постројења: Нова методологија одржавања машина, Српски академски центар, Нови Сад, 2014.

²⁸ Адамовић, Ж., Ашоња, А., Милошевић, Д., Пауњорић, П.: Теледијагностика машина, Дуга књига, Сремски Карловци, 2011.

б) Дијагностичке контроле ради утврђивање степена оштећења

Дијагностичке контроле ради утврђивања степена оштећења омогућавају да се одређеним поступцима дијагностике утврди колики је степен оштећења настао радом постројења.

На основу резултата дијагностичких контрола доноси се одлуке (закључци) о даљем коришћењу постројења или о мерама одржавања.²⁴

За утврђивање степена оштећења примењује се најчешће такви поступци дијагностике који се односе на мерење параметара који се мењају у зависности од степена оштећења.

Пошто се, када је реч о постројењима за утврђивање степена оштећења постројења не сме раставити, директно утврђивање степена оштећења самим тим и није могуће. Зато се степен оштећења постројења утврђује индиректно преко параметара, или спољних појава које се мењају у зависности од степена оштећења.

При томе се претпоставља дасу степени оштећења и мерни параметри у директној и нама познатој зависности.²⁷

в) Дијагностичке контроле ради антипације (прогнозе) стања парних турбина

У циљу спречавања губитака радне способности постројења могуће је на основу праћења дијагностичких параметара прогнозировать промене његовог стања, односно предвидети карактер промене радне способности у будућности.

Антипација (прогноза) стања постројења представља предвиђање (прогнозирање) понашања параметара стања постројења у будућности, после извршене дијагностике, са циљем да се обезбеди потребна ефективност процеса експлоатације. Резултати антипације представљају основу за доношење одлуке о неопходном року и обиму активности одржавања.²⁶

Поред прогнозирања стања система у будућности праћења дијагностичких параметара треба генерално да обухвати и препознавање хаваријског стања постројења и да представља „окидач“ за његово искључење, односно прелаз на безбедан режим рада, што се постиже помоћу тзв. *Система хаваријске заштите*.

Уколико су познате све величине стохастичког утицаја постројења онада се уз помоћ рачуна вероватноће могу извести одговарајући математички односи за предвиђање преосталог времена коришћења делова и/или система.

За практичну примену у многим случајевима је сврсисходно да се не даје само једна прогностичка вредност трајања преосталог времена трајања преосталог времена коришћења са једном одређеном сигурношћу. Пожељно је да се даје више вредности трајања престалог времена коришћења са једном одређеном сигурношћу. Пожељно је да се даје више вредности трајања преосталог времена коришћења, које се могу постићи са различитом сигурношћу (нпр. 80-90%). Корисник постројења би онда могао боље да одлучи о коришћењу постројења у будућности.

Задатак прогнозирања стања радне способности у општем случају састоји се у следећем: након што се добију резултати дијагнозе стања постројења треба оценити његову радну способност у преосталом периоду коришћења.

За ово се могу користити два основна алгоритма прогнозирања:

- алгоритам експлоатације и
- алгоритам статистичке класификације.

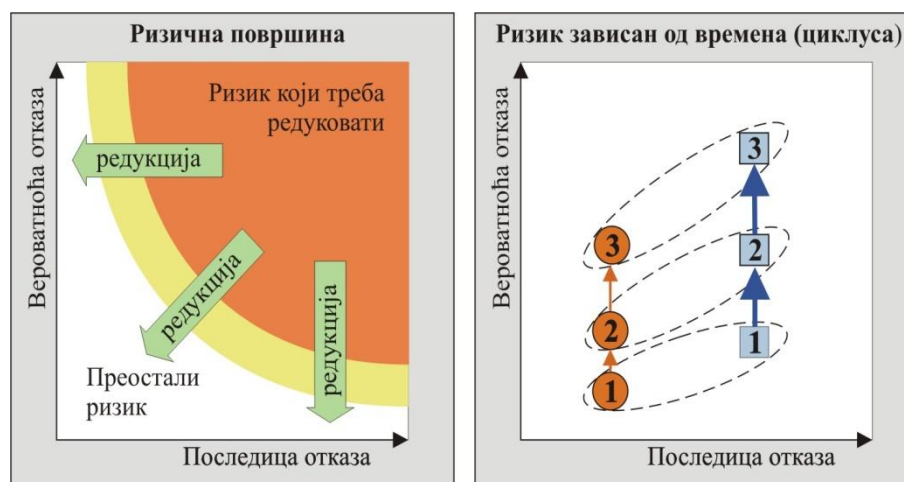
3. Дијагностичке контроле ради провере правилности функционисања парних турбина^{24,26}

Дијагностичке контроле ради провере правилности функционисања постројења омогућавају откривање евентуалних неисправности, које се могу појавити у току експлоатације постројења.²⁴ Односе се на мерења параметара функционисања и погонских параметара који су потребни за беспрекорно функционисање и економичан рад постројења.^{24,26}

4.6 ОДРЖАВАЊЕ ЗАСНОВАНО НА РИЗИКУ ПАРНИХ ТУРБИНА - TOSHIBA²⁹

Toshiba-RBM систем функционише тако да би помогао у доношењу стратегије одржавања са становишта техничке и финансиске стратегије. Ово се ради помоћу анализе вероватноће отказа у области података на основу процене вероватноће ризика са системским радним додиром. Овај систем може да се прилагоди за посебне топлане за повећање искоришћења топлане у раду и одржавању.

На слици 4.13 дата је вероватноћа отказа у зависности од последице отказа.²⁹



Дефиниција ризика:

$$\text{РИЗИК} = \text{ВЕРОВАТНОЋА} \times \text{ПОСЛЕДИЦА}$$

Вероватноћа = функција поузданости
= време или циклус

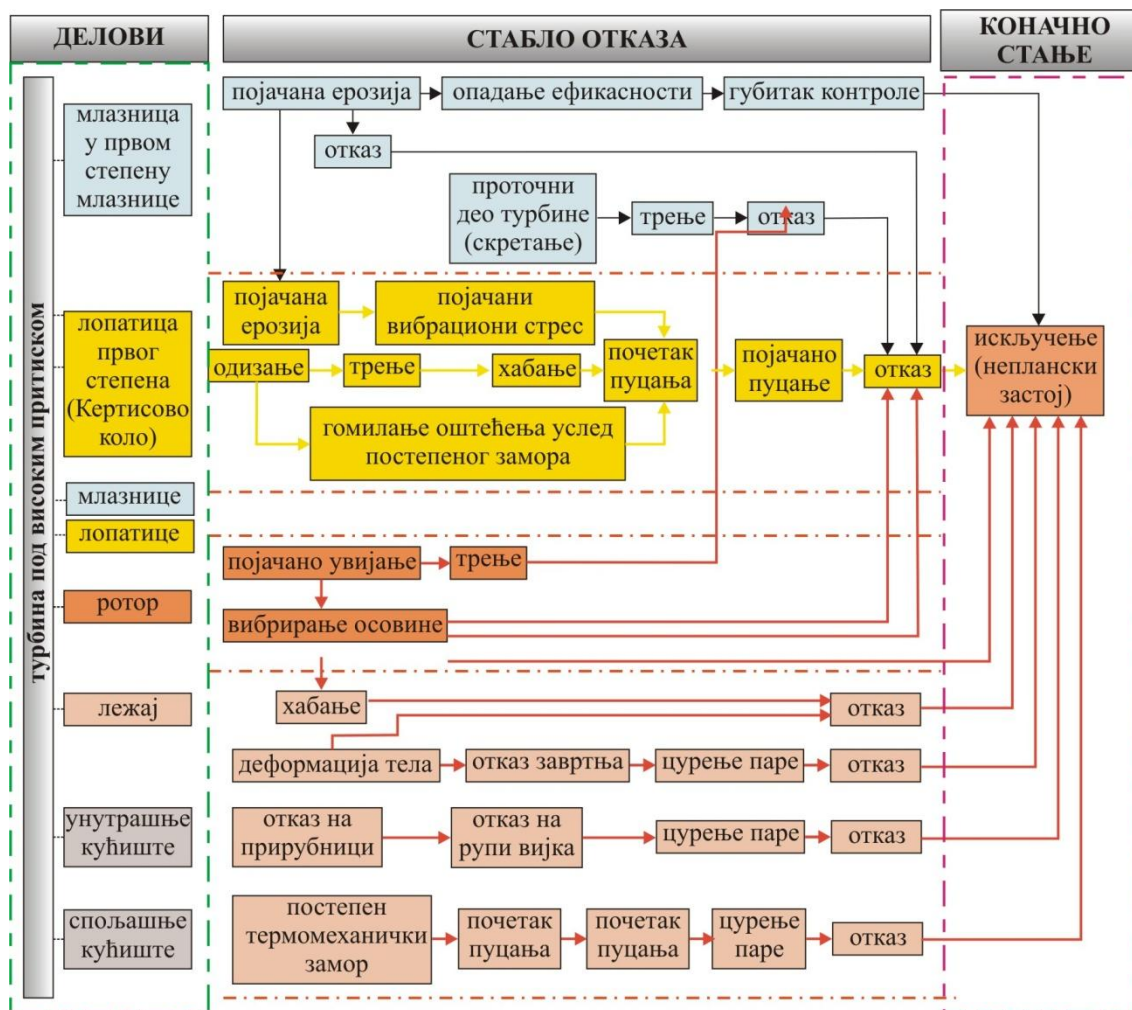
Последица = укупан финансијски губитак

Слика 4.13: Вероватноћа отказа у зависности од последице отказа²⁹

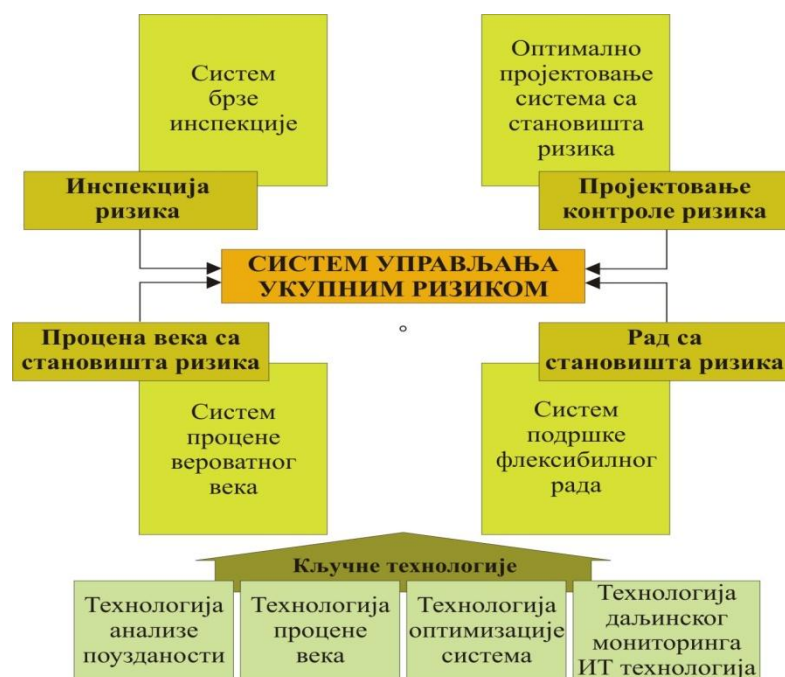
На слици 4.14 дат је алгоритам стабла отказа парних турбина у којем су узете најризичније компоненте које могу да откажу и изазову веће хаварије као и застој у производњи.

На слици број 4.15 дат је Тошибин концепт управљања укупним ризиком: пројектовање ризика, рад са становишта ризика, процена века са становишта ризика и инспекција ризика.

²⁹ www.Toshiba.co.jp/thermal-hyaro/en/thermal/service/support/gent/rbm.htm, Toshiba-Support service Risk-based Maintenance service (RBM), 2012.



Слика 4.14: Алгоритам стабла отказа у експлоатацији парне турбине²⁹



Слика. 4.15: Toshiba-концепт управљања укупним ризиком²⁹

На слици су приказане и кључне технологије које примењује Тошиба а то су: технологија анализе поузданости, технологија процене века, технологија оптимизације система и технологија даљинског мониторинга ИТ технологија.²⁹

4.7 МОДЕЛ ЧЕТИРИ СТАЊА ПО МАРКОВУ^{2,30}

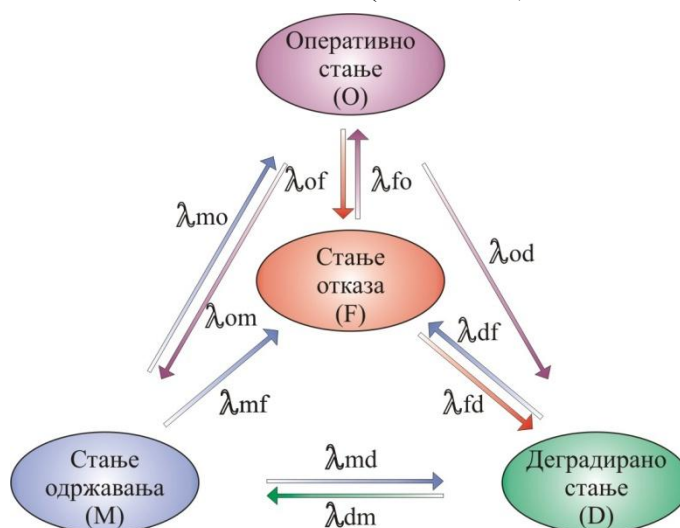
Погонски инжењери су често суочени са проблемом одређивања оптималног интервала инспекције и поправке критичних склопова машина и постројења који се не могу одржавати током функционисања система.

Увођење учесталих провера постројења води ка непотребним и високим трошковима. С друге стране, продужавање интервала између активности одржавања представља потенцијалну опасност отказа компоненти који могу да резултирају значајним економским последицама. Стандардни приступи поузданости узимају у обзир два стања за компоненте: стање “у раду” и стање “у отказу”. На овај начин није могуће квантификовати позитиван, већ само негативан утицај поступака одржавања. Дефинисањем деградационих стања компоненти, како у оперативном стању тако и у отказу, пружа се могућност да се спречи и поправи деградација пре него што дође до отказа, односно вреднује утицај одржавања на поузданост, а самим тим и на ризик. Модел Маркова представља моћан алат за оцењивање корисних ефеката активности одржавања и одређивање оптималних интервала одржавања, на основу поузданости компонентата (слика 4.16).^{2,30}

Ради једноставности претпоставићемо следеће:

- једно деградационо стање компоненте, када је компонента функционална али њене перформансе деградирају испод нормалног прага неке вредности,
- периодично тестирање компоненти,
- *down*-стање компоненте, тј. када је у стању за одржавање и мери негативне ефекте одржавања.

Дефинисаћемо следећа стања компоненти (слика 4.16)^{2,3,30}:



Слика 4.16: Модел четири стања по Маркову^{2, 3, 30}

³⁰ Vesely, W. E.: Quantifying maintenance Effects on unavailability and risk using Markov modeling, Reliability engineering and system Safety, 41, 177-187, Elsevier Science Publisher ktd. England, 1993.

- O – оперативно стање компоненте са нормалним перформансама,
 D – деградирано стање компоненте са деградираним али функционалним перформансама,
 M – стање компоненте спремне за одржавање,
 F – стање компоненте у отказу.

Преносни нивои за модел Маркова дати су у табели 4.6. ^{2,3,30}

Могуће перформансе за приказани модел су: ^{2, 30}

p_o – вероватноћа да је компонента у оперативном стању у датом тренутку.

p_d – вероватноћа да је компонента у стању деградације у датом тренутку.

p_m – вероватноћа да је компонента у стању одржавања у датом тренутку.

p_f – вероватноћа да је компонента у стању отказа у датом тренутку.

Стандардне једначине за формирану модел Маркова су: ^{2,29}

$$p_o(\lambda_{od} + \lambda_{om} + \lambda_{of}) = p_m \lambda_{mo} + p_f \lambda_{fo}$$

$$p_d(\lambda_{dm} + \lambda_{df}) = p_o \lambda_{od} + p_m \lambda_{md} + p_f \lambda_{fd}$$

$$p_m(\lambda_{mo} + \lambda_{md} + \lambda_{mf}) = p_o \lambda_{om} + p_d \lambda_{dm}$$

$$p_f(\lambda_{fo} + \lambda_{fd}) = p_o \lambda_{of} + p_d \lambda_{df} + p_m \lambda_{mf}$$

$$p_o + p_d + p_m + p_f = 1$$

λ_{od}	Преносни ниво из оперативног у деградационо стање, односно у деградациони ниво
λ_{om}	Преносни ниво из оперативног у стање одржавања, односно фреквенција одржавања када је компонента у оперативном стању
λ_{of}	Преносни ниво из оперативног стања у стање отказа
λ_{dm}	Преносни ниво из деградираног стања у стање одржавања, односно фреквенција одржавања када је компонента у деградираном стању
λ_{df}	Преносни ниво из деградираног стања у стање отказа, тј. ниво отказа када је компонента у деградираном стању
λ_{mo}	Преносни ниво из стања одржавања у оперативно стање, тј. ниво довођења компоненте у оперативно стање одржавањем
λ_{md}	Преносни ниво из стања одржавања у деградационо стање
λ_{mf}	Преносни ниво из стања одржавања у стање отказа, тј. ниво отказа услед одржавања
λ_{fo}	Преносни ниво из стања отказа у оперативно стање
λ_{fd}	Преносни ниво из стања отказа у деградирано стање
$\lambda_{do}, \lambda_{fm}$	Ови преносни нивои су занемарени из разлога што прелазе из деградираног у оперативно стање, као и стања отказа у стање одржавања нису реални

Табела 4.6: Преносиви нивои за модел Маркова ^{2, 30}

Решавање једначина врши се увођењем следећих односа:^{2, 30}

$$r_d = \frac{P_d}{P_o} \quad r_m = \frac{P_m}{P_o} \quad r_f = \frac{P_f}{P_o}$$

Израчунате величине r_d , r_m и r_f служе за одређивање вероватноће стања:^{2, 30}

$$p_o = \frac{1}{1 + r_d + r_m + r_f}, \quad p_d = \frac{r_d}{1 + r_d + r_m + r_f}, \quad p_m = \frac{r_m}{1 + r_d + r_m + r_f}, \quad p_f = \frac{r_f}{1 + r_d + r_m + r_f}$$

Када постоје потребни подаци о отказима и о одржавању, онда се преносни нивои могу директно проценити коришћењем тих података и одговарајућих статистичких техника.

Најчешће ови подаци нису доступни, па се преносни нивои изражавају инжењерским терминима, како би модел Маркова био практичан за употребу.^{2, 30}

λ_{of} – компонента степена катастрофалног отказа

Претпоставимо да је λ константа компоненте отказа у свим случајевима отказа.

Степен катастрофалног отказа можемо да изразимо као:

$$\lambda_{of} = f_{of} \lambda$$

при чему је f_{of} фреквенција катастрофалног отказа.

Израз f_{of} представља све катастрофалне отказе, тако λ_{of} могу бити решени уз помоћ f_{of} . Када f_{of} има малу вредност, тј. када је $f_{of} = 0,1$, онда представља катастрофалне отказе који не пролазе кроз деградативно стање.

λ_{od} – компонента деградационог нивоа

Компонента деградационог отказа λ_{od} се може одредити преко константе компоненте отказа λ на следећи начин:

$$\lambda_{od} = r_{od} \lambda$$

при чему је r_{od} деградациони однос.

За вредност деградационог односа $1 < r_{od} \leq 3$ кажемо да је спор, док ако је $r_{od} \geq 10$, да је брз.

λ_{df} – ниво деградационог отказа

На исти начин можемо написати:

$$\lambda_{df} = r_{df} \lambda$$

при чему је r_{od} однос нивоа отказа, тј. релативан пораст нивоа отказа деградираних компоненте.

Алтернативни израз се може извести полазећи од времена у коме се догађај одвија:

$$T_{odf} = T_{od} + T_{df}$$

где су:

T_{od} – време преласка из оперативног у деградирано стање,

T_{df} – време преласка из деградираних у стање отказа,

T_{odf} – време преласка из оперативног кроз деградирано у стање отказа.

Укупна компонента отказа λ је сума чинилаца:

$$\lambda = \lambda_{of} + \lambda_{odf} = \frac{I}{T_{of}} + \frac{I}{T_{odf}}$$

Нивои комплетне поправке се изражавају на исти начин:

$$\lambda_{fo} = \frac{P_{fo}}{d_f}$$

$$\lambda_{fd} = \frac{P_{fd}}{d_f}$$

где је:

d_f – просечно време трајања отказа,

P_{fo} – делови отказа који ће након поправке бити враћени у оперативно стање,

P_{fd} – делови отказа који ће бити делимично отклоњени и враћени у деградирано стање.

Важи једнакост:

$$P_{fo} + P_{fd} = 1$$

Ако је отказ лакше уочити тестом издржљивости, онда је:

$$d_f = \frac{T}{2} + r$$

Безначајни откази се могу детектовати одржавањем (T – интервал теста издржљивости, r – просечно време поправке).

Претходна једначина је приближна када је интервал одржавања значајно већи од интервала теста издржљивости или када одржавање не подржава оперативно тестирање за детектовање отказа компоненте.

Уколико је могуће детектовати, онда је:

$$d_f = \frac{T}{2} \left(1 - \frac{T}{3T_m} \right) + r$$

где је T_m просечно време између одржавања под претпоставком да је $T_m > T$.

Претходна једначина претпоставља да одржавање може бити урађено помоћу интервала теста.^{2, 30}

Под претпоставком оперативног стања након одржавања, ако се стање деградације појави између одржавања, онда ће се у просеку појављивати у пола интервала између одржавања због претпоставке константног деградационог нивоа λ_{od} .

$$P_{dm} = e^{-\lambda_{df} \frac{T_m}{2}}$$

$$L_d = \frac{T_m}{2} e^{-\frac{\lambda_{df} T_m}{2}} + \int_0^{\frac{T_m}{2}} t \cdot e^{-\lambda_{df} t} \lambda_{df} \cdot dt = \frac{T_m}{2} e^{-\lambda_{df} \frac{T_m}{2}} + \frac{1}{\lambda_{df}} \left(1 - e^{-\lambda_{df} \frac{T_m}{2}} \right) \left(1 + \lambda_{df} \frac{T_m}{2} \right)$$

где је:

p_{dm} – вероватноћа преноса из деградираног стања у стање одржавања,

L_d – просечно време проведено у деградираном стању пре преноса.

За $\lambda_{df}T_m \ll 1$ добијамо $L_d \approx T_m/2$.^{2, 30}

У табели 4.7 дат је преглед преносних нивоа за дати модел Маркова:^{2, 30}

Да би се применио метод Маркова са четири стања потребно је познавање преносних нивоа између стања, тј. инжењерско знање. Такође, претпоставка је да су они константни.^{2, 30}

4.7.1 Примена модела четири стања по Маркову^{2, 30}

Процењивање корисних ефеката одржавања при исправљању деградација, бар једног деградираног стања, мора се узети у обзир како за целу компоненту, тако и за њен део. Најједноставније је узети у обзир једно деградативно стање компоненте која је у оперативном стању или у стању отказа. Када је у стању деградације компонента је функционална али је у деградационом моду. Деградационо стање се појављује када перформансе компоненти деградирају испод нормалног прага неке вредности. Да би се квантификовала ефективност одржавања, деградациона стања се морају раздвојити. Оперативно, деградационо стање и стање у отказу могу бити дефинисани на различите начине, а у зависности од доступних информација.

$\lambda_{od} = r_{od} \lambda$
$\lambda_{om} = \frac{I}{T_m} e^{-(\lambda_{od} + \lambda_{of})T_m}$
$\lambda_{of} = f_{of} \lambda$
$\lambda_{dm} = \frac{2}{T_m} e^{-\lambda_{df} \left(\frac{T_m}{2}\right)}$
$\lambda_{df} = \lambda \frac{r_{od} (1 - f_{of})}{r_{od} - (1 - f_{of})}$
$\lambda_{mo} = \frac{p_{mo}}{d_m}$
$\lambda_{md} = \frac{p_{md}}{d_m}$
$\lambda_{mf} = \frac{p_{mf}}{d_m}$
$\lambda_{fo} = \frac{p_{fo}}{d_f}$
$\lambda_{fd} = \frac{p_{fd}}{d_f}$

Табела 4.7: Преглед преносивих нивоа за модел Маркова^{2, 30}

Дефинисање оперативног стања, деградираног стања, стања за одржавање и стања у отказу је довољно за квантификовање ефикасности одржавања.

Ове четири компоненте можемо обележити са o , d , m и f , где је:

- o – оперативно стање компоненте које рефлектује нормалне перформансе,
- d – деградирано стање компоненте које рефлектује деградиране али функционалне перформансе,
- m – стање компоненте спремно за одржавање,
- f – стање компоненте у отказу, у коме је компонента у функционалном отказу.

Пошто сада имамо четири стања перформанси (o , d , m , f), потребно је да дефинишемо преносне нивое између ових стања.

Релевантни преносни нивои су представљени у преносној матрици која је дата у табели 4.7.

У редовима матрице налазе се почетна стања, а у колонама постигнута стања. Вредности које недостају су одбачени преноси и могу се третирати као нуле. Обично се не узимају у обзир *one – step* преноси, то су преноси из једног стања у то исто стање, при чему се не образују промене стања. Преносом се не сматра прелаз из деградираног стања директно у оперативно стање ($d \rightarrow o$), пошто прво мора да постоји стање одржавања. Такође се не сматра преносом прелаз из стања отказа директно у стање одржавања ($f \rightarrow m$), претпостављајући да поправка има предност над одржавањем.

	o	d	m	f
o	-	λ_{od}	λ_{om}	λ_{of}
d	-	-	λ_{dm}	λ_{df}
m	λ_{mo}	λ_{md}	-	λ_{mf}
f	λ_{fo}	λ_{fd}	-	-

Табела 4.7: Релативни преносни нивои^{2, 30}

Преноси који нису нуле се дефинишу на следећи начин:

λ_{od} – преносни ниво из оперативног у деградирано стање, тј. ниво деградације компоненте,

λ_{om} – преносни ниво из оперативног стања у стање одржавања, тј. фреквенција одржавања када је компонента у оперативном стању,

λ_{of} – преносни ниво из оперативног стања директно у стање отказа, тј. ниво катастрофалног отказа,

λ_{dm} – преносни ниво из деградираног стања у стање одржавања, тј. фреквенција одржавања када је компонента у стању деградације,

λ_{df} – преносни ниво из деградираног стања у стање отказа, тј. ниво оказа када је компонента у стању деградације,

λ_{mo} – преносни ниво из стања одржавања у оперативно стање, тј. ниво довођења у првобитно стање одржавањем,

λ_{md} – преносни ниво из стања одржавања у деградационо стање, тј. ниво деградације услед одржавања,

λ_{mf} – преносни ниво из стања одржавања у стање отказа, тј. ниво отказа услед одржавања,

λ_{fo} – преносни ниво из стања отказа у оперативно стање, тј. ниво враћања у првобитно стање након отказа,

λ_{fd} – преносни ниво из стања отказа у деградационо стање, тј. ниво деградације након отказа.

Наведене дефиниције представљају нивое који се користе у терминологији поузданости и пружају помоћ у оквиру процедуре одржавања.

Преносни нивои се третирају као константе којима се добијају поуздане карактеристике стања при одржавању:^{2, 30}

4.7.2 Могуће перформансе стања за модел четири стања

За модел четири стања могуће перформансе су:^{2, 30}

p_o – могућност да је компонента у оперативном стању (o) у датом времену,

p_d – могућност да је компонента у стању деградације (d) у датом времену,

p_m – могућност да је компонента у стању одржавања (m) у датом времену,

p_f – могућност да је компонента у стању отказа (f) у датом времену.

Решења поузданих стања за p_o , p_d , p_m и p_f дају стања поузданости перформанси компоненти.

Све карактеристике једне компоненте су доступне са стања могућности перформанси, што укључује:

p_f – нерасположивост компоненте услед отказа,

p_m – нерасположивост компоненте услед одржавања,

p_o – оперативна расположивост,

p_d – деградативна расположивост,

$p_o \lambda_{od}$ – проучавани ниво деградације,

$p_o \lambda_{df}$ – посматрана учесталост отказа услед деградације,

$p_o \lambda_{of}$ – посматрана учесталост катастрофичних отказа.

Успешност одржавања се посматра на основу карактеристика ових перформанси и одржавања може служити за оптимизацију једне или више ових карактеристика.

Овде је фокус, пре свега, на поузданим решењима стања да би се добиле просечне вредности ефективности одржавања.

Стандардне једначине за p_o , p_m , p_d и p_f су:

$$p_o (\lambda_{od} + \lambda_{om} + \lambda_{of}) = p_m \lambda_{mo} + p_d \lambda_{df} + p_f \lambda_{fo}$$

$$p_d (\lambda_{dm} + \lambda_{df}) = p_o \lambda_{od} + p_m \lambda_{md} + p_f \lambda_{fd}$$

$$p_m (\lambda_{mo} + \lambda_{md} + \lambda_{mf}) = p_o \lambda_{om} + p_d \lambda_{dm}$$

$$p_f (\lambda_{fo} + \lambda_{fd}) = p_o \lambda_{of} + p_d \lambda_{df} + p_m \lambda_{mf}$$

Ове једначине су решене за p_o , p_d , p_m и p_f и оне се могу представити као:

$$p_o + p_d + p_m + p_f = 1$$

Једно решење је решити однос могућности перформанси, а онда детерминисати могућности из односа. Овај приступ искључиво важи за апликације које су изведене.

4.7.3 Параметарски односи за преносне нивое^{2,30}

За решавање перформанси могућих стања за дате апликације, прво морамо решити специфичне вредности за преносне нивое. То је чест проблем који се јавља при употреби моделовања по Маркову.

Када постоје потребни подаци о отказима и одржавању, онда се преносни нивои могу директно проценити из тих података коришћењем одговарајућих статистичких процењивачких техника.

Ипак, често детаљни подаци нису доступни. Да би модел одржавања по Маркову био практично применљив, пронашло се да је корисно изразити преносне нивое у терминима који су лакше применљиви у оквиру инжењерског знања. Студије осетљивости се такође могу лакше изразити у овим основним параметрима. Односи који су се развили су примери односа који су значајни по томе да приступ по Маркову буде практичан алат за употребу.

1. Компонента нивоа катастрофалног отказа λ_{of}

Нека λ_{of} буде компонента нивоа катастрофалног отказа за све случајеве, а λ константа компоненте отказа.

Такође је корисно повезати релевантне компоненте преносних нивоа отказа, пошто су доступне. Како λ садржи и катастрофалне отказе, као отказе који доводе до деградације, ниво катастрофалног отказа λ_{of} се може изразити и као:

$$\lambda_{of} = f_{of} \lambda$$

где је f_{of} – катастрофални отказ.

Израз f_{of} представља све отказе који су катастрофални. Тако λ и λ_{of} могу бити решени уз помоћ f_{of} .

Када f_{of} има малу вредност, тј. када је $f_{of} = 0,1$, она представља катастрофалне отказе који не пролазе кроз деградативно стање.

2. Компонента деградационог нивоа λ_{od}

Компонента деградационог нивоа може бити повезана са компонентом нивоа отказа λ , коришћењем израза:

$$\lambda_{od} = r_{od} \lambda$$

где је r_{od} – однос деградације.

Ниво деградације може бити спор и тада је $1 < r_{od} \leq 3$, или брз ако је $r_{od} \geq 10$.

3. Ниво деградационог отказа λ_{df}

$$\lambda_{df} = r_{df} \lambda$$

где је r_{of} – однос деградације.

Ова компонента представља релативан пораст нивоа отказа када је компонента деградирана. Израз r_{of} је сличан изразу за деградациони однос r_{od} .

Сада је укупна компонента отказа λ сума чинилаца како катастрофалних отказа, тако и отказа који пролазе кроз стање деградације, па је:

$$\lambda = \lambda_{of} + \lambda_{odf}$$

4. Ниво одржавања λ_{mo} , λ_{md} и λ_{mf}

$$\lambda_{mo} = \frac{P_{mo}}{d_m}$$

$$\lambda_{md} = \frac{P_{md}}{d_m}$$

$$\lambda_{mf} = \frac{P_{mf}}{d_m}$$

где су:

d_m – просечно трајање одржавања,

p_{mo} – израз у коме се одражавају резултати одржавања у компоненти која је у оперативном стању,

p_{md} – израз у коме се одражавају резултати одржавања на компоненту која је у стању деградације,

p_{mf} – израз у коме се одражавају резултати одржавања на компоненту која је у стању отказа.

$$p_{mo} + p_{md} + p_{mf} = 1$$

5. Ниво комплетне поправке λ_{fo} и λ_{fd}

Ниво комплетне поправке λ_{fo} и λ_{fd} могу слично бити изражени као:

$$\lambda_{fo} = \frac{P_{fo}}{d_f}$$

$$\lambda_{fd} = \frac{P_{fd}}{d_f}$$

где су:

d_f – просечно трајање отказа,

p_{fo} – отказ који се дешавају у оперативном стању,

p_{fd} – отказ који се појављују у стању деградације.

$$p_{fo} + p_{fd} = 1$$

6. Фреквенција одржавања λ_{om} када је компонента оперативна

Фреквенција одржавања λ_{om} , када је компонента оперативна, може бити изражена као:

$$\lambda_{om} = \frac{P_{om}}{L_o}$$

где је:

p_{om} – могућност преноса из оперативног стања (O) у стање одржавања (m),

L_o – просечно време проведено у оперативном стању пре преноса.

Узимајући у обзир да оперативно стање постоји после одржавања, следећи пренос се може појавити у стању одржавања ако нема деградације и катастрофалних отказа до следећег одржавања, у интервалу T_m , где је T_m просечно време између одржавања. .

Дато стање након одржавања:

$$p_{om} = e^{-\lambda_{ofd} T_m}$$

где је: $\lambda_{ofd} = \lambda_{of} + \lambda_{od}$

7. Фреквенција одржавања λ_{dm}

Фреквенција одржавања када постоји компонента деградације λ_{dm} , може бити изражена као:

$$\lambda_{dm} = \frac{P_{dm}}{L_d}$$

где је:

p_{dm} – могућност преноса из деградираног стања (d) у стање одржавања (m),

L_d – просечно трајање у стању деградације пре преноса.

Поново претпоставимо да је компонента у оперативном стању после одржавања.^{2,30}

5. РАЗВОЈ МОДЕЛА ОДРЖАВАЊА НА БАЗИ РИЗИКА И ЊИХОВ УТИЦАЈ НА ПОУЗДАНОСТ ПАРНИХ ТУРБИНА

5.1 МОДЕЛ ОДРЖАВАЊА НА БАЗИ РИЗИКА³¹

Развој модела одржавања на бази ризика развијен је са циљем да се његовом применом повећа поузданост парних турбина и смањи ризик застоја или отказа компонената парних турбина. Овај модел у виду алгоритма представља методологију по којој се прати рад парне турбине.

Пре пуштања парне турбине у експлоатацију морају се извршити превентивне активности односно сваке године или након 7600 часова рада турбине или око 317 дана, а 45 до 48 дана оставља се за превентивне периодичне оправке. Сваке четврте године или 30400 часова рада треба извршити генерални ремонт турбине.³⁰

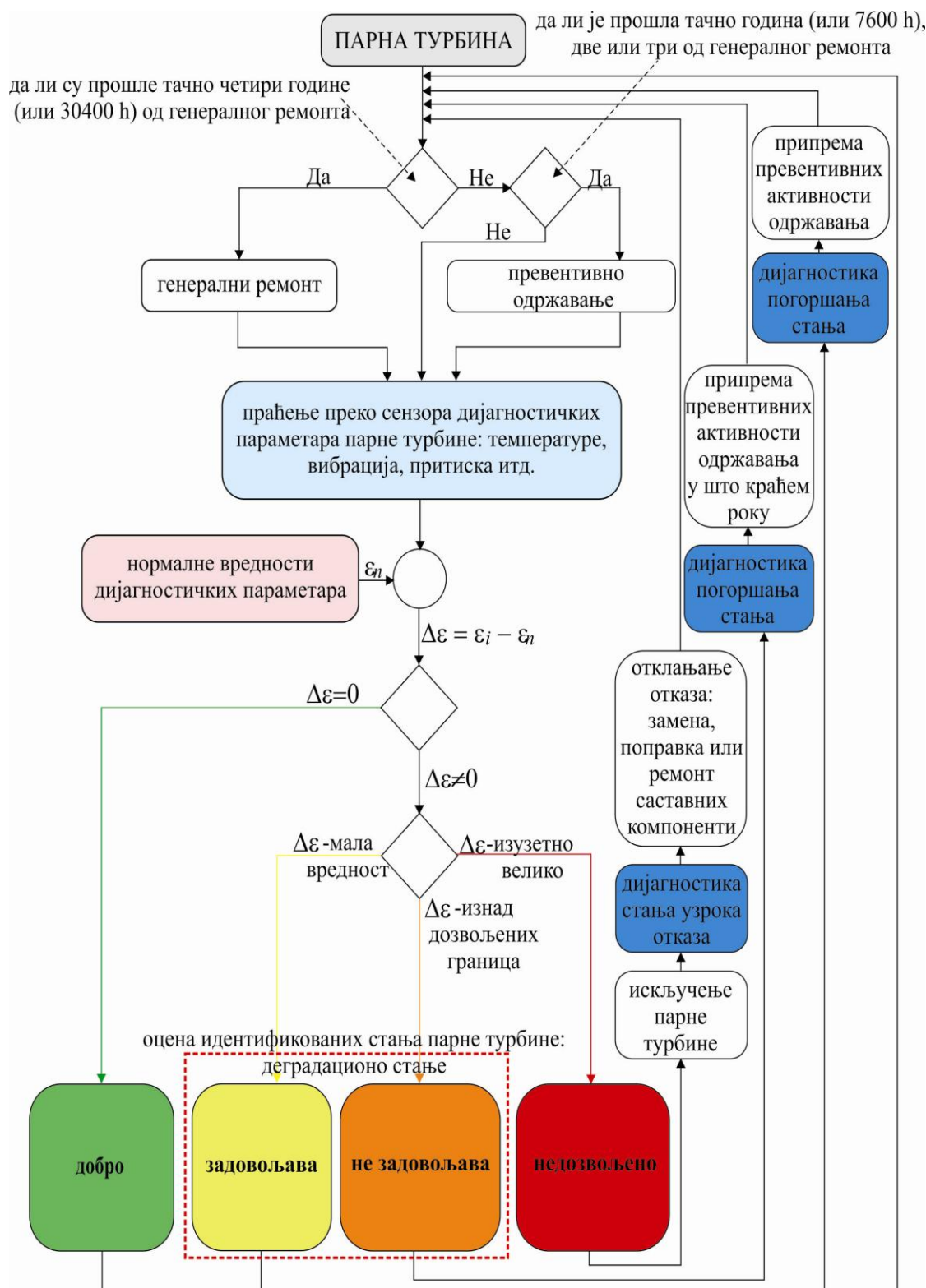
За одређене оптималне интервале одржавања парних турбина коришћени су подаци из инжењерске праксе одржавања, као и експлоатационих истраживања и постојећих стандарда. Оптимални интервали одржавања су исто тако одређени, потврђени и примењени у развијеном математичком моделу који је приказан у шестом поглављу дисертације.

На слици 5.1 приказан је развијени модел одржавања на бази ризика парних турбина.

Након пуштања парне турбине у рад континуално се прате одређени дијагностички параметри као што су:

1. Проток прегрејане паре [t/h]
2. Број обртаја ротора парне турбине [o/min]
3. Активна снага [MW]
4. Притисак прегрејане паре испред стоп вентила [bar]
5. Температура прегрејане паре у колектору за заптивање [$^{\circ}C$]
6. Притисак паре ка заптивањима [bar]
7. Температура паре у колектору за заптивање [$^{\circ}C$]
8. Притисак паре ка ејекторима и заптивањима [bar]
9. Температура паре ка ејекторима и заптивањима [$^{\circ}C$]
10. Осни помак ротора [mm]
11. Притисак у кондензатору [bar]
12. Притисак циркулационе воде [bar]
13. Температура расхладне воде на улазу у кондензатор [$^{\circ}C$]

³¹ Станковић, Н., Адамовић, Ж., Илић, Б., Милисављевић, Б.: Модел одржавања на бази ризика и његов утицај на поузданост парних турбина, Мајски скуп одржавалаца Србије, Конференција „Бука, вибрације и проактивно одржавање машина“, Врњачка Бања, 26. и 27. мај, 2017.



5.1: Графички приказ развијеног модела одржавања на бази ризика парних турбина.³¹

- 14. Притисак расхладне воде у сливу из кондензатора [bar]
- 15. Температура паре на излазу из CNP-а [°C]
- 16. Температура уља иза хладњака [°C]
- 17. Притисак уља за подмазивање [bar]

18. Температура уља за регулацију [$^{\circ}\text{C}$]
19. Притисак уља за регулацију [bar]
20. Проток кондензата [t/h]
21. Температура метала лежишта [$^{\circ}\text{C}$]
22. Температура аксијалних сегмената клизних лежишта [$^{\circ}\text{C}$]
23. Температура уља за подмазивање клизних лежишта [$^{\circ}\text{C}$]
24. Температура воде за хлађење уља [$^{\circ}\text{C}$]
25. Вибрације клизних лежишта.

На основу величине одступања измерених од нормалних вредности дијагностичких параметара оцењује се стање (степен неисправности) парних турбина и на основу тога доноси дијагностичка одлука о даљим активностима одржавања (о наставку или заустављања рада погона)

Када не постоји (или је врло мало) одступање измерене од нормалне вредности дијагностичких параметара ($\Delta\epsilon \approx 0$), серверски рачунар даје дијагностичку поруку да је стање парне турбине добро „**Добро**” (парна турбина је исправна, радно способна), у том случају наставља нормално да ради и не планирају се превентивне активности одржавања.

Када се појави одступање измерене од нормалне вредности, серверски рачунар упозорава о могућој појави отказа и то:

- У случају малих одступања ($\Delta\epsilon$ – **мала вредност**), када не постоји опасности од већих оштећења, серверски рачунар даје дијагностичку поруку стања парне турбине која се налази у деградацији „**Задовољава**“ и да треба да се прати стање где се у дијагностици стања утврђују неправилности и где се врши припрема за превентивне активности, али се наставља са радом пошто су мала одступања.
- У случају већих одступања ($\Delta\epsilon$ – **изнад дозвољених граница**), серверски рачунар даје дијагностичку поруку да стање парне турбине „**Незадовољава**“ и да се налази у деградацији којом се у дијагностици стања утврђују неправилности, где се врши припрема за превентивне активности одржавања у што краћем року.
- У случају изузетно великих одступања ($\Delta\epsilon$ - **изузетно велико**), када постоји опасност од отказа који су опасни за даљи рад парне турбине, серверски рачунар даје дијагностичку поруку да је стање „**Недозвољено**“ и да треба парну турбину одмах искључити, где се врши дијагностика стања узрока отказа након чега се врши отклањање отказа, замена поправка или ремонт саставних компонената, након отклањања отказа парна турбина може поново да се пусти у погон.

За дијагностичке параметре су изабране физичке величине из којих се могу добити најпоузданије информације о стању парне турбине које се контролишу.

У контролисане одређене компоненте уграђени су сензори фабрички или накнадно који из праћеног система узимају узорак неке физичке величине (температура вибрације притисак паре итд) и претварају је у електричну величину погодну за пренос и даљу обраду.

Циљ предложеног алгоритамског модела одржавања на бази ризика и његовог утицаја на поузданост парних турбина је да идентификује почетна одступања каракте-

ристика и стања опреме од пројектованих, односно да анализом параметара битних за рад парне турбине детектује отказе у почетној фази настанка односно открију деградациона стања, чиме се стварају услови да се правовременим предузимањем одговарајућих активности одржавања у технолошким најповољнијем тренутку спрече тежи откази и хаварије а тиме и трошкови и опасности по људе и околину. На основу увида у велики број дијагностичких параметара парне турбине могуће је остварити увид у стање опреме и погона у реалном времену, детектовати отказе у почетној фази настанка, спречити или смањити последице отказа, анализирати узроке отказа, извршити оптимизацију управљања опремом, провести одржавање према стању.

5.1.1 Утицај модела одржавања на бази ризика на поузданост парних турбина³¹

На основу развијеног модела и његове примене као алгоритма праћења рада парне турбине, правовремених и прецизних информација о стању виталних компоненти парне турбине могу се откази детектовати у почетној фази настанка, чиме су створени услови да се предузимањем правовремених одговарајућих активности одржавања у технолошки најповољних тренутака спрече катастрофални откази као и хаварије, а тиме и трошкови и опасности по људе и околину.

Примена мониторинга одређених параметара које се прате континуално током експлоатације парне турбине доприноси порасту нивоа поузданости као и рано откривање деградационих стања компоненти.

Откривањем деградационих стања компоненти пружа се могућност да се у дијагностици стања утврде и идентификују неисправности које се у зависности од степена деградације поправљају и отклањају у што краћем року. Спровођењем овог модела могу да се открију незадовољавајуће вредности где се парна турбина аутоматски искључује, затим се у дијагностици стања утврђују неисправности и предлаже замена поправка или ремонт саставних компоненти.

Значај правовремене (ране) детекције и идентификације отказа парне турбине која се остварује применом модела одржавања на бази ризика је од изизетне важности, јер омогућује да се предузимањем одговарајућих активности одржавања у најповољнијем тренутку:

- смањи број отказа и повећа ниво поузданости парних турбина,
- скрати време у застоју (прекида у раду) термоенергетског погона и повећа ниво расположивости парних турбина,
- спрече већи откази и хаварије парних турбина, а тиме и велики материјални трошкови (финансијски губици)
- спрече додатна оштећења и угрожавање рада целокупног термоенергетског погона,
- спречи опасност по радно особље термоелектране и околину,
- спрече експлозију и пожар у термоенергетском погону,
- смање активности класичних превентивних активности парних турбина,
- смање активности корективног одржавања парних турбина,
- оствари оптималније планирање активности одржавања парних турбина,
- смање трошкови одржавања парних турбина.

Софтверска подршка развијеном моделу веома је важна у смислу ефикасности дијагностичког процеса. Због тога је константно побољшање софтверских решења веома важно ради квалитетнијег праћења дијагностичких параметара и ефикаснијег доношења дијагностичких одлука, односно ради повећања поузданости читавог дијагностичког процеса, а тиме и поузданости парне турбине у целини чији се витални дијагностички параметри прате.

Развијени модел одржавања на бази ризика парних турбина има за циљ спречавање катастрофалних отказа, као и рано откривање деградационих стања компоненти. Компоненте парних турбина могу бити у оперативном стању, деградираном стању, стању дијагностификовања, у стању које је спремно за одржавање и стању отказа

Праћењем одређених дијагностичких параметара има за циљ идентификовање компоненти у деградираном стању, где се пружа могућност да се спречи односно поправи деградација и тиме спречи прелаз из деградационог стања у стање отказа а где се све активности одређују дијагностичком контролом у што краћем року. Последица неспречавања такве деградације може бити катастрофални отказ целе парне турбине и повреде људства, као и великих финансијских губитака. Из свега изложеног може се закључити да овај предложени модел има велики утицај на поузданост рада парних турбина.

5.2 РАЗВОЈ МЕТОДА ПРОЦЕНЕ РИЗИКА

У овом делу поглавља приказаше се методе процене ризика које су развијене и прилагођене у назначеној литератури.^{13,32}

5.2.1 Делфи метода (DELPHI)

Принципијелна шема Делфи методе приказана је на слици 5.2, а у табели 5.1 дат је упитник о ризику и избору средстава индивидуалне заштите руковоаоца техничког система.¹³



Слика 5.2: Принципијелна шема Делфи методе¹³

Опис ризика	Да	Не	Примедбе
<u>Механички ризици</u> Ударци Парчићи или летеће честице Рањавања оштрим предметима	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
<u>Термички ризици</u> Хладноћа Врелина Топљење метала Високи притисак	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Температура пода и просторије: °С Подвргнут деловању: сати на дан
<u>Хемијски ризици</u> Прашина Агресивне течности Токсичне и друге по здравље штетне супстанце	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Својства природних продуката (оштре, лако запаљиве, експлозивне итд.)
<u>Ризик повезан са зрачењем</u> Ултраљубичасто зрачење Инфрацрвено зрачење Ласерско зрачење Јонизујуће зрачење Зрачење током заваривања	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Дужина или домет таласа: Примењена метода: Интензитет:
<u>Услови рада и намештај близу радног места</u> Услови на другим радним местима близу датог радног места Услови на радном месту, ван просторије Услови унутар просторије Површине које зраче у околини	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Типови услова:
<u>Захтеви повезани са испуњењем задатака</u> Потребна видљивост - добра - врло добра - одлична Дужина употребе СИЗ - периодична употреба СИЗ - дуга употреба СИЗ Захтеви за добар опажај боја Захтеви у вези са видним пољем	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Број радника:
<u>Индивидуални аспекти</u> Користе се оптичка корективна средства - наочари - контактна сочива - оптичка корективна средства нису потребна	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Табела 5.1: Упитник о ризику и избору средстава индивидуалне заштите руковаоца техничким системом¹³

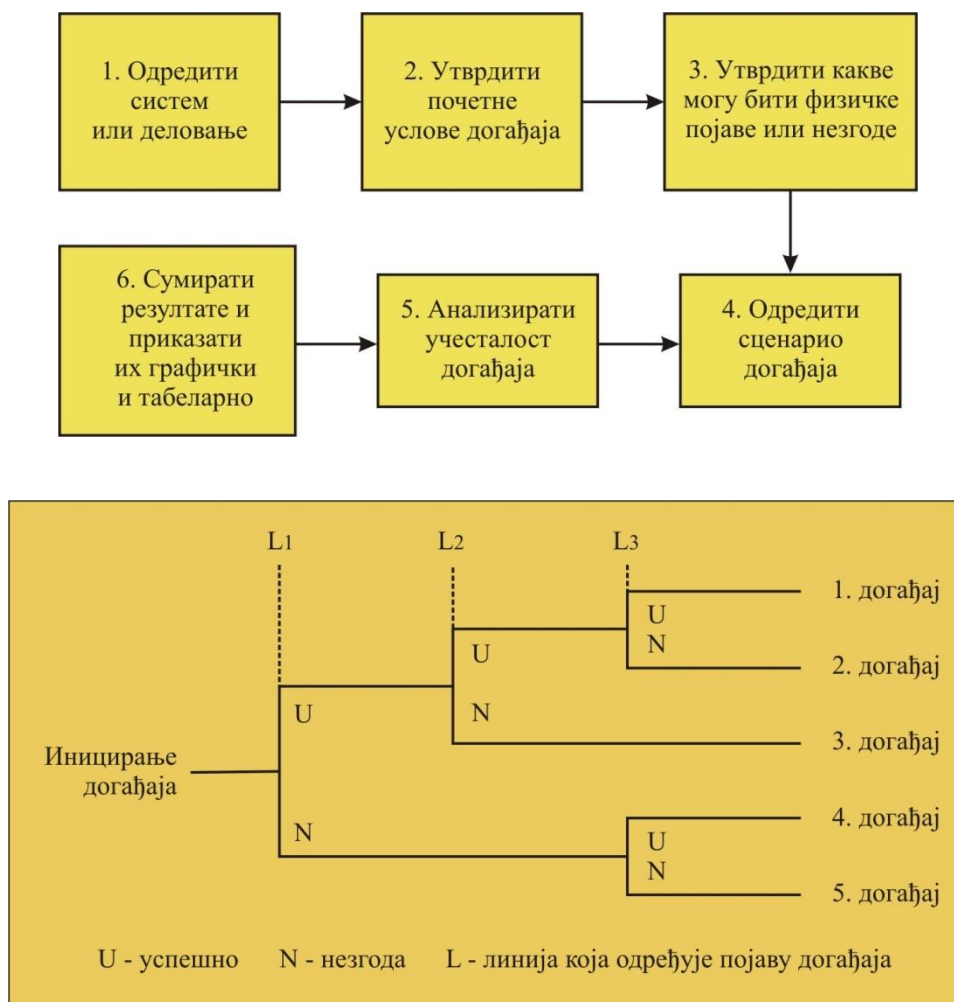
5.2.2 Развој методе логичке анализе

Метода логичке анализе грешака или Метода стабла грешака и Стабла догађаја (*Fault Tree analysis, Event Tree analysis*).¹³

Ова метода анализе грешака (МАГ) спада у дедуктивне методе, помоћу које је могуће распознати узроке неког конкретног нежељеног догађаја или грешке. То је графичка метода, која у облику дијаграма изражава могуће узајамне комбинације техничких дефеката, људских грешака, природних појава и других догађаја који могу довести до конкретног нежељеног догађаја. Дијаграм МАГ обликује се везивањем елементарних догађаја сценарија ризика путем логичких симбола „i“ или „ili“. У шемама се користе различите условне ознаке (симболи), који могу да уђу у компјутерске програме за извођење математичких прорачуна.

На крају се прави дијаграм – стабло са многим гранама које одређују вероватноћу могућег догађаја.

Пример процедуре и графичке анализе стабла догађаја дат је на слици 5.3.¹³



Слика 5.3: Пример процедуре и графичке анализе стабла догађаја¹³

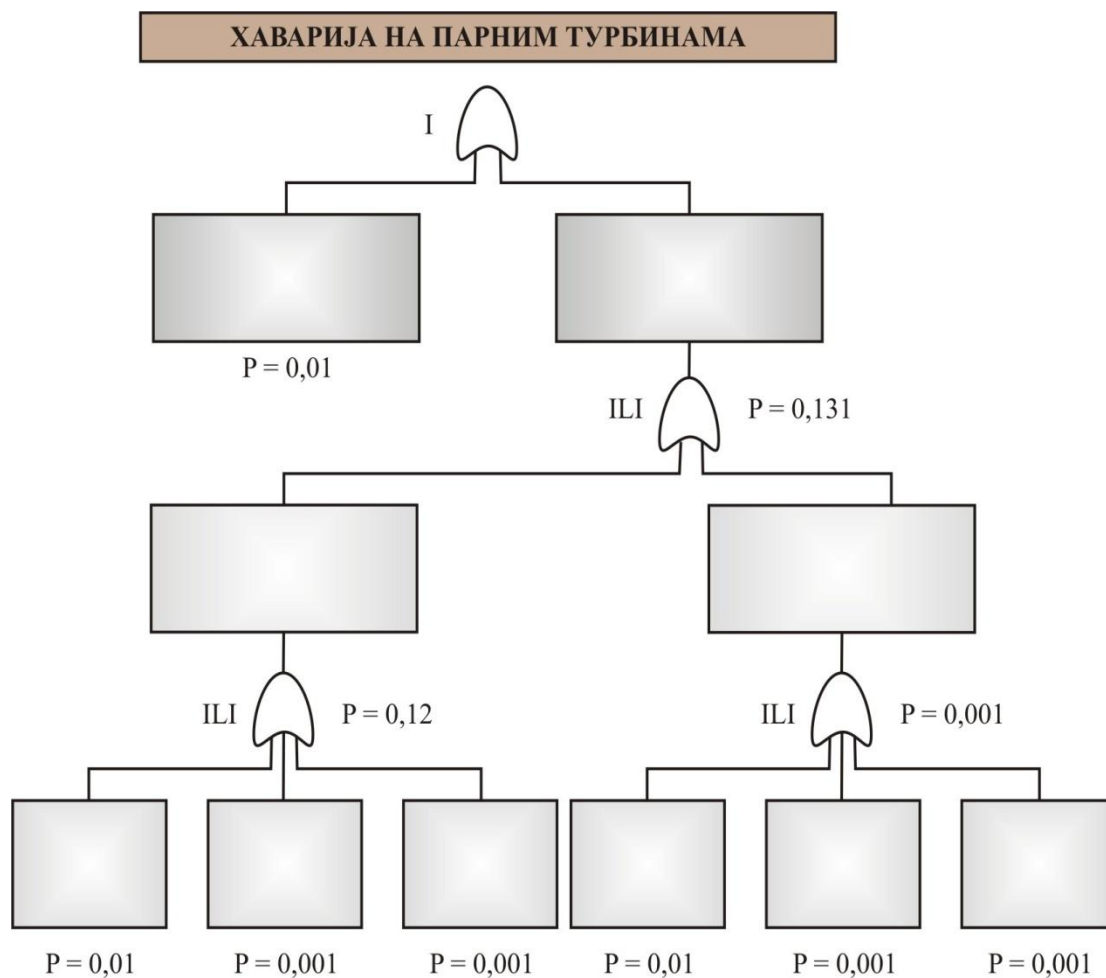
Метод се може направити квантитативним, уколико се користи скала вероватноће одговарајућих догађаја.

То је показано на примеру употребе „Стабла грешака“ за одређене могућности хаварије парних турбина у табели 5.2.

Скала вероватноће грешака	
1 од 10	Врло често
1 од 100	Могуће
1 од 1000	С времена на време
1 од 10 000	Довољно ретко
1 од 100 000	Врло ретко
1 од 1.000 000	Крајње ретко

Табела 5.2: Пример употребе „Стабла грешака“ за одређене могућности хаварије парних турбина¹³

На „стаблу грешака“ могу се показати могући узроци хаварије и вероватноћа њиховог појављивања, као у примеру на слици 5.4, где је вероватноћа хаварије 0,001 или 1 од 1000 случајева.



Слика 5.4: Шематски приказ „стабла грешака“¹³

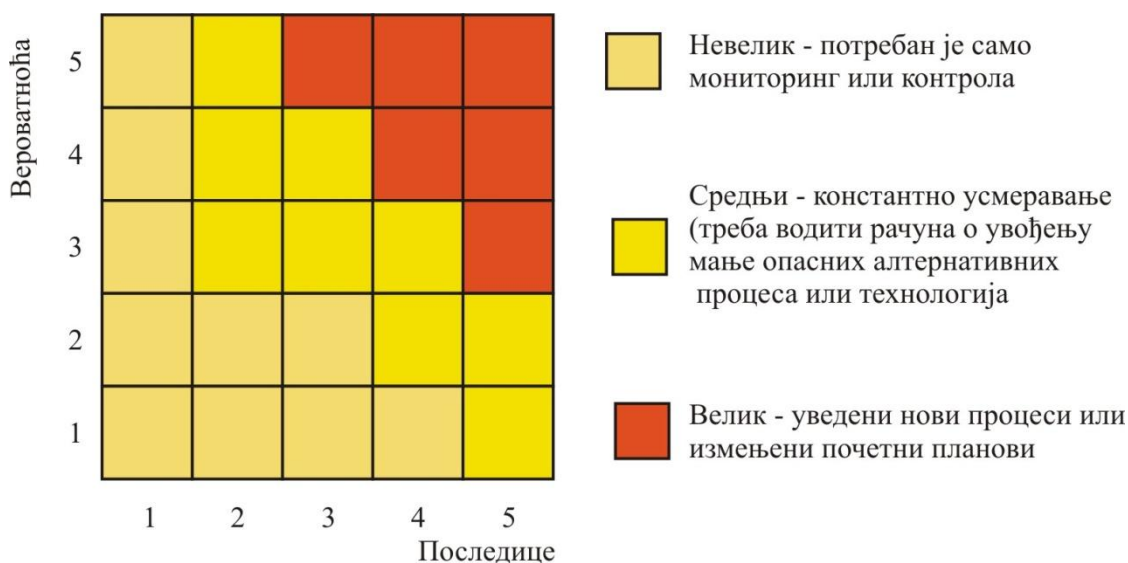
5.2.3 Развој матрица са проценом ризика

У овом делу поглавља ће се приказати матрице са проценом ризика које су развијене у наведеној литератури¹³ и ³².

1. Матрица VII (NASA, Hjuston, Teksas, 2003)¹³

Америчка космичка агенција NASA предлаже шему процене и усмеравања ризика, коју је могуће искористити за квалитативну процену финансијских и хаваријских ризика, ризика радног окружења и разних других ризика (табеле 5.3 и 5.4).

Ту шему је, исто тако, могуће прилагодити специфичностима комерцијалних предузећа.



Табела 5.3: Матрица VII за квалитативну процену ризика¹³

Шема усмеравања ризика коју је предложила NASA и појашњење матрице VII, слика 5.5:



Слика 5.5: Шематско управљање ризиком¹³

Шта се јавља као последица (трошкови, планирање или техника) у датом ризику?

Последице	Степен	1	2	3	4	5
	Трошкови	Утиче минимално или мало (мање од 10000\$)	Увећање буџета до 1000000\$	Увећање буџета са 1000000\$ на 10000000\$	Увећање буџета са 10000000\$ на 50000000\$	Увећање буџета са више од 50000000\$
	Планирање	Минимално или не утиче	Неопходне допунске мере	Испуњење 1. или 2. степена плана развија	Испуњење 1. или 2. степена плана успорава	Планирани пројекат не може бити испуњен
	Техника	Минимално или не утиче	Невелико улагање средстава	Средње улагање средстава	Велико улагање средстава	Недопустиво улагање средстава. Алтернативе нема

Табела 5.4: Последице трошкова, планирања или техника у датом ризику¹³

Каква је вероватноћа да ће се десити случај или хаваријска ситуација?

Степен	Вероватноћа	Постојећи процес
5	Веома висока	Немогуће је спречити догађај, нема алтернативе или другог одговарајућег процеса или технологије
4	Висока	Немогуће је спречити догађај, али постоје алтернативне варијанте и могућност да се измени процес
3	Средња	Могуће је спречити догађај, али потребне су допунске мере (расходи, заштитна техника итд.)
2	Ниска	Сасвим су довољна постојећа средства и заштитне мере
1	Врло ниска	Могуће је сасвим или делимично предупредити случај

Табела 5.5: Могућа вероватноћа случаја или хаваријских ситуација³²

Образложење последица за матрицу VII:

1. Расходи су истакнути у доларима, који су потребни за умањење ризика. То нису расходи који се појављују као последица ризика (несрећан случај, хаварија на инсталацијама или уређајима итд.).
2. Код планирања степен 2 указује на датум испоруке (апаратуре, уређаја), а степен 1 се односи на датум почетка процеса.
3. У одређење технике улази све што не представља расход и планирање (средства заштите, програмско осигурање, технолошки процеси итд.).
4. Планирање, техничке последице и расходи могу да егзистирају самостално, без међусобног утицаја.

5. Степени ризика потчињавају се закону: **ризик = вероватноћа x последице**.

У табели 5.6 дат је пример матрице ризика за детаљну оцену (евалуацију)³²

Примери скале вероватноће отказа					Последице отказа				
					A	B	C	D	E
Описно	Време између два отказа MTBF	Физика отказа PoF	Категорија						
Врло вероватно	мање од 1 године	више од 1×10^{-1}	5						Врло високи ризик
Могуће	1-5 година	1×10^{-1} до 1×10^{-2}	4				Високи ризик		
Вероватно	5-10 година	1×10^{-2} до 1×10^{-3}	3			Средњи ризик			
Мало вероватно	10-50 година	1×10^{-3} до 1×10^{-4}	2		Ниски ризик				
Врло мало вероватно	преко 100 година	мање од 1×10^{-4}	1	Врло ниски, скоро занемарив ризик					
Категорије вероватноће отказа									

Табела 5.6: Пример матрице ризика за детаљну оцену (евалуацију)³²

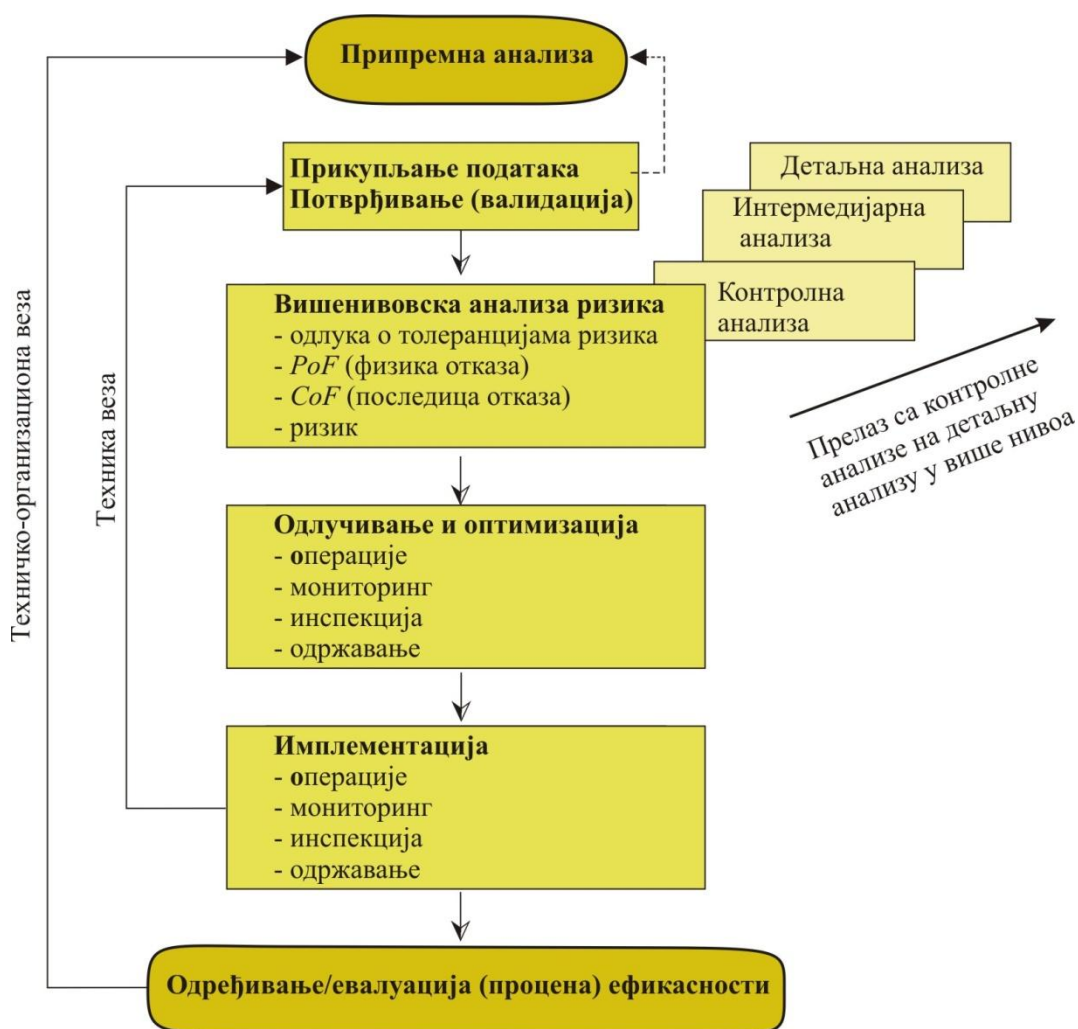
На слици 5.6 дата је општа процедура и захтеви за анализу ризика.³²

У табели 5.7 дат је пример матрице ризика 5x5 за процену ризика годишње вероватноће отказа.

³² DEG-Project „Esprit“ Course 3 Power Risk Analysis in Power Industries, Deutsche Investitions und Entwicklungsgesellschaft mbH, Stuttgart, january, 2009.

Категорија отказа	Годишња вероватноћа отказа						
	5	већа од 10^{-2}	очекивани отказ				
4	10^{-3} до 10^{-2}	висок					
3	10^{-4} до 10^{-3}	средњи					
2	10^{-5} до 10^{-4}	нижи					
1	мањи од 10^{-5}	виртуална нула					
Категорија последице			A	B	C	D	E

Табела 5.7: Пример матрице ризика 5x5 за процену ризика годишње вероватноће отказа³²



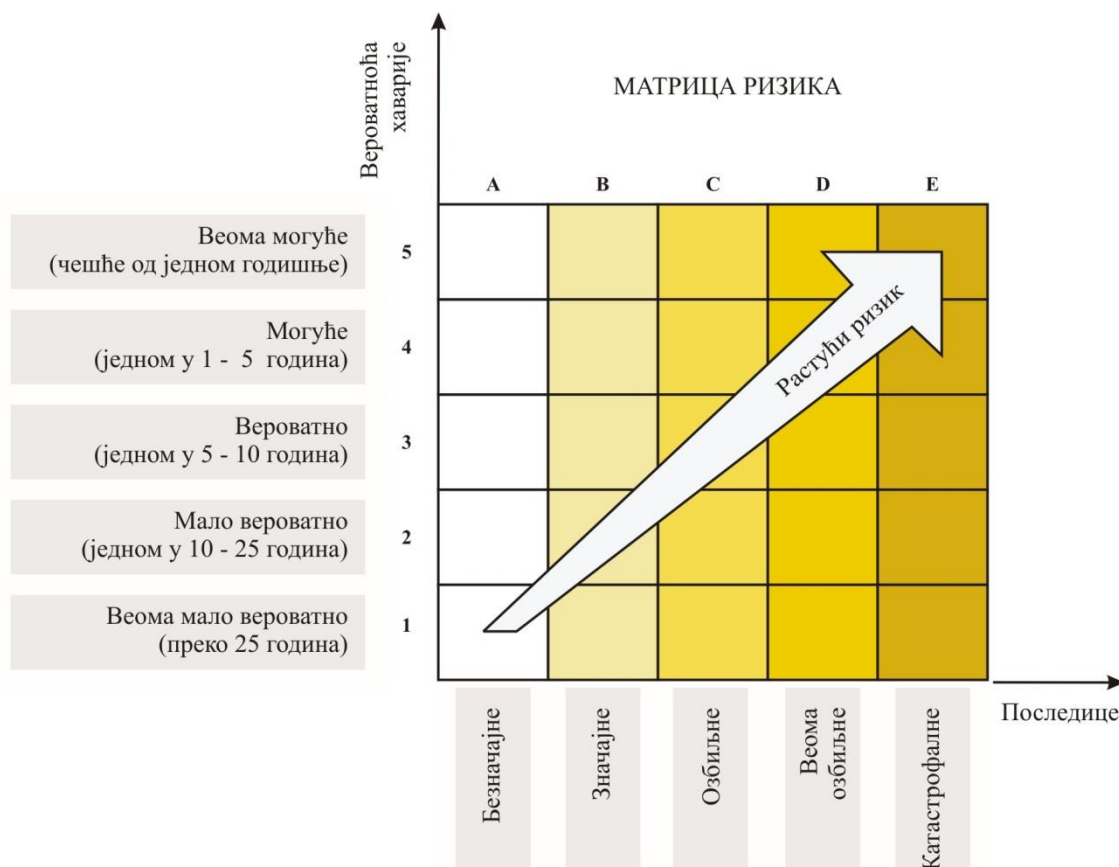
Слика 5.6: Основно представљање процедуре и захтева за анализу ризика³²

У табели 5.8 дат је пример матрице ризика за детаљну процену ризика, укључујући век трајања, сигурност, животну средину и економски ризик са пет граничних категорија ризика.³²

Категорије последица		A	B	C	D	E
Дуготрајно праћење	1	Упозорење издало, нема ефекта	Упозорење издало, могућ утицај	Повремени проблеми који се отклањају поправком	Ограничени утицај, трајна претња могућег отказа	Озбиљан утицај на појаву хаварије
Сигурност (тренутно праћење)	2	Није потребна помоћ, прекид рада	Потребна дијагностика стања	Привремене радне неисправности	Могућа трајна радна неисправност	Катастрофални исход
Животна средина	3	Занемарив утицај	Утицај мало присутан	Мали утицај	Оштећење на лицу места	Оштећење на лицу и ван лица места, дуготрајан ефекат
Трошкови	4	Мање од 1000 €	10.000 – 100.000 €	100.000 – 1000.000 €	1000.000 – 10.000.000 €	Више од 10.000.000 €
Безбедност	5	Никав	На лицу места (локални)	На лицу места (уопште)	Ван лица места	Друштвена опасност
Пад угледа	6	Никав	Мали	Лош публицитет	Питање компаније	Стручно питање
Друштвени поремећаји	7	Никави	Занемарив и	Мали	Мала заједница	Велика заједница

Табела 5.8: Пример матрице ризика за детаљну процену, укључујући век трајања, сигурност, животну средину и економски ризик са пет граничне категорије ризика³²

У табели 5.9 дата је матрица ризика 5x5 у зависности од вероватноће хаварије и последица.¹³



Табела 5.9: Матрица ризика 5x5 у зависности од вероватноће хаварије и последица¹³

5.3 МОДЕЛ ПЕТ СТАЊА ПАРНИХ ТУРБИНА³³

Модел пет могућих стања компонената парних турбина, који се овде разматра може директно да се примењује за одређивање оптималних интервала одржавања, коришћењем података из инжењерске праксе одржавања постројења и експлоатационих истраживања.

Овде је уведен модел пет могућих стања парних турбина, помоћу кога се могу дефинисати стања парних турбина који представља надоградњу Марковљевог модела четири стања уведеног у радовима^{2,30}, јер је уведено ново (пето) стање - *дијагностика стања*.

Дакле, посматра се кумулативни модел са пет стања компонената неког постројења. Израз *кумулативни модел* уведен је да би се обухватила и описала четири могућа начина прелаза у стање отказа, посматраног постројења. Детаљи ових начина биће изложени на сликама 5.8 и 5.9.

³³ Stankovic, M. N., Vulovic, M. St., Adamovic, Z. Zh., Milisavljevic, M. B., Asonja, A.A., Vulovic, S.M.: Model of Five States and Its Implementations to Reliability and Steam Turbines, Journal of the Balcan Tribological Association, book 3, vol. 23, pp. 542-568, Sofia, Bulgaria, 2017.

Стања компонената посматраног постројења су:

- $O = 1$ – оперативно стање (*operational state*) компоненте, које одговара нормалном пројектованом (предвиђеном) режиму рада компоненте, где се примењује мониторинг стања одређених параметара,
- $D = 2$ – деградирано стање (*degraded state*) компоненте, одговара деградираном, али још увек функционалном режиму рада компоненте,
- $DI = 3$ – стање када се врши дијагностика компоненте, стање дијагностиковања (*state of diagnosis*) контрола исправности, контрола радне способности, контрола функционалности и истаживање отказа или неисправности (место, облик и узрок)
- $M = 4$ – стање одржавања (*maintenance state*) компоненте, у коме је компонента искључена (из рада) због одржавања,
- $F = 5$ – стање компоненте у отказу, (*failed state*) у коме је функционисање компоненте отказало.

На слици 5.7. дат је графички приказ кумулативног модела пет стања компонената парних турбина, што је приказано у раду³³.

За уведених пет могућих стања, када су компоненте неког постројења: (O, D, DI, M, F), потребно је дефинисати брзине прелаза (димензијска величина) између два суседна стања. Овде је уведена ознака за брзину прелаза: λ_{ij} брзина прелаза из стања i у стање j .

Тако су на графикону приказаном на слици 5.7:

$\lambda_{12} = \lambda_{od}$ – брзина прелаза из оперативног стања у деградирано стање, тј.: мера деградације компоненте;

$\lambda_{14} = \lambda_{om}$ – брзина прелаза из оперативног стања у стање одржавања одређене компоненте, тј.: учесталост одржавања док је одређена компонента у оперативном стању;

$\lambda_{15} = \lambda_{of}$ – брзина прелаза из оперативног стања у стање компоненте у отказу – непосредно (директно), односно мера брзине отказа;

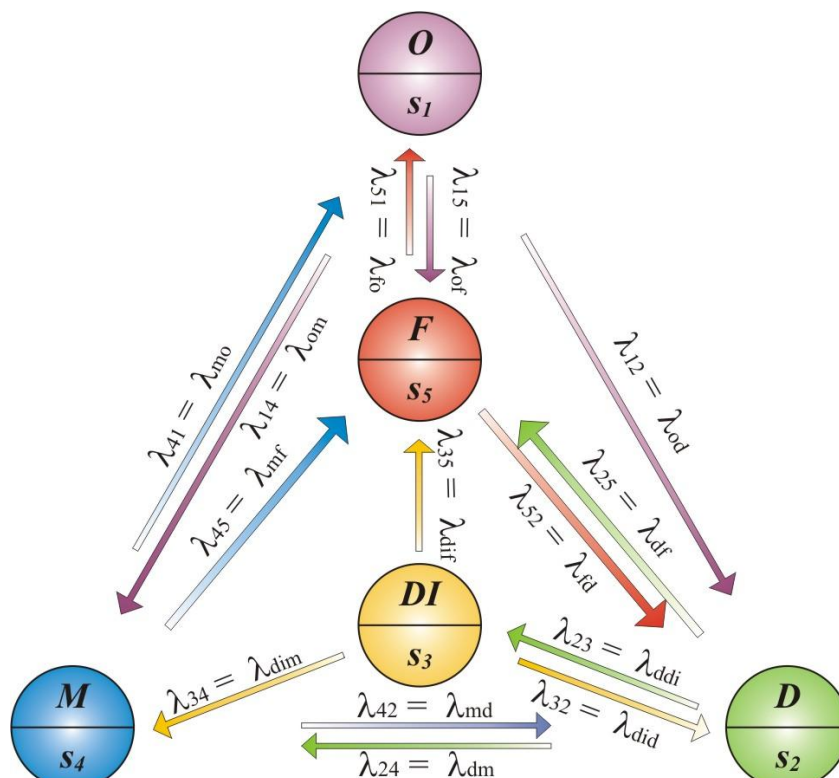
$\lambda_{23} = \lambda_{di}$ – брзина прелаза из деградираног стања у стање дијагностичке контроле компоненте (односно мера инспекције компоненте);

$\lambda_{24} = \lambda_{dm}$ – брзина прелаза из деградираног стања у стање одржавања одређене компоненте, тј.: учесталост одржавања док је одређена компонента у деградираном стању;

$\lambda_{25} = \lambda_{df}$ – брзина прелаза из деградираног стања у стање компоненте у отказу (када систем заштите врши своју функцију) или мера деградације компоненте;

$\lambda_{32} = \lambda_{did}$ – брзина прелаза из стања дијагностичке контроле компоненте у деградирано стање, односно мера деградације компоненте;

$\lambda_{34} = \lambda_{dim}$ – брзина прелаза из стања дијагностичке контроле компоненте у стање одржавања те компоненте, односно учесталост одржавања док је одређена компонента у дијагностици стања;



Слика 5.7: Графикон кумулативног модела пет стања компонента парних турбина³³

$\lambda_{35} = \lambda_{dif}$ – брзина прелаза из стања дијагностичке контроле компоненте у стање компоненте у отказу, односно мера отказа компоненте после дијагностичке стања;

$\lambda_{41} = \lambda_{mo}$ – брзина прелаза из стања одржавања у оперативно стање компоненте, односно мера поправке компоненте у одржавању;

$\lambda_{42} = \lambda_{md}$ – брзина прелаза из стања одржавања у деградирано стање одређене компоненте, односно мера деградације одржавања;

$\lambda_{45} = \lambda_{mf}$ – брзина прелаза из стања одржавања у стање компоненте у отказу, или мера исказивања отказа;

$\lambda_{51} = \lambda_{fo}$ – брзина прелаза из стања компоненте у отказу у оперативно стање, или мера ремонта компоненте у отказу;

$\lambda_{52} = \lambda_{fd}$ – брзина прелаза из стања компоненте у отказу у деградирано стање, или мера ремонта компоненте у отказу.

1. Вероватноће стања режима рада за модел пет стања

За уведени модел пет стања одговарајуће вероватноће стања у посматраном тренутку су:

$p_1 = p_o$ – вероватноћа да је посматрана компонента у оперативном стању **O**,

$p_2 = p_d$ – вероватноћа да је посматрана компонента у деградираном стању **D**,

$p_3 = p_{di}$ – вероватноћа да је посматрана компонента у стању **DI** када се врши дијагностичка контрола стања,

$p_4 = p_m$ – вероватноћа да је посматрана компонента у стању одржавања **M**,

$p_5 = p_f$ – вероватноћа да је посматрана компонента у стању отказа F , у датом тренутку.

Систем једначина стационарног стања, добијен применом Марковљевог моделовања– Марковљевих ланаца, као непознате садржи вероватноће стања $p_1 = p_o$, $p_2 = p_d$, $p_3 = p_{di}$, $p_4 = p_m$, и $p_5 = p_f$.

Решење оваквих система једначина даје поузданост режима рада посматране компоненте у стационарном стању.

Све карактеристике поузданости посматране компоненте могу да се добију помоћу вероватноћа режима рада, које подразумевају да је:

$p_1 = p_o$ – доступност пројектоване (предвиђене) оперативности;

$p_2 = p_d$ – доступност пројектоване (предвиђене) деградације;

$p_3 = p_{di}$ – недоступност компоненте услед дијагностичке контроле;

$p_4 = p_m$ – недоступност компоненте услед одржавања;

$p_5 = p_f$ – недоступност компоненте услед отказа.

Почетно стање [први број (i) у индексима за λ_{ij}] означава врсту матрице којој припада λ_{ij} , а стање после прелаза [други број (j) у индексима за λ_{ij}] означава стубац (колону) матрице којој припада λ_{ij} .

Недостајуће брзине прелаза не допуштају прелажење из једног у друго стање, зато може да се сматра да су њихове брзине прелаза једнаке нули.

Усвојено је да се не посматра прелаз из неког стања у исто то стање, јер то не доводи до промене тога стања.

Не посматра се ни непосредни прелаз из стања деградације у оперативно стање ($d \rightarrow o$), јер претходно мора да постоји стање дијагностиковања и стање одржавања.

Такође се не посматра ни непосредни прелаз из стања отказа у стање одржавања ($f \rightarrow m$), пошто се подразумева да ремонт има предност у односу на одржавање.^{2,30}

Одређивање вероватноћа стања ($p_1 = p_o$, $p_2 = p_d$, $p_3 = p_{di}$, $p_4 = p_m$, и $p_5 = p_f$), захтева да се одреде величине брзина прелаза ($\lambda_{12} = \lambda_{od}$, $\lambda_{14} = \lambda_{om}$, $\lambda_{15} = \lambda_{of}$, ...).

Ово је често проблем при примени Марковљевог моделовања на техничке системе. Моделовање по Маркову представља стандард, односно представљају се нове апликације, укључујући и односе који се развијају за тражене нивое, како би се обезбедила практична имплементација модела.^{2,30}

Ефекти одржавања су квантификовани дефинисањем дегредационих стања компонентата, како у оперативном стању, тако и у стању отказа.^{2,30}

Такође, карактеристике овог приступа су нови апликациони приступи, који омогућавају детерминацију преносних нивоа на основу стандардних података инжењерских искустава и стања из праксе.^{2,30} Овакав приступ може да се усвоји код парних турбина.

Када постоји довољно података о одржавању и отказима, тада се брзине прелаза могу лако да оцене коришћењем одговарајућих података, помоћу статистичких метода оцене.^{2,30}

Међутим, ови подаци често нису доступни, јер управо је овај модел развијен као методологија која спречава да не дође до отказа, који могу да изазову велике хава-рије, а самим тим и ризик по радно особље.

2. Могући прелази у стање отказа

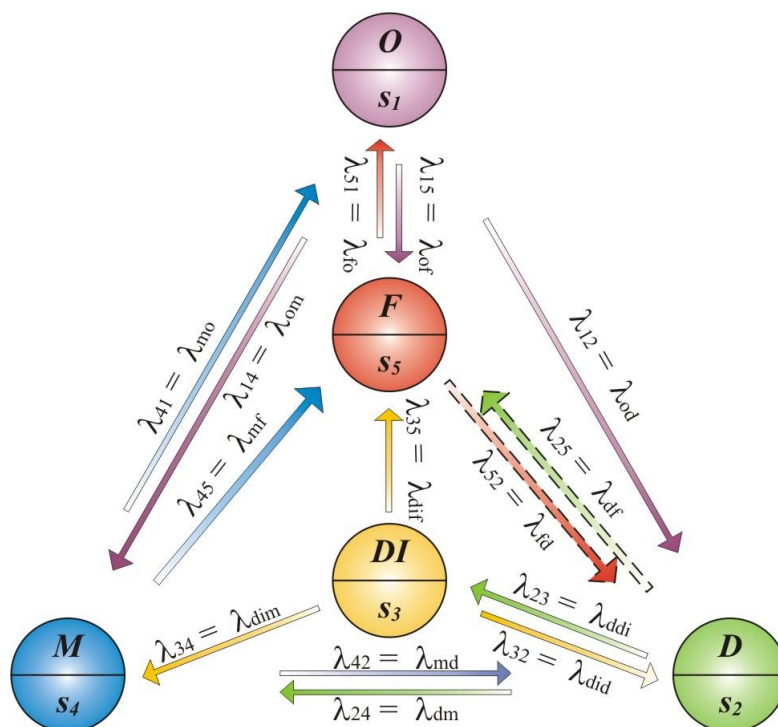
На графикону приказаном на слици. 5.7 приказан је кумулативни модел компоненте парних турбина при прелазу у стање отказа.

Сада ће се извршити подела на четири могућа начина прелаза у стање отказа. Тако кумулативни модел више неће бити важан у даљој анализи овог проблема.

Прелаз у стање отказа могућ је на следећа четири начина:

- први могући начин прелаза: $O \rightarrow D \rightarrow DI \rightarrow F$.
- други могући начин прелаза: $O \rightarrow D \rightarrow F$.
- трећи могући начин прелаз: $O \rightarrow F$.
- четврти могући начин прелаза: $O \rightarrow M$.

Графици прелаза у стање отказа приказани су на сликама 5.8 и 5.9.

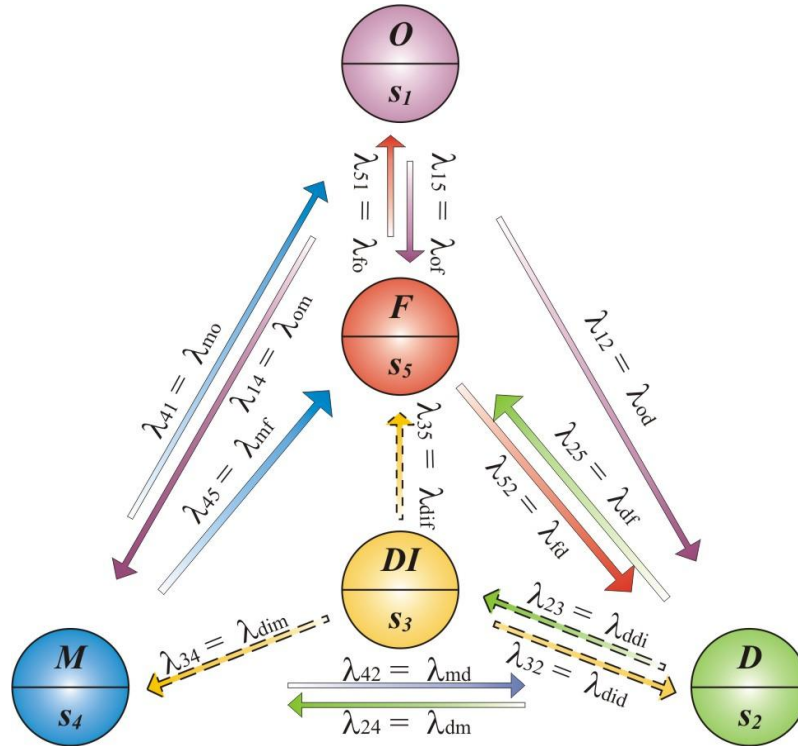


Слика 5.8: График модела пет стања при могућем прелазу у стање отказа: $O \rightarrow D \rightarrow DI \rightarrow F$ ³³

Напомена. У другом могућем начину прелаза у стање отказа ($O \rightarrow D \rightarrow F$) не фигурише стање $DI = 3$, односно стање када се врши дијагностика компоненте. Овај случај је већ и раније обрађен.^{2,30}

Дакле, посматрани модел пет стања представља уопштење модела четири стања.

У дисертацији се посматра први и други могући начин прелаза у стање отказа парних турбина.



Слика 5.9: График модела пет стања при прелазу у стање отказа: $O \rightarrow D \rightarrow F$ ³³

а) Први могући начин прелазу у стање отказа: $O \rightarrow D \rightarrow DI \rightarrow F$.

На слици 5.8 приказан је график модела пет стања компонента парних турбина, при могућем прелазу у стање отказа на следећи начин: $O \rightarrow D \rightarrow DI \rightarrow F$ ³³

б) Други могући начин прелазу у стање отказа: $O \rightarrow D \rightarrow F$.

На слици 5.9. приказан је график модела пет стања компонента парних турбина, при могућем прелазу у стање отказа на други начин: $O \rightarrow D \rightarrow F$

в) Систем једначина стационарног стања при прелазу на Први начин

Први могући начин прелазу у стање отказа: $O \rightarrow D \rightarrow DI \rightarrow F$ приказан је на слици 5.8.

За уведених пет могућих стања o, d, m, di, f треба дефинисати брзине прелазу између тих стања.

Одговарајуће брзине прелазу λ_{ij} дате су у матрици прелазу у табели 5.8.

Према уведеном моделу пет стања, применом Марковљевог моделовања одржавања и Марковљевих ланаца, може се написати следећи услов стационарности, који описује систем једначина стационарног стања (1):

$$p_j \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^5 \lambda_{ji} = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^5 p_i \lambda_{ij} ; j = 1, 2, 3, 4, 5, \quad (1)$$

уз који иде услов нормираности вероватноћа стања, односно ограничење тих вероватноћа:

$$p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5 = 1 \quad (2)$$

	<i>o</i> 1	<i>d</i> 2	<i>di</i> 3	<i>m</i> 4	<i>f</i> 5
<i>o</i> 1	—	$\lambda_{12} = \lambda_{od}$	—	$\lambda_{14} = \lambda_{om}$	$\lambda_{15} = \lambda_{of}$
<i>d</i> 2	—	—	$\lambda_{23} = \lambda_{ddi}$	$\lambda_{24} = \lambda_{dm}$	—
<i>di</i> 3	—	$\lambda_{32} = \lambda_{did}$	—	$\lambda_{34} = \lambda_{dim}$	$\lambda_{35} = \lambda_{dif}$
<i>m</i> 4	$\lambda_{41} = \lambda_{mo}$	$\lambda_{42} = \lambda_{md}$	—	—	$\lambda_{45} = \lambda_{mf}$
<i>f</i> 5	$\lambda_{51} = \lambda_{fo}$	—	—	—	—

Табела 5.8: Матрица прелаза $O \rightarrow D \rightarrow DI \rightarrow F$ у могуће стање отказа³³

Према графику уведеног модела пет могућих стања компонената, датог на слици 5.8, систем једначина (1) даје стандардне једначине стационарног стања за вероватноће стања p_1, p_2, p_3, p_4 и p_5 :

- за чвор 1 на графику (слика 5.8):

$$p_1(\lambda_{12} + \lambda_{14} + \lambda_{15}) = p_4\lambda_{41} + p_5\lambda_{51}. \quad (2.1)$$

- за чвор 2 графика:

$$p_2(\lambda_{23} + \lambda_{24}) = p_1\lambda_{12} + p_3\lambda_{32} + p_4\lambda_{42}. \quad (2.2)$$

- за чвор 3 графика:

$$p_3(\lambda_{32} + \lambda_{34} + \lambda_{35}) = p_2\lambda_{23} \quad (2.3)$$

- за чвор 4 графика:

$$p_4(\lambda_{41} + \lambda_{42} + \lambda_{45}) = p_1\lambda_{14} + p_2\lambda_{24} + p_3\lambda_{34}. \quad (2.4)$$

- за чвор 5 графика:

$$p_5\lambda_{51} = p_1\lambda_{15} + p_3\lambda_{35} + p_4\lambda_{45}. \quad (2.5)$$

Ради сажетијег писања једначина (2.1) – (2.5) уводе се следеће помоћне величине (3):

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= \lambda_{12} + \lambda_{14} + \lambda_{15} \\ \lambda_2 &= \lambda_{23} + \lambda_{24} \\ \lambda_3 &= \lambda_{32} + \lambda_{34} + \lambda_{35} \\ \lambda_4 &= \lambda_{41} + \lambda_{42} + \lambda_{45}, \\ \lambda_5 &= \lambda_{51} \end{aligned} \quad (3)$$

Применом помоћних величина (3) на једначине (2.1) – (2.5) добија се:

$$p_1\lambda_1 = p_4\lambda_{41} + p_5\lambda_{51} \quad (4.1)$$

$$p_2\lambda_2 = p_1\lambda_{12} + p_3\lambda_{32} + p_4\lambda_{42} \quad (4.2)$$

$$p_3\lambda_3 = p_2\lambda_{23} \quad (4.3)$$

$$p_4\lambda_4 = p_1\lambda_{14} + p_2\lambda_{24} + p_3\lambda_{34} \quad (4.4)$$

$$p_5\lambda_5 = p_1\lambda_{15} + p_3\lambda_{35} + p_4\lambda_{45} \quad (4.5)$$

Систем једначина (4.1) – (4.5) преписаће се у облику система хомогених једначина:

$$p_1\lambda_1 - p_4\lambda_{41} - p_5\lambda_{51} = 0 \quad (5.1)$$

$$p_2\lambda_{12} - p_2\lambda_2 + p_3\lambda_{32} + p_4\lambda_{42} = 0 \quad (5.2)$$

$$p_2\lambda_{23} - p_3\lambda_3 = 0 \quad (5.3)$$

$$p_1\lambda_{14} + p_2\lambda_{24} + p_3\lambda_{34} - p_4\lambda_4 = 0 \quad (5.4)$$

$$p_1\lambda_{15} + p_3\lambda_{35} + p_4\lambda_{45} - p_5\lambda_5 = 0 \quad (5.5)$$

Систем једначина (5.1) – (5.5) је систем хомогених линеарних алгебарских једначина.

Може да буде решив по непознатим: p_1 , p_2 , p_3 , p_4 и p_5 , уз поштовање услова нормираности, тј. ограничења (2).

Овде ћемо издвојити два важна случаја за примену у одржавању.

а) Први случај решивости система хомогених једначина

Систем једначина (5.1) – (5.5) увек има тривијална (очигледна или идентичка) решења:

$$p_1 = 0, p_2 = 0, p_3 = 0, p_4 = 0, p_5 = 0 \quad (6)$$

Овај случај отпада, јер нема смисла у одржавању: вероватноће свих пет стационарних стања, ни истовремено а ни појединачно, не могу да буду једнаке нули.

б) Други случај решивости система хомогених једначина

Да би систем хомогених једначина (5.1) – (5.5) имао решења различита од нуле (нетривијална или неидентичка решења) треба детерминанта система да буде једнака нули:

$$\begin{vmatrix} \lambda_1 & \mathbf{0} & \mathbf{0} & -\lambda_{41} & -\lambda_5 \\ \lambda_{12} & -\lambda_2 & \lambda_{32} & \lambda_{42} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \lambda_{23} & -\lambda_3 & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \lambda_{14} & \lambda_{24} & \lambda_{34} & -\lambda_4 & \mathbf{0} \\ \lambda_{15} & \lambda_{25} & \lambda_{35} & \lambda_{45} & -\lambda_5 \end{vmatrix} = \mathbf{0}. \quad (7)$$

Решења система (5.1) – (5.5), када важи услов (7), постоје, али нису потпуно одређена. Могу да се одреде само њихови односи.

Наиме, решења система хомогених једначина (5.1) – (5.5) сразмерна су кофакторима елемената ма које врсте детерминанте (7).

Овде су изабрани кофактори елемената пете врсте детерминанте (7) и они гласе:

$$K_{51} = -\mathbf{1}^{5+1} \begin{vmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & -\lambda_{41} & -\lambda_5 \\ -\lambda_2 & \lambda_{32} & \lambda_{42} & \mathbf{0} \\ \lambda_{23} & -\lambda_3 & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \lambda_{24} & \lambda_{34} & -\lambda_4 & \mathbf{0} \end{vmatrix}, \quad (8)$$

$$K_{52} = -\mathbf{1}^{5+2} \begin{vmatrix} \lambda_1 & \mathbf{0} & -\lambda_{41} & -\lambda_5 \\ \lambda_{12} & \lambda_{32} & \lambda_{42} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & -\lambda_3 & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \lambda_{14} & \lambda_{34} & -\lambda_4 & \mathbf{0} \end{vmatrix}, \quad (9)$$

$$K_{53} = -\mathbf{1}^{5+3} \begin{vmatrix} \lambda_1 & \mathbf{0} & -\lambda_{41} & -\lambda_5 \\ \lambda_{12} & -\lambda_2 & \lambda_{42} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \lambda_{23} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \lambda_{14} & \lambda_{24} & -\lambda_4 & \mathbf{0} \end{vmatrix}, \quad (10)$$

$$K_{54} = -\mathbf{1}^{5+4} \begin{vmatrix} \lambda_1 & \mathbf{0} & \mathbf{0} & -\lambda_5 \\ \lambda_{12} & -\lambda_2 & \lambda_{32} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \lambda_{23} & -\lambda_3 & \mathbf{0} \\ \lambda_{14} & \lambda_{24} & \lambda_{34} & \mathbf{0} \end{vmatrix}, \quad (11)$$

$$K_{55} = -\mathbf{1}^{5+5} \begin{vmatrix} \lambda_1 & \mathbf{0} & \mathbf{0} & -\lambda_{41} \\ \lambda_{12} & -\lambda_2 & \lambda_{32} & \lambda_{42} \\ \mathbf{0} & \lambda_{23} & -\lambda_3 & \mathbf{0} \\ \lambda_{14} & \lambda_{24} & \lambda_{34} & -\lambda_4 \end{vmatrix}. \quad (12)$$

Према теорији линеарних алгебарских једначина за решења: p_1, p_2, p_3, p_4 и p_5 система хомогених линеарних алгебарских једначина (5.1) – (5.5), важе следећи односи непознатих и одговарајућих кофактора елемената пете врсте детерминанте (7):

$$\frac{p_1}{K_{51}} = \frac{p_2}{K_{52}} = \frac{p_3}{K_{53}} = \frac{p_4}{K_{54}} = \frac{p_5}{K_{54}}. \quad (13)$$

Разматрање система хомогених линеарних алгебарских једначина (5.1) – (5.5) овим је завршено. Избацивањем једне од тих једначина, а увођењем уместо ње услова нормираности, тј. ограничење вероватноћа стања (2), добија се нехомогени систем линеарних алгебарских једначина. Овде се изоставља једначина (5.5).

Тако је добијен следећи систем нехомогених линеарних алгебарских једначина:

$$p_1\lambda_1 - p_4\lambda_{41} - p_5\lambda_{51} = 0 \quad (14.1)$$

$$p_1\lambda_{12} - p_2\lambda_2 + p_3\lambda_{32} + p_4\lambda_{42} = 0 \quad (14.2)$$

$$p_2\lambda_{23} - p_3\lambda_3 = 0 \quad (14.3)$$

$$p_1\lambda_{14} + p_2\lambda_{24} + p_3\lambda_{34} - p_4\lambda_4 = 0 \quad (14.4)$$

$$p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5 = 1 \quad (14.5)$$

Детерминанта система једначина (14.1) – (14.5) гласи:

$$D_s = \begin{vmatrix} \lambda_1 & \mathbf{0} & \mathbf{0} & -\lambda_{41} & -\lambda_{51} \\ \lambda_{12} & -\lambda_2 & \lambda_{32} & \lambda_{42} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \lambda_{23} & -\lambda_3 & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \lambda_{14} & \lambda_{24} & \lambda_{34} & -\lambda_4 & \mathbf{0} \\ \mathbf{1} & \mathbf{1} & \mathbf{1} & \mathbf{1} & \mathbf{1} \end{vmatrix}. \quad (15)$$

Према Крамеровом правилу, које важи када је $D_s \neq \mathbf{0}$, да би се систем нехомогених једначина (14.1) – (14.5) решио потребно је написати још пет детерминанти.

Ова процедура, за налажење вероватноћа стања p_1, p_2, p_3, p_4 и p_5 , може се скратити на следећи начин.

Како је увек $p_1 > \mathbf{0}$, уведе се количници вероватноћа стања: p_1, p_2, p_3, p_4 и p_5 .

Тако се добија:

$$r_2 = \frac{p_2}{p_1},$$

$$r_3 = \frac{p_3}{p_1},$$

$$r_4 = \frac{p_4}{p_1},$$

$$r_5 = \frac{p_5}{p_1}. \quad (16)$$

Деобом система једначина (14.1) – (14.5) са $p_1 > \mathbf{0}$ добија се:

$$\lambda_1 - \frac{p_4}{p_1} \lambda_{41} - \frac{p_5}{p_1} \lambda_{51} = \mathbf{0},$$

$$\lambda_{12} - \frac{p_2}{p_1} \lambda_2 + \frac{p_3}{p_1} \lambda_{32} + \frac{p_4}{p_1} \lambda_{42} = \mathbf{0},$$

$$\frac{p_2}{p_1} \lambda_{23} - \frac{p_3}{p_1} \lambda_3 = \mathbf{0},$$

$$\lambda_{14} + \frac{p_2}{p_1} \lambda_{24} + \frac{p_3}{p_1} \lambda_{34} - \frac{p_4}{p_1} \lambda_4 = \mathbf{0},$$

$$\mathbf{1} + \frac{p_2}{p_1} + \frac{p_3}{p_1} + \frac{p_4}{p_1} + \frac{p_5}{p_1} = \frac{\mathbf{1}}{p_1}.$$

Коришћењем, горе уведених, количника вероватноћа (16), овај систем једначина постаје:

$$r_1 \lambda_{41} + r_5 \lambda_{51} = \lambda_1 \quad (17.1)$$

$$-r_2\lambda_2 + r_3\lambda_{32} + r_4\lambda_{42} = -\lambda_{12} \quad (17.2)$$

$$r_2\lambda_{23} - r_3\lambda_3 = 0 \quad (17.3)$$

$$r_2\lambda_{24} + r_3\lambda_{34} - r_4\lambda_4 = -\lambda_{14} \quad (17.4)$$

$$r_2 + r_3 + r_4 + r_5 = 1/p_1 - 1 \quad (17.5)$$

Добијен је систем нехомогених линеарних алгебарских једначина (17.1) – (17.5). Једначине (17.1) – (17.4) служе за одређивање количника вероватноћа r_2 , r_3 , r_4 и r_5 , док једначина (17.5) служи за одређивање вероватноћа стационарних стања.

Овим је поједностављен систем једначина (14.1) – (14.5).

Дакле, прво се решава систем нехомогених линеарних једначина (17.1) – (17.4), помоћу Крамеровог правила.

Детерминанта система (17.1) – (17.4) је:

$$D_s = \begin{vmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \lambda_{41} & \lambda_{51} \\ -\lambda_2 & \lambda_{32} & \lambda_{42} & \mathbf{0} \\ \lambda_{23} & -\lambda_3 & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \lambda_{24} & \lambda_{34} & -\lambda_4 & \mathbf{0} \end{vmatrix},$$

која после развоја, има вредност:

$$D_s = \lambda_{51}[\lambda_4(\lambda_2\lambda_3 - \lambda_{23}\lambda_{32}) - \lambda_{42}(\lambda_3\lambda_{24} + \lambda_{23}\lambda_{34})] \quad (18.1)$$

Детерминанта непознате r_2 система (17.1) – (17.4) је:

$$D_2 = \begin{vmatrix} \lambda_1 & \mathbf{0} & \lambda_{41} & \lambda_{51} \\ -\lambda_{12} & \lambda_{32} & \lambda_{42} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & -\lambda_3 & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ -\lambda_{14} & \lambda_{34} & -\lambda_4 & \mathbf{0} \end{vmatrix}, \quad D_2 = \lambda_3\lambda_{51}\lambda_4\lambda_{12} + \lambda_{14}\lambda_{42}. \quad (18.2)$$

Детерминанта непознате r_3 система (17.1) – (17.4):

$$D_3 = \begin{vmatrix} \mathbf{0} & \lambda_1 & \lambda_{41} & \lambda_{51} \\ -\lambda_2 & -\lambda_{12} & \lambda_{42} & \mathbf{0} \\ \lambda_{23} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \lambda_{24} & -\lambda_{14} & -\lambda_4 & \mathbf{0} \end{vmatrix}, \quad D_3 = \lambda_{23}\lambda_{51}\lambda_4\lambda_{12} + \lambda_{14}\lambda_{42}. \quad (18.3)$$

Детерминанта непознате r_4 система (17.1) – (17.4):

$$D_4 = \begin{vmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \lambda_1 & \lambda_{51} \\ -\lambda_2 & -\lambda_{32} & -\lambda_{12} & \mathbf{0} \\ \lambda_{23} & -\lambda_3 & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \lambda_{24} & \lambda_{34} & -\lambda_{14} & \mathbf{0} \end{vmatrix},$$

$$D_4 = \lambda_{51}[\lambda_3(\lambda_2\lambda_{14} + \lambda_{12}\lambda_{24}) + \lambda_{23}(\lambda_{14}\lambda_{32} + \lambda_{12}\lambda_{34})] \quad (18.4)$$

Детерминанта непознате r_5 система (17.1) – (17.4):

$$D_5 = \begin{vmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \lambda_{41} & \lambda_1 \\ -\lambda_2 & -\lambda_{32} & -\lambda_{42} & -\lambda_{12} \\ \lambda_{23} & -\lambda_3 & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \lambda_{24} & \lambda_{34} & -\lambda_4 & -\lambda_{14} \end{vmatrix}$$

$$D_5 = \lambda_1 [\lambda_4 (\lambda_2 \lambda_3 + \lambda_{23} \lambda_{32}) + \lambda_{42} (\lambda_3 \lambda_{24} + \lambda_{23} \lambda_{34})] - \lambda_{41} [\lambda_3 (\lambda_2 \lambda_{14} + \lambda_{12} \lambda_{24}) + \lambda_{23} (\lambda_{14} \lambda_{32} + \lambda_{12} \lambda_{34})] \quad (18.5)$$

Према Крамеровом правилу, решења посматраног система једначина су:

$$r_2 = \frac{D_2}{D_s}, \quad r_3 = \frac{D_3}{D_s}, \quad r_4 = \frac{D_4}{D_s}, \quad r_5 = \frac{D_5}{D_s}; \quad (19)$$

Сменом израза (18.1) – (18.5) у изразе (19) одређени су количници вероватноћа:

$$r_2 = \frac{\lambda_3 \lambda_4 \lambda_{12} + \lambda_{14} \lambda_{42}}{\lambda_4 \lambda_2 \lambda_3 - \lambda_{23} \lambda_{32} - \lambda_{42} \lambda_3 \lambda_{24} + \lambda_{23} \lambda_{34}},$$

$$r_3 = \frac{\lambda_{23} \lambda_4 \lambda_{12} + \lambda_{14} \lambda_{42}}{\lambda_4 \lambda_2 \lambda_3 - \lambda_{23} \lambda_{32} - \lambda_{42} \lambda_3 \lambda_{24} + \lambda_{23} \lambda_{34}}, \quad (20)$$

$$r_4 = \frac{\lambda_3 \lambda_2 \lambda_{14} + \lambda_{12} \lambda_{24} + \lambda_{23} \lambda_{14} \lambda_{32} + \lambda_{12} \lambda_{34}}{\lambda_4 \lambda_2 \lambda_3 - \lambda_{23} \lambda_{32} - \lambda_{42} \lambda_3 \lambda_{24} + \lambda_{23} \lambda_{34}},$$

$$r_5 = \frac{\lambda_1 [\lambda_4 \lambda_2 \lambda_3 + \lambda_{23} \lambda_{32} + \lambda_{42} \lambda_3 \lambda_{24} + \lambda_{23} \lambda_{34}] - \lambda_{41} [\lambda_3 \lambda_2 \lambda_{14} + \lambda_{12} \lambda_{24} + \lambda_{23} \lambda_{14} \lambda_{32} + \lambda_{12} \lambda_{34}]}{\lambda_{51} [\lambda_4 \lambda_2 \lambda_3 - \lambda_{23} \lambda_{32} - \lambda_{42} \lambda_3 \lambda_{24} + \lambda_{23} \lambda_{34}]}$$

После добијених количника вероватноћа (20), помоћу израза (17.5), уз примену израза (16), налазе се изрази одређивање вероватноћа стационарних стања:

$$p_1 = \frac{1}{1 + r_2 + r_3 + r_4 + r_5}, \quad (21.1)$$

$$p_2 = \frac{r_2}{1 + r_2 + r_3 + r_4 + r_5}, \quad (21.2)$$

$$p_3 = \frac{r_3}{1 + r_2 + r_3 + r_4 + r_5}, \quad (21.3)$$

$$p_4 = \frac{r_4}{1 + r_2 + r_3 + r_4 + r_5}, \quad (21.4)$$

$$p_5 = \frac{r_5}{1 + r_2 + r_3 + r_4 + r_5}. \quad (21.5)$$

Збир вероватноћа (21.1) – (21.5) потврђује да услов нормираности вероватноћа стања, односно ограничење (2), важи:

$$p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5 = 1$$

Систем нехомогених линеарних алгебарских једначина (17.1) – (17.5) по r_2, r_3, r_4 и r_5 , има пет једначина а четири непознате.

Дакле, систем има више једначина, него непознатих.

У општем случају такав систем није решив, али у неким специјалним случајевима систем је решив.

За овакве системе једначина пише се елиминанта или резултанта, која представља детерминанту реда једнаког броју једначина. Елементи последње колоне (ступца) образују се од слободних чланова (чланова са десне стране) система једначина.

Услов да овакав систем има решење јесте да је вредност елиминанте (резултанте) једнак нули.

Елиминанта (резултанта) система нехомогених линеарних алгебарских једначина (17.1) – (17.5), када је испуњен услов да систем има решење, гласи:

$$D_e = \begin{vmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \lambda_{41} & \lambda_5 & \lambda_1 \\ \lambda_2 & -\lambda_{32} & -\lambda_{42} & \mathbf{0} & \lambda_{12} \\ \lambda_{23} & -\lambda_3 & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \lambda_{24} & \lambda_{34} & -\lambda_4 & \mathbf{0} & -\lambda_{14} \\ \mathbf{1} & \mathbf{1} & \mathbf{1} & \mathbf{1} & \frac{\mathbf{1}}{p_1} - \mathbf{1} \end{vmatrix} = \mathbf{0}. \quad (22)$$

Развојем елиминанте (22) по елементима пете врсте (с десна на лево) добија се:

$$D_e = \left(\frac{\mathbf{1}}{p_1} - \mathbf{1} \right) \begin{vmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \lambda_{41} & \lambda_5 \\ \lambda_2 & -\lambda_{32} & -\lambda_{42} & \mathbf{0} \\ \lambda_{23} & -\lambda_3 & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \lambda_{24} & \lambda_{34} & -\lambda_4 & \mathbf{0} \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \lambda_{41} & \lambda_1 \\ \lambda_2 & -\lambda_{32} & -\lambda_{42} & \lambda_{12} \\ \lambda_{23} & -\lambda_3 & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \lambda_{24} & \lambda_{34} & -\lambda_4 & -\lambda_{14} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \lambda_5 & \lambda_1 \\ \lambda_2 & -\lambda_{32} & \mathbf{0} & \lambda_{12} \\ \lambda_{23} & -\lambda_3 & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \lambda_{24} & \lambda_{34} & \mathbf{0} & -\lambda_{14} \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} \mathbf{0} & \lambda_{41} & \lambda_5 & \lambda_1 \\ \lambda_2 & -\lambda_{12} & \mathbf{0} & \lambda_{12} \\ \lambda_{23} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \lambda_{24} & -\lambda_4 & \mathbf{0} & -\lambda_{14} \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} \mathbf{0} & \lambda_{41} & \lambda_5 & \lambda_1 \\ -\lambda_{32} & -\lambda_{42} & \mathbf{0} & \lambda_{12} \\ -\lambda_3 & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \lambda_{34} & -\lambda_4 & \mathbf{0} & -\lambda_{14} \end{vmatrix} = \mathbf{0}$$

Коришћењем правила о особинама детерминанти, које се односи на замену двеју колоне (стубаца) или двеју врста – што доводи до промене предзнака детерминанте и коришћењем уведених ознака за детерминанте: (18.1) – (18.5).

Горњи израз постаје:

$$D_e = \left(\frac{1}{p_1} - 1 \right) D_s - D_5 - D_4 - D_3 - D_2 = 0.$$

Деобом ове једначине са D_s добија се:

$$\frac{1}{p_1} - 1 - \frac{D_5}{D_s} - \frac{D_4}{D_s} - \frac{D_3}{D_s} - \frac{D_2}{D_s} = 0,$$

а употребом ознака за количнике вероватноћа (19) биће:

$$\frac{1}{p_1} - 1 - r_5 - r_4 - r_3 - r_2 = 0, \text{ одакле је:}$$

$$p_1 = \frac{1}{1 + r_2 + r_3 + r_4 + r_5}.$$

Овим је потврђено да је вредност елиминанте (22) посматраног система заиста једнака нули. Ова теорија изложена је, на пример, у књизи А. Рашковића³⁴.

2). Систем једначина стационарног стања при прелазу на други начин

Други могући начин прелазу у стање отказа: $O \rightarrow D \rightarrow F$ приказан је на слици 5.9.

За уведена четири могућа стања o, d, m, f опет ће да се дефинишу брзине прелазу између тих стања.

Одговарајуће брзине прелазу λ_{ij} дате су у доњој матрици прелазу у табели 5.9:

	o 1	d 2	di 3	m 4	f 5
o 1	—	$\lambda_{12} = \lambda_{od}$	—	$\lambda_{14} = \lambda_{om}$	$\lambda_{15} = \lambda_{of}$
d 2	—	—	—	$\lambda_{24} = \lambda_{dm}$	$\lambda_{25} = \lambda_{df}$
di 3	—	—	—	—	—
m 4	$\lambda_{41} = \lambda_{mo}$	$\lambda_{42} = \lambda_{md}$	—	—	$\lambda_{45} = \lambda_{mf}$
f 5	$\lambda_{51} = \lambda_{fo}$	$\lambda_{52} = \lambda_{fd}$	—	—	—

Табела 5.9: Матрица прелазу $O \rightarrow D \rightarrow F$ у могуће стање отказа

Све опште напомене су исте као у одељку *в*).

Према уведеном моделу четири стања, важи следећи услов стационарности, који описује систем једначина стационарног стања:

³⁴ Рашковић, А.: Основи матричног рачунања са применом на техничке проблеме, Научна књига, Београд, 1971.

$$p_j \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j, i \neq 3}}^5 \lambda_{ji} = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j, i \neq 3}}^5 p_i \lambda_{ij} ; j = 1, 2, 4, 5, \quad (23)$$

уз који иде **услов нормираности** вероватноћа стања, односно **ограничење** тих вероватноћа:

$$p_1 + p_2 + p_4 + p_5 = 1 \quad (24)$$

Према графику уведеног модела стања компонената, датог на слици 5.9, овде постоје само четири стања, јер чвор 3 није у функцији. Тако једначина у сажетом облику (23) даје четири једначине стационарног стања, које садрже вероватноће стања $p_1 + p_2 + p_4$ и p_5 , а које гласе:

- за чвор **1** графика

$$p_1(\lambda_{12} + \lambda_{14} + \lambda_{15}) = p_4\lambda_{41} + p_5\lambda_{51}, \quad (25.1)$$

- за чвор **2** графика

$$p_2(\lambda_{24} + \lambda_{25}) = p_1\lambda_{12} + p_4\lambda_{42} + p_5\lambda_{52}, \quad (25.2)$$

- за чвор **4** графика

$$p_4(\lambda_{41} + \lambda_{42} + \lambda_{45}) = p_1\lambda_{14} + p_2\lambda_{24}, \quad (25.3)$$

- за чвор **5** графика

$$p_5(\lambda_{51} + \lambda_{52}) = p_1\lambda_{15} + p_2\lambda_{25} + p_4\lambda_{45}, \quad (25.4)$$

Ради сажетости писања једначине (25.1) – (25.4) и овде се уводе, као код првог начина прелаза у стање отказа изразима (3), следеће помоћне величине:

$$\lambda_1 = \lambda_{12} + \lambda_{14} + \lambda_{15}$$

$$\lambda_2 = \lambda_{24} + \lambda_{25}$$

$$\lambda_4 = \lambda_{41} + \lambda_{42} + \lambda_{45},$$

$$\lambda_5 = \lambda_{51} + \lambda_{52}.$$

Напомена. Поређењем помоћних величина уведених у са помоћним величинама које су уведене у (26), види се да је њихов број различит, као и да се неке од њих узајамно разликују. Међутим, ове ознаке користе се из практичних разлога, јер то не може да доведе до забуне у анализи.

Применом помоћних величина (26) на једначине (25.1) – (25.4) добија се:

$$p_1\lambda_1 = p_4\lambda_{41} + p_5\lambda_{51}, \quad (27.1)$$

$$p_2\lambda_2 = p_1\lambda_{12} + p_4\lambda_{42} + p_5\lambda_{52}, \quad (27.2)$$

$$p_4\lambda_4 = p_1\lambda_{14} + p_2\lambda_{24}, \quad (27.3)$$

$$p_5\lambda_5 = p_1\lambda_{15} + p_2\lambda_{25} + p_4\lambda_{45}. \quad (27.4)$$

Систем једначина (27.1) – (27.4) еквивалентан је следећем систему хомогених једначина:

$$p_1 \lambda_{11} - p_4 \lambda_{41} - p_5 \lambda_{51} = 0, \quad (28.1)$$

$$p_1 \lambda_{12} - p_2 \lambda_{22} + p_4 \lambda_{42} + p_5 \lambda_{52} = 0, \quad (28.2)$$

$$p_1 \lambda_{14} + p_2 \lambda_{24} - p_4 \lambda_{44} = 0, \quad (28.3)$$

$$p_1 \lambda_{15} + p_2 \lambda_{25} + p_4 \lambda_{45} - p_5 \lambda_{55} = 0. \quad (28.4)$$

Систем једначина (28.1) – (28.4) као систем хомогених линеарних алгебарских једначина може да буде решив по непознатим: p_1, p_2, p_3, p_4 и p_5 , при поштовању услова нормираности, или ограничења (24). За примену у одржавању, као што је горе већ речено, важна су два случаја.

Први случај

Систем једначина (28.1) – (28.4) увек има **тривијална решења**:

$$p_1 = 0, p_2 = 0, p_3 = 0, p_4 = 0, p_5 = 0 \quad (29)$$

Овај случај отпада, јер нема смисла у одржавању, пошто вероватноће сва четири стационарна стања не могу, ни истовремено а ни појединачно, да буду једнаке нули.

Други случај

Да би систем (28.1) – (28.4) имао решења која су различита од нуле (нетривијална или неидентичка решења) треба детерминанта система да буде једнака нули:

$$\begin{vmatrix} \lambda_{11} & 0 & -\lambda_{41} & -\lambda_{51} \\ \lambda_{12} & -\lambda_{22} & \lambda_{42} & \lambda_{52} \\ \lambda_{14} & \lambda_{24} & -\lambda_{44} & 0 \\ \lambda_{15} & \lambda_{25} & \lambda_{45} & -\lambda_{55} \end{vmatrix} = 0. \quad (30)$$

Решења система (28.1) – (28.4), када важи услов (30), постоје, али нису потпуно одређена, као што је већ речено у одељку **в**).

Овде су написани кофактори елемената четврте врсте детерминанте (30) и они гласе:

$$K_{41} = -1^{4+1} \begin{vmatrix} 0 & -\lambda_{41} & -\lambda_{51} \\ -\lambda_{22} & \lambda_{42} & \lambda_{52} \\ \lambda_{24} & -\lambda_{44} & 0 \end{vmatrix}, \quad (31)$$

$$K_{42} = -1^{4+2} \begin{vmatrix} \lambda_{11} & -\lambda_{41} & -\lambda_{51} \\ \lambda_{12} & \lambda_{42} & \lambda_{52} \\ \lambda_{14} & -\lambda_{44} & 0 \end{vmatrix} \quad (32)$$

$$K_{43} = -1 \begin{vmatrix} \lambda_1 & \mathbf{0} & -\lambda_{51} \\ \lambda_{12} & -\lambda_2 & \lambda_{52} \\ \lambda_{14} & \lambda_{24} & \mathbf{0} \end{vmatrix}, \quad (33)$$

$$K_{44} = -1 \begin{vmatrix} \lambda_1 & \mathbf{0} & -\lambda_{41} \\ \lambda_{12} & -\lambda_2 & \lambda_{42} \\ \lambda_{14} & \lambda_{24} & -\lambda_4 \end{vmatrix}. \quad (34)$$

За решења p_1, p_2, p_4 и p_5 система хомогених линеарних једначина (28.1) – (28.4), важе следећи односи непознатих и кофактора елемената четврте врсте детерминанте (30):

$$\frac{p_1}{K_{41}} = \frac{p_2}{K_{42}} = \frac{p_4}{K_{43}} = \frac{p_5}{K_{44}}. \quad (35)$$

Ако се било која једначина избаци из система (28.1) – (28.4), а уместо ње се уведе, услов нормираности, односно ограничење вероватноћа стања (24), као и код првог начина прелаза у стање отказа, добиће се нехомогени систем линеарних алгебарских једначина.

Тако се, изостављањем једначине (28.4), добија следећи систем нехомогених линеарних алгебарских једначина:

$$p_1 \lambda_1 - p_4 \lambda_{41} - p_5 \lambda_{51} = \mathbf{0}, \quad (36.1)$$

$$p_1 \lambda_{12} - p_2 \lambda_2 + p_4 \lambda_{42} + p_5 \lambda_{52} = \mathbf{0}, \quad (36.2)$$

$$p_1 \lambda_{14} + p_2 \lambda_{24} - p_4 \lambda_4 = \mathbf{0}, \quad (36.3)$$

$$p_1 + p_2 + p_4 + p_5 = \mathbf{1}. \quad (36.4)$$

Детерминанта система једначина (36.1) – (36.4) је:

$$D_s = \begin{vmatrix} \lambda_1 & \mathbf{0} & -\lambda_{41} & -\lambda_{51} \\ \lambda_{12} & -\lambda_2 & \lambda_{42} & \lambda_{52} \\ \lambda_{14} & \lambda_{24} & -\lambda_4 & \mathbf{0} \\ \mathbf{1} & \mathbf{1} & \mathbf{1} & \mathbf{1} \end{vmatrix}. \quad (37)$$

Крамерово правило, које важи при $D_s \neq \mathbf{0}$, захтева за решавање система нехомогених једначина (36.1) – (36.4), да се напишу још четири детерминанте.

Ова процедура, за налажење вероватноћа стања p_1, p_2, p_4 и p_5 , скраћује се на следећи начин: како је увек $p_1 > \mathbf{0}$, уведе се количници вероватноћа стања: p_1, p_2, p_4 и p_5 .

Тако је:

$$r_2 = \frac{p_2}{p_1}, \quad r_4 = \frac{p_4}{p_1}, \quad r_5 = \frac{p_5}{p_1}. \quad (38)$$

Деобом система једначина (36.1) – (36.4) са вероватноћом p_1 добија се:

$$\lambda_1 - \frac{p_4}{p_1} \lambda_{41} - \frac{p_5}{p_1} \lambda_{51} = 0,$$

$$\lambda_{12} - \frac{p_2}{p_1} \lambda_2 + \frac{p_4}{p_1} \lambda_{42} + \frac{p_5}{p_1} \lambda_{52} = 0,$$

$$\lambda_{14} + \frac{p_2}{p_1} \lambda_{24} - \frac{p_4}{p_1} \lambda_4 = 0,$$

$$1 + \frac{p_2}{p_1} + \frac{p_4}{p_1} + \frac{p_5}{p_1} = \frac{1}{p_1}.$$

Коришћењем количника вероватноћа (38) горњи систем једначина постаје:

$$r_4 \lambda_{41} + r_5 \lambda_{51} = \lambda_1, \quad (39.1)$$

$$-r_2 \lambda_2 + r_4 \lambda_{42} + r_5 \lambda_{52} = -\lambda_{12}, \quad (39.2)$$

$$r_2 \lambda_{24} - r_4 \lambda_4 = -\lambda_{14}, \quad (39.3)$$

$$r_2 + r_4 + r_5 = \frac{1}{p_1} - 1. \quad (39.4)$$

Систем нехомогених линеарних алгебарских једначина (39.1) – (39.3), служи за налажење количника вероватноћа r_2 , r_4 и r_5 .

Једначина (39.4) служи за одређивање вероватноћа стационарних стања.

Тако је решавање система једначина (36.1) – (36.4) поједностављено.

Ово је идентично са поступком који је примењен на решавање система једначина (17.1) – (17.5).

Овом процедуром, основи проблем (налажење вероватноћа стања p_1 , p_2 , p_4 и p_5) сведен је на решавање система једначина (39.1) – (39.3).

Тако детерминанта тог система:

$$D_s = \begin{vmatrix} 0 & \lambda_{41} & \lambda_{51} \\ -\lambda_2 & \lambda_{42} & \lambda_{52} \\ \lambda_{24} & \lambda_4 & 0 \end{vmatrix},$$

после развоја, има вредност:

$$D_s = \lambda_2 \lambda_4 \lambda_{51} - \lambda_{24} \lambda_{42} \lambda_{51} + \lambda_{24} \lambda_{41} \lambda_{52}. \quad (40.1)$$

Детерминанта непознате r_2

$$D_2 = \begin{vmatrix} \lambda_1 & \lambda_{41} & \lambda_{51} \\ -\lambda_{12} & \lambda_{42} & \lambda_{52} \\ -\lambda_{14} & -\lambda_4 & 0 \end{vmatrix}$$

има вредност:

$$D_2 = \lambda_4 \lambda_{12} \lambda_{51} + \lambda_1 \lambda_{52} + \lambda_{14} \lambda_{42} \lambda_{51} - \lambda_{41} \lambda_{52} . \quad (40.2)$$

Детерминанта непознате r_4 је:

$$D_4 = \begin{vmatrix} \mathbf{0} & \lambda_1 & \lambda_{51} \\ -\lambda_2 & -\lambda_{12} & \lambda_{52} \\ \lambda_{24} & -\lambda_{14} & \mathbf{0} \end{vmatrix}$$

$$D_4 = \lambda_1 \lambda_{24} \lambda_{52} + \lambda_{12} \lambda_{24} \lambda_{51} + \lambda_2 \lambda_{14} \lambda_{51} . \quad (40.3)$$

Детерминанта непознате r_5 је:

$$D_5 = \begin{vmatrix} \mathbf{0} & \lambda_{41} & \lambda_1 \\ -\lambda_2 & \lambda_{42} & -\lambda_{12} \\ \lambda_{24} & -\lambda_4 & -\lambda_{14} \end{vmatrix}$$

$$D_5 = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_4 - \lambda_1 \lambda_{24} \lambda_{42} - \lambda_{12} \lambda_{24} \lambda_{41} - \lambda_2 \lambda_{14} \lambda_{41} . \quad (40.4)$$

Крамерово правило даје количнике вероватноћа:

$$r_2 = \frac{D_2}{D_s}, \quad r_4 = \frac{D_4}{D_s}, \quad r_5 = \frac{D_5}{D_s} . \quad (41)$$

Сменом величина (40.1) – (40.4) у изразе (41) налазе се количници вероватноћа:

$$r_2 = \frac{\lambda_4 \lambda_{12} \lambda_{51} + \lambda_1 \lambda_{52} + \lambda_{14} \lambda_{42} \lambda_{51} - \lambda_{41} \lambda_{52}}{\lambda_2 \lambda_4 \lambda_{51} - \lambda_{24} \lambda_{42} \lambda_{51} + \lambda_{24} \lambda_{41} \lambda_{52}} ,$$

$$r_4 = \frac{\lambda_1 \lambda_{24} \lambda_{52} + \lambda_{12} \lambda_{24} \lambda_{51} + \lambda_2 \lambda_{14} \lambda_{51}}{\lambda_2 \lambda_4 \lambda_{51} - \lambda_{24} \lambda_{42} \lambda_{51} + \lambda_{24} \lambda_{41} \lambda_{52}} , \quad (42)$$

$$r_5 = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_4 - \lambda_1 \lambda_{24} \lambda_{42} - \lambda_{12} \lambda_{24} \lambda_{41} - \lambda_2 \lambda_{14} \lambda_{41}}{\lambda_2 \lambda_4 \lambda_{51} - \lambda_{24} \lambda_{42} \lambda_{51} + \lambda_{24} \lambda_{41} \lambda_{52}} .$$

Изрази (39.4) и (38) дају вероватноће стационарних стања за прелаз на други начин:

$$p_1 = \frac{1}{1 + r_2 + r_4 + r_5} , \quad (43.1)$$

$$p_2 = \frac{r_2}{1 + r_2 + r_4 + r_5} , \quad (43.2)$$

$$p_4 = \frac{r_4}{1 + r_2 + r_4 + r_5} , \quad (43.3)$$

$$p_5 = \frac{r_5}{1 + r_2 + r_4 + r_5} . \quad (43.4)$$

Збир вероватноћа (43.1) – (43.4) је $p_1 + p_2 + p_4 + p_5 = 1$, чиме је потврђено да услов нормираности вероватноћа стања, тј. ограничење (24), важи.

Систем нехомогених линеарних једначина (39.1) – (39.4) по непознатим по r_2, r_4, r_5 има четири једначине а три непознате. Као и код прелаза на први начин, тако и у овом случају при прелазу на други начин, јавља се више једначина (четири) него што има непознатих (три).

Ово разматрање је идентично са разматрањем које се односи на разматрање везано за прелаз на први начин.

Дакле, елиминанта система нехомогених линеарних једначина (39.1) – (39.4), када је испуњен услов да овај нехомогени систем има решење, гласи:

$$D_e = \begin{vmatrix} 0 & \lambda_{41} & \lambda_5 & \lambda_1 \\ -\lambda_2 & \lambda_{42} & \lambda_{52} & -\lambda_{12} \\ \lambda_{24} & -\lambda_4 & 0 & -\lambda_{14} \\ 1 & 1 & 1 & \frac{1}{p_1} - 1 \end{vmatrix} = 0. \quad (44)$$

Идентичном процедуром као код прелаза на први начин, добија се да је:

$$D_e = \left(\frac{1}{p_1} - 1 \right) D_s - D_5 - D_4 - D_2 = 0,$$

одакле се, применом израза (39.4), налази вероватноћа (43.1) стационарног стања $\mathbf{o} = \mathbf{1}$:

$$p_1 = \frac{1}{1 + r_2 + r_4 + r_5}.$$

Дакле, вредност елиминанте (44) посматраног система заиста је једнака нули.

6. ЕКСПЛОАТАЦИОНА ИСТРАЖИВАЊА

Експлоатациона истраживања су извршена кроз имплементацију развијеног модела одржавања на бази ризика у виду алгоритма.

Имплементација развијеног математичког модела пет могућих стања и четири могућа стања у којима се парне турбине могу налазити.

Такође, експлоатациона истраживања су извршена и кроз анализу примене Делфи методе, анализу метода логичке анализе грешака или метода стабла грешака и стабла догађаја и анализу примене метода матрица са проценом ризика.

6.1 ИМПЛЕМЕНТАЦИЈА МОДЕЛА ОДРЖАВАЊА НА БАЗИ РИЗИКА

Имплементацијом модела одржавања на бази ризика у виду алгоритма потребно је у току експлоатације парне турбине пратити одређене дијагностичке параметре који, ако нису у нормалним вредностима, могу изазвати застоје или отказе парних турбина.

Спровођењем овог модела вршено у периоду од јануара месеца 2016. године до краја марта месеца 2018. године

Применом развијеног модела у виду алгоритма може да се смањи ризик и повећа поузданост. Експлоатациона праћена изведена су на парним турбинама РТ-135/165-130/15 и Т-110/120-130-4 у Термоелектрани-топлани "Нови Сад". На наредним сликама дати су резултати дијагностичких контрола брзина вибрација на клизним лежиштима, добијени применом развијеног модела одржавања на бази ризика.

У току рада парних турбина у *ТЕ-ТО "Нови Сад"* праћење вибрација изводи се са по два уграђана електродинамичка сензора брзина вибрација на сваком лежишту и даље се електронским путем преко претварача, као и комплетом давача, предпостављача и пратећом опремом читавају вредности у командној сали помоћу развијеног системског софтвера SCAD, уграђеног у систем надзора рада *ТЕ-ТО*.³⁵ Праћење се изводи континуално током 24 [h] дневно уз обезбеђену звучну сигнализацију. Општа оцена динамичког стања клизних лежишта парне турбине дата је у табели 6.1. и она интегрише нормативе оцене стања према *ISO 10816 - 2:2001 (E)*.

Границе зона оцењивања вибрација клизних лежишта парних турбина према препорукама стандарда *ISO 10816 - 2 : 2001 (E)*.³⁶ У највише случајева вредности дате у табели су у складу са обезбеђењем задовољавајућег рада машина. Међутим, у извесним случајевима, специфичне карактеристике неког посебног типа машине могу захтевати примену другачијих вредности граница зона.

³⁵ Институт „Михајло Пупин“, ИМП „Аутоматика“ доо, Београд

³⁶ Стандард *ISO 10816 - 2 : 2001 (E)*

Граница зоне	Брзина обротаја вратила [o/min]	
	1500 или 1800	3000 или 3600
	Брзина вибрација (ефективна вредност) mm/s	
A/B	2,8	3,8
B/C	5,3	7,5
C/D	8,5	11,8

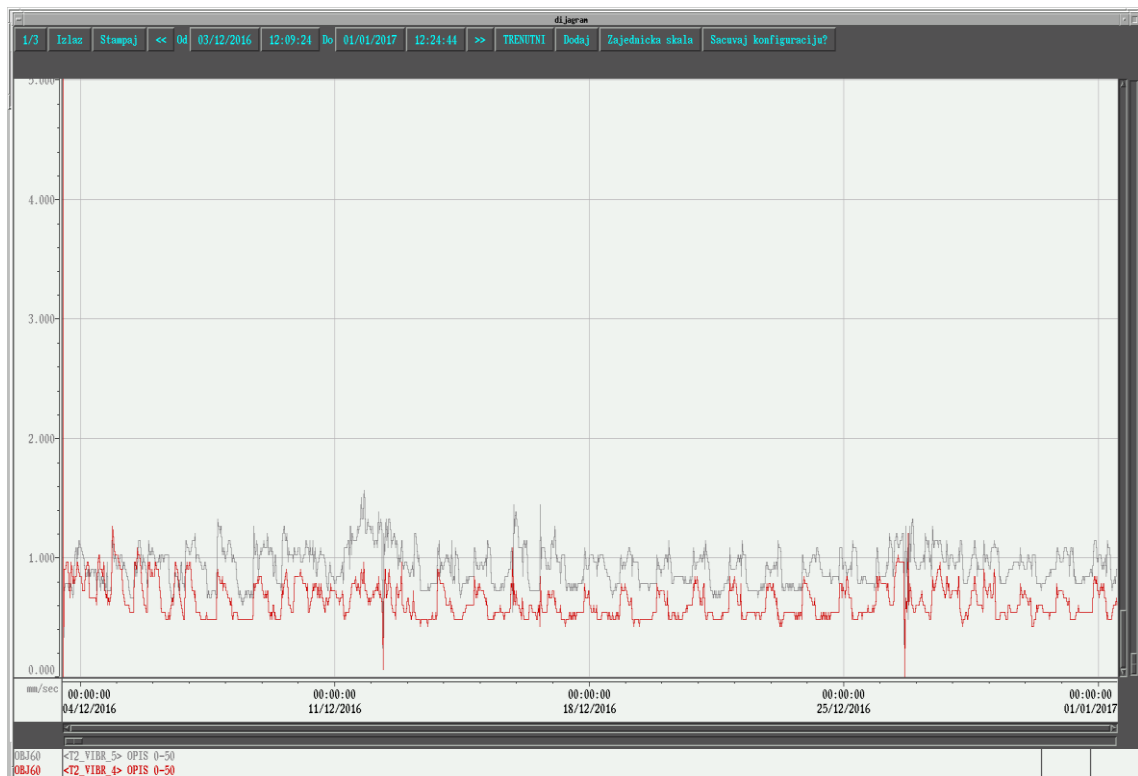
Зоне оцењивања
Зона А: Вибрације новоуведених машина би нормално ушле у ову зону.
Зона В: Машине са вибрацијама унутар ове зоне сматрају се прихватљивим за неограничен дугорочан рад.
Зона С: Машине са вибрацијама унутар ове зоне нормално се сматрају незадовољавајућим за дужи непрекидан рад. Ипак, оне се и тада могу ограничено време држати у раду, док се не појави погодна прилика за извођење корективне акције.
Зона D: За вредности вибрација унутар ове зоне нормално се сматра да су довољне јачине да могу проузроковати оштећење машине.

Табела 6.1.: Препоручене вредности граница зона брзине вибрација кућишта/постоља лежишта парних турбина и генератора³⁶

На сликама 6.1 – 6.15 дат је графички приказ континуалних експлоатационих праћења брзина вибрација на клизним лежиштима парне турбине број 2 - T-110/120-130-4 помоћу SCAD система



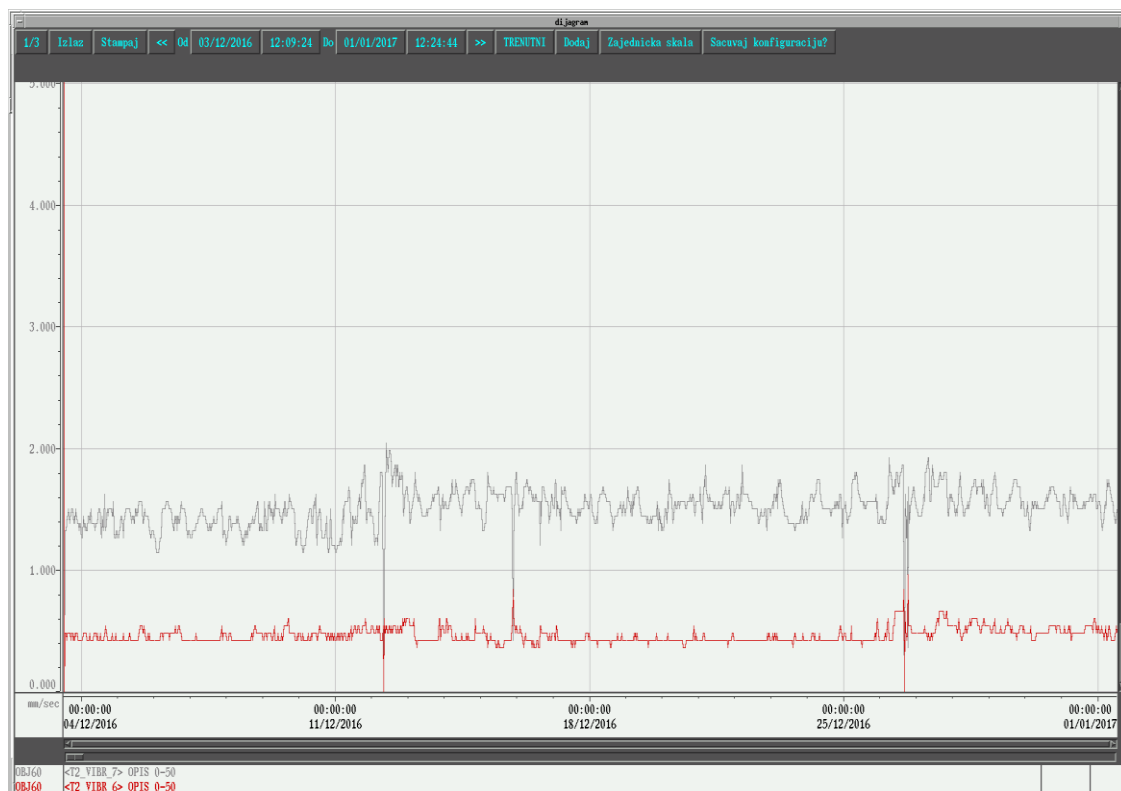
Слика 6.1: Експлоатационо праћење брзина вибрација за период од 4.12.2016 до 1.1. 2017. у току 24 часа за клизно лежиште број 1³⁷



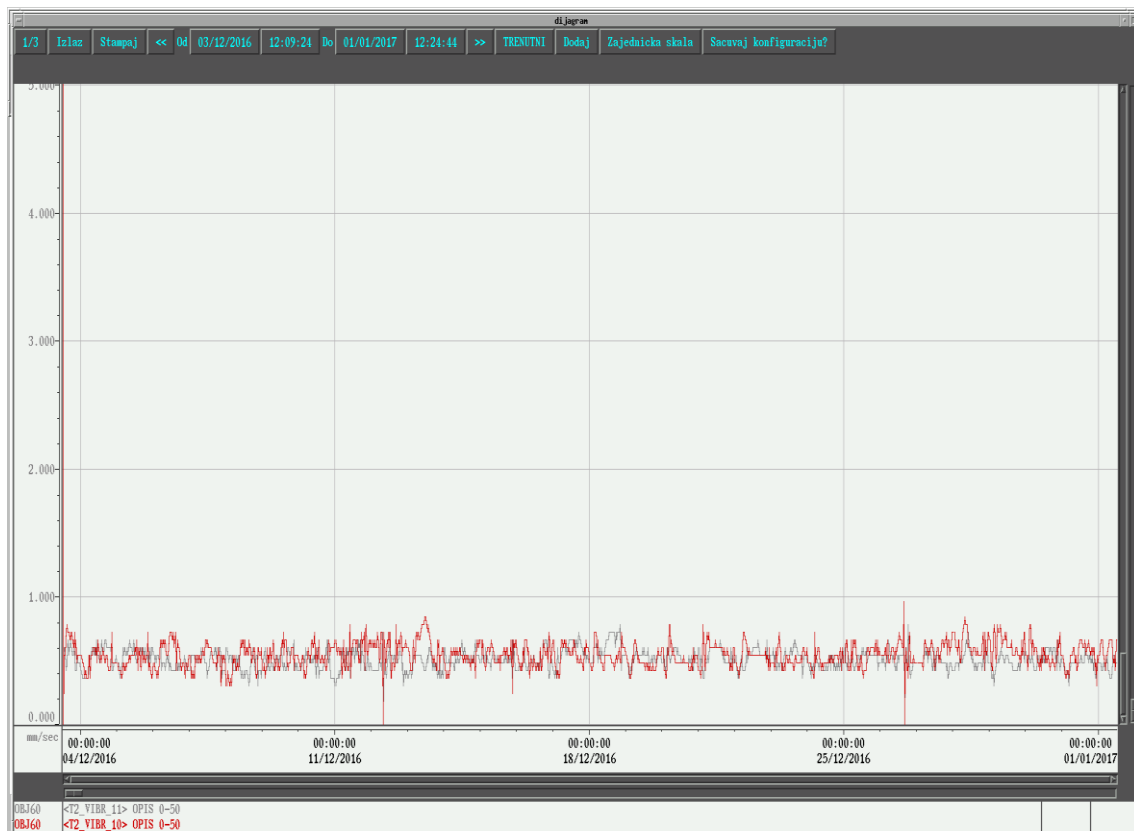
Слика 6.2: Експлоатационо праћење брзина вибрација за период од 4.12.2016 до 1.1. 2017. у току 24 часа за клизно лежиште број 2³⁷



Слика 6.3: Експлоатационо праћење брзина вибрација за период од 4.12.2016 до 1.1. 2017. у току 24 часа за клизно лежиште број 3³⁷



Слика 6.4: Експлоатационо праћење брзина вибрација за период од 4.12.2016 до 1.1. 2017. у току 24 часа за клизно лежиште број 4³⁷



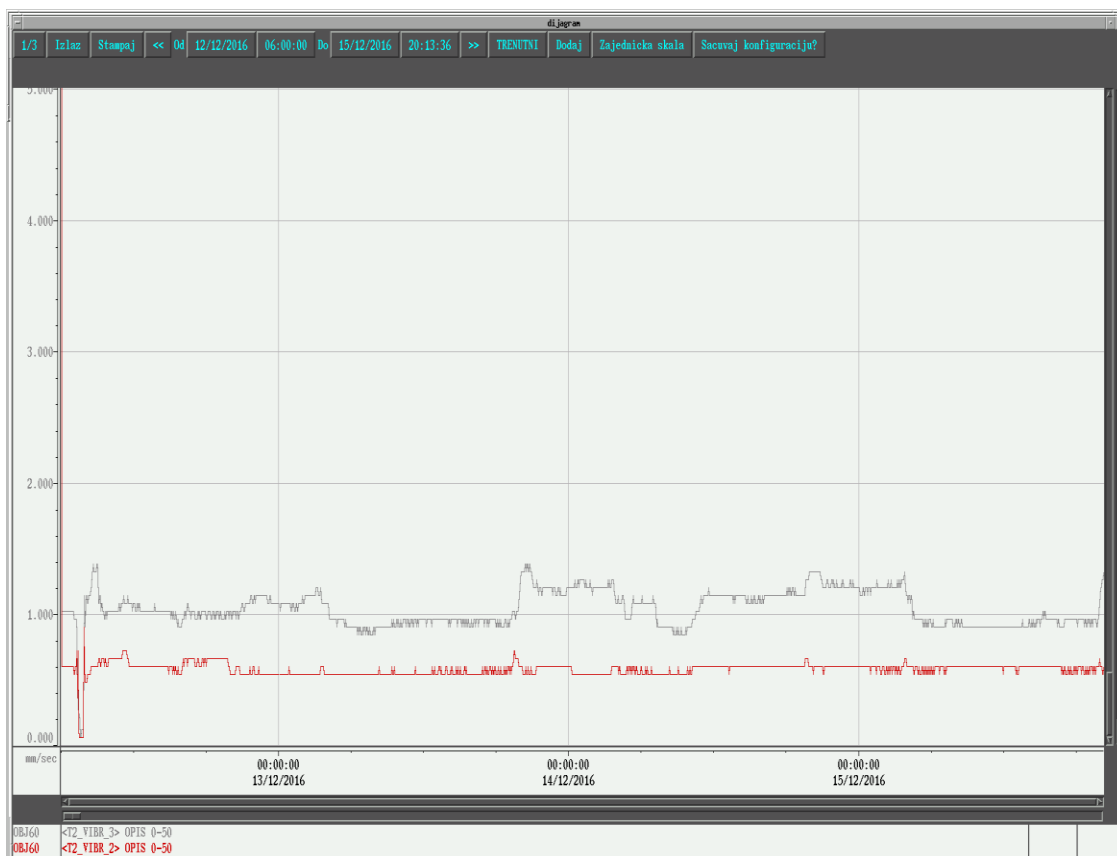
Слика 6.5: Експлоатационо праћење брзина вибрација за период од 4.12.2016 до 1.1. 2017. у току 24 часа за клизно лежиште број 5³⁷



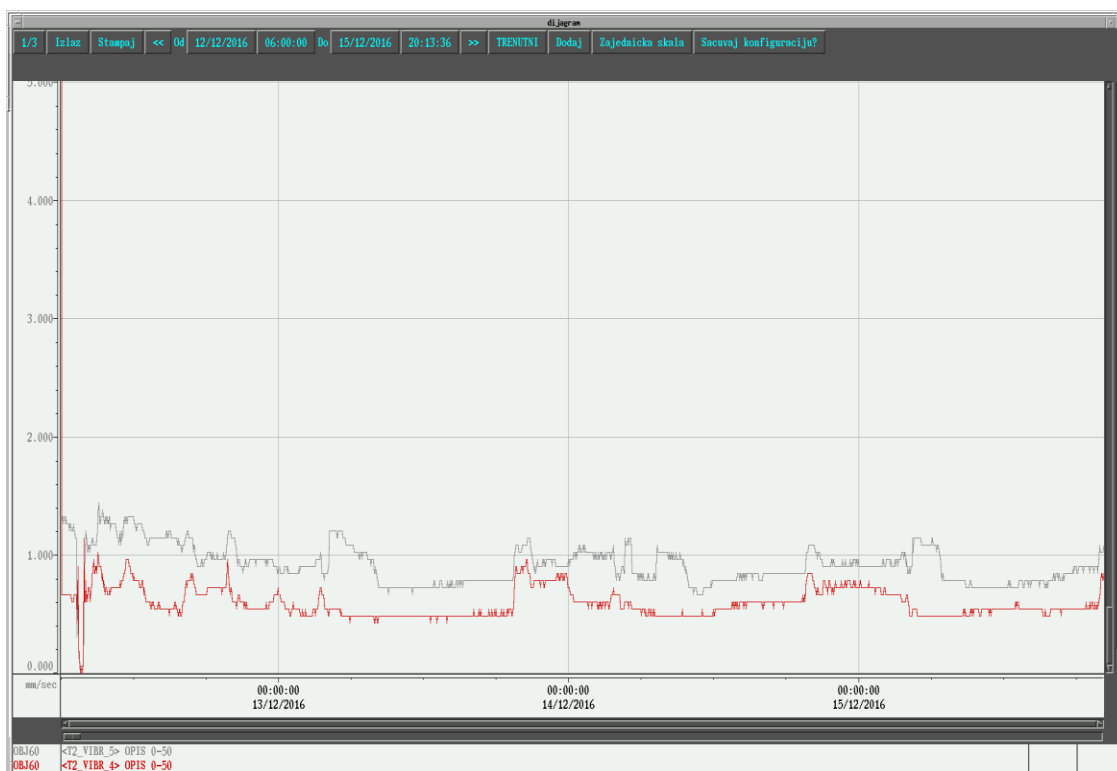
Слика 6.6: Експлоатационо праћење брзина вибрација за период од 4.12.2016 до 1.1. 2017. у току 24 часа за клизно лежиште број 6³⁷



Слика 6.7: Експлоатационо праћење брзина вибрација за период од 4.12.2016 до 1.1. 2017. у току 24 часа за клизно лежиште број 7³⁷



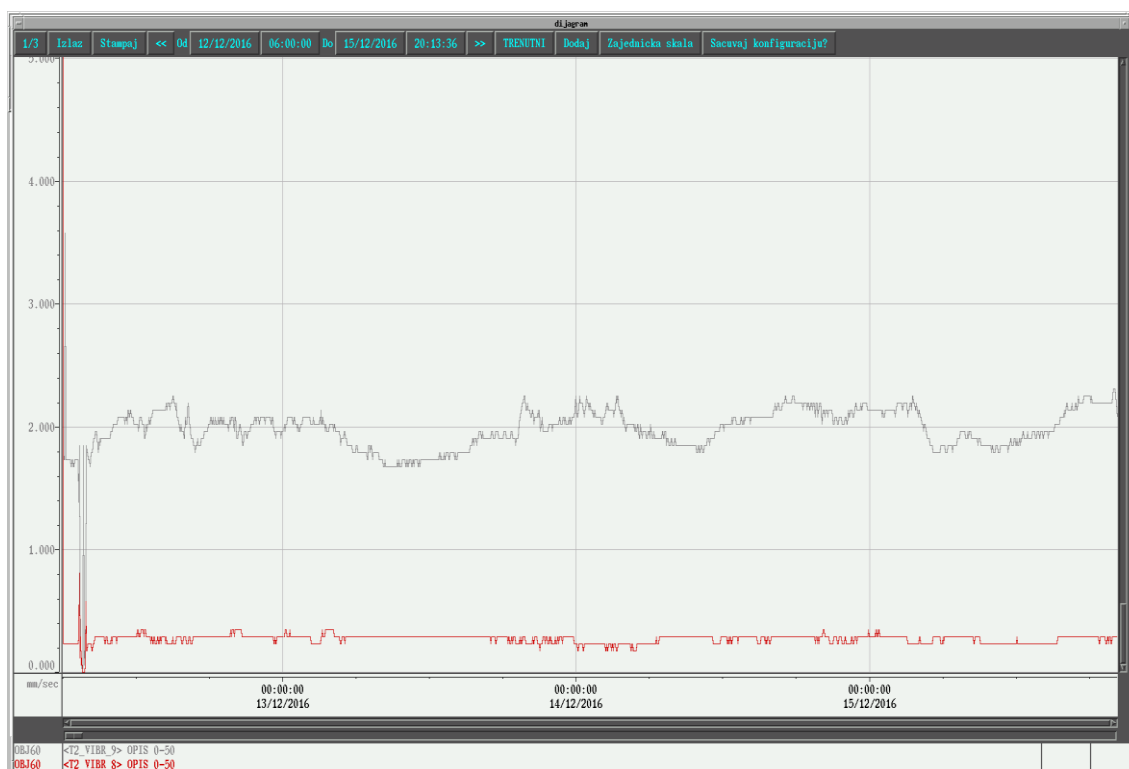
Слика 6.8: Експлоатационо праћење брзина вибрација за период од 13.12. до 15.12.2016. у току 24 часа за клизно лежиште број 1³⁷



Слика 6.9: Експлоатационо праћење брзина вибрација за период од 13.12. до 15.12.2016. у току 24 часа за клизно лежиште број 2³⁷



Слика 6.10: Експлоатационо праћење брзина вибрација за период од 13.12. до 15.12.2016. у току 24 часа за клизно лежиште број 3³⁷



Слика 6.11: Експлоатационо праћење брзина вибрација за период од 13.12. до 15.12.2016. у току 24 часа за клизно лежиште број 4³⁷



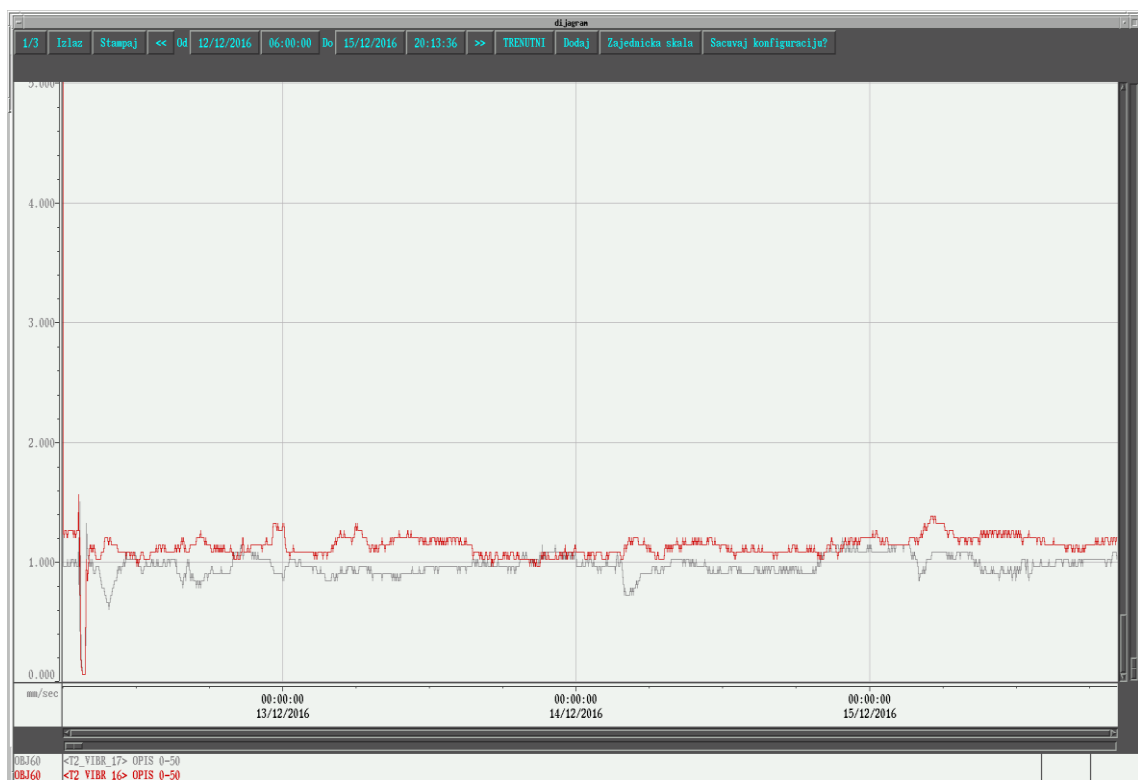
Слика 6.12: Експлоатационо праћење брзина вибрација за период од 13.12. до 15.12.2016. у току 24 часа за клизно лежиште број 5³⁷



Слика 6.13: Експлоатационо праћење брзина вибрација за период од 13.12. до 15.12.2016. у току 24 часа за клизно лежиште број 6³⁷



Слика 6.14: Експлоатационо праћење брзина вибрација за период од 13.12. до 15.12.2016. у току 24 часа за клизно лежиште број 7³⁷



Слика 6.15: Експлоатационо праћење брзина вибрација за период од 13.12. до 15.12.2016. у току 24 часа за клизно лежиште број 8³⁷

На слици 6.16 дат је број обртаја ротора турбине.³⁷



Слика 6.16: Експлоатационо праћење броја обртаја ротора за период од 13.12. до 15.12. 2016. у току 24 часа³⁷

1. Коментар резултата експлоатационих праћења брзина вибрација клизних лежишта парне турбине T-110/120-130-4

На сликама 6.1 до 6.7 дат је графички приказ експлоатационих праћења брзина вибрација клизних лежишта исте парне турбине број 2 у периоду од 04.12.2016. до 01.01.2017. године по x - и y -оси.

На сликама 6.8 до 6.15 дат је графички приказ експлоатационих праћења брзина вибрација клизних лежишта парне турбине број 2 - PT-110/120-130-4 у периоду од 13.12. 2016. године до 15.12.2016. године у току 24 часа по x - и y -оси.

Црвене криве на дијаграмима означавају мерења по x -оси, а сива по y -оси. На кривама се може прочитати да вредности брзина вибрација по x - и y -оси, а према препорукама стандарда ISO 10816-2:2001 (E) (табела 6.1) се налазе у зони (A), тј. да не прелазе нигде 3 [mm/s]. Ове вибрације одговарају новоуведеним машинама.

Број обртања ротора приказан је на слици 6.16 и види се да је био константан, односно да је износио 3000 [o/min].

Због повећаних вибрација (ван дозвољених граница) јавља се ризик и могуће хаварије турбоагрегата, застој у производњи, пуцање цевног система, додатни инвестициони трошкови и опасност по безбедност радног особља. Праћењем стања вибрација могуће је на време предупредити горе наведене ризике.

³⁷ ТЕ-ТО “Нови Сад“, Нови Сад

У случају да се почну повећавати вибрације, оператер снижавањем оптерећења турбогенератора може исте довести у опсег дозвољених граница.

На наредним сликама су такође дати резултати дијагностичких контрола експлоатационих мерења температуре метала лежишта, броја обртаја ротора, температуре уља иза и испред хладњака, притиска расхладне воде пред уљним хладњацима, притиска уља за регулацију и подмазивање парне турбине у ТЕ-ТО "Нови Сад"³⁷ применом развијеног модела одржавања на бази ризика.

Температура метала лежишта контролише се помоћу термометара, који су уграђени на самим клизним лежиштима. На лежишта се уграђују по два термометра ради безбедности у случају да један откаже. Термометри су повезани са командном салом где се читава температура помоћу развијеног софтвера континуално 24 [h] дневно.

Осим температуре метала лежишта мери се температура уља која је прошла кроз лежиште испред резервоара, температура уља на улазу у лежиште, температура аксијалних сегмената лежишта и температуре воде која служи за хлађење уља.

Подмазивање лежишта уљем врши се уз помоћ циркулационог уљног система.

У пракси се у стационарним турбинама температура уља на излазу из лежишта креће између 60 и 70 [$^{\circ}\text{C}$].

Према мишљењу Стонија (*Stoney*) препоручљиво је да се не прелази граница од 71 [$^{\circ}\text{C}$], пошто је на вишој температури могућа оксидација уља. Неки аутори препоручују и већу граничну вредност температуре уља.³⁸

Искусствено се може утврдити да се температура уља при проласку кроз лежишта повишава за око 10 до 15 [$^{\circ}\text{C}$]. При томе температура на улазу лежишта је око 45 [$^{\circ}\text{C}$], а на излазу 50 до 55 [$^{\circ}\text{C}$].

Температура белог метала у том случају у лежиштима одржава се у дозвољеним границама, а као максимална вредност не сме прећи 80 [$^{\circ}\text{C}$].

Произвођачи парних турбина уграђују сигнал упозорења на 75 [$^{\circ}\text{C}$], док на 80 [$^{\circ}\text{C}$] аутоматски се искључи парна турбина. Међутим, није толико важно да се одржи загревање од 10 до 15 [$^{\circ}\text{C}$] уља већ и то, да температурска разлика између улазне и излазне температуре уља буде константна током времена. Искуства из праксе показују да је најбоља температура уља на улазу у лежиште од 40 до 45 [$^{\circ}\text{C}$] да би се добио правилан уљни клин.

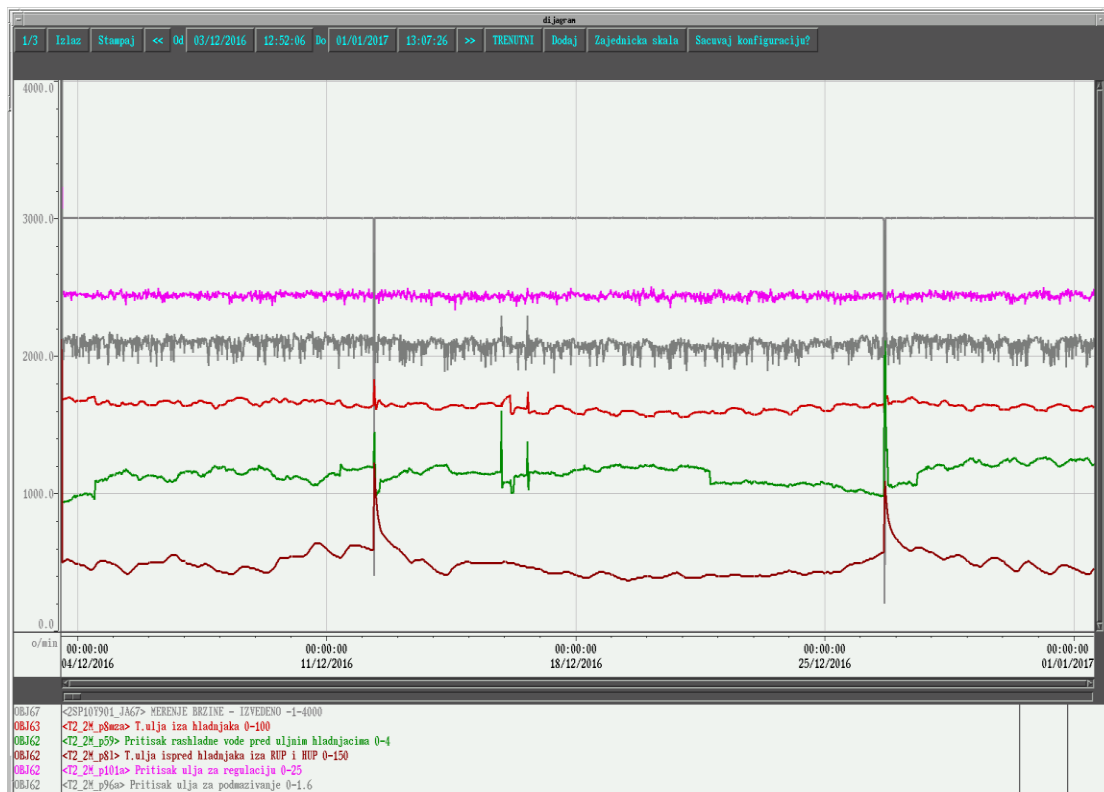
Температура воде за хлађење уља препоручује се као номинална 20 [$^{\circ}\text{C}$], зависно од спољне температуре ваздуха и може бити и до 30 [$^{\circ}\text{C}$].³⁹

Клизна лежишта се морају снабдети са довољном количином турбинског уља. Отуда се повремено морају вршити мерења на уљном систему у циљу провере рада лежишта.

На слици 6.17 дато је експлоатационо праћење температуре уља иза хладњака, притиска расхладне воде пред уљним хладњацима 0-4, температуре уља испред хладњака уља за подмазивање лежишта (0-150), притисак уља за регулацију 0-25 и притисак уља за подмазивање 0-1,6.

³⁸ Zictemann, С., Прорачун и конструкција парних турбина, Научна књига, Београд, 1951.

³⁹ Адамовић, Ж., Тасић, И., Станковић, Н., Ашоња, А.: Одржавање клизних лежишта, Дуга књига, Сремски Карловци, 2011.



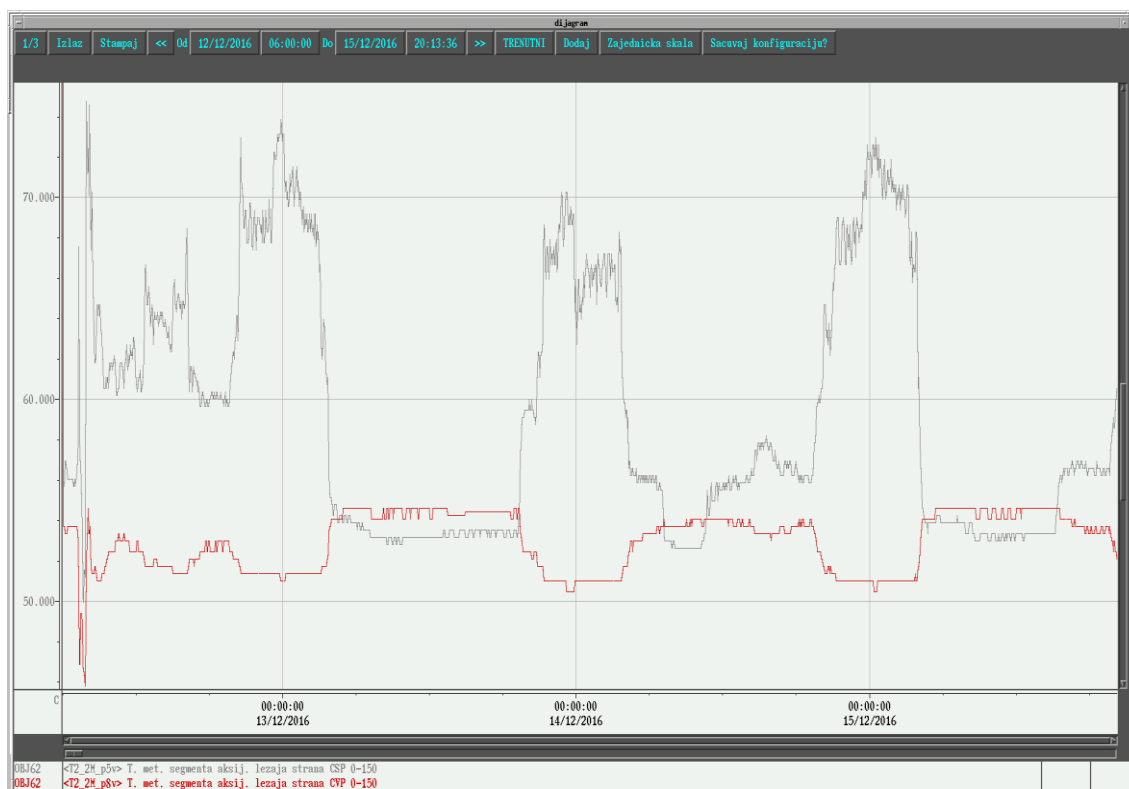
Слика 6.17: Експлоатационо праћење броја обртаја ротора, температуре уља иза хладњака, притиска расхладне воде пред уљним хладњацима 0-4, температуре уља испред хладњака иза RUP и HUP 0-150, притисак уља за регулацију 0-25 и притисак уља за подмазивање 0-1,6³⁷



Слика 6.18: Експлоатационо праћење температура метала сегмената 1 (доњи) аксијалног лежишта са стране CSP (0-150) (сива боја) и сегмената аксијалног лежишта са стране CVP (0-150) (црвена боја) за период од 13.12. 2016. до 15.12. 2016. у току 24 часа³⁷



Слика 6.19: Експлоатационо праћење температура метала сегмената 2 (доњи) аксијалног лежишта са стране CSP (0-150) (сива боја) и сегмената аксијалног лежишта са стране CVP (0-150) (црвена боја) за период од 13.12. 2016. до 15.12. 2016. у току 24 часа³⁷



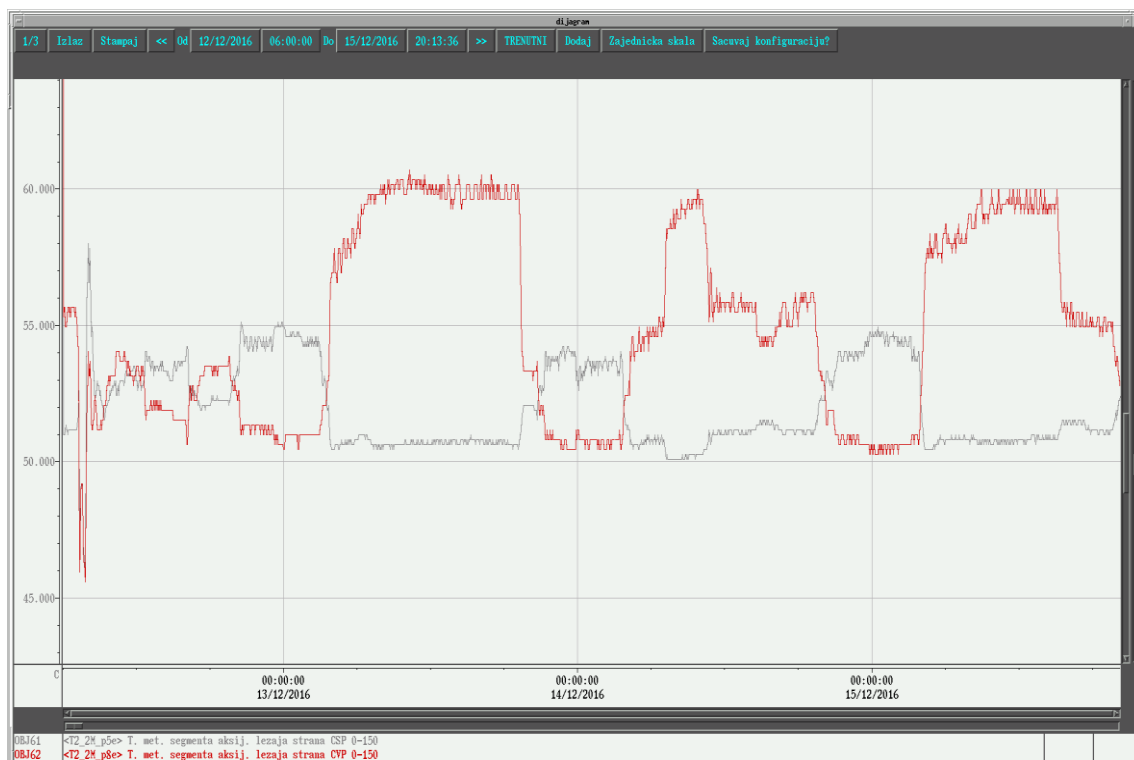
Слика 6.20: Експлоатационо праћење температура метала сегмената 3 (доњи) аксијалног лежишта са стране CSP (0-150) (сива боја) и сегмената аксијалног лежишта са стране CVP (0-150) (црвена боја) за период од 13.12. 2016. до 15.12. 2016. у току 24 часа³⁷



Слика 6.21: Експлоатационо праћење температура метала сегмента 4 (доњи) аксијалног лежишта са стране CSP (0-150) и сегмента аксијалног лежишта са стране CVP (0-150) за период од 13.12. 2016. до 15.12. 2016. у току 24 часа³⁷



Слика 6.22: Експлоатационо праћење температура метала сегмента 5 (доњи) аксијалног лежишта са стране CSP (0-150) и сегмента аксијалног лежишта са стране CVP (0-150) за период од 13.12. 2016. до 15.12. 2016. у току 24 часа³⁷



Слика 6.23: Експлоатационо праћење температура метала сегмената 6 (горњи) аксијалног лежишта са стране CSP (0-150) и сегмената аксијалног лежишта са стране CVP (0-150) за период од 13.12. 2016. до 15.12. 2016. у току 24 часа³⁷

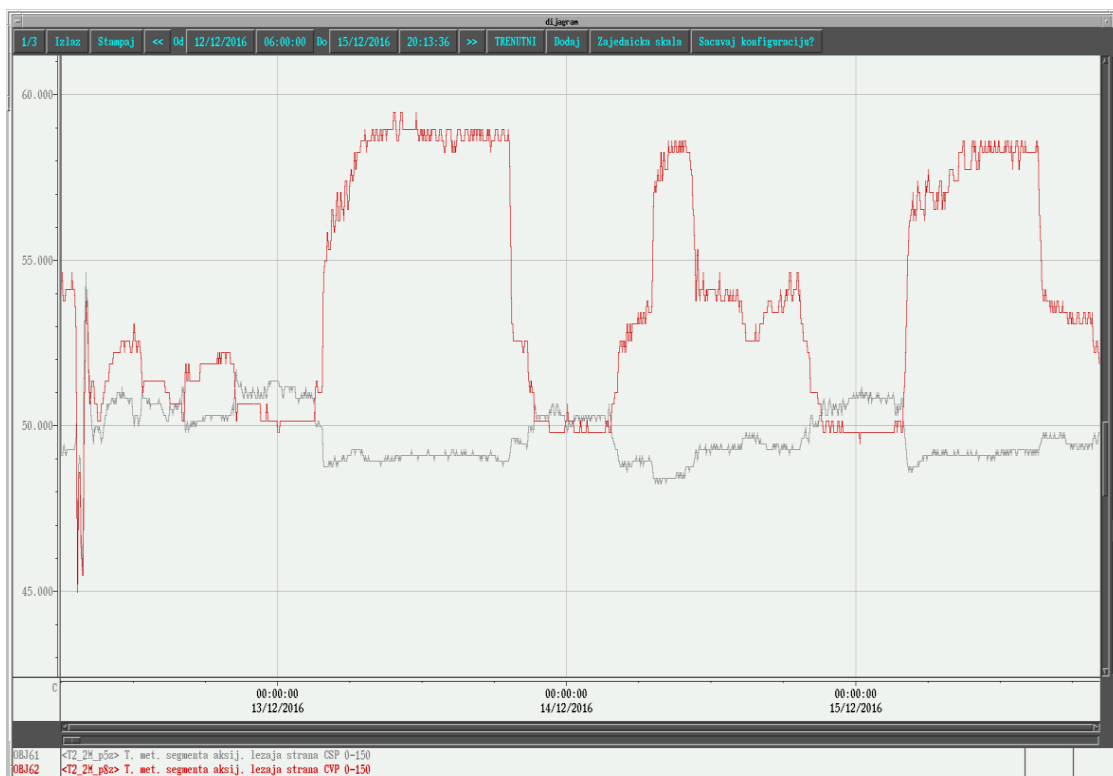


Слика 6.24: Експлоатационо праћење температура метала сегмената 7 (горњи) аксијалног лежишта са стране CSP (0-150) и сегмената аксијалног лежишта са стране CVP (0-150) за период од 13.12. 2016. до 15.12. 2016. у току 24 часа³⁷

2. Коментар експлоатационих мерења температура метала лежишта, броја обртаја ротора, температура уља иза и испред хладњака, притисак расхладне воде пред уљним хладњацима, притисак уља за регулацију и подмазивање у ТЕ-ТО „Нови Сад“ за парну турбину број 2 Т-110/120-130-4³⁷

На слици 6.17 графички су приказана експлоатациона праћења у периоду од 04.12.2016. до 01.01.2017. године за парну турбину број 2 и то: број обртаја ротора означен на кривој сивом бојом (који је износио 3000 [o/min], затим температура уља иза хладњака, притисак расхладне воде испред уљних хладњака, температура испред хладњака иза РУП (резервне уљне пумпе) и ХУП (хаваријске уљне пумпе), температура уља за подмазивање, притисак уља за регулацију и притисак уља за подмазивање. Сва мерења су била у дозвољеним границама и није било потребно предузимати никакве активности, што се може закључити са дијаграма да није било прекида у експлоатацији парне турбине.

На сликама 6.18 до 6.27 приказана су графичка мерења десет сегмената аксијалог лежишта у периоду од 13.12.2016. до 15.12.2016. године у току двадесет четири часа непрекидно.

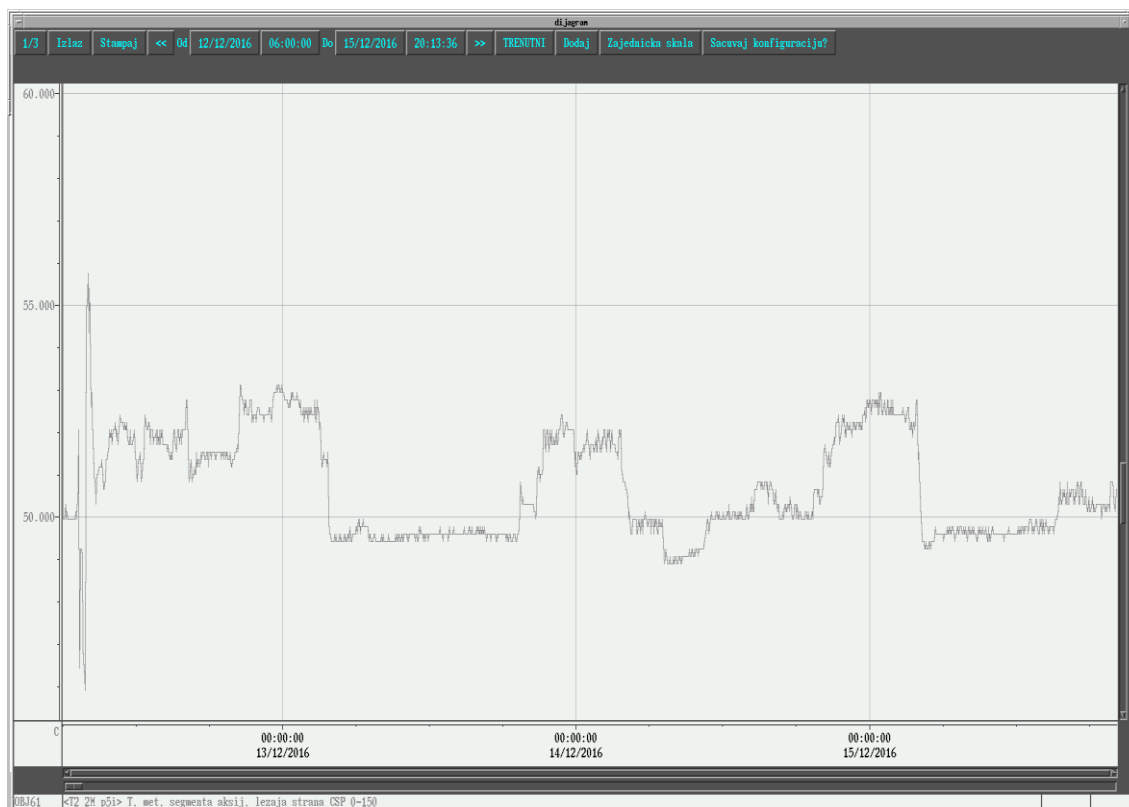


Слика 6.25: Експлоатационо праћење температура метала сегмената 8 (горњи) аксијалног лежишта са стране CSP (0-150) и сегмената аксијалног лежишта са стране CVP (0-150) за период од 13.12. 2016. до 15.12. 2016. у току 24 часа³⁷

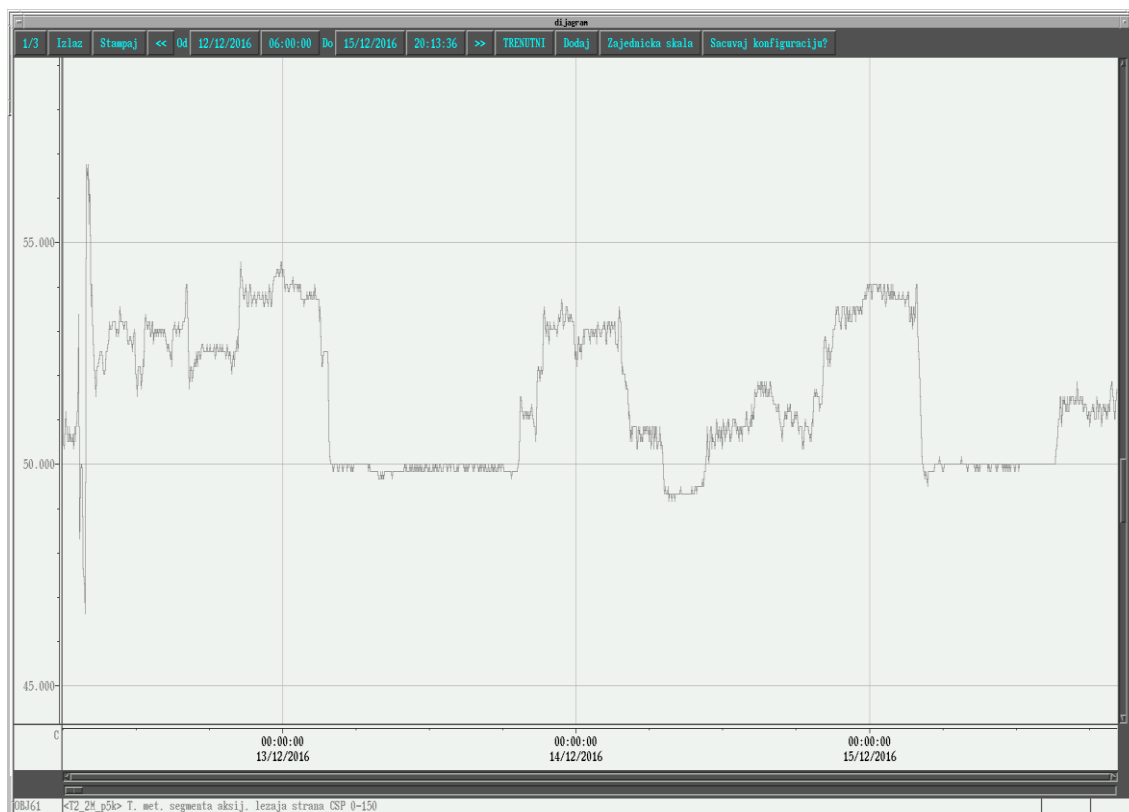
Остали дани нису приказани због тога што су вредности мерења биле у дозвољеним границама.

Криве означене сивом бојом на дијаграмима означавају температуре метала сегмената аксијалног лежишта са стране CSP (са стране цилиндра средњег притиска).

Кривама означеним црвеном бојом означава се температура метала аксијалног лежишта са стране CVP (са стране цилиндра високог притиска).



Слика 6.26: Експлоатационо праћење температура метала сегмената 9 (горњи) аксијалног лежишта са стране CSP (0-150) за период од 13.12. 2016. до 15.12. 2016. у току 24 часа³⁷



Слика 6.27: Експлоатационо праћење температура метала сегмената 10 (доњи) аксијалног лежишта са стране CSP (0-150) за период од 13.12. 2016. до 15.12. 2016. у току 24 часа³⁷

Са дијаграма се јасно види, а и да се закључити, да температуре белог метала ни где не прелазе 75 [$^{\circ}\text{C}$], док би се на температури од 80 [$^{\circ}\text{C}$] парна турбина аутоматски искључила.

Зато се може закључити да није било прекида у раду и мерењу и да није било потребе за предузимањем никаквих превентивних активности.

У случају повишења температуре клизних лежишта дошло би до нарушавања геометрије лежишта, јер би се оштетио бели метал, што би довело до хаварије лежишта, а самим тим и до хаварије парне турбине.

Снижавањем или повишењем температуре уља на улазу у лежиште нарушио би се систем лежишта, не би било уљног клина а самим тим ни уљног филма, па би се бели метал почео лепити на осовину ротора турбогенератора па би, такође, дошло до последица, односно до хаварије турбогенератора.

Мерењем ових параметара утиче се на смањење ризика и повишења поузданости рада целе парне турбине јер се спречава:

- хаварија парне турбине,
- смањују инвестициони трошкови који могу бити велики,
- смањују застоји у производњи топлотне и електричне енергије и
- повећава безбедност радног особља.

6.2 ИМПЛЕМЕНТАЦИЈА МАТЕМАТИЧКОГ МОДЕЛА СТАЊА НА ПОУЗДАНОСТ ПАРНИХ ТУРБИНА У ТЕРМОЕЛЕКТРАНАМА И ТОПЛАНАМА³³

Имплементација модела стања је посматрана између два генерална ремонта. Усвојени модел пет стања развијен је као методологија која спречава да не дође до појаве изненадних отказа, који могу да изазову велике хаварије, застоје у производњи електричне и топлотне енергије, а самим тим и ризик по радно особље.

Предложени су оптимални временски интервали одржавања на годишњем нивоу, односно после 7600 часова рада турбине или око 317 дана, а 45 до 48 дана оставља се за превентивне периодичне оправке у пуној експлоатацији за два могућа начина прелаза у стање отказа, односно ови предложени интервали ће спречити да не дође до преласка у стање отказа. Израчунате су вероватноће могућих стања у посматраном и предложеном интервалу одржавања.

Експлоатациона истраживања су вршена на две парне турбине: *PT-135/165-130/15*, и *T-110/120-13-4* у ТЕ-ТО „Нови Сад“ у Новом Саду.

Брзине прелаза између стања, рачунају се на два начина.

Ако је реч о простом прелазу између два стања: i у j , тј.: $i \rightarrow j$, тада важи израз:

$$\lambda_{ij} = \frac{1}{T_{ij}}, [h^{-1}], \quad (45)$$

где је:

T_{ij} , [h] – време прелаза из стања i у стање j .

Ако је реч о сложеном прелазу између два стања: $i \rightarrow j$, тада се користи израз:

$$\lambda_{ij} = \frac{1}{\frac{T_{ij}}{e^{\frac{1}{T_{ij}} T_{ak}} - 1}}, [h^{-1}], \quad (46)$$

где су (у општим ознакама, на конкретним прелазима биће спецификована стања!):

- T_{ij} , h – (средње) време прелаза из стања i у стање j ,
- T_{ak} , h – просечно k – то време одлучивања о прелазу из стања у стање.

Општи изрази (45) и (46) сада ће се конкретизовати кроз пример примене за оба уведена могућа начина прелаза из оперативног стања у стање отказа. При овоме треба имати на уму да су времена прелаза и одлучивања узета из инжењерског искуства, као и према постојећим стандардима, који се односе на рад парних турбина.

График кумулативног модела пет стања компонената парне турбине приказан је на слици 5.7. Графици два могућа начина прелаза из оперативног у стање отказа дати су на сликама 5.8 и 5.9.

Овај пример илуструје горе приказани поступак за прелаз из оперативног стања у стање отказа. Нумерички резултати дати су у табелама 6.2 и 6.3. Брзине прелаза (λ_{12} , ...) изражене су помоћу параметара истраживања, као и параметара одржавања компонената до којих се долази инжењерским искуством.

Посматрају се два могућа начина прелаза из оперативног стања у стање отказа.

a) Први могући начин прелаза: $O \rightarrow D \rightarrow DI \rightarrow F$ (в. график прелаза на сл. 5.8).

Прелаз: $O \rightarrow D$, или $1 \rightarrow 2$.

Време прелаза T_{12} , тј. предложени интервали времена одржавања: T_m је:

1. године: $1 \times 7600 [h]$,

2. године: $2 \times 7600 [h]$,

3. године: $3 \times 7600 [h]$,

4. године: $4 \times 7600 [h]$.

Овде се дешава прости прелаз.

Брзина прелаза одређује се према изразу (45), т.ј.:

$$\lambda_{12} = \frac{1}{T_{12}}, [h^{-1}].$$

Прелаз: $O \rightarrow M$, или $1 \rightarrow 4$.

Овде се јавља сложени прелаз. Брзина прелаза одређује се помоћу израза (46), па је:

$$\lambda_{14} = \frac{1}{\frac{T_{14}}{e^{\frac{1}{T_{14}} T_{d1}} - 1}}, [h^{-1}],$$

где су, према инжењерском искуству:

– време прелаза:

$$T_{14} = \left\{ 1 \text{ година: } 1 \times \frac{1}{80}, 2 \text{ године: } 2 \times \frac{1}{80}, 3 \text{ године: } 3 \times \frac{1}{80}, 4 \text{ године: } 4 \times \frac{1}{80} \right\}, h;$$

– просечно време одлучивања о прелазу из стања 1 у стање 4: $T_{d1} = \frac{1}{6} [h]$.

Прелаз: O → F, или 1 → 5.

Ово је сложени прелаз. Брзина прелаза према изразу (46) је:

$$\lambda_{15} = \frac{1}{T_{15} \left(e^{\frac{1}{T_{15} T_{d1}}} - 1 \right)}, [h^{-1}], \text{ где је:}$$

– време прелаза: $T_{15} = \frac{1}{60} [h]$;

– просечно време одлучивања о прелазу из стања 1 у стање 5: $T_{d1} = \frac{1}{6} [h]$.

Прелаз: D → DI, или 2 → 3.

Овде се врши прости прелаз.

Време прелаза је $T_{23} = 1 [h]$; Брзина прелаза према (45) је:

$$\lambda_{23} = \frac{1}{T_{23}}, [h^{-1}].$$

Прелаз: D → M, или 2 → 4.

Овде се јавља сложени прелаз. Брзина прелаза према изразу (45) је:

$$\lambda_{24} = \frac{1}{T_{24} \left(e^{\frac{1}{T_{24} T_{d2}}} - 1 \right)}, [h^{-1}],$$

– време прелаза: $T_{24} = 120 [h]$;

– просечно време одлучивања о прелазу из стања 2 у стање 4: $T_{d2} = \frac{1}{8} [h]$.

Прелаз: DI → D, или 3 → 2.

Овде се врши прости прелаз.

Брзина прелаза према изразу (45) је:

$$\lambda_{32} = \frac{1}{T_{32}}, [h^{-1}];$$

– време прелаза је $T_{32} = 1 [h]$.

Прелаз: DI → M, или 3 → 4.

Овде се врши прости прелаз. Брзина прелаза према изразу (45) је:

$$\lambda_{34} = \frac{1}{T_{34}}, [h^{-1}];$$

– време прелаза је $T_{34} = 168$ [h].

Прелаз: DI → F, или **3 → 5**.

Овде се врши прости прелаз. Брзина прелаза према изразу (45) је:

$$\lambda_{35} = \frac{1}{T_{35}}, [h^{-1}];$$

– време прелаза је $T_{35} = \frac{3}{4}$ [h].

Прелаз: M → O, или **4 → 1**.

Овде се врши сложени прелаз. Брзина прелаза према изразу (46) је:

$$\lambda_{41} = \frac{1}{\frac{T_{41}}{e^{\frac{1}{T_{41}T_{d4}}} - 1}}, [h^{-1}],$$

– време прелаза: $T_{41} = 8$ [h];

– просечно време одлучивања о прелазу из стања **4** у стање **1**: $T_{d4} = \frac{1}{720}$ [h].

Прелаз: M → D, или **4 → 2**.

Овде се врши сложени прелаз. Брзина прелаза према изразу (46) је:

$$\lambda_{42} = \frac{1}{\frac{T_{42}}{e^{\frac{1}{T_{42}T_{d4}}} - 1}}, [h^{-1}],$$

– време прелаза: $T_{42} = 8$ [h];

– просечно време одлучивања о прелазу из стања **4** у стање **1**: $T_{d4} = \frac{1}{720}$ [h].

Прелаз: M → F, или **4 → 5**.

Овде се врши сложени прелаз. Брзина прелаза према изразу (46) је:

$$\lambda_{45} = \frac{1}{\frac{T_{45}}{e^{\frac{1}{T_{45}T_{d4}}} - 1}}, [h^{-1}],$$

– време прелаза: $T_{45} = 8$ [h];

– просечно време одлучивања о прелазу из стања **4** у стање **5**: $T_{d4} = \frac{1}{720}$ [h].

Прелаз: F → O, или **5 → 1**.

Овде се врши сложени прелаз.

Брзина прелаза према изразу (46) је:

$$\lambda_{51} = \frac{\frac{1}{T_{51}}}{e^{\frac{1}{T_{51}}} - 1}, [h^{-1}],$$

– време прелаза: $T_{51} = 80 [h]$;

– просечно време одлучивања о прелазу из стања **5** у стање **1**: $T_{d5} = \frac{1}{720} [h]$.

1. Ток рачунања за први могући начин прелаза: $O \rightarrow D \rightarrow DI \rightarrow F$

Након прве године експлоатације

Брзине прелаза су:

$$\lambda_{12} = \frac{1}{T_{12}} = \frac{1}{1 \cdot 7600} = \frac{1}{7600} [h^{-1}],$$

$$\lambda_{14} = \frac{\frac{1}{T_{14}}}{e^{\frac{1}{T_{14}}} - 1} = \frac{\frac{1}{80}}{e^{\frac{1}{80}} - 1} = \frac{1}{80 \left(e^{\frac{1}{80}} - 1 \right)} [h^{-1}],$$

$$\lambda_{15} = \frac{\frac{1}{T_{15}}}{e^{\frac{1}{T_{15}}} - 1} = \frac{\frac{1}{60}}{e^{\frac{1}{60}} - 1} = \frac{1}{60 \left(e^{\frac{1}{60}} - 1 \right)} [h^{-1}],$$

$$\lambda_{23} = \frac{1}{T_{23}} = \frac{1}{1} = 1 [h^{-1}],$$

$$\lambda_{24} = \frac{\frac{1}{T_{24}}}{e^{\frac{1}{T_{24}}} - 1} = \frac{\frac{1}{120}}{e^{\frac{1}{120}} - 1} = \frac{1}{120 \left(e^{\frac{1}{120}} - 1 \right)} [h^{-1}],$$

$$\lambda_{32} = \frac{1}{T_{32}} = \frac{1}{1} = 1 [h^{-1}],$$

$$\lambda_{34} = \frac{1}{T_{34}} = \frac{1}{168} [h^{-1}],$$

$$\lambda_{35} = \frac{1}{T_{35}} = \frac{1}{\frac{3}{4}} = \frac{4}{3} [h^{-1}],$$

$$\lambda_{41} = \frac{\frac{1}{T_{41}}}{e^{\frac{1}{T_{41}}} - 1} = \frac{\frac{1}{8}}{e^{\frac{1}{8}} - 1} = \frac{1}{8 \left(e^{\frac{1}{8}} - 1 \right)} [h^{-1}],$$

$$\lambda_{42} = \frac{\frac{1}{T_{42}}}{e^{\frac{1}{T_{42} T_{d4}} - 1}} = \frac{1}{8 \left(e^{\frac{1}{5760} - 1} \right)} [h^{-1}],$$

$$\lambda_{45} = \frac{\frac{1}{T_{45}}}{e^{\frac{1}{T_{45} T_{d4}} - 1}} = \frac{1}{8 \left(e^{\frac{1}{5760} - 1} \right)} [h^{-1}],$$

$$\lambda_{51} = \frac{\frac{1}{T_{51}}}{e^{\frac{1}{T_{51} T_{d5}} - 1}} = \frac{\frac{1}{80}}{e^{\frac{1}{80 \cdot 720} - 1}} = \frac{1}{80 \left(e^{\frac{1}{57600} - 1} \right)} [h^{-1}],$$

Величине уведене у изразима (3) имају следеће вредности:

$$\lambda_1 = \lambda_{12} + \lambda_{14} + \lambda_{15} = \frac{1}{7600} + \frac{1}{80 \left(e^{\frac{1}{480} - 1} \right)} + \frac{1}{60 \left(e^{\frac{1}{360} - 1} \right)} [h^{-1}],$$

$$\lambda_2 = \lambda_{23} + \lambda_{24} = 1 + \frac{1}{120 \left(e^{\frac{1}{760} - 1} \right)} [h^{-1}], \quad \lambda_3 = \lambda_{32} + \lambda_{34} + \lambda_{35} = 1 + \frac{1}{168} + \frac{4}{3} = \frac{131}{56} [h^{-1}],$$

$$\lambda_4 = \lambda_{41} + \lambda_{42} + \lambda_{45} = \frac{3}{8 \left(e^{\frac{1}{5760} - 1} \right)} [h^{-1}], \quad \lambda_5 = \lambda_{51} = \frac{1}{80 \left(e^{\frac{1}{57600} - 1} \right)} [h^{-1}].$$

Сменом ових вредности у изразе (20, а потом коришћењем израза (21.1) – (21.5), добијају се величине вероватноћа свих пет стања после прве године експлоатације парне турбине:

$$p_1 = p_o = 0.9999345175 [-];$$

$$p_2 = p_d = 0.0000429683 [-];$$

$$p_3 = p_{di} = 0.0000183682 [-];$$

$$p_4 = p_m = 0.0000003286 [-];$$

$$p_5 = p_f = 0.0000038174 [-];$$

Збир добијених вероватноћа стања је:

$$p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5 = 1.0000000000.$$

Тиме је потврђен услов нормираности (2) вероватноћа стања.

Након две године експлоатације

Брзине прелаза су:

$$\lambda_{12} = \frac{1}{T_{12}} = \frac{1}{2 \cdot 7600} = \frac{1}{15\,200} [h^{-1}], \quad \lambda_{14} = \frac{1}{T_{14}} = \frac{2 \cdot \frac{1}{80}}{e^{\frac{1}{T_{14}} T_{d1}} - 1} = \frac{2 \cdot \frac{1}{80}}{e^{2 \cdot \frac{1}{80} \cdot \frac{1}{6}} - 1} = \frac{1}{40 \left(e^{\frac{1}{240}} - 1 \right)} [h^{-1}],$$

$$\lambda_{15} = \frac{1}{T_{15}} = \frac{1}{60} = \frac{1}{60 \left(e^{\frac{1}{360}} - 1 \right)} [h^{-1}],$$

$$\lambda_{23} = \frac{1}{T_{23}} = \frac{1}{1} = 1 [h^{-1}], \quad \lambda_{24} = \frac{1}{T_{24}} = \frac{120}{e^{\frac{1}{T_{24}} T_{d2}} - 1} = \frac{120}{e^{\frac{1}{120} \cdot \frac{1}{8}} - 1} = \frac{1}{120 \left(e^{\frac{1}{760}} - 1 \right)} [h^{-1}],$$

$$\lambda_{32} = \frac{1}{T_{32}} = \frac{1}{1} = 1 [h^{-1}], \quad \lambda_{34} = \frac{1}{T_{34}} = \frac{1}{168} [h^{-1}], \quad \lambda_{35} = \frac{1}{T_{35}} = \frac{1}{3} = \frac{4}{3} [h^{-1}],$$

$$\lambda_{41} = \frac{1}{T_{41}} = \frac{1}{8} = \frac{1}{8 \left(e^{\frac{1}{5760}} - 1 \right)} [h^{-1}], \quad \lambda_{42} = \frac{1}{T_{42}} = \frac{1}{8 \left(e^{\frac{1}{5760}} - 1 \right)} [h^{-1}],$$

$$\lambda_{45} = \frac{1}{T_{45}} = \frac{1}{8 \left(e^{\frac{1}{5760}} - 1 \right)} [h^{-1}],$$

$$\lambda_{51} = \frac{1}{T_{51}} = \frac{1}{80} = \frac{1}{80 \left(e^{\frac{1}{57600}} - 1 \right)} [h^{-1}],$$

Величине наведене у изразима (3) имају следеће вредности:

$$\lambda_1 = \lambda_{12} + \lambda_{14} + \lambda_{15} = \frac{1}{15\,200} + \frac{1}{40 \left(e^{\frac{1}{240}} - 1 \right)} + \frac{1}{60 \left(e^{\frac{1}{360}} - 1 \right)} [h^{-1}],$$

$$\lambda_2 = \lambda_{23} + \lambda_{24} = 1 + \frac{1}{120 \left(e^{\frac{1}{760}} - 1 \right)} [h^{-1}],$$

$$\lambda_3 = \lambda_{32} + \lambda_{34} + \lambda_{35} = 1 + \frac{1}{168} + \frac{4}{3} = \frac{131}{56} [h^{-1}],$$

$$\lambda_4 = \lambda_{41} + \lambda_{42} + \lambda_{45} = \frac{3}{8 \left(e^{\frac{1}{5760}} - 1 \right)} [h^{-1}],$$

$$\lambda_5 = \lambda_{51} = \frac{1}{80 \left(e^{\frac{1}{57600}} - 1 \right)} [h^{-1}].$$

Применом израза (20), затим коришћењем израза (21.1) – (21.5) налазе се вероватноће свих пет стања после **две године** експлоатације парне турбине:

$$p_1 = p_o = \mathbf{0.9920084883} [-];$$

$$p_2 = p_d = \mathbf{0.0055464390} [-];$$

$$p_3 = p_{di} = \mathbf{0.0023709968} [-];$$

$$p_4 = p_m = \mathbf{0.0000659204} [-];$$

$$p_5 = p_f = \mathbf{0.0000081555} [-].$$

Збир свих ових вероватноћа износи:

$$p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5 = \mathbf{1.0000000000}.$$

Чиме је потврђен услов нормираности (2) вероватноћа стања.

Након три године експлоатације

Брзине прелаза су:

$$\lambda_{12} = \frac{1}{T_{12}} = \frac{1}{3 \cdot 7600} = \frac{1}{22\ 800} [h^{-1}],$$

$$\lambda_{14} = \frac{\frac{1}{T_{14}}}{e^{\frac{1}{T_{14}}} - 1} = \frac{3 \cdot \frac{1}{80}}{e^{3 \cdot \frac{1}{80 \cdot 6}} - 1} = \frac{3}{80 \left(e^{\frac{1}{160}} - 1 \right)} [h^{-1}],$$

$$\lambda_{15} = \frac{\frac{1}{T_{15}}}{e^{\frac{1}{T_{15}}} - 1} = \frac{\frac{1}{60}}{e^{\frac{1}{60 \cdot 6}} - 1} = \frac{1}{60 \left(e^{\frac{1}{360}} - 1 \right)} [h^{-1}],$$

$$\lambda_{23} = \frac{1}{T_{23}} = \frac{1}{1} = 1 [h^{-1}],$$

$$\lambda_{24} = \frac{\frac{1}{T_{24}}}{e^{\frac{1}{T_{24}}} - 1} = \frac{\frac{1}{120}}{e^{\frac{1}{120 \cdot 8}} - 1} = \frac{1}{120 \left(e^{\frac{1}{960}} - 1 \right)} [h^{-1}],$$

$$\lambda_{32} = \frac{1}{T_{32}} = \frac{1}{1} = 1 \left[h^{-1} \right],$$

$$\lambda_{34} = \frac{1}{T_{34}} = \frac{1}{168} \left[h^{-1} \right],$$

$$\lambda_{35} = \frac{1}{T_{35}} = \frac{1}{\frac{3}{4}} = \frac{4}{3} \left[h^{-1} \right],$$

$$\lambda_{41} = \frac{\frac{1}{T_{41}}}{e^{\frac{1}{T_{41} T_{d4}}} - 1} = \frac{\frac{1}{8}}{e^{\frac{1}{8 \cdot 720}} - 1} = \frac{1}{8 \left(e^{\frac{1}{5760}} - 1 \right)} \left[h^{-1} \right],$$

$$\lambda_{42} = \frac{\frac{1}{T_{42}}}{e^{\frac{1}{T_{42} T_{d4}}} - 1} = \frac{1}{8 \left(e^{\frac{1}{5760}} - 1 \right)} \left[h^{-1} \right],$$

$$\lambda_{45} = \frac{\frac{1}{T_{45}}}{e^{\frac{1}{T_{45} T_{d4}}} - 1} = \frac{1}{8 \left(e^{\frac{1}{5760}} - 1 \right)} \left[h^{-1} \right],$$

$$\lambda_{51} = \frac{\frac{1}{T_{51}}}{e^{\frac{1}{T_{51} T_{d5}}} - 1} = \frac{\frac{1}{80}}{e^{\frac{1}{80 \cdot 720}} - 1} = \frac{1}{80 \left(e^{\frac{1}{57600}} - 1 \right)} \left[h^{-1} \right].$$

Величине наведене у изразима (3) имају следеће вредности:

$$\lambda_1 = \lambda_{12} + \lambda_{14} + \lambda_{15} = \frac{1}{22 \ 800} + \frac{3}{80 \left(e^{\frac{1}{160}} - 1 \right)} + \frac{1}{60 \left(e^{\frac{1}{360}} - 1 \right)} \left[h^{-1} \right],$$

$$\lambda_2 = \lambda_{23} + \lambda_{24} = 1 + \frac{1}{120 \left(e^{\frac{1}{760}} - 1 \right)} \left[h^{-1} \right],$$

$$\lambda_3 = \lambda_{32} + \lambda_{34} + \lambda_{35} = 1 + \frac{1}{168} + \frac{4}{3} = \frac{131}{56} \left[h^{-1} \right],$$

$$\lambda_4 = \lambda_{41} + \lambda_{42} + \lambda_{45} = \frac{3}{8 \left(e^{\frac{1}{5760}} - 1 \right)} \left[h^{-1} \right],$$

$$\lambda_5 = \lambda_{51} = \frac{1}{80 \left(e^{\frac{1}{57600}} - 1 \right)} \left[h^{-1} \right].$$

Коришћењем израза (20), потом израза (22.1) – (22.5) добијају се вероватноће свих пет стања после три године експлоатације парне турбине:

$$p_1 = p_o = 0.9524266513 [-];$$

$$p_2 = p_d = 0.0330305452 [-];$$

$$p_3 = p_{di} = 0.0141199277 [-];$$

$$p_4 = p_m = 0.0003930558 [-];$$

$$p_5 = p_f = 0.0000298200 [-].$$

Збир вероватноћа стања износи:

$$p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5 = 1.0000000000.$$

Овим је потврђен услов нормираности (2) вероватноћа стања.

Након четири године експлоатације

Брзине прелаза су:

$$\lambda_{12} = \frac{1}{T_{12}} = \frac{1}{4 \cdot 7600} = \frac{1}{30\,400} \left[h^{-1} \right],$$

$$\lambda_{14} = \frac{\frac{1}{T_{14}}}{e^{\frac{1}{T_{14} T_{d1}}} - 1} = \frac{4 \cdot \frac{1}{80}}{e^{4 \cdot \frac{1}{80 \cdot 6}} - 1} = \frac{1}{20 \left(e^{\frac{1}{120}} - 1 \right)} \left[h^{-1} \right],$$

$$\lambda_{15} = \frac{\frac{1}{T_{15}}}{e^{\frac{1}{T_{15} T_{d1}}} - 1} = \frac{\frac{1}{60}}{e^{\frac{1}{60 \cdot 6}} - 1} = \frac{1}{60 \left(e^{\frac{1}{360}} - 1 \right)} \left[h^{-1} \right],$$

$$\lambda_{23} = \frac{1}{T_{23}} = \frac{1}{1} = 1 \left[h^{-1} \right],$$

$$\lambda_{24} = \frac{\frac{1}{T_{24}}}{e^{\frac{1}{T_{24} T_{d2}}} - 1} = \frac{\frac{1}{120}}{e^{\frac{1}{120 \cdot 8}} - 1} = \frac{1}{120 \left(e^{\frac{1}{960}} - 1 \right)} \left[h^{-1} \right],$$

$$\lambda_{32} = \frac{1}{T_{32}} = \frac{1}{1} = 1 \left[h^{-1} \right],$$

$$\lambda_{34} = \frac{1}{T_{34}} = \frac{1}{168} [h^{-1}],$$

$$\lambda_{35} = \frac{1}{T_{35}} = \frac{1}{\frac{3}{4}} = \frac{4}{3} [h^{-1}],$$

$$\lambda_{41} = \frac{\frac{1}{T_{41}}}{e^{\frac{1}{T_{41} T_{d4}}} - 1} = \frac{\frac{1}{8}}{e^{\frac{1}{8 \cdot \frac{1}{720}} - 1}} = \frac{1}{8 \left(e^{\frac{1}{5760} - 1} \right)} [h^{-1}],$$

$$\lambda_{42} = \frac{\frac{1}{T_{42}}}{e^{\frac{1}{T_{42} T_{d4}}} - 1} = \frac{1}{8 \left(e^{\frac{1}{5760} - 1} \right)} [h^{-1}],$$

$$\lambda_{45} = \frac{\frac{1}{T_{45}}}{e^{\frac{1}{T_{45} T_{d4}}} - 1} = \frac{1}{8 \left(e^{\frac{1}{5760} - 1} \right)} [h^{-1}],$$

$$\lambda_{51} = \frac{\frac{1}{T_{51}}}{e^{\frac{1}{T_{51} T_{d5}}} - 1} = \frac{\frac{1}{80}}{e^{\frac{1}{80 \cdot \frac{1}{720}} - 1}} = \frac{1}{80 \left(e^{\frac{1}{57600} - 1} \right)} [h^{-1}].$$

Величине наведене у изразима (3) имају следеће вредности

$$\lambda_1 = \lambda_{12} + \lambda_{14} + \lambda_{15} = \frac{1}{22\,800} + \frac{1}{20 \left(e^{\frac{1}{120} - 1} \right)} + \frac{1}{60 \left(e^{\frac{1}{360} - 1} \right)} [h^{-1}],$$

$$\lambda_2 = \lambda_{23} + \lambda_{24} = 1 + \frac{1}{120 \left(e^{\frac{1}{760} - 1} \right)} [h^{-1}],$$

$$\lambda_3 = \lambda_{32} + \lambda_{34} + \lambda_{35} = 1 + \frac{1}{168} + \frac{4}{3} = \frac{131}{56} [h^{-1}],$$

$$\lambda_4 = \lambda_{41} + \lambda_{42} + \lambda_{45} = \frac{3}{8 \left(e^{\frac{1}{5760} - 1} \right)} [h^{-1}],$$

$$\lambda_5 = \lambda_{51} = \frac{1}{80 \left(e^{\frac{1}{57600} - 1} \right)} [h^{-1}].$$

Применом израза (20), затим израза (21.1) – (21.5) налазе се вероватноће свих пет стања после четири године експлоатације парне турбине:

$$p_1 = p_o = 0.8955780035 [-];$$

$$p_2 = p_d = 0.0725040818 [-];$$

$$p_3 = p_{di} = 0.0309941114 [-];$$

$$p_4 = p_m = 0.0008628681 [-];$$

$$p_5 = p_f = 0.0000609352 [-].$$

Збир добијених вероватноћа стања је:

$$p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5 = 1.0000000000.$$

Дакле, потврђен је услов нормираности (2) вероватноћа стања.

Резултати рачунања одговарајућих вероватноћа стања за први начин прелаза између стања дати су у табели 6.2.

Дијаграми вероватноћа тих стања приказани су на сликама 6.28 – 6.32.

б) Други могући начин прелаза: $O \rightarrow D \rightarrow F$
(видети график прелаза на слици 5.9).

Прелаз: $O \rightarrow D$, или $1 \rightarrow 2$.

Време прелаза T_{12} , тј. предложени интервали времена одржавања: T_m је:

1 година: 1×7600 [h],

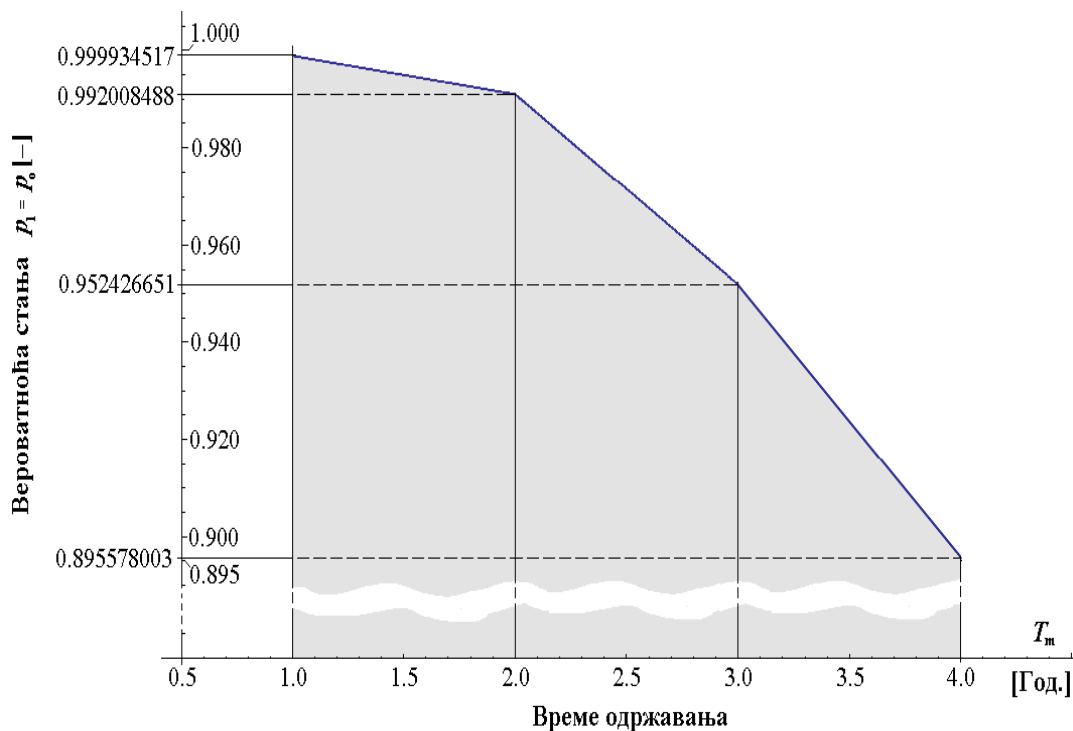
2 године: 2×7600 [h],

3 године: 3×7600 [h],

4 године: 4×7600 [h].

T_m [год.]	$p_1 = p_o$ [-]	$p_2 = p_d$ [-]	$p_3 = p_{di}$ [-]	$p_4 = p_m$ [-]	$p_5 = p_f$ [-]	Σp_i [-]
1	0.9999345175	0.0000429683	0.0000183682	0.0000003286	0.0000038174	1.0000000000
2	0.9920084883	0.0055464390	0.0023709968	0.0000659204	0.0000081555	1.0000000000
3	0.9524266513	0.0330305452	0.0141199277	0.0003930558	0.0000298200	1.0000000000
4	0.8955780035	0.0725040818	0.0309941114	0.0008628681	0.0000609352	1.0000000000

Табела 6.2: Вероватноће стационарних стања: $O \rightarrow D \rightarrow DI \rightarrow F$.³³

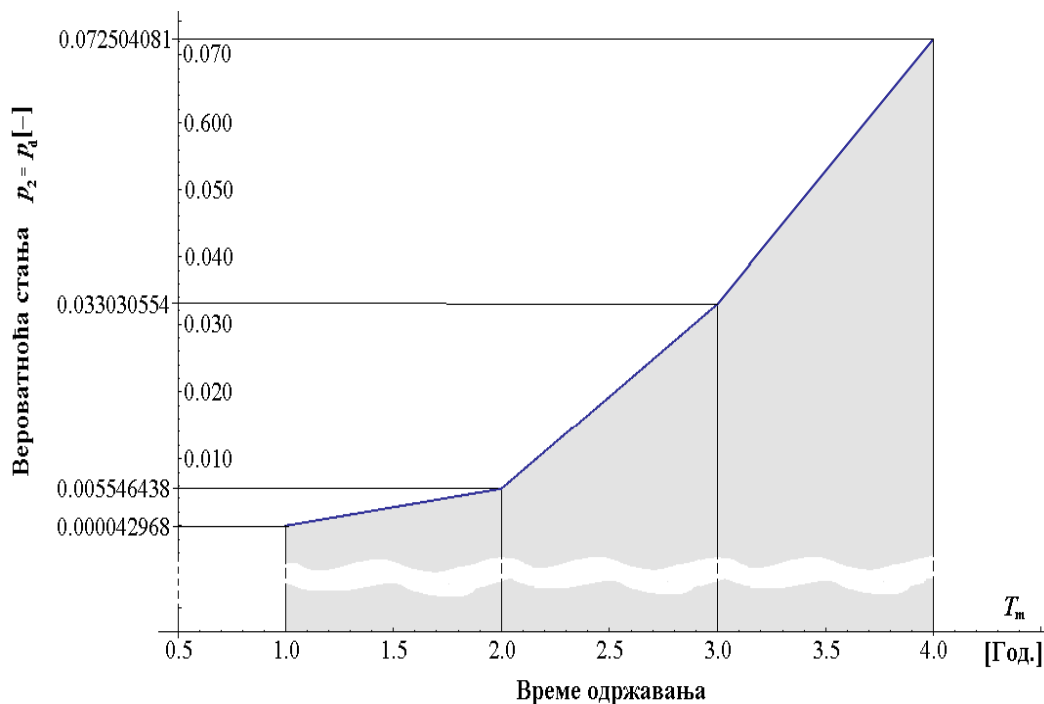


Слика 6.28: Вероватноће стања p_1 по времену одржавања T_m ($O \rightarrow D \rightarrow DI \rightarrow F$)

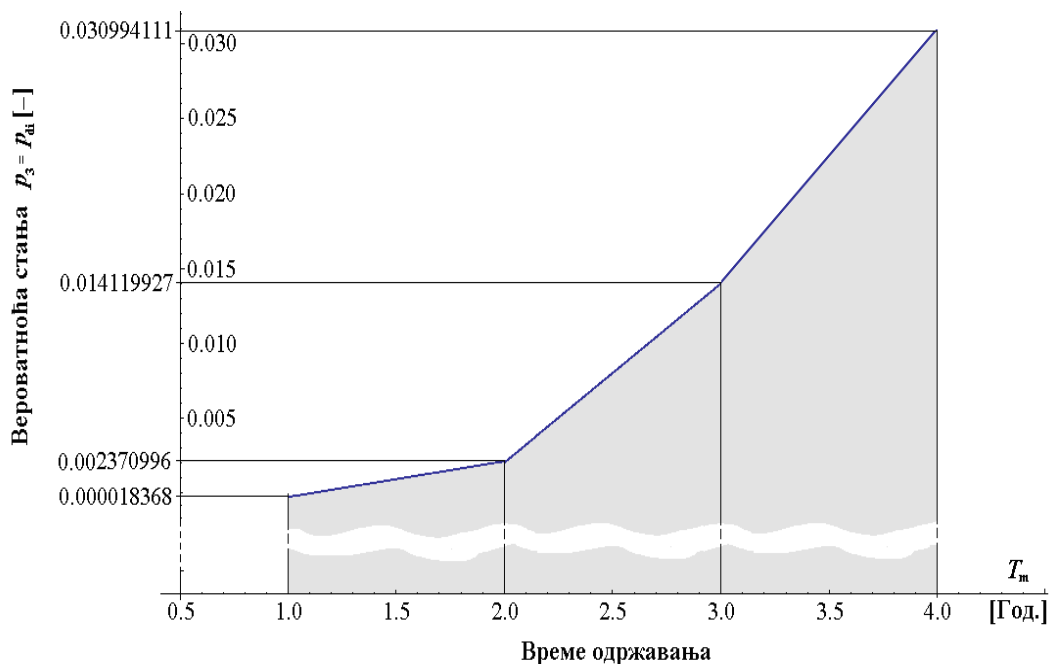
Овде се дешава прости прелаз.

Брзина прелаза одређује се према изразу (45), т.ј.:

$$\lambda_{12} = \frac{1}{T_{12}}, [h^{-1}].$$



Слика 6.29: Вероватноће стања p_2 по времену одржавања T_m ($O \rightarrow D \rightarrow DI \rightarrow F$)



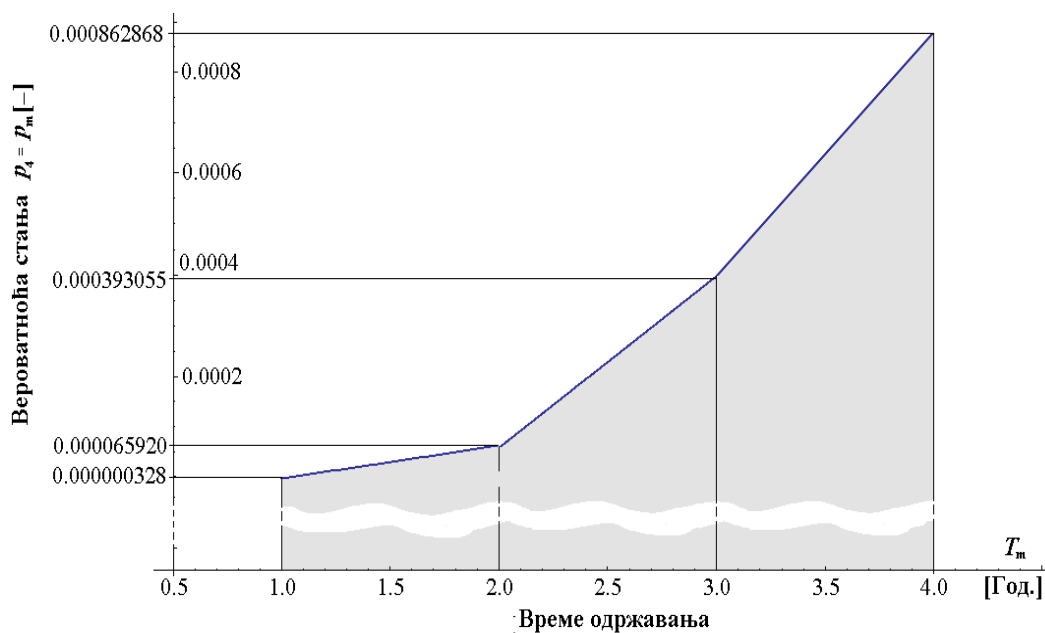
Слика 6.30: Вероватноће стања p_3 по времену одржавања T_m ($O \rightarrow D \rightarrow DI \rightarrow F$)

Прелаз: $O \rightarrow M$, или $1 \rightarrow 4$.

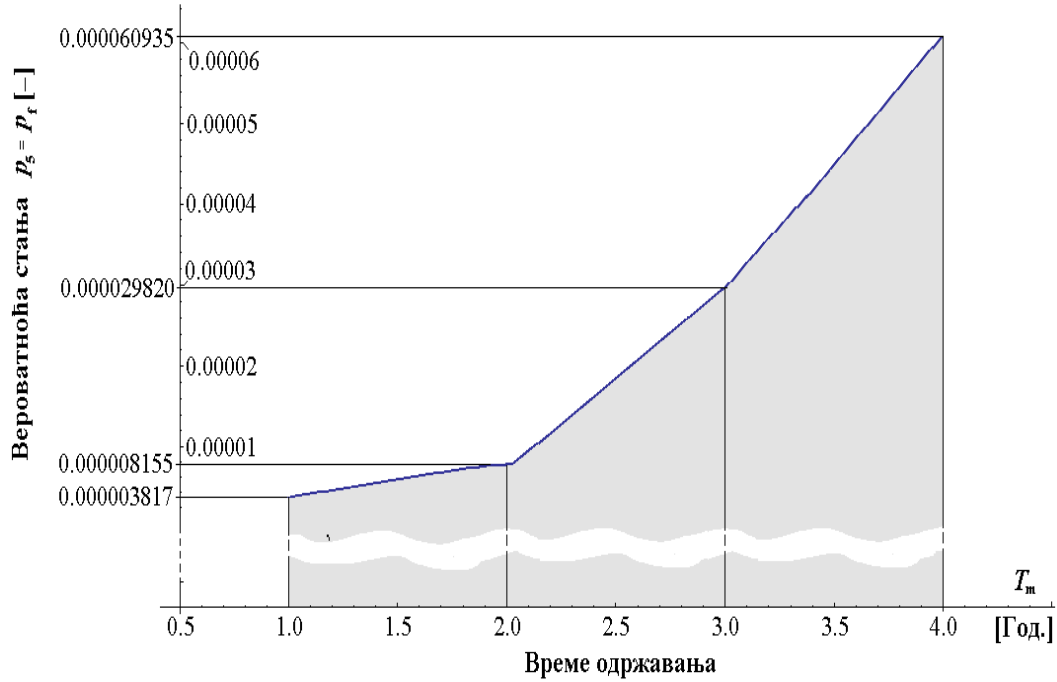
Овде се врши сложени прелаз. Брзина прелаза одређује се помоћу израза (46), па је:

$$\lambda_{14} = \frac{1}{\frac{T_{14}}{e^{\frac{1}{T_{14} T_{d1}}} - 1}}, [h^{-1}],$$

– време прелаза:



Слика 6.31: Вероватноће стања p_4 по времену одржавања T_m ($O \rightarrow D \rightarrow DI \rightarrow F$)



Слика 6.32. Вероватноће стања p_5 по времену одржавања T_m ($O \rightarrow D \rightarrow DI \rightarrow F$)

$$T_{14} = \left\{ 1 \text{ година: } 1 \times \frac{1}{80}, 2 \text{ године: } 2 \times \frac{1}{80}, 3 \text{ године: } 3 \times \frac{1}{80}, 4 \text{ године: } 4 \times \frac{1}{80} \right\}, h;$$

– просечно време одлучивања о прелазу из стања 1 у стање 4: $T_{d1} = \frac{1}{6} [h]$.

Прелаз: $O \rightarrow F$, или $1 \rightarrow 5$.

Овде се врши сложени прелаз.

Брзина прелаза одређује се помоћу израза (46), па је:

$$\lambda_{15} = \frac{1}{T_{15} \left(e^{\frac{1}{T_{15}} T_{d1}} - 1 \right)}, [h^{-1}],$$

– време прелаз из стања 1 у стање 5: $T_{15} = \frac{1}{60} [h]$;

– просечно време одлучивања о прелазу из стања 1 у стање 5: $T_{d1} = \frac{1}{6} [h]$.

Прелаз: $D \rightarrow M$, или $2 \rightarrow 4$.

Овде се врши сложени прелаз. Брзина прелаз одређује се помоћу израза (46), па је:

$$\lambda_{24} = \frac{1}{T_{24} \left(e^{\frac{1}{T_{24}} T_{d2}} - 1 \right)}, [h^{-1}],$$

– време прелаз из стања 2 у стање 4: $T_{24} = 120 [h]$;

- просечно време одлучивања о прелазу из стања **2** у стање **4**: $T_{d2} = \frac{1}{8} [h]$.

Прелаз: D → F, или **2 → 5**.

Овде се врши сложени прелаз. Брзина прелаза одређује се помоћу израза (47), па је:

$$\lambda_{25} = \frac{1}{\frac{T_{25}}{e^{\frac{1}{T_{25}} T_{d2}} - 1}}, [h^{-1}],$$

- време прелаза из стања **2** у стање **5**: $T_{25} = \frac{1}{60} [h]$;
- просечно време одлучивања о прелазу из стања **2** у стање **5**: $T_{d2} = \frac{1}{8} [h]$.

Прелаз: M → O, или **4 → 1**.

Овде се врши сложени прелаз. Брзина прелаза одређује се помоћу израза (46), па је:

$$\lambda_{41} = \frac{1}{\frac{T_{41}}{e^{\frac{1}{T_{41}} T_{d4}} - 1}}, [h^{-1}],$$

- време прелаза из стања **4** у стање **1**: $T_{41} = 8 [h]$;
- просечно време одлучивања о прелазу из стања **4** у стање **1**: $T_{d4} = \frac{1}{720} [h]$.

Прелаз: M → D, или **4 → 2**.

Овде се врши сложени прелаз.

Брзина прелаза одређује се помоћу израза (46), па је:

$$\lambda_{42} = \frac{1}{\frac{T_{42}}{e^{\frac{1}{T_{42}} T_{d4}} - 1}}, [h^{-1}],$$

- време прелаза из стања **4** у стање **2**: $T_{42} = 8 [h]$;
- просечно време одлучивања о прелазу из стања **4** у стање **2**: $T_{d4} = \frac{1}{720} [h]$.

Прелаз: M → F, или **4 → 5**.

Овде се врши сложени прелаз. Брзина прелаза одређује се помоћу израза (46), па је:

$$\lambda_{45} = \frac{1}{\frac{T_{45}}{e^{\frac{1}{T_{45}} T_{d4}} - 1}}, [h^{-1}],$$

- време прелаза из стања **4** у стање **5**: $T_{45} = 8 [h]$;
- просечно време одлучивања о прелазу из стања **4** у стање **5**: $T_{d4} = \frac{1}{720} [h]$.

Прелаз: F → O, или **5 → 1**

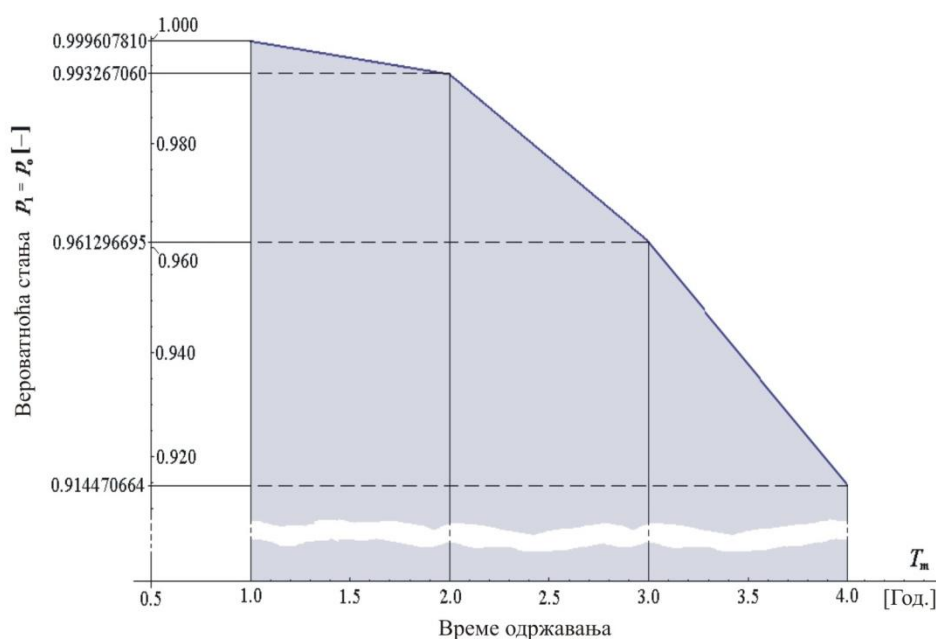
Овде се врши сложени прелаз. Брзина прелаза одређује се помоћу израза (46), па је:

$$\lambda_{s1} = \frac{1}{\frac{T_{s1}}{e^{\frac{1}{T_{s1} T_{d5}} - 1}}}, [h^{-1}],$$

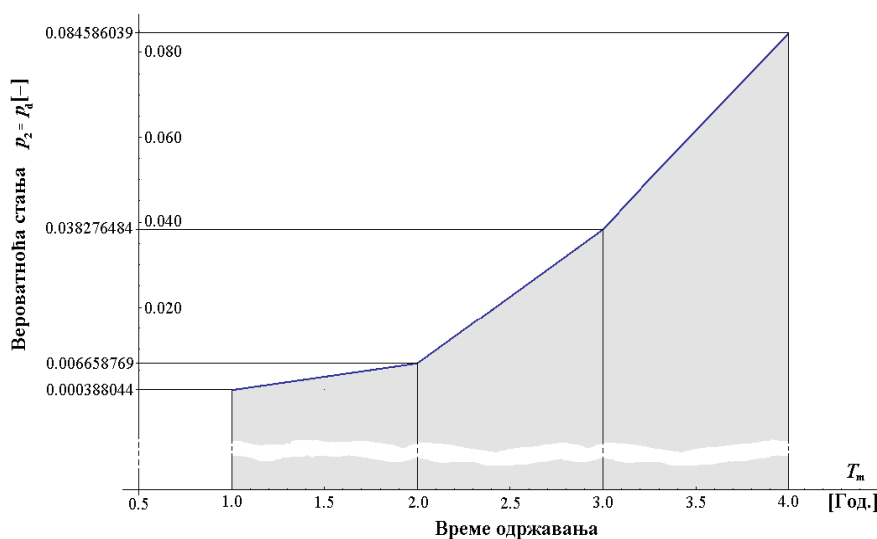
- време прелаза из стања 5 у стање 1: $T_{s1} = 80 [h]$;
- просечно време одлучивања о прелазу: $T_{d5} = \frac{1}{720} [h]$.

Резултати рачунања одговарајућих вероватноћа стања за други начин прелаза између стања дат је у табели 6.3.

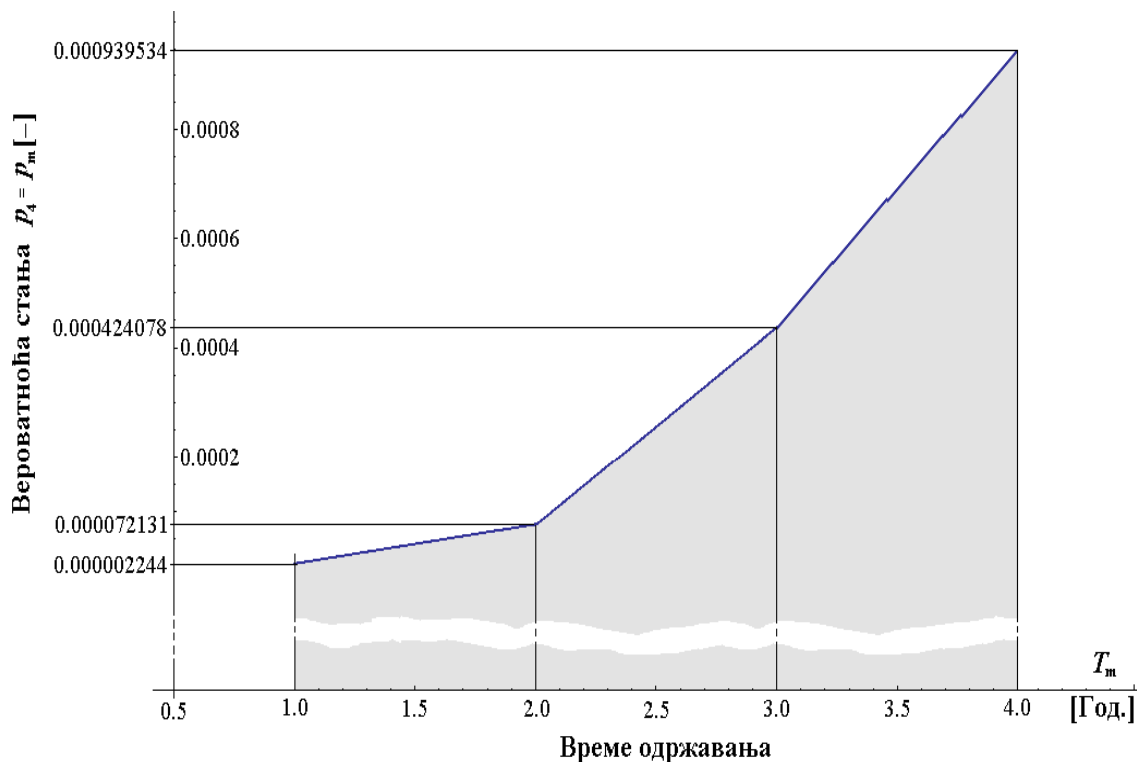
Дијаграми вероватноћа тих стања приказани су на сликама 6.33 – 6.36.



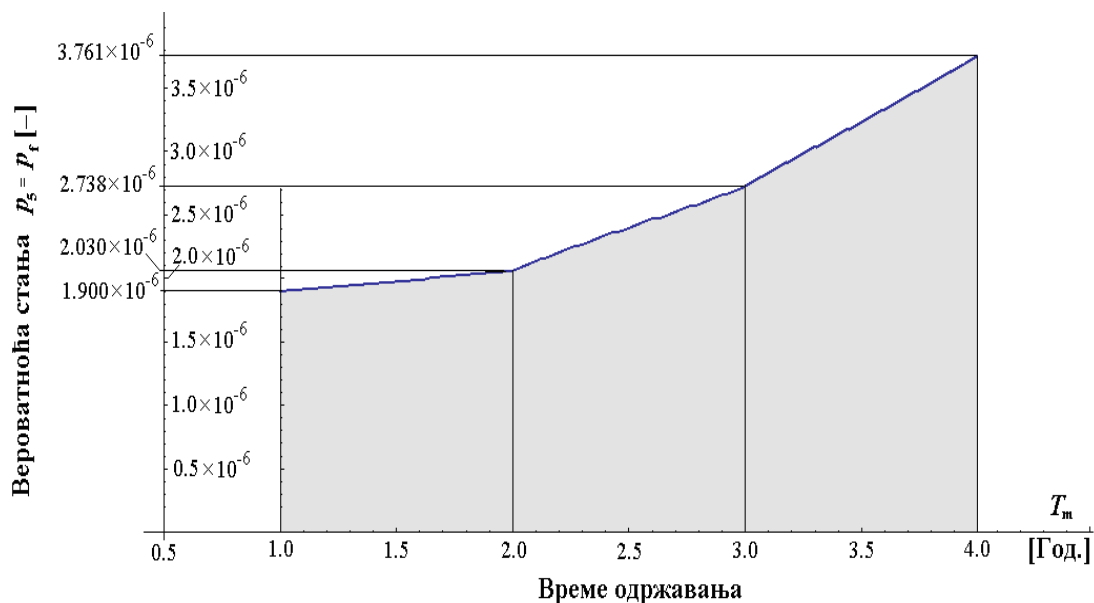
Слика 6.33: Вероватноће стања p_1 по времену одржавања T_m ($O \rightarrow D \rightarrow F$)



Слика 6.34: Вероватноће стања p_2 по времену одржавања T_m ($O \rightarrow D \rightarrow F$)



Слика 6.35: Вероватноће стања p_4 по времену одржавања T_m ($O \rightarrow D \rightarrow F$)



Слика 6.36: Вероватноће стања p_5 по времену одржавања T_m ($O \rightarrow D \rightarrow F$)

2. Ток рачунања за други могући начин прелаза: $O \rightarrow D \rightarrow F$

Након прве године експлоатације

Брзине прелаза су:

$$\lambda_{12} = \frac{1}{T_{12}} = \frac{1}{1 \cdot 7600} = \frac{1}{7600} [h^{-1}],$$

$$\lambda_{14} = \frac{\frac{1}{T_{14}}}{e^{\frac{1}{T_{14}}} - 1} = \frac{\frac{1}{80}}{e^{\frac{1}{80 \cdot \frac{1}{6}} - 1}} = \frac{1}{80 \left(e^{\frac{1}{480} - 1} \right)} [h^{-1}],$$

$$\lambda_{15} = \frac{\frac{1}{T_{15}}}{e^{\frac{1}{T_{15}}} - 1} = \frac{\frac{1}{60}}{e^{\frac{1}{60 \cdot \frac{1}{6}} - 1}} = \frac{1}{60 \left(e^{\frac{1}{360} - 1} \right)} [h^{-1}],$$

$$\lambda_{24} = \frac{\frac{1}{T_{24}}}{e^{\frac{1}{T_{24}}} - 1} = \frac{\frac{1}{120}}{e^{\frac{1}{120 \cdot \frac{1}{8}} - 1}} = \frac{1}{120 \left(e^{\frac{1}{760} - 1} \right)} [h^{-1}],$$

$$\lambda_{25} = \frac{\frac{1}{T_{25}}}{e^{\frac{1}{T_{25}}} - 1} = \frac{\frac{1}{60}}{e^{\frac{1}{60 \cdot \frac{1}{8}} - 1}} = \frac{1}{60 \left(e^{\frac{1}{480} - 1} \right)} [h^{-1}],$$

$$\lambda_{41} = \frac{\frac{1}{T_{41}}}{e^{\frac{1}{T_{41}}} - 1} = \frac{\frac{1}{8}}{e^{\frac{1}{8 \cdot \frac{1}{720}} - 1}} = \frac{1}{8 \left(e^{\frac{1}{5760} - 1} \right)} [h^{-1}],$$

$$\lambda_{42} = \frac{\frac{1}{T_{42}}}{e^{\frac{1}{T_{42}}} - 1} = \frac{1}{8 \left(e^{\frac{1}{5760} - 1} \right)} [h^{-1}],$$

$$\lambda_{45} = \frac{1}{T_{45}} = \frac{1}{8} [h^{-1}],$$

$$\lambda_{51} = \frac{\frac{1}{T_{51}}}{e^{\frac{1}{T_{51}}} - 1} = \frac{\frac{1}{80}}{e^{\frac{1}{80 \cdot \frac{1}{720}} - 1}} = \frac{1}{80 \left(e^{\frac{1}{57600} - 1} \right)} [h^{-1}],$$

$$\lambda_{52} = \frac{\frac{1}{T_{52}}}{e^{\frac{1}{T_{52}}} - 1} = \frac{\frac{1}{80}}{e^{\frac{1}{80 \cdot \frac{1}{720}} - 1}} = \frac{1}{80 \left(e^{\frac{1}{57600} - 1} \right)} [h^{-1}].$$

Величине уведене у изразима (26) имају следеће вредности:

$$\lambda_1 = \lambda_{12} + \lambda_{14} + \lambda_{15} = \frac{1}{7600} + \frac{1}{80 \left(e^{\frac{1}{480}} - 1 \right)} + \frac{1}{60 \left(e^{\frac{1}{360}} - 1 \right)} [h^{-1}],$$

$$\lambda_2 = \lambda_{24} + \lambda_{25} = \frac{1}{120 \left(e^{\frac{1}{760}} - 1 \right)} + \frac{1}{60 \left(e^{\frac{1}{480}} - 1 \right)} [h^{-1}],$$

$$\lambda_4 = \lambda_{41} + \lambda_{42} + \lambda_{45} = \frac{1}{4 \left(e^{\frac{1}{5760}} - 1 \right)} + \frac{1}{8} [h^{-1}],$$

$$\lambda_5 = \lambda_{51} + \lambda_{52} = \frac{1}{40 \left(e^{\frac{1}{57600}} - 1 \right)} [h^{-1}].$$

Сменом ових вредности у изразе (42), а потом коришћењем израза (43.1) – (43.4) добијају се величине вероватноћа сва четири стања после прве године експлоатације парне турбине:

$$p_1 = p_o = 0.9996078108 [-];$$

$$p_2 = p_d = 0.0003880444 [-];$$

$$p_4 = p_m = 0.0000022446 [-];$$

$$p_5 = p_f = 0.0000019002 [-].$$

Збир добијених вероватноћа је:

$$p_1 + p_2 + p_4 + p_5 = 1.0000000000.$$

Тиме је потврђен услов нормираности (24) вероватноћа стања.

Након друге године експлоатације

Брзине прелаза су:

$$\lambda_{12} = \frac{1}{T_{12}} = \frac{1}{2 \cdot 7600} = \frac{1}{15200} [h^{-1}],$$

$$\lambda_{14} = \frac{\frac{1}{T_{14}}}{e^{\frac{1}{T_{14}}} - 1} = \frac{2 \cdot \frac{1}{80}}{e^{2 \cdot \frac{1}{80}} - 1} = \frac{1}{40 \left(e^{\frac{1}{240}} - 1 \right)} [h^{-1}],$$

$$\lambda_{15} = \frac{\frac{1}{T_{15}}}{e^{\frac{1}{T_{15} T_{d1}}} - 1} = \frac{\frac{1}{60}}{e^{\frac{1}{60 \cdot 6}} - 1} = \frac{1}{60 \left(e^{\frac{1}{360}} - 1 \right)} [h^{-1}],$$

$$\lambda_{24} = \frac{\frac{1}{T_{24}}}{e^{\frac{1}{T_{24} T_{d2}}} - 1} = \frac{\frac{1}{120}}{e^{\frac{1}{120 \cdot 8}} - 1} = \frac{1}{120 \left(e^{\frac{1}{760}} - 1 \right)} [h^{-1}],$$

$$\lambda_{25} = \frac{\frac{1}{T_{25}}}{e^{\frac{1}{T_{25} T_{d2}}} - 1} = \frac{\frac{1}{60}}{e^{\frac{1}{60 \cdot 8}} - 1} = \frac{1}{60 \left(e^{\frac{1}{480}} - 1 \right)} [h^{-1}],$$

$$\lambda_{41} = \frac{\frac{1}{T_{41}}}{e^{\frac{1}{T_{41} T_{d4}}} - 1} = \frac{\frac{1}{8}}{e^{\frac{1}{8 \cdot 720}} - 1} = \frac{1}{8 \left(e^{\frac{1}{5760}} - 1 \right)} [h^{-1}],$$

$$\lambda_{42} = \frac{\frac{1}{T_{42}}}{e^{\frac{1}{T_{42} T_{d4}}} - 1} = \frac{1}{8 \left(e^{\frac{1}{5760}} - 1 \right)} [h^{-1}],$$

$$\lambda_{45} = \frac{1}{T_{45}} = \frac{1}{8} [h^{-1}],$$

$$\lambda_{51} = \frac{\frac{1}{T_{51}}}{e^{\frac{1}{T_{51} T_{d5}}} - 1} = \frac{\frac{1}{80}}{e^{\frac{1}{80 \cdot 720}} - 1} = \frac{1}{80 \left(e^{\frac{1}{57600}} - 1 \right)} [h^{-1}],$$

$$\lambda_{52} = \frac{\frac{1}{T_{52}}}{e^{\frac{1}{T_{52} T_{d5}}} - 1} = \frac{\frac{1}{80}}{e^{\frac{1}{80 \cdot 720}} - 1} = \frac{1}{80 \left(e^{\frac{1}{57600}} - 1 \right)} [h^{-1}].$$

Величине наведене у изразима (26) имају следеће вредности:

$$\lambda_1 = \lambda_{12} + \lambda_{14} + \lambda_{15} = \frac{1}{15 \cdot 200} + \frac{1}{40 \left(e^{\frac{1}{240}} - 1 \right)} + \frac{1}{60 \left(e^{\frac{1}{360}} - 1 \right)} [h^{-1}],$$

$$\lambda_2 = \lambda_{24} + \lambda_{25} = \frac{1}{120 \left(e^{\frac{1}{760}} - 1 \right)} + \frac{1}{60 \left(e^{\frac{1}{480}} - 1 \right)} [h^{-1}],$$

$$\lambda_4 = \lambda_{41} + \lambda_{42} + \lambda_{45} = \frac{1}{4 \left(e^{\frac{1}{5760}} - 1 \right)} + \frac{1}{8} \left[h^{-1} \right],$$

$$\lambda_5 = \lambda_{51} + \lambda_{52} = \frac{1}{40 \left(e^{\frac{1}{57600}} - 1 \right)} \left[h^{-1} \right].$$

Сменом ових вредности у изразу (42), а потим коришћењем израза (43.1) – (43.4) величине вероватноћа сва четири стања после две године експлоатације парне турбине су:

$$p_1 = p_o = 0.9932670600 [-];$$

$$p_2 = p_d = 0.0066587695 [-];$$

$$p_4 = p_m = 0.0000721316 [-];$$

$$p_5 = p_f = 0.0000020309 [-].$$

Збир добијених вероватноћа је:

$$p_1 + p_2 + p_4 + p_5 = \mathbf{1.0000000000}.$$

Тиме је потврђен услов нормираности (24) вероватноћа стања.

Након треће године експлоатације

Брзине прелаза су:

$$\lambda_{12} = \frac{1}{T_{12}} = \frac{1}{3 \cdot 7600} = \frac{1}{22800} \left[h^{-1} \right],$$

$$\lambda_{14} = \frac{\frac{1}{T_{14}}}{e^{\frac{1}{T_{14}}} - 1} = \frac{3 \cdot \frac{1}{80}}{e^{3 \cdot \frac{1}{80 \cdot 6}} - 1} = \frac{3}{80 \left(e^{\frac{1}{160}} - 1 \right)} \left[h^{-1} \right],$$

$$\lambda_{15} = \frac{\frac{1}{T_{15}}}{e^{\frac{1}{T_{15}}} - 1} = \frac{\frac{1}{60}}{e^{\frac{1}{60 \cdot 6}} - 1} = \frac{1}{60 \left(e^{\frac{1}{360}} - 1 \right)} \left[h^{-1} \right],$$

$$\lambda_{24} = \frac{\frac{1}{T_{24}}}{e^{\frac{1}{T_{24}}} - 1} = \frac{\frac{1}{120}}{e^{\frac{1}{120 \cdot 8}} - 1} = \frac{1}{120 \left(e^{\frac{1}{960}} - 1 \right)} \left[h^{-1} \right],$$

$$\lambda_{25} = \frac{\frac{1}{T_{25}}}{e^{\frac{1}{T_{25}}} - 1} = \frac{\frac{1}{60}}{e^{\frac{1}{60 \cdot 8}} - 1} = \frac{1}{60 \left(e^{\frac{1}{480}} - 1 \right)} \left[h^{-1} \right],$$

$$\lambda_{41} = \frac{\frac{1}{T_{41}}}{e^{\frac{1}{T_{41} T_{d4}}} - 1} = \frac{\frac{1}{8}}{e^{\frac{1}{8 \cdot 720}} - 1} = \frac{1}{8 \left(e^{\frac{1}{5760}} - 1 \right)} [h^{-1}],$$

$$\lambda_{42} = \frac{\frac{1}{T_{42}}}{e^{\frac{1}{T_{42} T_{d4}}} - 1} = \frac{1}{8 \left(e^{\frac{1}{5760}} - 1 \right)} [h^{-1}],$$

$$\lambda_{45} = \frac{1}{T_{45}} = \frac{1}{8} [h^{-1}],$$

$$\lambda_{51} = \frac{\frac{1}{T_{51}}}{e^{\frac{1}{T_{51} T_{d5}}} - 1} = \frac{\frac{1}{80}}{e^{\frac{1}{80 \cdot 720}} - 1} = \frac{1}{80 \left(e^{\frac{1}{57600}} - 1 \right)} [h^{-1}],$$

$$\lambda_{52} = \frac{\frac{1}{T_{52}}}{e^{\frac{1}{T_{52} T_{d5}}} - 1} = \frac{\frac{1}{80}}{e^{\frac{1}{80 \cdot 720}} - 1} = \frac{1}{80 \left(e^{\frac{1}{57600}} - 1 \right)} [h^{-1}].$$

Величине наведене у изразима (26) имају следеће вредности:

$$\lambda_1 = \lambda_{12} + \lambda_{14} + \lambda_{15} = \frac{1}{22 \ 800} + \frac{3}{80 \left(e^{\frac{1}{160}} - 1 \right)} + \frac{1}{60 \left(e^{\frac{1}{360}} - 1 \right)} [h^{-1}],$$

$$\lambda_2 = \lambda_{24} + \lambda_{25} = \frac{1}{120 \left(e^{\frac{1}{760}} - 1 \right)} + \frac{1}{60 \left(e^{\frac{1}{480}} - 1 \right)} [h^{-1}],$$

$$\lambda_4 = \lambda_{41} + \lambda_{42} + \lambda_{45} = \frac{1}{4 \left(e^{\frac{1}{5760}} - 1 \right)} + \frac{1}{8} [h^{-1}],$$

$$\lambda_5 = \lambda_{51} + \lambda_{52} = \frac{1}{40 \left(e^{\frac{1}{57 \ 600}} - 1 \right)} [h^{-1}].$$

Сменом ових вредности у изразе (42), а потим коришћењем израза (43.1) – (43.4) величине вероватноћа сва четири стања после три године експлоатације парне турбине су:

$$p_1 = p_o = 0.9612966955 [-];$$

$$p_2 = p_d = 0.0382764842 [-];$$

$$p_4 = p_m = 0.0004240783 [-];$$

$$p_5 = p_f = 0.0000027380 [-].$$

Збир вероватноћа стања износи:

$$p_1 + p_2 + p_4 + p_5 = 1.0000000000.$$

Овим је потврђен услов нормираности (24) вероватноћа стања.

Након четврте године експлоатације

Брзине прелаза су:

$$\lambda_{12} = \frac{1}{T_{12}} = \frac{1}{4 \cdot 7600} = \frac{1}{30\,400} [h^{-1}],$$

$$\lambda_{14} = \frac{\frac{1}{T_{14}}}{e^{\frac{1}{T_{14}}} - 1} = \frac{4 \cdot \frac{1}{80}}{e^{4 \cdot \frac{1}{80}} - 1} = \frac{1}{20 \left(e^{\frac{1}{120}} - 1 \right)} [h^{-1}],$$

$$\lambda_{15} = \frac{\frac{1}{T_{15}}}{e^{\frac{1}{T_{15}}} - 1} = \frac{\frac{1}{60}}{e^{\frac{1}{60}} - 1} = \frac{1}{60 \left(e^{\frac{1}{360}} - 1 \right)} [h^{-1}],$$

$$\lambda_{24} = \frac{\frac{1}{T_{24}}}{e^{\frac{1}{T_{24}}} - 1} = \frac{\frac{1}{120}}{e^{\frac{1}{120}} - 1} = \frac{1}{120 \left(e^{\frac{1}{760}} - 1 \right)} [h^{-1}],$$

$$\lambda_{25} = \frac{\frac{1}{T_{25}}}{e^{\frac{1}{T_{25}}} - 1} = \frac{\frac{1}{60}}{e^{\frac{1}{60}} - 1} = \frac{1}{60 \left(e^{\frac{1}{480}} - 1 \right)} [h^{-1}],$$

$$\lambda_{41} = \frac{\frac{1}{T_{41}}}{e^{\frac{1}{T_{41}}} - 1} = \frac{\frac{1}{8}}{e^{\frac{1}{8}} - 1} = \frac{1}{8 \left(e^{\frac{1}{5760}} - 1 \right)} [h^{-1}],$$

$$\lambda_{42} = \frac{\frac{1}{T_{42}}}{e^{\frac{1}{T_{42}}} - 1} = \frac{1}{8 \left(e^{\frac{1}{5760}} - 1 \right)} [h^{-1}],$$

$$\lambda_{45} = \frac{1}{T_{45}} = \frac{1}{8} [h^{-1}],$$

$$\lambda_{51} = \frac{\frac{1}{T_{51}}}{e^{\frac{1}{T_{51} T_{d5}} - 1}} = \frac{\frac{1}{80}}{e^{\frac{1}{80 \cdot 720} - 1}} = \frac{1}{80 \left(e^{\frac{1}{57600} - 1} \right)} [h^{-1}],$$

$$\lambda_{52} = \frac{\frac{1}{T_{52}}}{e^{\frac{1}{T_{52} T_{d5}} - 1}} = \frac{\frac{1}{80}}{e^{\frac{1}{80 \cdot 720} - 1}} = \frac{1}{80 \left(e^{\frac{1}{57600} - 1} \right)} [h^{-1}].$$

Величине наведене у изразима (26) имају следеће вредности:

$$\lambda_1 = \lambda_{12} + \lambda_{14} + \lambda_{15} = \frac{1}{30 \cdot 400} + \frac{1}{20 \left(e^{\frac{1}{120} - 1} \right)} + \frac{1}{60 \left(e^{\frac{1}{360} - 1} \right)} [h^{-1}],$$

$$\lambda_2 = \lambda_{24} + \lambda_{25} = \frac{1}{120 \left(e^{\frac{1}{760} - 1} \right)} + \frac{1}{60 \left(e^{\frac{1}{480} - 1} \right)} [h^{-1}],$$

$$\lambda_4 = \lambda_{41} + \lambda_{42} + \lambda_{45} = \frac{1}{4 \left(e^{\frac{1}{5760} - 1} \right)} + \frac{1}{8} [h^{-1}],$$

$$\lambda_5 = \lambda_{51} + \lambda_{52} = \frac{1}{40 \left(e^{\frac{1}{57600} - 1} \right)} [h^{-1}].$$

Применом израза (42), затим израза (43.1) – (43.4) налазе се вероватноће сва четири стања после четири године експлоатације парне турбине:

$$p_1 = p_o = 0.9144706648 [-];$$

$$p_2 = p_d = 0.0845860392 [-];$$

$$p_4 = p_m = 0.0009395341 [-];$$

$$p_5 = p_f = 0.0000037619 [-].$$

Збир добијених вероватноћа стања је:

$$p_1 + p_2 + p_4 + p_5 = \mathbf{1.0000000000}.$$

Дакле, потврђен је услов нормираности (24) вероватноћа стања.

6.2.1. Коментар резултата сопствених истраживања³³

Имплементацијом математичког модела стања резултати вероватноћа стања током времена одржавања T_m за уведени модел пет могућих стања парних турбина, како је то раније већ речено за први начин прелаза, приказани су у табели 6.2.

Дијаграми вероватноћа тих стања приказани су на сликама 6.28 – 6.32.

Резултати рачунања одговарајућих вероватноћа стања за други начин прелаза између стања дат је у табели 6.3.

За модел четири могућа стања парних турбина вероватноће стања садржи табела 6.3.

За модел пет могућих стања јасно може да се закључи да вероватноће у оперативном стању имају високе вредности.

Висока поузданост парних турбина остварена је уведеним новим стањем, које се назива **дијагностика стања компоненти (DI)**, где се врши контрола исправности, контрола радне способности и контрола функционалности и истраживање отказа или неисправности (место, облик и узрок).

T_m [год.]	$p_1 = p_o$ [-]	$p_2 = p_d$ [-]	$p_4 = p_m$ [-]	$p_5 = p_f$ [-]	$\sum p_i$ [-]
1	0.9996078108	0.0003880444	0.0000022446	0.0000019002	1.0000000000
2	0.9932670600	0.0066587695	0.0000721316	0.0000020309	1.0000000000
3	0.9612966955	0.0382764842	0.0004240783	0.0000027380	1.0000000000
4	0.9144706648	0.0845860392	0.0009395341	0.0000037619	1.0000000000

Табела 6.3: Вероватноће стационарних стања: $O \rightarrow D \rightarrow F$.

Дијагностика стања компоненти служи да се лакше и тачније може установити да ли су компоненте за одржавање или за отказ, чиме се избегава прелазак у деградацију. Одавде се уочава оправданост увођења новог дијагностичког стања компоненти – **DI**.

У табели 6.2, налазе се израчунате вероватноће стања за пет могућих стања. На слици 6.32 дат је дијаграм вероватноћа отказа $p_5 = p_f$, са кога се уочава да она благо расте током трајања времена експлоатације парне турбине због старења њених компоненти. На сличан начин може да се закључи да вероватноћа оперативног стања $p_1 = p_o$ (в. слику 6.28) опада током рада парне турбине.

Супротно овоме, вероватноће $p_2 = p_d$ (в. слику 6.29), $p_3 = p_{di}$ (в. слику 6.30) и $p_4 = p_m$ (в. слику 6.31) расте током експлоатације. Времена одлучивања T_{ak} о прелазу из стања у стање имају велики утицај на поузданост рада парне турбине. Та времена проистичу из инжењерског искуства стеченог у пракси и експлоатационог истраживања. Развојем софтвера који би подржавао овај модел, нарочито због брзине времена одлучивања прелаза из стања у стање, посматрани модел учинио би да уведени модел буде много ефикаснији.

У табели 6.3. дате су израчунате вероватноће четири могућа стања, где је поштована иста математичка процедура као код модела пет могућих стања. За добијене вредности вероватноћа стања конструисани су дијаграми, приказани на сликама 6.33 – 6.36. Са њих може да се закључи да је већа вероватноћа у деградацији у односу на прелаз код пет стања. У стању деградације много је теже одредити да ли су компоненте за одржавање или за отказ, а потребно је и дужи време због тога што је понекад потребно зауставити парну турбину, а потом и сачекати да се охлади. Ово доводи до дужег прекида у производњи топлотне и електричне енергије.

Овде може да се изврши упоредна анализа модела са пет и четири могућа стања. Модел са четири стања мање је прихватљив за парне турбине термоелектрана и топлана, у односу на неке друге техничке системе где може да се примени и да се добију задовољавајући резултати у смислу поузданости техничких система.

На поузданост парних турбина утичу предложени оптимални интервали одржавања. Код парних турбина термоелектрана и топлана јако је битна имплементација мониторинга одржавања према стању. Континуалним праћењем одређених параметара може благовремено да се открије деградација компоненти. Допринос овог модела је управо надоградња Марковљевог модела четири могућа стања, јер је уведено пето могуће стање: дијагностика стања – *DI*.

Имплементацијом овде развијеног модела пет могућих стања, може да се постигне веома висока поузданост парних турбина, а самим тим и смањење катастрофалних отказа, који могу да узрокују веома велике материјалне губитке, застој у производњи електричне и топлотне енергије, а такође и ризик по радно особље.

После четири године у пуној експлоатацији, односно након 30400 часова експлоатације парне турбине предлаже се генерални ремонт, због тога што долази до постепеног опадања вредности вероватноће оперативног стања $p_1 = p_0$.

6.2.2 Спроведена истраживања у смањењу застоја повишења нивоа поузданости и готовости после примене модела одржавања на бази ризика на парним турбинама у ТЕ-ТО «Нови Сад»

Експлоатациона истраживања која су спроведена током рада парних турбина у ТЕ-ТО «Нови Сад» у Новом Саду на две парне турбине у периоду од 2011. до 2018. године, дата су у поглављу 10. ове дисертације.

У табели 10.3 дата су времена и термини непланских застоја у периоду од 2011. до 2015. године за парну турбину *PT-135/165-130/15*, а у табели 10.4 времена трајања непланских застоја у периоду 2011. до 2015. године за парну турбину *T-110/120-130-4*.

У табели 10.5 дата су времена трајања непланских застоја у периоду од 2016. до краја марта 2018. године за парну турбину *T-110/120-130-4* након примене развијених модела одржавања на бази ризика.

У табели 10.6 дат је преглед стартовања и застоја блока А1 (турбине *PT-135/165-130/15*) и блока А2 (турбине *T-110/120-130-4*) у периоду од 2011. до 2015. године.

У табели 10.7 дат је преглед стартовања и застоја блока А2 (турбине *T-110/120-130-4*) у току 2016. године, након примене модела одржавања на бази ризика.

У спровођењу истраживања смањења застоја и повишења поузданости, посматрана је само парна турбина број 2, односно турбина *T-110/120-130-4*, због тога што

је парна турбина број 1 (PT-135/165-130/15) мало била у експлоатацији, јер није било потребе за њено укључивање у рад.

1. Прорачун смањења застоја

Укупан застој од 2011. до краја марта месеца 2018. године износио је: **15.679 [min]**.

Укупан застој од 2016. до краја марта месеца 2018. године износио је: **206 [min]**.

Укупан застој од 2011. до краја 2015. године износио је: **15.473 [min]**.

Учешће у укупном застоју након увођења модела на бази ризика износи:

$$k_1 = \frac{206 \text{ [min]}}{15679 \text{ [min]}} \cdot 100 \text{ [%]} = 1,32 \text{ [%]}$$

Учешће у укупном застоју пре увођења модела на бази ризика износи:

$$k_2 = \frac{15473 \text{ [min]}}{15679 \text{ [min]}} \cdot 100 \text{ [%]} = 98,68 \text{ [%]}$$

где је k – коефицијент застоја.

- k_1 је коефицијент који се односи на период од 2016. до 2018. године, а
- k_2 је коефицијент који се односи на период од 2011. до 2016. године.

Према томе:

$$k = \frac{k_2}{k_1} = \frac{98,68}{1,32} = 74,75 \text{ [%]}$$

Овде се јасно види да је (k_1) за 74,75% пута мањи од (k_2), што се може сматрати да је време застоја (отказа) веома снижено након примене и увођења модела одржавања на бази ризика.

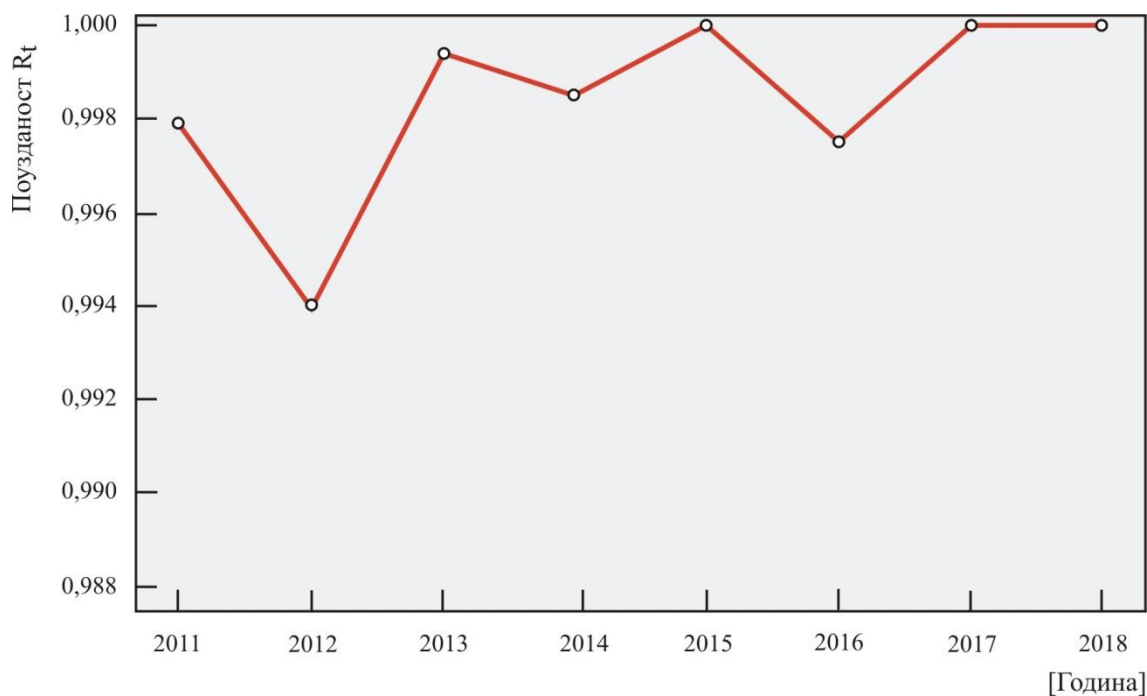
Смањење застоја (отказа) у времену посматрања од 2016. до краја марта 2018. године је за 74,75%, што се може и оправдати увођењем модела одржавања на бази ризика.

На слици 6.37 дат је дијаграм поузданости парних турбина у ТЕ-ТО „Нови Сад“ у периоду од јануара месеца 2011. године до краја марта месеца 2018. године

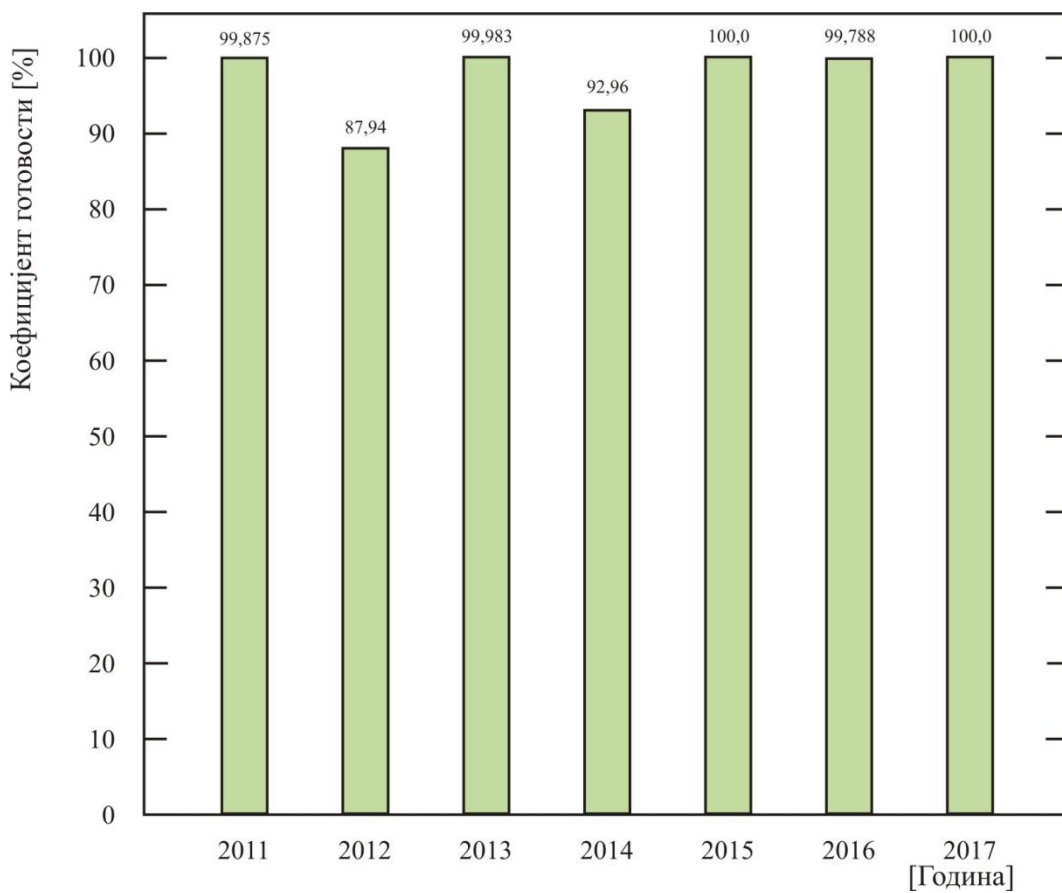
Након примене модела одржавања на бази ризика у периоду од почетка 2016. године до краја марта месеца 2018. године, поузданост рада парних турбина је почела да се повећава.

Са приложеног дијаграма може се јасно прочитати да је поузданост у 2016. години била 0,9975 и да се почела повећавати и достигла је вредност 1,000 у 2017. години. На тој се вредности задржала и до краја марта месеца 2018. године.

На слици 6.38 дат је дијаграм (хистограм) коефицијента готовости (расположивости) парних турбина у ТЕ-ТО „Нови Сад“ у периоду од 2011. до 2017. године, пре примене модела одржавања на бази ризика и после примене модела од 2016. до 2017. године.



Слика 6.37: Дијаграм поуздаости парних турбина у ТЕ-ТО „Нови Сад“ у периоду од јануара месеца 2011. године до краја марта месеца 2018. године



Слика 6.38: Дијаграм (хистограм) коефицијента готовости (распољивости) парних турбина у ТЕ-ТО „Нови Сад“ у периоду од 2011. до 2017. године, пре примене модела одржавања на бази ризика и после примене модела од 2016. до 2017. године.

Са дијаграма се јасно може видети да је након примене модела одржавања на бази ризика готовост у 2016. години износила 0,99788% због испада турбине из рада за кратко време, а разлог испада је био везан за систем заштите и регулације. Сви испади су последица електронског управљања. Принудни застоји су настали због грешака у изради софтвера за електронско управљање система турбогенератора (извршена је модификација заштите и регулације).

У 2017. години готовост (расположивост) је износила 100%.

Поузданост и готовост (расположивост) је израчуната помоћу познатих формула за поузданост и готовост.

6.3. АНАЛИЗА ПРИМЕНА МЕТОДА ПРОЦЕНЕ РИЗИКА

Анализа примена метода процене ризика парних турбина са модификацијом и прилагођавањем извршена је у ТЕ-ТО „Нови Сад“, у Новом Саду.

6.3.1 Анализа примене Делфи методе

У анализи примене Делфи методе процене ризика узет је као пример упитник о ризику и избору средстава индивидуалне заштите помоћника руковоаца турбином и топлификације (табела 6.4).

Опис ризика	Да	Не	Примедбе
<u>Механички ризици</u>			
Ударци	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Парчићи или летеће честице	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Рањавања оштрим предметима	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
<u>Термички ризици</u>			Температура пода и просторије: 20 °С Подвргнут деловању: 8 сати на дан
Ниска температура	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Висока температура	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Топљење метала	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Високи притисак	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
<u>Хемијски ризици</u>			Својства природних продуката (оштре, лако запаљиве, експлозивне итд.)
Прашина	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Агресивне течности	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Токсичне и друге по здравље штетне супстанце	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
<u>Ризик повезан са зрачењем</u>			Дужина или домет таласа: 1 m Примењена метода: СИЗ Интензитет: 10 min
Ултраљубичасто зрачење	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Инфрацрвено зрачење	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Ласерско зрачење	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Јонизујуће зрачење	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Зрачење током заваривања	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
<u>Рад са теретом</u>			
Маса терета од 5 до 200 kg	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
<u>Ризик од хаварије турбине услед појаве експлозије и пожара</u>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

<u>Ризик од повишеног нивоа буке и вибрација</u>	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	
<u>Рад на висини за време ремонта турбине</u>	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	
<u>Услови рада и намештај близу радног места</u> Услови на другим радним местима близу датог радног места Услови на радном месту, ван просторије Услови унутар просторије Површине које зраче у околини	<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Типови услова:
<u>Захтеви повезани са испуњењем задатака</u> Потребна видљивост - добра - врло добра - одлична Дужина употребе СИЗ - периодична употреба СИЗ - дуга употреба СИЗ Захтеви за добар опажај боја Затеви у вези са видним пољем	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	Број радника: 2
<u>Индивидуални аспекти</u> Користе се оптичка корективна средства - наочари - контактна сочива - оптичка корективна средства нису потребна	<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	

Табела 6.4: Упитник о ризику и избору средстава индивидуалне заштите помоћника руковоаца турбине и топлификације

Могуће опасности

Опасности које могу довести до озбиљних повреда могу бити услед хаварија постројења, као и појаве експлозије и пожара, због кретања по погонима јер су постројења и цевоводи под изузетно великим притисцима.

Следећа могућа опасност може бити повреда електричном струјом из нисконапонске и високонапонске мреже (приликом функционалног испитивања опреме).

Могуће штетности

Могуће штетности по здравље могу бити због повишеног нивоа буке и вибрација, снижен ниво осветљености, повишена температура и влажност ваздуха (приликом рада постројења), као и због хемијске штетности, експлозије гаса, мазива и мазута.

Анализирано радно место помоћника руковоаца турбине и топлификације због безбедности и здравља на раду мора носити радну одећу, обућу, шлем, као и средства за личну заштиту и да се сваке године упућује на периодични лекарски преглед.

Из свега изложеног, као и спроведене анкете, може се закључити да овом радном месту припада повећани ризик, као и оправданост примене Делфи методе процене ризика.

6.3.2 Анализа примене логичке анализе грешака

На слици 6.39 дата је анализа шематског приказа стабла грешака, где су приказани могући узроци хаварије парне турбине, као и вероватноће њиховог појављивања, где је вероватноћа хаварије $P = 0,001$ (1 од 1000 случајева). Анализом стања на стаблу грешака може се јасно закључити да могуће хаварије парних турбина могу бити искључиво ако систем заштите парних турбина не изврши своју задату функцију критеријума. Ова метода веома утиче на поузданост турбина.

6.3.3 Анализа примене метода матрица са проценом ризика

У табели 6.5 дати су узроци и врсте отказа у зависности последица од вероватноћа. Последице отказа су приказане и у новчаном износу у еврима. У могућим узроцима и врстама отказа дате су могуће потенцијалне неисправности, које могу да изазову отказе на склоповима, подсклоповима или компонентама. Вероватноћа отказа (*PoF*) су одређене бројчано у зависности од могућег узрока отказа.




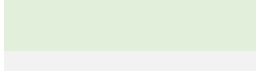
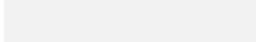
У табели 6.6 извршена је процена ризика кроз матрицу 5x5 (пет вероватноћа – пет последица отказа са назначеним пољима за израчунавање вредности могућих новчаних губитака).

Бр.	Узрок и врста отказа	Вероватноћа (физика) отказа <i>PoF</i>	Последице отказа <i>CoF</i>
1	Затворио се СТОП вентил	0,001	> 1000 €
2	Прорадила механичка заштита која искључује турбоагрегат из рада	0,0011	10.000 -100.000 €
3	Прорадила заштита од превисоког броја обртаја (осигурање од разлетања) која искључује турбоагрегат из рада	0,000015	10.000 -100.000 €
4	Прорадила заштита пад вакуума у кондензатору која искључује турбоагрегат из рада	0,0001	10.000 €
5	Прорадила заштита пад притиска уља у систему за подмазивање лежаја (АУР уљних пумпи) која искључује турбоагрегат из рада	0,0002	10.000 -100.000 €
6	Прорадила заштита ВЗ-2 од пораста притиска која искључује турбоагрегат из рада	0,0001	1000 -10.000 €
7	Прорадила заштита осно померање ротора која искључује турбоагрегат из рада	0,0002	10.000 -100.000 €
8	Прорадила заштита пораста температуре уља за подмазивање лежаја и пад притиска воде за хлађење уља испред уљних хладњака која искључује турбоагрегат из рада	0,005	10.000 -100.000 €
9	Прорадила заштита пораст вибрација која искључује турбоагрегат из рада	0,0001	10.000 -100.000 €

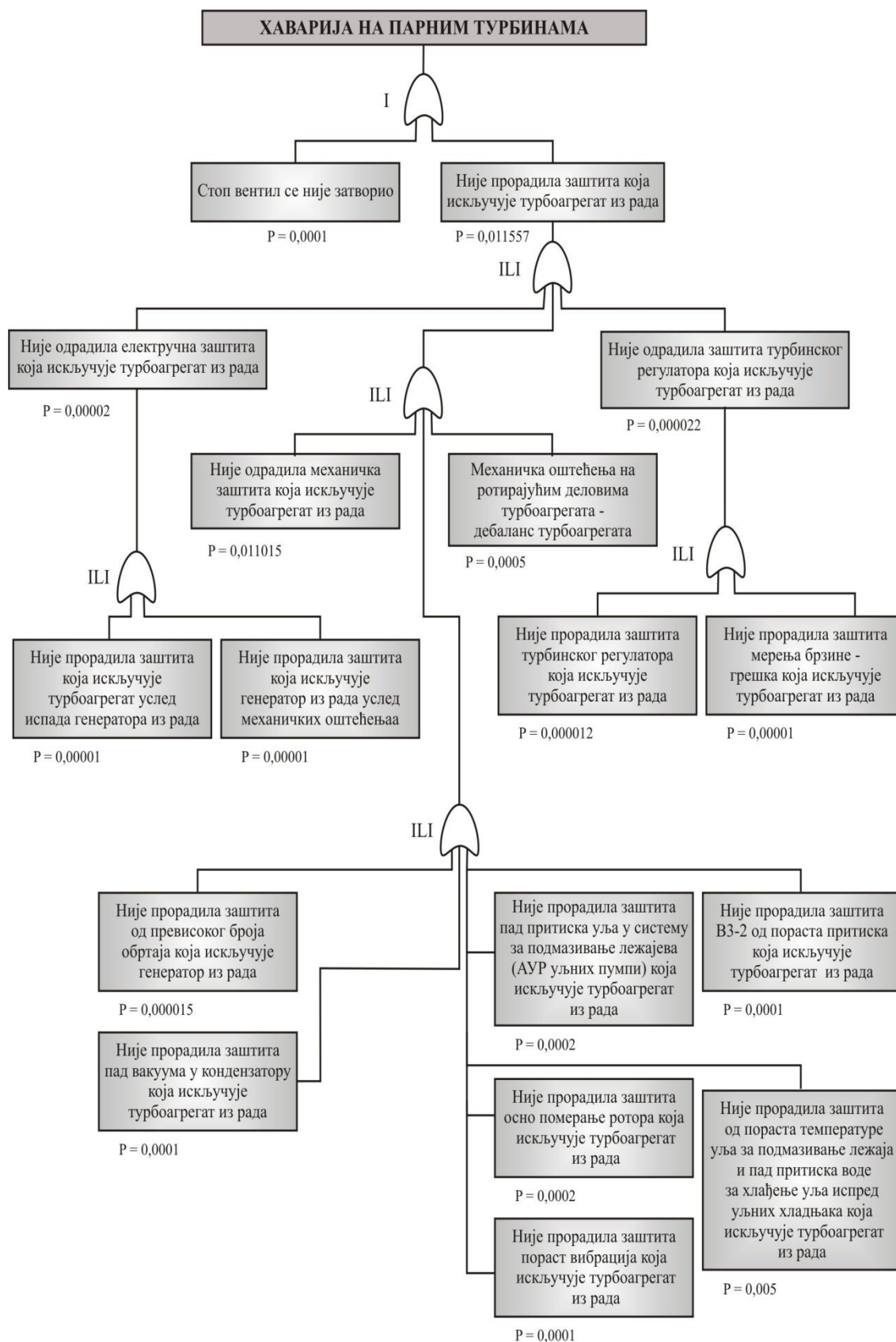
10	Отказ услед механичког оштећења на ротирајућим деловима турбоагрегата - дебаланс турбоагрегата	0,005	< 1000.000 €
11	Прорадила заштита која искључује турбоагрегат из рада услед механичких оштећења	0,00001	< 100.000 €
12	Прорадила заштита која искључује турбоагрегат из рада услед испада генератора	0,00001	1.000 -10.000 €
13	Прорадила заштита турбинског регулатора која искључује турбогенератор из рада	0,000012	1.000 -10.000 €
14	Прорадила заштита мерење брзине – грешка која искључује турбоагрегат из рада	0,00001	1.000 -10.000 €

Табела 6.5: Табела узрока и врста отказа и зависност последица од вероватноће на парним турбинама у ТЕ-ТО „Нови Сад“ у Новом Саду

	A	B	C	D	E	
< 0,01						5
0,001-0,01	x1	x4	x2 x5 x8		x10	4
0,0001-0,001		x6	x7 x9			3
0,00001-0,0001			x3			2
> 0,00001		x13 x14	x12		x11	1
	> 1 к€	1-10 к€	10 -100 к€	100 -1000 к€	< 1000 к€	

Ризик		
	Веома висок	A, B, C, D, E Последице
	Висок	
	Средњи	1,2,3,4,5 Вероватноће
	Низак	
	Без ризика	1к€ = 1000 €

Табела 6.6: Матрица ризика 5x5 – зависност последица од вероватноће



Слика 6.39: Шематски приказ „стабла грешака“ могуће хаварије на парним турбинама у ТЕ-ТО „Нови Сад“ у Новом Саду

Циљ анализе примене метода матрица са проценом ризика приказане контроле засноване на анализи ризика матрицом 5 x 5 је у циљу побољшања ефикасности превентивног одржавања. Она обухвата анализу довољно потребних података (узроке и врсте отказа, израчунате вероватноће отказа и цену коштања поправке) за процес одржавања у вези са турбоагрегатом.

Ова анализа утиче и на друштвену одговорност као и безбедност и здравље на раду. Она нам даје добру слику за рационално доношење одлуке код процеса одржавања или наставка експлоатације турбоагрегата. Анализа примене која је приказана у овој дисертацији заснована је на вероватноћи отказа и његове последице, где је ризик јаданак производу вероватноће отказа и његове последице.

На турбоагрегату су анализиране све могуће фазе оштећења опреме које би могле проузроковати отказе и настале последице. У табели 6.6 на вертикалним колонама је анализирана вероватноћа отказа која је дата бројчано од 1 до 5 са процењеним вероватноћама отказа. Посматрани су откази који се јављају у времену и броју понављања. Назначени степени и вероватноће ризика су модификовани и прилагођени за турбоагрегат, где је 1 (веома мало вероватно), 2 (мало вероватно), 3 (вероватно), 4 (могуће) и 5 (веома могуће). У хоризонталним редовима дате су категорије последица отказа (А; В; С; D; Е) које се јављају настанком отказа и које су повезане са ценом коштања у случају могућег отказа, где су: А (безначајне последице), В (значајне последице), С (озбиљне последице), D (веома озбиљне последице) и Е (катастрофалне последице).

Из свега овога може се закључити да ова анализа примене метода матрица са проценом ризика има велики утицај на поузданост турбоагрегата јер је извршена процена ризика вероватноћа могућих отказа као и њиховим последицама на конкретном примеру која је применом у пракси дала добре резултате.

6.3.4 Дискусија резултата истраживања и поређење са другим уз утврђивање међусобне сличности и разлика

Нарочити захтеви који се постављају у експлоатацији парних турбина и побољшању њихових перформанси указују да у будућности треба посветити све већу пажњу одржавања на бази ризика.

Откази елемената парних турбина имају често непредвидиве последице на материјална и природна добра. Да би се спречили откази парних турбина потребно је да сви елементи постројења имају одговарајућу поузданост. Сваки уграђени елемент код парних турбина треба да обезбеди потребну поузданост рада турбине како би се омогућило несметано одвијање технолошког процеса.

Одржавање парних турбина у погледу динамике и садржаја спровођења мора бити базирано на ризицима. Због тога се мора спровести одржавање које ће обезбедити оптималне ефекте уз минималне трошкове рада. Основни правци одржавања на бази ризика парних турбина морају бити усмерени на дефинисање поступака и критеријума оптимизације који ће омогућити најповољније односе перформанси система одржавања, односно поузданости парних турбина и трошкова одржавања.

У литератури^{2,3,30} погонски инжењери су често суочени са проблемом одређивања оптималног интервала инспекција и поправке критичних склопова машина и постројења који се не могу одржавати током функционисања система. Увођењем учесталих провера постројења доводи до непотребних и високих трошкова. С друге

стране, продужавање интервала између активности одржавања представља потенцијалну опасност отказа компоненти који могу да резултирају значајним економским последицама. Стандардни приступи поузданости узимају у обзир два стања за компоненте: стање у раду и стање у отказу. На овај начин није могуће квантификовати позитиван, већ само негативан утицај поступка одржавања. Дефинисањем деградационих стања компоненти, како у оперативном стању тако и у отказу, пружа се могућност да се спречи и поправи деградација пре него што дође до отказа, односно вреднује утицај одржавања на поузданост а самим тим и на ризик.

Модел четири стања по Маркову^{2,30} представља моћан алат за оцењивање корисних ефеката активности одржавања и одређивање оптималних интервала одржавања, на основу поузданости компонената. Овај модел дефинише следећа стања компоненти, (*O*) оперативно стање компоненти са нормалним перформансама, (*D*) деградирана стања компоненти са деградираним али функционалним перформансама, (*M*) стање компоненти спремно за одржавање, (*F*) стање компоненти у отказу.

Могуће перформансе за приказани модел су:

- p_o - вероватноћа да је компонента у оперативном стању у датом тренутку,
- p_d - вероватноћа да је компонента у стању деградације у датом тренутку,
- p_m - вероватноћа да је компонента у стању одржавања у датом тренутку,
- p_f - вероватноћа да је компонента у стању отказа у датом тренутку.

Конечно, вероватноће стања одређују се на основу израза који су дати у овој литератури. Када постоје потребни подаци о отказима и о одржавању онда се преносни нивои могу директно проценити коришћењем тих података и одговарајућих статистичких техника.

Најчешће ови подаци нису доступни, па се преносни нивои изражавају инжењерским терминима, како би модел Маркова био практичан за употребу.

У раду³³ под називом: *Модел пет стања и његова имплементација на поузданост парних турбина* је уведен модел пет могућих стања у којима се парне турбине могу налазити током експлоатације. Помоћу овог модела се могу дефинисати стања парних турбина и који представљају надоградњу Марковљевог модела четири стања уведеног у раду² и извештају³⁰, јер је уведено ново пето стање дијагностика стања (*DI*). Дакле посматра се кумулативни модел пет стања компонената неког постројења. Израз кумулативни модел уведен је да би се обухватила и описала четири могућа начина прелаза у стање отказа, а који се морају спречити. Детаљи ових начина приказани су на сликама 5.8 и 5.9. Усвојени модел пет могућих стања у којима се парне турбине могу налазити, развијен је као методологија која спречава да не дође до појаве изненадних отказа, који могу да изазову велике хаварије, застоје у производњи електричне и топлотне енергије, а самим тим и ризик по радно особље. Предложени су оптимални временски интервали одржавања на годишњем нивоу односно после 7600 часова рада у пуној експлоатацији рада парне турбине, за два могућа начина прелаза у отказ (*O-D-DI-F*) и (*O-D-F*), односно ови предложени интервали ће спречити да не дође до преласка у стање отказа. Израчунате су вероватноће могућих стања у посматраним и предложеним интервалима одржавања. Резултати рачунања одговарајућих вероватноћа стања за први могући начин прелаза (*O-D-DI-F*) између стања дати су у табели број 6.2, а за други могући начин прелаза у стање отказа (*O-D-F*) резултати рачунања одговарајућих вероватноћа стања дати су у табели број 6.3. Вероватноће стања за

модел пет стања приказане су графички на сликама 6.28 до 6.32, а вероватноће стања за модел четири стања приказане су графички на сликама 6.33 до 6.36.

Помоћу овог модела могу се вероватноће стања одредити у сваком тренутку на основу брзине прелаза између стања које су изражене помоћу параметара истраживања, као и параметара одржавања компонената до којих се долази истраживањем и инжењерским искуствима.

Помоћу модела пет могућих стања парних турбина може да се оствари већа поузданост у односу на модел четири стања јер је уведено ново стање, које се назива дијагностика стања компонената (*DI*) где се врши (контрола исправности, контрола радне способности, контрола функционалности и истраживање отказа или неисправности (место облик и узрок). У дијагностици стања може лакше и брже да се одреди дали су компоненте за одржавање или отказ. У стању деградације много је теже одредити дали су компоненте за одржавање или за отказ а потребно је и дужи време због тога што је понекад потребно зауставити парну турбину, а потом и сачекати да се охлади. Ово доводи до дужег прекида у производњи топлотне и електричне енергије. Овде може да се изврши упоредна анализа модела са пет и четири стања. Модел са четири стања мање је прихватљив за парне турбине термоелектрана и топлана у односу на неке друге техничке системе где може да се примени и да се добију задовољавајући резултати у смислу поузданости посматраних техничких система.

У литератури³¹ развијен је модел одржавања на бази ризика парних турбина у виду алгоритма. На основу величине одступања измерених од нормалних вредности дијагностичких параметара оцењује се стање (степен неисправности) парних турбина и на основу тога доноси дијагностичка одлука о даљим активностима одржавања (о наставку или заустављању рада погона).

Помоћу овог алгоритма могу да се оцене стања парних турбина и то: добро, задовољава, незадовољава и недозвољено.

На основу развијеног модела и његове примене као алгоритма праћења рада парне турбине, правовремених и прецизних информација о стању виталних компонената парне турбине могу се отказати детектовати у почетној фази настанка, чиме су створени услови да се предузимањем правовремених одговарајућих активности одржавања у технолошки најповољним тренутцима спрече катастрофални откази као и хаварије, а тиме и трошкови и опасности по људе и околину.

Примена мониторинга одрђених параметара^{40,41,42}, које се прате континуално током експлоатације парне турбине доприноси порасту нивоа поузданости⁴³ као и рано откривање деградационих стања компонената. Откривањем деградационих стања

⁴⁰ Станковић, Н., Адамовић, Ж., Илић, В., Савић, Б.: Значај техничке дијагностике за поуздан рад парних турбина, Научно-стручни часопис Техничка дијагностика, Вол. 12, № 1, пп. 20-30, Београд, 2013.

⁴¹ Станковић, Н., Адамовић, Ж.: Техничка дијагностика парних турбина на бази ризика, Научно-стручни часопис Техничка дијагностика, Вол. 12, № 2, пп. 55-59, Београд, 2013.

⁴² Станковић, Н., Адамовић, Ж.: Методе техничке дијагностике за анализу стања парних турбина, Научно-стручни часопис Техничка дијагностика, Друштво за енергетску ефикасност Босне и Херцеговине, Вол. 6, № 3-4, пп. 52-58, Бања Лука, 2014.

⁴³ Станковић, Н., Адамовић, Ж., Милисављевић, Б.: Методе процене поузданости парних турбина, XV Конференција, Техничка дијагностика машина и постројења, Врњачка Бања, октобар, 2015.

компонената пружа се могућност да се у дијагностици стања⁴⁴ утврде и идентификују неисправности које се у зависности од степена дегредације поправљају и отклањају у најкраћем року. Спровођењем овог модела могу да се открију незадовољавајуће вредности где се парна турбина аутоматски искључује, затим се у дијагностици стања утврђују неисправности и предлаже замена, поправка или ремонт саставних компоненати.

У стандарду ИЕС 60300-3-9:1995, између осталог, развијене су и прописане методе: Делфи метода, метода логичке анализе и метода матрица са проценом ризика. Извршена је њихова анализа и примена на парне турбине и особље које опслужује (рукује) парним турбинама у реалним условима.

6.4 ИСТРАЖИВАЊА ПРЕДНОСТИ ИМПЛЕМЕНТАЦИЈЕ МОДЕЛА ОДРЖАВАЊА НА БАЗИ РИЗИКА НА ТУРБОГЕНЕРАТОРУ У ТЕРМОЕЛЕКТРАНИ „КОСТОЛАЦ“

Ова истраживања су вршена на турбогенератору (генератор TVF-100-2 и турбина К-100-9) у Термоелектрани „Костолац“ у периоду од две године (2016 - 2017).

Предности имплементације модела одржавања на бази ризика у односу на неке друге моделе су:

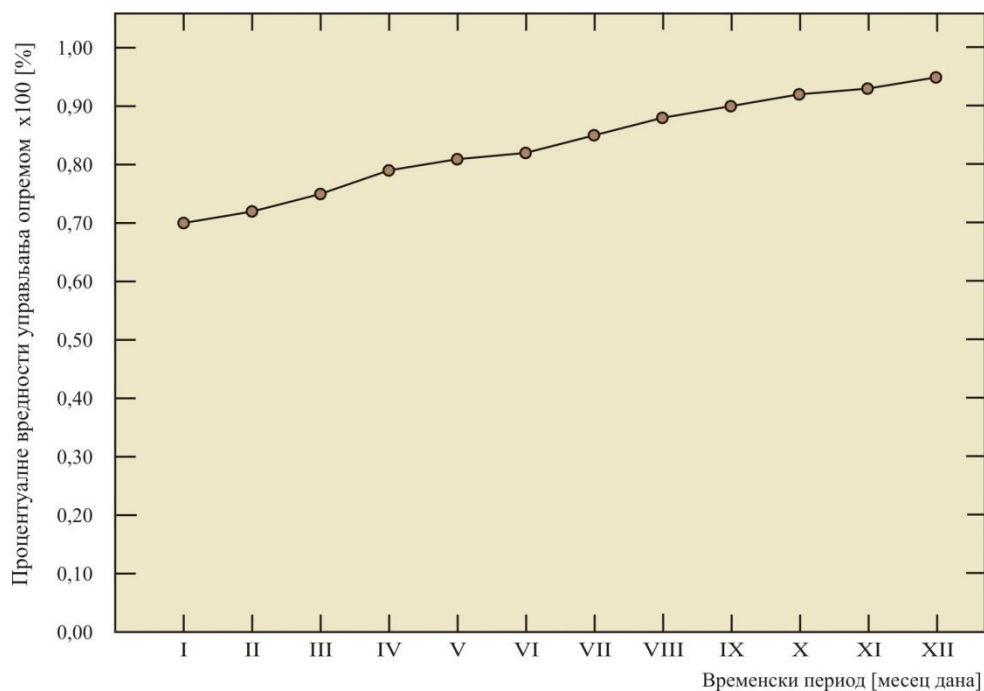
- праћење потребних одређених дијагностичких параметара се изводи континуално у нормалним и реалним погонским условима
- на основу величине одступања измерених у односу на нормалне вредности дијагностичких параметара оцењују се стања (степен неисправности) турбогенератора и на основу тога доноси се дијагностичка одлука о даљим активностима одржавања (о наставку или заустављању рада)
- откривања дијагностичких стања компонената у почетној фази, где се избегавају већи застоји, откази или хаварије
- аутоматско читавање измерених величина, као и бројчани и графички приказ
- чување у рачунару измерених података и праћење тренда промене стања система
- одређивање помоћу математичког модела временских интервала на годишњем нивоу за превентивно одржавање
- одређивање временског и годишњег нивоа у пуној експлоатацији турбогенератора генералног ремонта
- управљање дијагностичком опремом подигнуто је на већи ниво, што је приказано на слици 6.40.

Даља истраживања која су вршена показала су да је услед застоја турбогенератора због поправке дошло до губитака у производњи електричне енергије.

Ако су трошкови одржавања 5000 €, онда су укупни трошкови за предузеће 15000 € или 80000 €. Због тога је велики ризик за термоенергетски погон да се утврђују

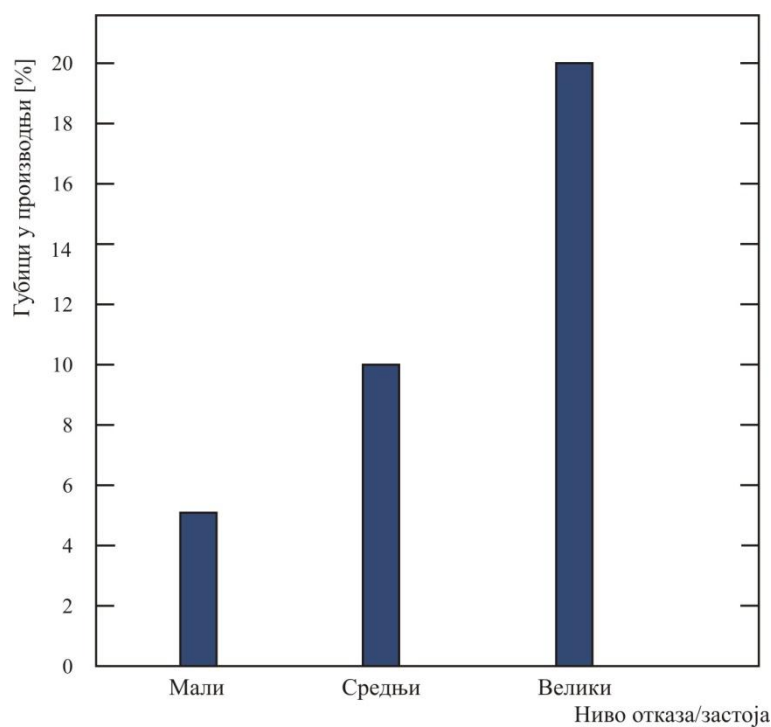
⁴⁴Станковић, Н., Адамовић, Ж., Савић, Б., Јанић, Н., Илић, Б.: Дијагностика стања парних турбина, XVII Конференција „Проактивно одржавање машина“, Врњачка Бања, 10.11.2017.

трошкови одржавања или неодржавања, па је самим тим јако важно увођење одржавања на бази ризика.



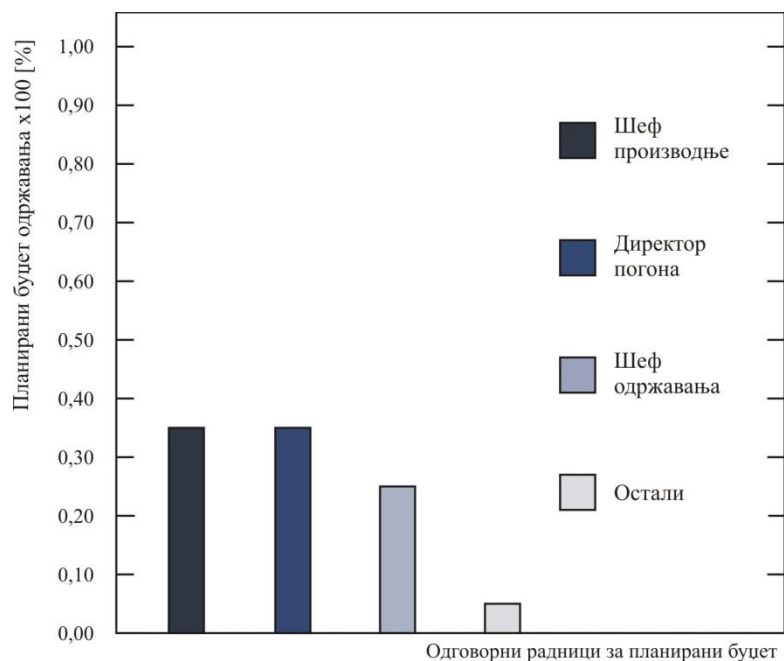
Слика 6.40: Временски период управљања мерно-контролном опремом у Термоелектрани „Костолац“

На слици 6.41 дат је графички приказ губитака у производњи услед застоја (отказа) због поправки турбогенератора у Термоелектрани „Костолац“.



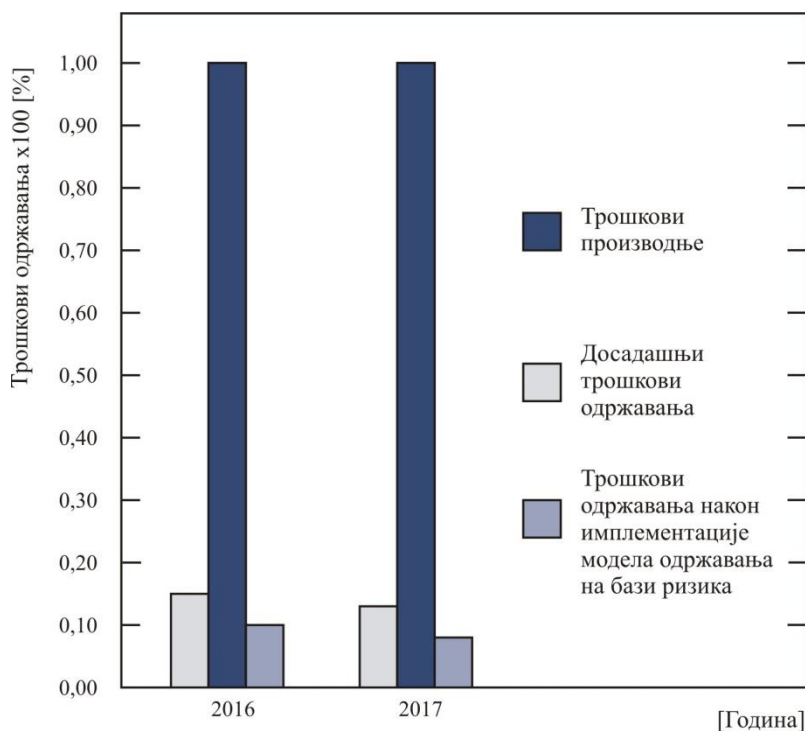
Слика 6.41: Графички приказ губитака у производњи услед застоја (отказа) због поправки турбогенератора у Термоелектрани „Костолац“.

Велики проблем представља контрола финансијског буџета одржавања за термо-енергетски погон. Директор погона или шеф производње је одговоран за планирани буџет одржавања турбогенератора. На слици 6.42 је дат графички приказ одговорности за формирање финансијског буџета одржавања турбогенератора у Термоелектрани „Костолац“.



Слика 6.42: Графички приказ одговорности за формирање финансијског буџета одржавања турбогенератора у Термоелектрани „Костолац“

Увођењем одржавања на бази ризика дошло је до смањења трошкова одржавања и повећање профита. Ова зависност је приказана графички на слици 6.43.



Слика 6.43: Смањење трошкова одржавања и повећање профита након увођења одржавања на бази ризика

Са слике се може видети зависност трошкова досадашњег одржавања, трошкова производње и трошкова одржавања са имплементацијом модела одржавања на бази ризика.

Даљом имплементацијом модела одржавања на бази ризика треба да се и даље смањују трошкови одржавања у наредним годинама, а због смањења застоја (отказа) у производњи.

У табели 6.7 дат је број отказа (неисправности) клизних лежишта пре примене модела одржавања на бази ризика, као и након примене модела.

<i>Редни број</i>	<i>Називи клизних лежишта турбогенератора</i>	<i>Откази – неисправности пре примене модела</i>	<i>Откази – неисправности после примене модела</i>
<i>1</i>	Предње клизно лежиште цилиндра високог притиска (H_1)	10	5
<i>2</i>	Задње клизно лежиште цилиндра високог притиска (H_2)	7	3
<i>3</i>	Предње клизно лежиште цилиндра високог притиска (H_3)	15	6
<i>4</i>	Задње клизно лежиште цилиндра високог притиска (H_4)	13	7
<i>5</i>	Предње клизно лежиште генератора (H_5)	10	5
<i>6</i>	Задње клизно лежиште генератора (H_6)	12	6
<i>7</i>	Предње клизно лежиште будилице (H_7)	13	7
<i>8</i>	Задње клизно лежиште будилице (H_8)	9	4

Табела 6.7: Број отказа (неисправности) клизних лежишта пре примене модела одржавања на бази ризика, као и након примене модела

Применом модела одржавања на бази ризика од јануара 2016. године до краја децембра 2017. године смањени су откази (неисправности) на клизним лежиштима турбогенератора, а тиме и повећана поузданост, како клизних лежишта, тако и целог турбогенератора.

На слици 6.44 дат је графички приказ поузданости пре примене модела од 2014. до 2015. године, као и после примене модела на бази ризика у току 2016. и 2017. године.

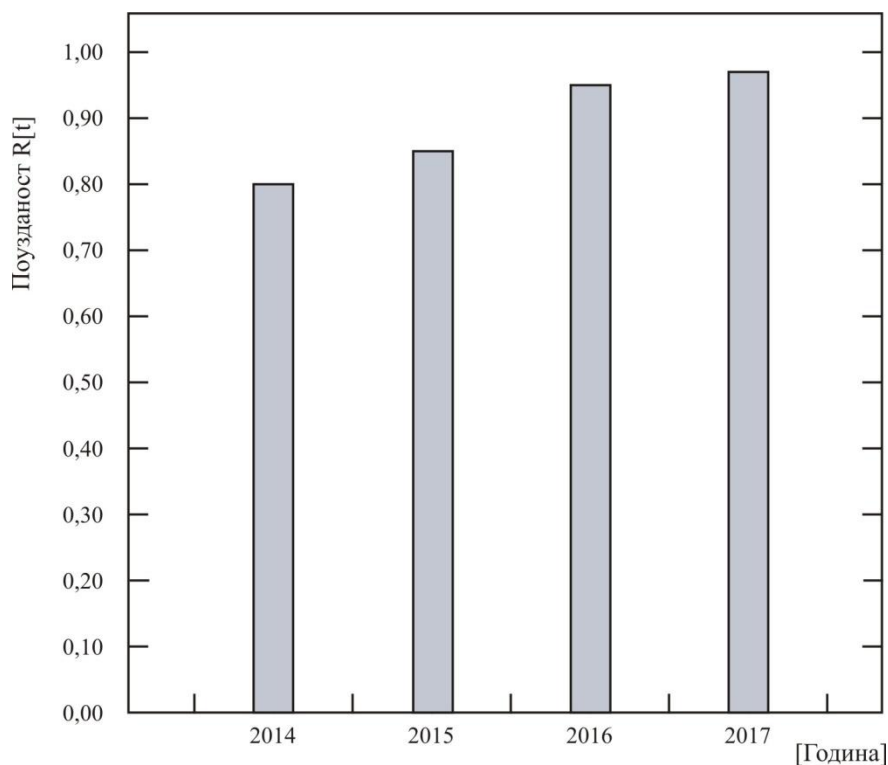
Са поменутог дијаграма се јасно може видети да је поузданост у 2016. години повећана и износи 0,95, а у 2017. години је још и већа и износи 0,97.

На основу тога се може закључити да је у Термоелектрани „Костолац“ била оправдана имплементација модела одржавања на бази ризика.

Увођењем модела одржавања на бази ризика може се закључити следеће:

- смањени су губици у производњи услед застоја (отказа) због поправке турбогенератора.

- смањени су трошкови одржавања након имплементације модела одржавања на бази ризика
- повишен је ниво планираних превентивних активности одржавања турбогенератора
- повишен је ниво планираног генералног ремонта турбогенератора и
- повећана је поузданост компонента турбогенератора.



Слика 6.44: Графички приказ поузданости турбогенератора у термоелектрани „Костолац“ у периоду од 2014. до 2017. године

6.5 ДОКАЗ ГЛАВНЕ ХИПОТЕЗЕ

Полазећи од главне хипотезе: Могуће је формирати моделе одржавања на бази ризика у циљу повишења нивоа поузданости парних турбина у процесу експлоатације и резултата експлоатационих и сопствених истраживања можемо закључити да је доказана главна хипотеза.

Доказивањем хипотезе је базирано на основу експлоатационих и сопствених истраживања.

На основу њих формиран су модели и то:

- 1) Модел одржавања на бази ризика и његов утицај на поузданост парних турбина у виду алгоритма.
- 2) Математички модел пет стања и његова имплементација на поузданост парних турбина

Активности које се спроводе при формирању, развоју и имплементацији модела одржавања на бази ризика су:

Прва активност истраживања обухватила је упознавање са актуелним достигнућима у области теоријских модела одржавања на бази ризика.

Друга активност истраживања обухватила је експлоатациона истраживања (праћења) од 2011. до 2015. године, непланских застоја за две парне турбине са узроцима и њиховим последицама као и експлоатациона праћења након примене развијеног модела одржавања на бази ризика у децембру 2016. године брзина вибрација на клизним лежиштима парне турбине, затим температуре метала сегмената аксијалног лежишта, температура уља иза хладњака, притисак расхладне воде пред уљним хладњацима, температура уља испред хладњака иза *РУП* (резервна уљна пумпа) и *ХУП*, (хаваријска уљна пумпа) притисак уља за регулацију, притисак уља за подмазивање.

Трећа активност обухвата теоријска истраживања заснована на обради сакупљених података експерименталног истраживања за одређивање брзина прелаза између појединих стања.

Нови апликациони приступи који омогућавају детерминацију преносних нивоа на основу стандардних података, инжењерских искустава и стања из праксе. Овакв приступ може да се усвоји код парних турбина. Када постоји довољно података о одржавању и отказима тада се брзине прелаза могу лако да се оцене коришћењем одговарајућих података помоћу статистичких метода оцене. Међутим ови подаци често нису доступни, па су времена прелаза из стања (*i*) у стање (*j*) као и просечна (*k*) времена одлучивања о прелазу из стања у стање узета и сакупљена истраживања, инжењерских искустава и праксе, као и према постојећим стандардима и прописима који се односе на рад парних турбина.

На основу претходних активности формиран су модели: *Модел одржавања на бази ризика* и његов утицај на поузданост парних турбина у виду алгоритма и *Модел пет стања* и његова имплементација на поузданост парних турбина.

Доказивањем главне хипотезе долази се до закључка о испуњености главне хипотезе; Могуће је формирати моделе одржавања на бази ризика у циљу повишења поузданости парних турбина у процесу експлоатације. Модел у виду алгоритма и математички модел имају велики утицај на поузданост рада парних турбина што је и доказано у њиховом развоју као и практичној имплементацији. Јасно се може извести закључак да је дат и одговор на наслов дисертације.

7. ЗАКЉУЧАК

Основни циљ истраживања у овој докторској дисертацији био је да се на основу теоријских и емпиријских сазнања развију нови модели одржавања на бази ризика, парних турбина и да се испита дали утичу на повећање укупног нивоа поузданост и расположивости у процесу експлоатације посматраних парних турбина, затим следећи циљ је био експлоатациона праћења рада и континуална праћења одређених дијагностички параметара, као и њихов утицај на поузданост посматраних парних турбина.

Главни закључак који се намеће из овог рада, а што је уједно и одговор на наслов дисертације јесте, да су успешно развијени модели одржавања на бази ризика парних турбина и као такви примењени у практичним условима, као и њихов утицај на повећању укупне поузданости и расположивости парних турбина дали у пракси добре резултате. Потврда наслова дисертације разматра се кроз потврде главне хипотезе рада.

Као потврда главне хипотезе намеће се пре свега развој нових модела у циљу повишења нивоа поузданости парних турбина у процесу експлоатације и то:

- модел одржавања на бази ризика и његов утицај на поузданост парних турбина у виду алгоритма.³¹
- математички модел пет могућих стања и његова имплементација на поузданост парних турбина.³³

За модел пет могућих стања у којима се парне турбине могу налазити (оперативно стање, деградационо стање, стање дијагностификовања, стање одржавања и стање отказа) јасно може да се закључи да вероватноће у оперативном стању имају високе вредности. Висока поузданост парних турбина остварена је надоградњом Марковљевог модела четири стања са уведеним новим стањем које се назива дијагностика стања компоненти (DI) где се врши контрола исправности, контрола радне способности контрола функционалности и истраживање отказа-застоја или неисправности (место, облик и узрок). Дијагностика стања компонената служи дасе лакше и тачније може установити да ли су компоненте за одржавање или за отказ, чиме се избегава прелазак у деградацију. Одавде се уочава оправданост увођења новог дијагностичког стања компоненти (DI). У стању деградације много је теже одредити да ли су компоненте за одржавање или за отказ, а потребно је и дуже време због тога што је понекад потребно зауставити парну турбину, а потом и сачекати дасе парна турбина охлади. Ово доводи до дужег прекида у производњи топлотне и електричне енергије.

На поузданост парних турбина утичу предложени оптимални интервали одржавања. Код парних турбина термоелектрана и топлана јако је битна имплементација мониторинга одржавања према стању. Континуалним праћењем одређених параметара може благовремено да се открије деградација компонената. Имплементација развијеног математичког модела пет могућих стања, може да се постигне веома висока

поузданост парних турбина, а самим тим и смањење катастрофалних отказа, који могу да узрокују веома велике материјалне губитке, застој у производњи електричне и топлотне енергије, а такође и ризик по радно особље и околину.

Први модел који је развијен одржавања на бази ризика и његовог утицаја на поузданост парних турбина у виду алгоритма, а који уједно и подржава математички модел пет могућих стања у којима се могу налазити парне турбине, представља методологију праћења експлоатације и одржавања парних турбина. Помоћу овог модела врши се континуално праћење одређених дијагностичких параметара који су наведени и набројани у делу поглавља 5.1. На основу величине одступања измерених од нормалних вредности дијагностичких параметара оцењују се стања (степен неисправности) парних турбина и на основу тога доноси дијагностичка одлука о даљим активностима одржавања (о наставку или заустављања рада погона).

Циљ предложеног алгоритамског модела одржавања на бази ризика и његовог утицаја на поузданост парних турбина је да идентификује почетна одступања карактеристика и стања опреме од пројектованих, односно да анализом параметара битних за рад парних турбина детектује отказе у почетној фази настанка односно открију деградациона стања, чиме се стварају услови да се правовременим предузимањем одговарајућих активности одржавања у технолошком најповољнијем тренутку спрече тежи откази и хаварије а тиме трошкови и опасности по људе и околину.

На основу увида у велики број дијагностичких параметара парне турбине, могуће је остварити увид у стање опреме и погона у реалном времену, детектовати отказе у почетној фази настанка, спречити или смањити последице отказа, анализирати узроке отказа, извршити оптимизацију управљања опреме, провести одржавање према стању. Откривањем деградационих стања компонената пружа се могућност да се у дијагностици стања утврди и идентификују неисправности које се у зависности од степена деградације поправљају и отклањају у најкраћем року.

Спровођењем овог модела могу да се открију незадовољавајуће вредности где се у дијагностици стања⁴⁴ утврђују неисправности и предложе замене, поправке или ремонт саставних компоненти. Значај правовремене (ране) детекције и идентификације отказа парних турбина која се остварује применом модела одржавања на бази ризика је од изузетне важности, јер омогућује да се предузимањем одговарајућих активности одржавања у најповољнијем тренутку:

- смањи број отказа-застоја (прекида у раду) термоенергетског погона и повећа ниво расположивости парних турбина,
- скрати време у застоју (прекида у раду) термоенергетског погона и повећа ниво расположивости парних турбина,
- спрече већи откази-застоји и хаварије парних турбина, а тиме и велики материјални трошкови (финансиски губици),
- спрече додатна оштећења и угрожавање рада целокупног термоенергетског погона,
- спрече опасности по радно особље термоелектране и околину,
- спрече експлозије и пожар у термоенергетском погону,
- смање активности класичних превентивних активности парних турбина,

- смање активности корективног одржавања парних турбина,
- оствари оптималније планирање активности одржавања парних турбина и
- смање трошкови одржавања парних турбина.

У резултатима експлоатационих праћења на парним турбинама у ТЕ-ТО „Нови Сад“ застоја, која су дата у делу поглавља 10. Прилози од 2016. до краја марта 2018. године за две парне турбине било је веома мало застоја која су углавном била због прораде заштите (лажни сигнал)

На основу континуалних праћења одређених параметара након примене развијеног модела одржавања на бази ризика као што су: брзине вибрација клизних лежишта, број обртаја ротора, температуре уља иза хладњака, притисак расхладне воде пред уљним хладњацима, температуре уља испред хладњака и иза РУП (резервне уљне пумпе) и ХУП (хаваријске уљне пумпе), притисак уља за регулацију, притисак уља за подмазивање и температуре метала сегмената аксијалних лежишта која су дата у делу поглавља 6.1, може се закључити да је рад свих параметара у дозвољеним границама, а да се у овом случају видело да није било потребно никакве интервенције предузимати. Увођењем новог развијеног система за надзор и управљање парних турбина³⁵ у виду хардверске и софтверске функционалности има велики утицај на поузданост рада парних турбина. Применом модела на парним турбинама ТЕ-ТО „Нови Сад“, које је спроведено у 2016., 2017. и 2018. години може се закључити да су откази и застоји смањени за 74,75% и самим тим поузданост се почела повећавати од 2016. године, која је била 0,9975 на 1,000 у 2017. године, која се задржала све до марта месеца 2018. године (ови подаци су дати у делу поглављу 6.2.2). Такође, остварене су и знатне уштеде због смањених трошкова одржавања и смањених губитака у производњи топлотне и електричне енергије, чиме је и потврђена успешност развијених модела.

У анализи примена метода процене ризика, која је дата у делу поглавља 6.3, извршена је следећа анализа:

1. Анализа примене Делфи методе, где су кроз анкету упитника о ризику и избору средстава индивидуалне заштите помоћника руковооца турбином и топлификацијом, процењене могућности опасности и могуће штетности по здравље
2. Анализа примене логичке анализе грешака (које су приказане шематски у облику Стабла грешака) и могући узроци хаварија посматраних парних турбина, као и вероватноће њиховог појављивања. Анализом стања на Стаблу грешака може се јасно закључити да могуће хаварије парних турбина могу бити ако систем заштите парних турбина не изврши своју задату функцију критеријума.
3. Анализа примене метода матрица са проценом ризика табеларно су приказани узроци и врсте отказа у зависности од вероватноће и последица. Последице отказа су приказане и у новчаном износу. Такође је у табели извршена процена кроз матрицу ризика 5x5 у зависности последица од вероватноће.

Истраживањем предности имплементације модела одржавања на бази ризика у односу на неке друге моделе, која су вршена у Термоелектрани „Костолац“ на турбогенератору, дошло се до следећих закључака:

- управљање дијагностичком опремом је подигнуто на виши ниво
- смањени су губици у производњи услед застоја (отказа)
- смањени су трошкови одржавања након имплементације модела одржавања на бази ризика
- повишен је ниво планираних превентивних активности одржавања
- повишен је ниво планираног генералног ремонта
- повећана је поузданост компонента турбогенератора.

7.1 КЉУЧНИ ЗАКЉУЧЦИ

Закључено је да се могу развити модели одржавања на бази ризика у циљу повишења нивоа поузданости парних турбина у процесу експлоатације и то:

- модел одржавања на бази ризика и његов утицај на поузданост парних турбина у виду алгоритма,
- математички модел пет стања и његова имплементација на поузданост парних турбина.

На основу развијених модела одржавања на бази ризика као и њихове примене долази се до сазнања њиховог утицаја на, и то:

- повишење поузданости рада парних турбина,
- продужење века трајања парних турбина,
- смањење трошкова одржавања парних турбина,
- смањи број отказа или застоја парних турбина,
- скрати време у застоју (прекид рада) термоенергетског погона и повећа ниво расположивости,
- спрече већи откази и хаварије парних турбина, а тиме и велики материјални трошкови (финансијски губици),
- спрече додатна оштећења и угрожавање рада целокупног термоенергетског погона,
- спрече опасности по радно особље термоелектране а и околине,
- спрече експлозија и пожар у термоенергетском погону,
- смање активности класичних превентивних активности парних турбина,
- смање активности корективног одржавања парних турбина,
- оствари оптималније планирање активности одржавања парних турбина и
- смање трошкови одржавања парних турбина.

7.2 ТЕОРИЈСКИ ДОПРИНОС ДИСЕРТАЦИЈИ

Теоријски допринос ове докторске дисертације се огледа у томе што је проучавањем релевантне домаће и међународне литературе извршена синтеза бројних сазнања до којих су дошли еминентни стручњаци у овој области, тако да ова дисер-

тација представља и значајан прилог литературе, јер је недовољан број радова код нас који се баве овом проблематиком, нарочито за стручњаке који желе да се баве одржавањем на бази ризика парних турбина као и уопште техничких система, посебно техничких система које је потребно пратити у процесу експлоатације са становишта поузданости и ризика. У литератури дисертације је дат велики број назива међународних радова која је проучавана током израде ове докторске дисертације.

7.3 ПРИВРЕНИ ДОПРИНОС ДИСЕРТАЦИЈЕ

Привредни допринос истраживања која су спроведена током израде ове дисертације огледа се у добијеним резултатима истраживања који представљају значајан допринос за праксу и науку при решавању конкретних проблема у области одржавања парних турбина на бази ризика у термоелектранама-топланама. Развијени модели одржавања на бази ризика имају могућност примене у термоелектранама наше земље, што ће допринети да се и у термоелектро индустрији примењују светски стандарди и прате трендови у области дијагностике и одржавања термоенергетских система.

Ови модели се исто тако могу примењивати и на друге парне турбине у другим гранама привреде.

Развијени модели одржавања на бази ризика, уз мање модификације имају могућност примене на техничке системе који обављају неку другу задату функцију критеријума, што ће допринети унапређењу постојеће праксе одржавања техничких система.

Непосредна примена сазнања стеченим овим истраживањима допринеће да се у термоенергетској индустрији наше земље примењују светски стандарди и прате трендови у области одржавања на бази ризика парних турбина.

Резултати који су дати истраживањем показују и да стратегију привредног развоја, која се односи на одржавање сложених техничких система као што су парне турбине треба усмерити на развој и примену савремене дијагностичке опреме што укључује и друге привредне капацитете, ради производње савремених дијагностичких система.

Набавка савремених дијагностичких система мора бити искључиво од акредитованих, проверених и познатих привредни субјеката.

7.4. ДРУШТВЕНИ ДОПРИНОС ДИСЕРТАЦИЈЕ

У друштву се модели одржавања на бази ризика могу применити на парне турбине термоелектрана и топлана, као и на сличним парним турбинама које се налазе на другим местима.

Оправданост примене модела одржавања на бази ризика као и њихов утицај на поузданост парних турбина је с обзиром да су термоелектране важан елемент у производњи електричне и топлотне енергије, њихово стајање доводи до великих губитака. Један од могућих узрока стајања термоелектране-толане може бити и отказ или застој парних турбина.

Парне турбине спадају у критичне машине, чије заустављање истовремено значи и заустављање целе производње.

У циљу одржавања продуктивности погона хаварија и заустављање парних турбина се не сме дозволити.

Основни циљ предложених модела одржавања на бази ризика парних турбина је:

- повећање укупне расположивости парних турбина,
- смањење трошкова одржавања парних турбина,
- гаранција целовитости опреме и сигурност људи.

Предложени модели одржавања на бази ризика носиће са собом потенцијално велике могућности за уштеду и то кроз:

- повећање укупне продуктивности на годишњем нивоу,
- смањење трошкова у првој години примене уведених модела одржавања на бази ризика и то кроз елиминацију плаћања пенала услед неиспоштовања уговореног термина испоруке енергије, а нарочито топлотне енергије у зимском периоду која је јако битна за потршаче који се греју на овај вид грејања, оптимизације профила људи и њиховог броја у служби одржавања.

7.5 НАУЧНИ ДОПРИНОС ДИСЕРТАЦИЈЕ

Научни допринос ове дисертације су резултати истраживања која су урађена у врло значајној области - поузданост парних турбина. Развијени модели значајно унапређују истраживања у тој области.

Први научни допринос је у дугогодишњем сакупљању експлоатационих података који су били потребни за формирање математичког модела у једном врло сложеном термоенергетском систему.

Други научни допринос се огледа у обради сакупљених података експлоатационих података, како би се на најбољи начин применили на развој математичког модела.

Трећи научни допринос је развој математичког модела пет могућих стања, у којима се парне турбине могу налазити, а који представља надоградњу Марковљевог модела четири стања са новим петим стањем, дијагностика стања (DI)

Четврти научни допринос је развој модела одржавања на бази ризика и његовог утицаја на поузданост парних турбина у виду алгорита, а који уједно подржава и математички модел пет могућих стања у којима се парне турбине могу налазити. Модел одржавања представља методологију праћења експлоатације и одржавања парних турбина и повишење нивоа поузданости парних турбина у процесу експлоатације.

Пети научни допринос је имплементација модела пет могућих стања на посматране парне турбине где су одређени оптимални тренутци превентивних периодичних поправки или одржавања, са датим вероватноћама у појединим стањима на годишњим нивоима

Шести научни допринос је у дугогодишњем праћењу непланских застоја-отказа са коментаром узрока застоја-отказа у експлоатацији парних турбина у Термоелектрани-топлани „Нови Сад“.

Седми научни допринос је примена развијеног модела одржавања на бази ризика у периоду око две године, где су смањени неплански застоји-откази за 74,75 % и повећана поузданост са 0.9975 на 1.00 за посматране турбине у Термоелектрани-топлани „Нови Сад“, као и повећање готовости (распољивости) парних турбина где је достигла вредност 100% у 2017. години. Такође, остварене су знатне уштеде због смањених трошкова одржавања и смањења губитака у производњи топлотне и електричне енергије, чиме је и потврђена успешност развијеног модела.

Осми научни допринос је примена развијеног модела одржавања на бази ризика у Термоелектрани Костолац на турбогенератор у периоду око две године. Дате су предности имплементације модела одржавања на бази ризика у односу на неке друге моделе. Дијаграмом је приказано да је управљање дијагностичком опремом подигнуто на већи ниво. Такође су графички приказани губици у производњи услед застоја (отказа) због поправке турбогенератора, као и одговорности за формирање финансијског буџета одржавања турбогенератора. Приказана је и зависност досадашњих трошкова одржавања, трошкова производње и трошкова одржавања са имплементацијом модела одржавања на бази ризика. Табеларно су приказани и откази на појединим склоповима пре и после примене модела одржавања на бази ризика, где је смањен број отаказа. На дијаграму је приказана поузданост турбогенератора пре и после примене модела одржавања на бази ризика. Овде је уочена већа поузданост турбогенератора. Спроведена је и анализа Делфи методе, метода логичке анализе и анализа примене матрица са проценом ризика у ТЕ-ТО „Нови Сад“ у Новом Саду.

Оригиналноост докторске дисертације је, да су се на основу теоријских и емпиријских сазнања развили оригинални модели одржавања на бази ризика и врло студиозном анализом резултата истраживања дошло до оригиналних научних сазнања. Доказано је да ови модели имају велики утицај на поузданост парних турбина у току експлоатације а самим тим њиховом применом смањују се трошкови одржавања, јер се помоћу њих спречавају непредвиђени откази (застоји), као и велике хаварије постројења. Резултати до којих се дошло током израде докторске дисертације показују значајан научни допринос пошто овакви термоенергетски системи као што су парне турбине не могу се одржавати током функционисања, него је потребно предвидети оптималне временске тренутке извођења одржавања, као и идентификовати деградацију појединих компонената парних турбина која може ако пређе недозвољене границе изазвати застоје-отказе као и велике хаварије.

8. ПРАВЦИ ДАЉИХ ИСТРАЖИВАЊА

Могући правци даљих истраживања се заснивају на закључцима и могли би да гласе на следеће начине:

Први правац даљих истраживања био би примена и прилагођавање модела на бази ризика у виду алгоритма као и његовог утицаја на повишење укупне поузданости посматраних сличних парних турбина. За овај алгоритамски модел би било потребно одредити дијагностичке параметра које ће се пратити, као и одређивање или примена из стандарда дозвољених граница одступања који су потребни због одступања измерених вредности од нормалних вредности, како би се одредила могућа стања у којима се могу налазити посматране парне турбине као и у дијагностици стања да се одреде активности које је потребно отклонити или зауставити посматрану парну турбину.

Други правац даљих истраживања је могућност примене и прилагођавање модела одржавања на бази ризика у виду алгоритма на техничке системе који врше неку другу функцију критеријума и који морају имати већу поузданост у процесу експлоатације.

Трећи правац даљих истраживања је развој софтвера који би подржао математички модел пет стања у којима се парне турбине могу налазити нарочито због брзине времена одлучивања о прелазу (T_{dk}) из стања у стање, посматрани модел би био много ефикасни.

Помоћу овог софтвера који би био развијен могле би се вероватноће у оперативном стању, деградационом стању, стању дијагностификовања, стању одржавања и стању у отказу у сваком тренутку на основу броја сати у експлоатацији врло брзо и лакше да одреде због подршке развијеног софтвера.

Четврти правац даљих истраживања је примена и прилагођавање математичког модела пет стања и на друге сличне парне парне турбине које се користе у неким другим гранама и за које би требало прикупити експлоатационе податке током истраживања како би модел био практично примењив и дао добре резултате који би утицали на повишење укупне поузданост посматраних парних турбина.

Пети правац даљих истраживања је имплементација математичког модела пет стања на техничке системе или термоенергетске системе који морају имати већу поузданост у процесу производње и експлоатације.

9. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Адамовић Ж., Голубовић Т.: Тотално одржавање, Универзитет у Новом Саду, Технички факултет „Михајло Пупин“ Зрењанин, 2000.
- [2] Vesely, W. E., Rezos, J. T.: Risk-Based Maintenance Modeling. Prioritization of Maintenance Importances and Quantification of Maintenance Effectiveness, Prepared for Division of Systems Technology Office of Nuclear Regulatory Research U. S. Nuclear Regulatory Commission Washington, September, 1995.
- [3] Адамовић, Ж., Воскренски, В., Тул, Р.: Одржавање на бази ризика, Друштво за техничку дијагностику Србије, Београд, 2007.
- [4] Račaijova, H., Raschman, P.: Reliability, Risk and Maintenance Policy, Technical University of Kosice, Kosice, 2001.
- [5] Томић, М., Адамовић, Ж.: Поузданост у функцији одржавања техничких система, Техничка књига, Београд, 1986.
- [6] Адамовић, Ж., Николић, Д.: Технологија одржавања, Универзитет у Новом Саду, Технички факултет, „Михајло Пупин“ Зрењанин, 2003.
- [7] Адамовић, Ж., Ђурић, Ж.: Менаџмент одржавања, Универзитет у Новом Саду, Технички факултет, „Михајло Пупин“ Зрењанин, 2005.
- [8] Зубер, Н., Личен, Х.: Типови предиктивног одржавања опреме на бази мерења и анализе вибрација, Стратегије имплементације, Пример, XX Конференција са међународним учешћем, Тара, 2006.
- [9] Адамовић, Ж., **Станковић, Н.**, Савић, Б.: Поузданост машина и постројења Stylos Art, Нови Сад, 2011.
- [10] Arnold, J.: Vorsorgen mit quantitativen Risikoanalysen von Prozessan-Lagen; DNV consulting, Esen, 2005.
- [11] Ljungquist, K.: A Probabilistic Approach to Risk Analysis, Lulea, University of Technology, 2005.
- [12] Lofgren, E. V., Cooper, S. E., Phillips, L. B.: A process for Risk-Focused Maintenance, Februar, 1991.
- [13] Стандард ИЕС 60300-3-9:1995
- [14] Jovanović, A.: Risk-based Life Management in ALIAS, MPA Stuttgart
- [15] Тодоровић, Ј.: Управљање одржавањем на бази ризика, ПРР-Истраживања и пројектовања за привреду 1/2003.
- [16] Rimap, Report on current Practice, Rimap Consortium, 2004.

- [17] ***: Results and Experience from use of Risk Based Methods in Maintenance of Power Plants, Rimar-Nas Workshop, Beograd, 2002.
- [18] Watson, R. G., Ray, P. E., Wanquan, C. S. P.: How preventive maintenance impact plant safety, University of Alabama.
- [19] Smith, R.: Risk Assessment for Maintenance; Life Cycle Engineering, 2003.
- [20] Миличић, Д., Миловановић, З.: Енергетске машине – Парне турбине, Универзитет у Бања Луци, Машински факултет, Бања Лука 2010.
- [21] Адамовић, Ж., Илић, Б., Савић, Б., Јевтић, М.: Термографија - поуздана дијагностичка метода, Pan book, Нови Сад, 2011.
- [22] Адамовић, Ж.: Техничка дијагностика, Завод за уџбенике и наставна средства, Београд, 1998.
- [23] Адамовић, Ж., Илић, Б., Вуловић, С., **Станковић, Н.**, Вуловић, М.: Техничка дијагностика електрана и топлана: Поуздано одржавање термоелектрана, хидроелектрана, соларних електрана, ветроелектрана и топлана, Друштво за техничку дијагностику - Адам институт, Смедерево, 2014.
- [24] Илић, Б., Адамовић, Ж., Савић, Б., Пауњорић, П.: Аутоматизовани дијагностички системи електричних машина, Српски академски центар, Нови Сад, 2012.
- [25] Адамовић, Ж., Илић, Б.: Наука о одржавању техничких система, Српски академски центар, Нови Сад, 2013.
- [26] Илић, Б., Петров, Т., Адамовић, Ж., Савић, Б., **Станковић, Н.**: Врсте и узроци оштећења клизних и котрљајућих лежајева машина у процесној индустрији, Научно-стручни часопис „Техничка дијагностика“, Друштво за енергетску ефикасност Босне и Херцеговине, вол. 4, 3-4, стр. 11-16, Бања Лука, 2012.
- [27] Адамовић, Ж., Илић, Б., Бурсаћ, Ж.: Вибродијагностичко одржавање машина и постројења: Нова методологија одржавања машина, Српски академски центар, Нови Сад, 2014.
- [28] Адамовић, Ж., Ашоња, А., Милошевић, Д., Пауњорић, П.: Теледијагностика машина, Дуга књига, Сремски Карловци, 2011.
- [29] WWW. Toshiba co. Jp/thermal-hyaro/en/thermal/service/support/gent/rbm.htm, Toshiba-Support service Risk-based Maintenance service (RBM) 2012.
- [30] Vesely, W. E.: Quantifying maintenance Effects on unavailability and risk using Markov modeling, Reliability engineering and system Safety, 41, 177-187, Elsevier Science Publisher ktd. England, 1993.
- [31] **Станковић, Н.**, Адамовић, Ж., Илић, Б., Милисављевић, Б.: Модел одржавања на бази ризика и његов утицај на поузданост парних турбина, XXXX Мајски скуп одржавалаца Србије, Конференција „Бука, вибрације и проактивно одржавање машина“, Врњачка Бања, 26. и 27. мај, 2017.
- [32] DEG-Project „Esprit“ Course 3 Power Risk Analysis in Power Industries, Deutsche Investitions und Entwicklungsgesellschaft mbH, Stuttgart, january, 2009.
- [33] **Stankovic, M. N.**, Vulovic, M. St., Adamovic, Z. Zh., Milisavljevic, M. B., Asonja, A. A., Vulovic, S. M.: Model of Five States and Its Implementations to

- Reliability and Steam Turbines, Journal of the Balcan Tribological Association, book 3, vol. 23, pp. 542-568, Sofia, Bulgaria, 2017.
- [34] Рашковић, А.: Основи матричног рачунања са применом на техничке проблеме, Научна књига, Београд, 1971.
- [35] ***: Институт „Михајло Пупин“, ИМП „АУТОМАТИКА“ д.о.о. Београд
- [36] ***: Стандард ISO 10816-2:2001(E)
- [37] ***: ТЕ-ТО „Нови Сад“, Нови Сад
- [38] Zietemann, С., Прорачун и конструкција парних турбина, Научна књига, Београд, 1951.
- [39] Адамовић, Ж., Тасић, И., **Станковић, Н.**, Ашоња, А.: Одржавање клизних лежишта, Дуга књига, Сремски Карловци, 2011.
- [40] **Станковић, Н.**, Адамовић, Ж., Илић, Б., Савић, Б.: Значај техничке дијагностике за поуздан рад парних турбина, Научно-стручни часопис Техничка дијагностика, Вол. 12, № 1, pp. 20-30, Београд, 2013.
- [41] **Станковић, Н.**, Адамовић, Ж.: Техничка дијагностика парних турбина на бази ризика, Научно-стручни часопис Техничка дијагностика, Вол. 12, № 2, pp. 55-59, Београд, 2013.
- [42] **Станковић, Н.**, Адамовић, Ж.: Методе техничке дијагностике за анализу стања парних турбина, Научно-стручни часопис Техничка дијагностика, Друштво за енергетску ефикасност Босне и Херцеговине, Вол. 6, № 3-4, pp. 52-58, Бања Лука, 2014.
- [43] **Станковић, Н.**, Адамовић, Ж., Милисављевић, Б.: Методе процене поузданости парних турбина, XV Конференција, Техничка дијагностика машина и постројења, Врњачка Бања, октобар, 2015.
- [44] **Станковић, Н.**, Адамовић, Ж., Савић, Б., Јанић, Н., Илић, Б.: Дијагностика стања парних турбина, XVII Конференција „Проактивно одржавање машина“, Врњачка Бања, 10.11.2017.
- [45] Шушњевић, З., Стевановић, С., Лукић, Ј., Бајчета, М.: Збирка упуштава за руковање турбинским постројењем, ЈП „Панонске електране“ ТЕ-ТО „Нови Сад“ Нови Сад, 2001.
- [46] ***: Документација Термоелектране “Костолац“
- [47] С. Derman: On Optimal Replacement Rules When Changes of State Are Markovian, Mathematical Optimization Techniques, Edited by Richard Bellman pp. 201-210, The RAND Corporation, Santa Monica, California, 1963.
- [48] С. Derman: Finite State Markovian Decision Processes, Academic Press, New York, (1970).
- [49] Y. Hatoiyama.: On Markov Maintenance Problems. IEEE Transactions on Reliability. Vol. R-33, No 4, pp. 280-283, (1984).
- [50] J. Endreny, S. H. Sim.: Optimal preventive maintenance for continuously operating repairable equipment. Ontario Hydro Research Division Report K. Government publication, State or province government publication, 1986.

- [51] S. H. Sim, J. Endreny.: Optimal preventive maintenance with repair. *IEEE Trans. Reliability*, 37 (1), 177, (1988).
- [52] P. K. Samanta, W. E. Vesely, F. Hsu, M. Subudly.: Degradation modeling with application to aging maintenance effectiveness evaluations. Division of Systems Research, Office of Nuclear Regulatory Research, US Nuclear Regulatory Commission, March, 1, (1991).
- [53] P. K. Samanta, F. Hsu, M. Subudhi, W. E. Vesely.: Analyses of component degradation to evaluate maintenance effectiveness and aging effects. Brookhaven National Lab., Upton, NY (United States). Funding organization: Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC (United States), Jan. 1, (1991).
- [54] T. M. Welte, J. Vatn, J. Heggset.: Markov state model for optimization of maintenance and renewal of hydro power components. In: *Proceedings 9th International Conference Methods Applied to Power System KTH, Stockholm, Sweden; 11-15 June, (2006).*
- [55] G. K. Chan, S. Agarpoor.: Optimum maintenance policy with Markov processes. *Electr Power Syst. Res.*, 76, 432, (2006).
- [56] A. Baghela.: Application of Markov process to improve production of power plant. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 2 (1), 200, (2012).
- [57] J. Johansson, H. Hassel, E. Zio.: Reliability and vulnerability analyses of critical infrastructures. Comparing two approaches in the context of power systems. *Reliability Engineering and System Safety*, 120, 27, (2013).
- [58] D. N. Dewangan, Manoj Kumar Jha, Y. P. Banjare.: Reliability Investigation of Steam, Turbine Used In Thermal Power Plant, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 3 (7), 14915, (2014).
- [59] J. E. Ruiz-Castro.: Markov counting and reward processes for analysis the performance of a complex system subject to random inspections. *Reliability Engineering and System Safety*, 145, 155, (2016).
- [60] Адамовић, Ж., Јевтић, Н., Десница, Е.: Триболошки проблеми радијалних клизних лежишта парних турбина, Симпозијум-подмазивање машина, Врњачка Бања, јул 2003.
- [61] Адамовић, Ж.: Поузданост машина, Технички факултет „Михајло Пупин“ Зрењанин, 2004.
- [62] Адамовић, Ж., Адамовић, Д.: Техничка дијагностика, Друштво за техничку дијагностику Србије-ТЕНДИС, Београд, 2009.
- [63] Адамовић, Ж., Бркић, Р.: Инжењерство поузданости, Друштво за техничку дијагностику Србије-ТЕНДИС, Београд, 2004.
- [64] Степанов, Љ.: Парне турбине, Факултет техничких наука, Нови Сад, 1979.
- [65] Дьяков, А.Ф., Канцедалов, В.Г., Берлявский, Г.П., Кантович, Л.И.: Управление надежностью, долговечностью и безопасностью энергооборудования ТЭС и АЭС, "Горная книга", Москва, 2008.
- [66] Кемени, Дж., Снелл, Дж.: Конечные цепи Маркова, Наука, Москва, 1971.
- [67] Романовский, В. И.: Дискретные цепи Маркова, ГИТТЛ, Москва, Ленинград, 1949.

- [68] Latcovich, John A. Jr.: Turbine Optimization Program to Extend Outage Periods and Manage Equipment Breakdown Risk, Power Generation Asset and Portfolio.
- [69] Management Conference Sponsored by Black & Veatch and EUCI, March 27-28, 2002. Atlanta, Georgia.
- [70] Dhillon, B.S., Liu, Y.: Human Error in Maintenance: a Review, Journal of Quality in Maintenance Engineering Vol. 12. No.1, 2006. pp. 22-36, Emerald Group Publishing Limited.
- [71] Mobley, R. Keith: An Introduction to Predictive Maintenance, Butterworth-Heinemann, Elsevier Science (USA), 2002.
- [72] Latcovich, John, Astrom, Thomas, Huizen, Peter Frank, Fukushima, Seigou, Hamberg, Hakan, Keller, Stefan: Maintenance and Overhaul of Steam Turbines, International Association of Engineering Insurers 38th Annual Conference - Moscow, 2005.
- [73] W.E. Vesely, W.E., Rezos, J.T.: Risk – Based Maintenance Modeling, Science Applications International Corporation Dublin, OH 43017, 1995.
- [74] Beebe, Ray: Condition Monitoring of Steam Turbines by Performance Analysis, Journal of Quality in Maintenance Engineering vol. 9 No. 2, pp. 102-112, Australia, 2003.
- [75] Sliter, G.: Interoduction to Simplified Generation Risk Assessment Modeling, Project Manager, California, USA, 2004.
- [76] Mili, A., Hubac, S., Basseto, S., Siadat, A.: Risks Analyses Update Based on Maintenance Events, Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control, Seoul, July 6-11, 2008.
- [77] Arunraj, N.S., Maiti, J.: Risk-Based Maintenance - Techniques and Applications, Jurnal of Hazardous Materials, India, pp. 653-661, 2007.
- [78] Loganathan Krishnasamy, Faisal Khan, Mahmoud Haddara: Development of a Risk- Based Maintenance (RBM) Strategy for a Power-Generating Plant, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Canada, 18, pp. 69-81, 2005.
- [79] Kazunari Fujiyama., Satoshi Nagai., Yasunari Akikuni., Toshihiro Fujiwawa., Kenichiro Furuya., Shigeru Matsumoto., Kentaro Takagi., Taro Kawabata.: Risk-Based Inspection and Maintenance Systems for Steam Turbines, International Journal of Pressure Vessels and Piping 81 (10/11), pp. 825-835, 2004.
- [80] J.M. Moubray: Reliability-Centred Maintenance, Butterworth-Heinemann, Oxford, Boston, 1997.
- [81] P.K. Dey, A Risk-Based Maintenance Model for Inspection and Maintenance of Cross-Country Petroleum Pipeline, J. Qual. Maint. Eng. 7(1), pp. 25-41, 2001.
- [82] G.A. Antaki, T.M. Monahan, R.W. Canseler, Risk-Based Inspection (RBI) of Steam Systems, in: Proceedings of the ASME PVP Conference on Pressure Vessels and Piping Conference, July 2005.
- [83] S.J. Brown, I.L. May.: Risk-Based Hazardous Protection and Prevention by Inspection and Maintenance, Trans. ASME J. Press. Ves. Technol.122, pp. 362-367, 2003.

- [84] Mathias Warja.: Maintenance Management of Complex Industrial Systems - Methodology for Renewal Strategies, Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, September 2005.
- [85] L. Bertling: Reliability Centred Maintenance for Electric Power Distribution Systems, Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2002.
- [86] Адамовић, Ж., Вуковић, В., Малешевић, Д.: Методологија истраживања у индустрији и образовању, Друштво за енергетску ефикасност Босне и Херцеговине, Бања Лука, 2010.
- [87] Amari, S. V.: Reliability, Risk and Fault-Tolerance of Complex Systems, PhD Dissertation, 1997, Indian, Institute of Technology, Kharagpur.
- [88] Ламбић, М.: Инжењерство и иновације, Технички факултет „Михајло Пупин“, Зрењанин, 1996.
- [89] Ламбић, М.: Енергетика I, Технички факултет „Михајло Пупин“, Зрењанин, 1996.
- [90] Ћосић, И., Радаковић, Н., Максимовић, Р.: Основе радних поступака у индустријским системима, Факултет техничких наука, Институт за индустријске системе, Нови Сад, 1991.
- [91] Навалушић, С., Зељковић, М., Милојевић, З.: Инжењерско пројектовање са становишта безбедности, Трећи скуп о конструјисању, обликовању и дизајну КОД, 2004, Нови Сад, п.п. 47-52.
- [92] Максимовић, Р., Камберовић, Б.: ISO 9000 и одржавање, XXIII Југословенски мајски скуп, „Одржавање техничких система“, Крагујевац, 1998.
- [93] Тодоровић, Ј., Зеленовић, Д.: Ефективност система у машинству, Научна књига, Београд, 1981.
- [94] Зеленовић, Д., Тодоровић, Ј.: Теорија поузданости техничких система, Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, 2004.
- [95] Вујановић, Н.: Теорија поузданости техничких система, Војноиздавачки и новински центар, Београд, 1990.
- [96] Сотировић, В., Адамовић, Ж.: Методологија научног истраживачког рада са статистиком, Технички факултет „Михајло Пупин“, Зрењанин, 2005.
- [97] Миљисављевић, Б. М.: Приватна комуникација, Нови Сад.
- [98] R. Dekker: Applications of Maintenance Optimization Models: A Review and Analysis, Reliability Engineering & System Safety, Vol. 51, pp. 229-240, March 1996.
- [99] F.G. Carazas, G.F.M. Souza: Risk-based decision making method for maintenance policy selection of thermal power plant equipment, Energy, 35 (2010) pp. 964–975.
- [100] Шкорић, Б., Какаш, Д.: Карактеризација микро и нано превлака, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2010, 161 стр., ISBN 978-86-7892-312.
- [101] Samanta, P.K., Vesely, W.E., Hsu, F. and Subudhi, M.: Degradation Modeling with Application to Aging and Maintenance Effectiveness Evaluations, BNL-

- NUREG/45309, Brookhaven National Laboratorz Upton, New York, 11973, 1991.
- [102] Dyer, Danny: Unification of Relibility-Availability-Repairbility Models for Markov Systems, IEEE Transations on Reliability, Vol. 38 N^o. 2, June 1989.
- [103] Hsu, F., Vesely, W.E., Grove, E., Subudhi, M., Samanta, P.K.: Degradation modeling Extensions & Aplications, Risk and Reliability Analysis Group Engineering Technology Divistional Department of Nuclear Energy Brookhaven National Laboratory Upton, New York 11973, Science Applications International Corporation, June 1991.
- [104] Monahan, George, E.: A Survey of Partially Observable Markov Decision Processes: Theory, Models, and Algorithms, Management Science, Vol. 28, N^o. 1, January 1982, Printed in USA.
- [105] Suhov, Yuri, Kelbert, Mark: Probability and Statistics by Example, Markov Chains-A, Primer in Rondon Processes and teir Applications, Camberidge, University Press, New York, 2008,
- [106] Abraham, Tamir, Elserver Applications of Markov Chains in Chemical Engineering, Beer Sheva, Israel, May 1, 1998.
- [107] Vora, J.P.: NRC Research Program on Plant Aging: Listing and Summaries of Reports Issued Though, September 1993. Division of Engineering Office of Nuclear Regulatory Research U.S. Nuclear Regularory Commission Washington, DC 20555-0001.
- [108] Прохорев, Ю.В., Пономаренко, Л.С.: Лекции по теории вероятностей и математической статистике, МГУ, Москва, 2012.
- [109] Навалушић, С., Милојевић, З., Зельковић, М.: Концепт виртуалног инжењерства, Одржавање машина, Научно-струњни часопис за област одржавања техничких система у индустрији, број 9-10, 2008, (ISSN 1452-9688).
- [110] Адамовић, Ж., и други, Вибродијагностика и Трибодијагностика машина, Друштво за техничку дијагностику Србије, Београд 2009.
- [111] Куцура, И.: Тотално продуктивно одржавање, Друштво за техничку дијагностику Србије, Београд, 2007.
- [112] Максимовић, Р.: Методе и технике за анализу и унапређење квалитета (11. поглавље) Систем квалитета, Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, Нови Сад, 1996.
- [113] Максимовић, Р.: Сложеност и флексибилност структура индустријских система, Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, Нови Сад, едукација монографије 2003, 230 страна УДК: 65.01 ISBN 86-80249-77-7.
- [114] V. Narayan, Effective Maintenance Management Risk and Reliability Strategies for Optimizing Performance, Industrial Press New York, 2003.
- [115] J. P. Den Hartog, Mechanical Vibrations, New York, Toronto, London Mc GRAW-HILL Book Company 1956.
- [116] Адамовић, Ж., Десница, Е., Радовановић, Љ., Адамовић, Д., Реџић, М.: Центрирање ротационих машина, Друштво за техничку дијагностику Србије, Београд, 2005.

- [117] **Станковић, Н.**, Савић, Б.: Трење у клизним лежиштима парних турбина-теорија и пракса, Техничка дијагностика, Међународни научно-стручни часопис за област дијагностике, одржавања, информационих технологија и менаџмента знања, Друштво за енергетску ефикасност Босне и Херцеговине, Бања Лука, 2009, (ISSN 1840-4898) Број 3-4.
- [118] **Станковић, Н.**, Адамовић, Ж.: Одржавање парних турбина према стању, Техничка дијагностика, Међународно научно-стручни часопис за област дијагностике, одржавања, информационих технологија и менаџмента знања, Друштво за енергетску ефикасност Босне и Херцеговине, Бања Лука, 2011, (ISSN 1840-4898), Број 1-2.
- [119] **Станковић, Н.**, Адамовић, Ж.: Развој алгорита методологије одржавања клизних лежишта парних турбина, Техничка дијагностика, Међународно научно-стручни часопис за област дијагностике, одржавања, информационих технологија и менаџмента знања, Друштво за енергетску ефикасност Босне и Херцеговине, Бања Лука, 2011, (ISSN 1840-4898) Број, 1-2.
- [120] Савић, Б., Илић, Б., **Станковић, Н.:** Технологија одржавања и информационе технологије, Научно-стручни часопис „Одржавање машина“, Друштво за техничку дијагностику Србије „ТЕНДИС“ (ISSN 1452-9688) Број 1-2, 2011.
- [121] Савић, Б., **Станковић, Н.**, Илић, Б.: Савремено одржавање и сервисирање опреме, Научно-стручни часопис „Менаџмент знања“ Друштво за техничку дијагностику Србије „ТЕНДИС“ (ISSN 1452-961), Број 3-4, 2011.
- [122] **Станковић, Н.**, Адамовић, Ж., Савић, Б., Поповић, М.: Методе испитивања без разарања компонената парних турбина, Научно-стручни часопис, „Менаџмент знања“ Друштво за техничку дијагностику Србије, вол. 7, бр. 3-4, Смедерево, 2011, (ISSN 1452-9661).
- [123] Илић, Б., Адамовић, Ж., Савић, Б., **Станковић, Н.:** Примена аутоматизованих дијагностичких система у дијагностици стања лежајева машина методом спектралне анализе струје статора, Научно-стручни часопис “Менаџмент знања”, Друштво за техничку дијагностику Србије, вол.7, бр. 1-2, пп. 3-12, Смедерево, 2012.(ISSN 1452-9661).
- [124] Илић, Б., Адамовић, Ж., Савић, Б., **Станковић, Н.:** Аутоматизована вибро-акустичка испитивања клизних и котрљајућих лежаја, Научно-стручни часопис, “Менаџмент знања” Друштво за техничку дијагностику Србије, вол. 7, бр. 1-2, пп. 13-24, Смедерево, 2012. (ISSN 1452-9661).
- [125] Илић, Б., Адамовић, Ж., Савић, Б., **Станковић, Н.:** Аутоматизована термографска испитивања клизних и котрљајућих лежајева. Међународни научно-стручни часопис, Техничка дијагностика, Друштво за енергетску ефикасност Босне и Херцеговине, Бања Лука, вол. 4, бр. 1-2, пп. 10-19, 2012. (ISSN 1840-4898).
- [126] Илић, Б., Адамовић, Ж., Савић, Б., **Станковић, Н.:** Развој модела аутоматизованог дијагностичког система и његов утицај на поузданост техничких система, Међународни научно-стручни часопис, Техничка дијагностика, Друштво за енергетску ефикасност Босне и Херцеговине, Бања Лука, вол. 4, бр. 1-2, пп. 20-40, 2012. (ISSN 1840-4898).

- [127] Илић, Б., Адамовић, Ж., Савић, Б., **Станковић, Н.**: Техно-економска анализа ефекта примене новог модела аутоматизованог дијагностичког система у дијагностици стања лежаче машине, Начно-стручни часопис, Техничка дијагностика, Друштво за енергетску ефикасност Босне и Херцеговине, вол. 4, бр. 3-4, стр. 40-46, Бања Лука, 2012. (ISSN 1840-4898).
- [128] Илић, Б., Адамовић, Ж., Савић, Б., **Станковић, Н.**: Процена термичког стања електроенергетске опреме у процесној индустрији методом термографије, Научно-стручни часопис, „Journal of Engineering & Processing Management“, Технолошки факултет Зворник, вол. 4, бр.1, стр. 163-176, 2012. (ISSN 1840-4774).
- [129] Илић, Б., Адамовић, Ж., Савић, Б., **Станковић, Н.**: Примена метода вештачке интелигенције у дијагностици стања лежаче машина у процесној индустрији, Научно-стручни часопис, Техничка дијагностика, Друштво за енергетску ефикасност Босне и Херцеговине, вол. 5, бр. 1-2, стр. 32-38, Бања Лука, 2012. (ISSN 1840-4898).
- [130] **Станковић, Н.**, Адамовић, Ж., Савић, Б., Радић, Р., Николић, Д.: Бука у хидроелектранама Научно стручни часопис, Менаџмент знања, Друштво за техничку дијагностику Србије, вол. 9, бр. 3-4, пп. 56-59, Смедерево, 2014, (ISSN 1452-9661).
- [131] Јовановић, Д., **Станковић, Н.**, Вукојевић, Д., Адамовић, Ж., Перић, Д., Јанковић, З., Вукојевић, П.: Ремонт сложених машина у електропривреди, Научно-стручни часопис, Менаџмент знања, Друштво за техничку дијагностику Србије, вол. 9, бр. 3-4, пп. 42-51, Смедерево, 2014, (ISSN 1452-9661).
- [132] **Станковић, Н.**, Адамовић, Ж., Вуловић, М., Илић, Б.: Детекција роторске ексцентричности, Научно-стручни часопис, Одржавање машина, Друштво за техничку дијагностику Србије, вол. 12, бр. 3-4, пп. 40-43, Смедерево, 2015, (ISSN 1452-9688)
- [133] **Станковић, Н.**, Адамовић, Ж., Милисављевић, Б.: Methods of maintenance in steam turbines, Међународни научно-стручни скуп, Процесна техника и заштита животне средине, Универзитет у Новом Саду, Технички факултет „Михајло Пупин“, Зрењанин, децембар, 2011, (ISBN 978-86-7672-152-8).
- [134] Илић, Б., Адамовић, Ж., Радовановић, Љ., Савић, Б., **Станковић, Н.**: Thermographic investigations of power plant elements, Proceedings 5th International Symposium on Industrial Engineering-SIE 2012, organized by Industrial Engineering Department Faculty of Mechanical Engineering University of Belgrade and Steinbeis Advanced Risk Technologies Stuttgart, Germany. Publisher Faculty of Mechanical Engineering University of Belgrade pp. 291-296, Belgrade, Serbian, June 14-15.2012. (ISBN 978-86-7083-758-4).
- [135] Илић, Б., Адамовић, Ж., Радовановић, Љ., Савић, Б., **Станковић, Н.**: Application of the method of thermography in diagnostics of power plants, Proceedings/ II International Conference-Industrijal Engineering and Environmental Protection (IIZS 2012), pp. 157-164, Zrenjanin, 31st. October, 2012. (ISSN 978-86-7672-184-9).
- [136] **Станковић, Н.**: Значај и улога радијалних заптивача у одржавању машина, XXVI Мајски скуп одржавалаца средстава за рад Србије, Нишка Бања, 2003.

- [137] **Станковић, Н.**, Савић, Б.: Методологија одржавања клизних лежишта турбинских постројења, XXVIII Мајски скуп одржавалаца Србије и Црне Горе, Врњачка Бања, 2005.
- [138] **Станковић, Н.**: Одржавање према стању клизних лежишта парних турбина, XXIX Мајски скуп одржавалаца средстава за рад Србије и Црне Горе, Врњачка Бања 2006.
- [139] Савић, Б., **Станковић, Н.**: Развој и примена модела одржавања према стању за системе подложне отказима, XXX Мајски скуп одржавалаца Србије и Црне Горе „Одржавање на бази ризика“ Врњачка Бања, 2007. (ISBN 86-83701-02-6).
- [140] **Станковић, Н.**, Савић, Б.: Трење у клизним лежиштима парних турбине, XXXI Мајски скуп одржавалаца Србије “Проактивно одржавање машина”, Врњачка Бања” 2008.
- [141] **Станковић, Н.**, Савић, Б., Стевановић, С.: Контрола стања турбинског уља, X Симпозијум Хидрауличара и еколога Србије, Вршац, октобар, 2008. (ISBN 978-86-83701-20-9).
- [142] **Станковић, Н.**: Дијагностичке фазе праћења стања клизних лежишта парних турбина, XXXII Мајски скуп одржавалаца средстава за рад Србије, Врњачка Бања, 2009.
- [143] **Станковић, Н.**, Савић, Б.: Могуће врсте трења у клизним лежиштима парних турбине, XXXIII Мајски скуп одржавалаца средстава за рад Србије “Телеаутоматизација машина и постројења у индустрији-информатика и екологија“, Врњачка Бања, 2010. (ISBN 978-86-83701-27-8).
- [144] **Станковић, Н.**, Адамовић, Ж., Поповић, М.: Одржавање према стању са контролом параметара парних турбина, Научно стручни симпозијум „Дијагностика и поузданост, информатика и менаџмент, саобраћај и екологија” Врњачка Бања, новембар, 2010, (ISBN 978-86-83701-29-2).
- [145] **Станковић, Н.**, Адамовић, Ж., Савић, Б.: Могућа стања клизних лежишта парних турбина, Научно-стручни симпозијум, „Дијагностика и поузданост, информатика и менаџмент, саобраћај и екологија”, Врњачка Бања, новембар, 2010. (ISBN 978-86-83701-29-2).
- [146] **Станковић, Н.**, Адамовић, Ж., Савић, Б., Поповић, М.: Значај техничке дијагностике за поуздан рад парних турбине, XXXV Конференција “Пословних комуникација и производног инжењерства”, Зборник радова, Врњачка Бања, 01-02.06.2012. (ISBN 978-86-85391-07-1).
- [147] Илић, Б., Адамовић, Ж., Савић, Б., **Станковић, Н.**: Техно-економска анализа ефеката примене новог модела аутоматизованог дијагностичког система у дијагностици стања лежајева машина, XXXV Конференција “Пословних комуникација и производног инжењерства”, Зборник радова, Врњачка Бања, 01-02.06.2012. (ISBN 978-86-85391-07-1).
- [148] Илић, Б., Адамовић, Ж., Савић, Б., **Станковић, Н.**: Примена аутоматизованих дијагностичких система у дијагностици стања машина у процесној индустрији, XXXV Конференција „Пословних комуникација и производног инжењерства“, Зборник радова, Врњачка Бања, 01-02.06.2012. (ISBN 978-86-85391-07-1).

- [149] Илић, Б., Адамовић, Ж., Савић, Б., **Станковић, Н.**: Примена метода вештачке интелигенције у дијагностици стања лежајева машина, XXXV Конференција “Пословних комуникација и производног инжењерства”, Зборник радова, Врњачка Бања, 01-02.06.2012. (ISBN 978-86-85391-07-1).
- [150] Илић, Б., Адамовић, Ж., Савић, Б., **Станковић, Н.**: Врсте и узроци оштећења клизних и котрљајућих лежајева машина у процесној индустрији, XXXV Конференција “Пословних комуникација и производног инжењерства”, Зборник радова, Врњачка Бања, 01-02.06.2012. (ISBN 978-86-85391-07-1).
- [151] Илић, Б., Адамовић, Ж., Савић, Б., **Станковић, Н.**: Оштећења гасовода узрокована електроенергетским ефектима из окружења и њихов утицај на поузданост рада техничког система, XXXV Конференција “Пословних комуникација и производног инжењерства”, Зборник радова, Врњачка Бања, 01-02.06.2012. (ISBN 978-86-85391-07-1).
- [152] **Станковић, Н.**, Адамовић, Ж., Илић, Б., Савић, Б., Поповић, М.: Значај техничке дијагностике за поуздан рад парних турбина, XXXV Конференција „Пословних комуникација и производног инжењерства“, Зборник радова, Врњачка Бања, 01-02.06.2012. (ISBN 978-86-85391-07-1).
- [153] **Станковић, Н.**, Адамовић, Ж., Савић, Б., Илић, Б.: Техничка дијагностика парних турбине на бази ризика, XXXVI Мајски скуп одржавалаца Србије, “Мерење индикатора перформанси одржавања техничких система у компанијама”, Зборник радова, Врњачка Бања, 31.05.2013. (ISBN 978-86-83701-30-8).
- [154] Савић, Б., Илић, Б., Петровић-Гегић, А., Ђукић, Д., **Станковић, Н.**: Примена термовизије у дијагностици стања, XXXVI Мајски скуп одржавалаца Србије, „Мерење индикатора перформанси одржавања техничких система у компанијама“, Зборник радова, Врњачка Бања, 31.05.2013. (ISBN 978-86-83701-30-8).
- [155] **Станковић, Н.**, Адамовић, Ж.: Методе техничке дијагностике за анализу стања парних турбине, XI Конференција, “Техничка дијагностика термоелектрана, соларних електроана, топлана и хидроелектрана”, Врњачка Бања, новембар, 2014, (ISBN 978-86-83701-33-9).
- [156] Бурсаћ, Ж., **Станковић, Н.**: Утицај структуре на поузданост и готовост система, XI Конференција „Техничка дијагностика термоелектрана, соларних електроана, топлана и хидроелектрана, Врњачка Бања, 07.11.2014. (ISBN 978-86-83701-33-9).
- [157] **Станковић, Н.**, Адамовић, Ж., Вуловић, М., Илић, Б.: Детекција роторске ексцентричност, XXXVIII Мајски скуп одржавалаца Србије, “Техничка дијагностика термоелектрана, соларних електроана, топлана и хидроелектрана”, Врњачка Бања, мај, 2015. (ISBN 978-86-83701-36-0).
- [158] **Станковић, Н.**, Адамовић, Ж., Милисављевић, Б.: Методе процене поузданости парних турбина, XV Конференција, Техничка дијагностика машина и постројења, Врњачка Бања, октобар, 2015, (ISBN 978-86-83701-38-4).
- [159] **Станковић, Н.**, Адамовић, Ж., Савић, Б., Јањић, Н.: Поступци испитивања сегмената радијалних клизних лежишта парне турбине, XXXIX Мајски скуп одржавалаца Србије, Врњачка Бања, мај, 2016, стр. 439-444, (ISBN 978-86-83701-43-8).

- [160] **Станковић, Н.**, Адамовић, Ж., Савић, Б., Јањић, Н.: Поступци дијагностике клизних лежишта парне турбине, XXXIX Мајски скуп одржавалаца Србије, Врњачка Бања, мај, 2016, стр. 445-457, (ISBN 978-86-83701-43-8)
- [161] **Станковић, Н.**, Адамовић, Ж., Савић, Б., Јањић, Н., Илић, Б.: Фазе одржавања клизних лежишта парних турбина, XXXX Мајски скуп одржавалаца Србије – Конференција „Бука, Вибрације и Проактивно одржавање машина“, Врњачка Бања, 26 и 27.05.2017. (ISBN 978-86-83701-47-6).
- [162] Адамовић, Ж., Савић, Б., **Станковић, Н.**: Основи одржавања машина, Old Commerce, Нови Сад, 2003, Библиотека Матице Српске, Нови Сад, (COBISS, SR-10 189873415).
- [163] В. Прохоров, В.Н. Калинина, В.И. Соловьев, В.И.Малыхин, А.П. Курочкин: Теория вероятностей в примерах и задачах, Изд. ГУУ, Москва 2001. ISBN 5-215-01281-4.
- [164] А.А. Марков: Избранные труды: Теория чисел, Теория вероятностей, Изд. АН СССР, Москва, 1951.
- [165] А.Р. Панков, Е.Н. Платонов: Практикум по математической статистике, Изд. МАИ Москва, 2006.
- [166] О.Г. Гохман, А.Н. Гудович: 150 задач по теории вероятностей, Изд. ВГУ, Воронеж, 1980.
- [167] А.Р. Панков, К.В. Семенихин: Практикум по теории случайных процессов (сокращенный вариант), Изд. МАИ, Москва, 2008.
- [168] Е.Б. Дынкин: Марковские процессы, Изд. Физмазлит, Москва, 1963.
- [169] D.A. Dawson: Introduction to Markov chains, Canadian Mathematical Congress, Montreal, 1970.
- [170] A. Tolver: An Introduction to Markov Chains, University of Chopenhagen, Copenhagen, 2016.
- [171] D.T. Gillespie: Markov Process – An Introduction for Physical Scientists, Academic Press, Inc. Harcourt, Brace Jovanovich Publishers, Boston, 1992.
- [172] J.G. Kemeny, J.L. Snell: Finite Markov Chains, Springer Verlag, New York, Berlin, Heidelberg, Tokyo, 1983, ISBN 3-540-90192-2.
- [173] J.G. Kemeny, J.L. Snell, A.W. Knapp: Denumerable Markov Chains: with a chapter of Markov Random Fields, Springer Verlag, New York, Berlin, Heidelberg, Tokyo, 1976, ISBN 3-540-90177-9.
- [174] D. Revuz: Markov Chains, Nort-Holland, Amsterdam, New York, Oxford, 1984, ISBN0444-86400-8.
- [175] Љ., Крсмановић, А. Гајић: Турбомашине, Универзитет у Београду, Машински факултет Београд, 2005.
- [176] Адамовић, Ж., Стефановић, С., Шубара, Н., Миленковић, Д., Крстић, М.: Стандардизација поступака одржавања, Друштво за техничку дијагностику Србије, TEHDIS, Београд, 2008.
- [177] R.X. Perez, D.W. Lawhon: Steam turbines, Scrivener Publishing Wiley, 2016.

- [178] A.S. Poznyak, K. Najim, E. Gómez-Ramirez: Self-learning control of finite Markov chains, Marcel Dekker, Inc., New York – Basel, 2000.
- [179] Z. Orłowski: A Model for Operational Diagnostics of Steam Turbines, Mechanical Systems and Signal Processing. 9(2), pp. 215-222, (1995).
- [180] Y. G. Li: Performance Analysis Based Gas Turbine Diagnostics: A Review, Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 216, pp. 363-377, (2002).
- [181] K. Fujiyama, S. Nagai, Y. Akikuni, T. Fujiwara, K. Furuya, S. Matsumoto, K. Takagi, T. Kawabata: Risk-based Inspection and Maintenance Systems for Steam Turbines, International Journal of Pressure Vessels and Piping, 81, pp. 825-835, (2004).
- [182] A.M. Rusin: Technical Risk Involved in Long-term Operation of Steam Turbines, Reliability Engineering and System Safety, 92, pp. 1242-1249, (2007).
- [183] Васиљевић, Н.: Парне турбине, Машински факултет Београд, Београд, 1993.
- [184] Јанић, Н., Микић, Д., Ашоња, А., **Станковић, Н.**, Петровић, Д.: Дијагностика стања машинских техничких система заснованих на примени бинарне регресије, IV Међународна конференција – Управљање знањем и информатика, 12-13, јануар 2018, Висока техничка школа струковних студија у Новом Саду, Копаоник.
- [185] Тешњак, С., Григић, Д., Кузле, И.: Термоелектране, Факултет електротехнике и рачунарства, завод за високи напон и енергетику, Загреб, 2005.
- [186] [http://sh.wikipedia.org/wiki/parne turbine](http://sh.wikipedia.org/wiki/parne_turbine)
- [187] Bragatto, P.: CorradoDelle Site, Angelo Faragnoli: Opportunities and Threats of Risk Based Inspections: the new Italian Legislation on Pressure Equipment Inspection. TheItalianAssociationof Chemical Engineering.Vol. 26, pp. 177 – 182. (2012).
- [188] Kauer, R., Jovanovic, A., Angelsen, S., Vage, G.: Plant Asset Management RIMAP (Risk – Based Inspection and Maintenance for European Industries) The European Approach. TASME PVP Risk and Reliability and Evaluation of Components and Machinery.Vol. 488.July 25 – 29, San Diego, California, (2004).
- [189] Djapic, M., Lukic, Lj., Pavlovic, A.: Technical Product Risk Assessment: Standards, Integration in the Erm Modeland UncertaintyModeling. International Journal for Quality SearchResearch.10(1), pp.159 – 176, (2016).
- [190] Selvic, J.T., Scarf, P., Aven, T.: An Extended Methodologyfor Risk Based Inspection Planning. Reliability: Theory and Applications.01(20) Vol. 2, pp. 115 – 126, (2011).
- [191] Eti, M.C., Ogaji, S.O.T., Robert, S.D.: Integrating reliability, availability, maintainability and supportability with risk analysis for improved operation of the Afam thermal power-station, Applied Energy, 84, pp. 202-221, (2007).
- [192] ***: Standard IEC/ISO 31010:2009.
- [193] **Станковић, Н.**: Развој оджавања клизних лежишта, Специјалистички рад, Технички факултет „Михајло Пупин“, Зрењанин, (2003).
- [194] **Станковић, Н.**: Методологија одржавања клизних лежишта парних турбина, Магистарска теза, Технички факултет „Михајло Пупин“, Зрењанин, (2010).

- [195] Илић, Б.: Аутоматизовани дијагностички модели и њихов утицај на поузданост техничких система, Докторска дисертација, Технички факултет „Михајло Пупин“, Зрењанин, (2016).
- [196] Вуловић, С.: Интегрисани модел одржавања заснован на успостављању законитости промене механичких вибрација и његов утицај на прогностику стања ротационих машина, Докторска дисертација, Технички факултет „Михајло Пупин“, Зрењанин, (2018).
- [197] Милошевић, Д.: Модели обезбеђења поузданости сложених постројења у термоелектранама, Докторска дисертација, Технички факултет „Михајло Пупин“, Зрењанин, (2015).
- [198] Бркић, Р.: Моделовање сигурности и поузданости преноса података у железничком интегралном систему, Докторска дисертација, Технички факултет „Михајло Пупин“, Зрењанин, (2011).
- [199] Jovanović, A., Renn, O., Salvi, O. eds: 2nd INTeg – Risk Conference: New Technologies & Emerging Risk (Dealing with multiple and interconnected emerging risk, INTeg – Risk, Stuttgart (Germany), Steinbeis Edition (2010).
- [200] RIMAP RTO or RIMAP Demo project: [http:// Research.dnv/rimap.com](http://Research.dnv/rimap.com)
- [201] RIMAP TN: <http://www.mpa-lifetech.dr/rimap>
- [202] Ђорђевић, П., Кирин, С., Седмак, А., Џиндо, Е.: Анализа ризика интегритета конструкција, Научно-стручни часопис, Интегригет и век конструкција, Вол. 11, Бр. 2, Београд, 2011.
- [203] **Станковић, Н.**, Адамовић, Ж., Савић, Б., Јањић, Н., Илић, Б.: Утицај техничке дијагностике на поузданост парних турбина, XVIII Конференција „Техничка дијагностика саобраћајних возила“, Врњачка Бања–Гоч, 01-02 јун, 2018.

10. ПРИЛОЗИ

10.1 ОПШТЕ О ПРЕДУЗЕЋИМА У КОЈИМА СУ СЕ ИЗВОДИЛА ЕМПИРИЈСКА ИСТРАЖИВАЊА

Емпиријска истраживања су урађена у *Термоелектрани-тополани „Нови Сад“* у Новом Саду, на парним турбинама *PT-135/165-130/15* и *T-110/120-130-4*.

ТЕ-ТО „Нови Сад“ у Новом Саду је енергетски објекат за комбиновану производњу електричне енергије, технолошке паре и топлотне енергије.

Смештена је на левој обали реке Дунав, један километар низводно од ушћа канала ДТД у Дунав и простире се на 50 хектара.

Истраживања су, такође, урађена на турбогенератору у термоелектрани „Костолац“ у Костољцу.

10.1.1 Принцип рада парне турбине *PT-135/165-130/15*⁴⁵

Парна топлификациона турбина *PT-135/165-130/15* је кондезациона, двокућишна машина без међупрегревања паре у котлу.

Турбина има три регулисана одузимања (производно и два топлификациона) и пет нерегулисаних одузимања за регенеративно загревање кондезата и напојне воде и једно производно нерегулисано одузимање.

Водена пара се до турбине доводи са два паровода свеже паре који се иза стоп вентила рачва на четири паровода и преко четири регулациона вентила улази у цилиндар високог притиска (*CVP*).

Пара пролази кроз регулациони, акциони степен и шест степени притиска у унутрашњем кућишту *CVP*, прави окрет за 180° и усмерава се између два оклопа у следећих шест степени притиска у спољашњем делу *CVP*.

Из *CVP* део паре прелази у цилиндар ниског притиска (*CNP*), а део се одузима за потрошаче технолошке паре.

На *CNP* су два регулациона одузимања паре за топлификацију.

Када пара изврши механички рад, прође кроз турбину она се кондезује у кондезатору и у виду кондезатора се враћа поново у циклус.

⁴⁵ Шушњевић, З., Стевановић, С., Лукић, Ј., Бајчета, М.: Збирка упустава за руковање турбинским постројењем, ЈП „Панонске електране“ ТЕ-ТО „Нови Сад“ Нов Сад, 2001.



Слика 10.1.: Изглед Термоелектране-топлане Нови Сад (просторни изглед)

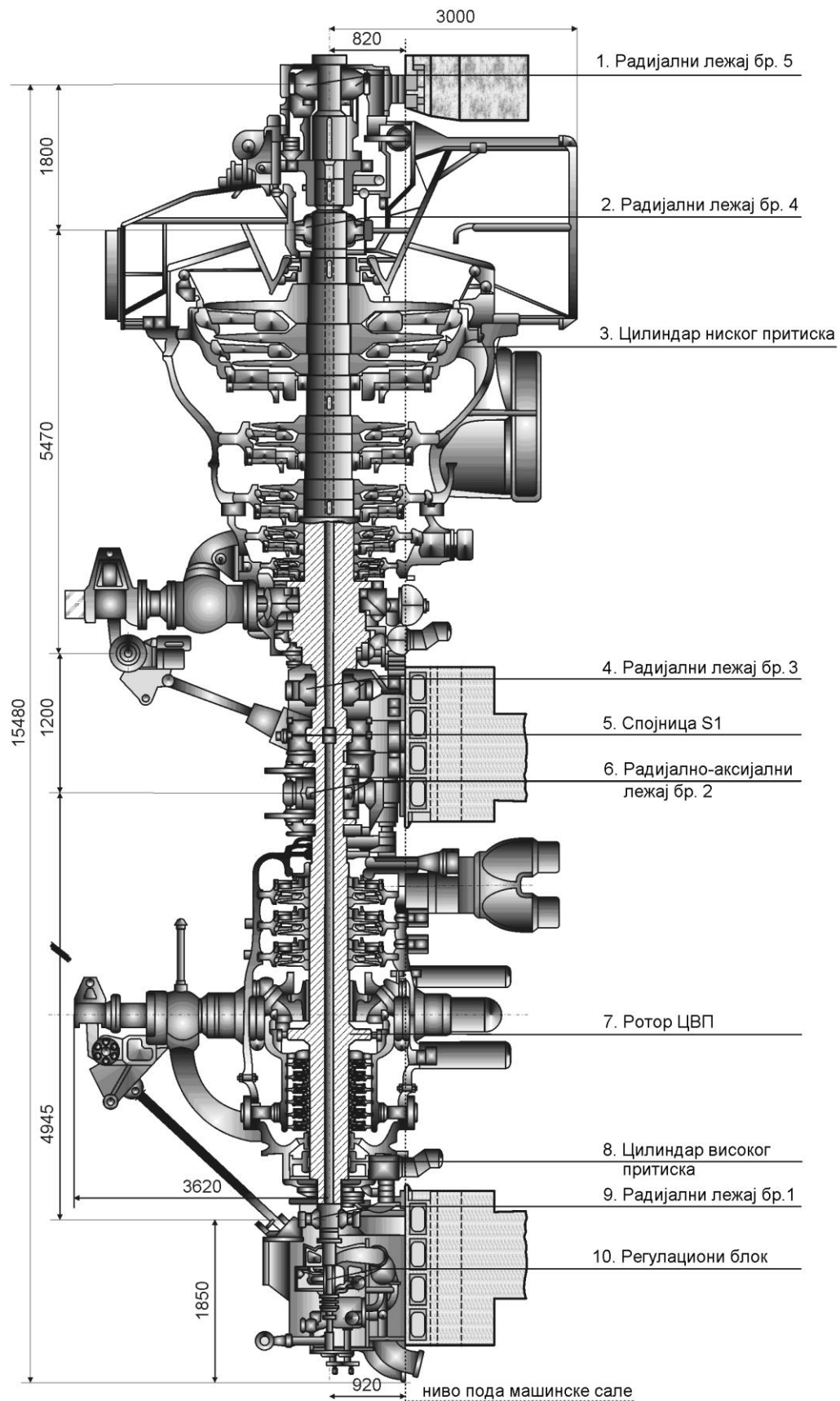


Слика 10.2.: Изглед парне турбине РТ-135 /165-130/15 у Термоелектрани-топлани „Нови Сад“



Слика 10.3.: Изглед парне турбине Т-110/120-130-4 у Термоелектрани-топлани „Нови Сад“ (просторни изглед)

На слици 10.4. дат је пресек парне турбине *PT-130/165-130/15*.



Слика 10.4: Шематски приказ парне турбине *PT-135/165-130/15*.

10.1.2 Принцип рада парне турбине Т-110/120-130-4⁴⁵

Парна топлификациона турбина Т-110/120-130-4 са кондезационим уређајима и са два регулациона одузимања паре за грејање, предвиђена је за директно покретање генератора и одвајање топлоте ради грејања.

При степенастом загревању вреле воде из два топлификациона одузимања, регулација одржава задату температуру вреле воде иза VZ-2. При загревању вреле воде једним топлификационим одузимањем, температура вреле воде одржава се иза VZ-1.

Притисак у регулаторима вреловодног одузимања:

- у горњем одузимању: 0,6-2,5 *bar*-а при укљученом оба вреловодна одузимања
- у доњем одузимању: 0,6-2,0 *bar*-а при искљученом горњем топлификационим одузимању.

Максимална снага турбине од 120 [MW] постиже се када нема нерегулисаног одузимања, осим за регулацију:

- а) при вреловодном одузимању према дијаграмима режимима рада
- б) у кондезационом режиму.

Постоји могућност рада турбине у блоку са котлом ради чега постоји:

- а) уређај за пријем паре у кондезатор, у периоду потпале и при скидању оптерећења
- б) експандер за пријем дренаже високог притиска од паровода свеже паре.

Ако турбина није предвиђена за рад по блок шеми (са попречним везама), тада не постоје цевоводи од *SRRS* (стартна редуцир расхладна станица) или *RRS* (редуцир расхладна станица) ка уређају за пријем паре у кондезатор, цевоводи за допунско хлађење редуковане паре и експандер дренаже високог притиска блока са цевоводима и уређајима за хлађење.

Постоје и уређаји за брзо хлађење турбине паром од 13 бара, 260-290 [°C] и дохлађиване ваздухом, који се користи и за старт турбине на клизне параметре.

У табели 10.1. дати су основни параметри парне турбине *PT 135/165-130/15*, а у табели 10.2. дати су основни подаци за регенеративно одузимање паре.

10.1.3 Основне карактеристике турбогенератора Термоелектране „Костолац“ у Костолицу⁴⁶

1. Блок А1

Парна турбина тип: *K-100-90 (BK 100-6)*

- | | |
|--|--------------|
| – Снага: | 100 [MW] |
| – Број обртаја ротора: | 3000 [o/min] |
| – Температура паре на улазу у турбину: | 535 [°C] |
| – Притисак паре на улазу у турбину: | 90 [bar] |

⁴⁶ Документација Термоелектране „Костолац“

– Проток паре: 363 [t/h]

Generator: TVF-110-2(EY3)

– Привидна снага: 137,5 [MVA]

– Напон намотаја статора: 10500 [V]

– Струја статора : 7560 [A]

– Учесталост : 50 [Hz]

– Активна снага: 110 [MW]

Параметри парне турбине PT-135/165-130/15.	Вредност параметра	Јединице
Апсолутни притисак прегрејане паре	330	[bar]
Температура прегрејане паре	555	[°C]
Број обртаја ротора	3000	[o/min]
Номинална снага турбине	135	[MW]
Максимална снага турбине	165	[MW]
Максимална потрошња прегрејане паре	760	[t/h]
Максимална снага у кондензационом режиму	120	[MW]
Потрошња паре у кондензационом режиму, при максималној снази	445	[t/h]
Номиналне величине истовремених одузимања при номиналној снази:		
- производно при притиску од 15 bar-a	320	[t/h]
- топлификационо (збирно за оба одузимања) при притиску вршног одузимања 0,8 bar-a	128	[MW] (око 210 t/h)
Максимална величина производног одузимања, при номиналној снази од 135 [MW] и притиску од 15 bar-a, а без топлификационих одузимања.	390	[t/h]

Табела 10.1: Основни параметри парне турбине PT-135/165-130/15⁴⁵

10.2 РЕЗУЛТАТИ ЕКСПЛОАТАЦИОНИХ ПРАЋЕЊА НЕПЛАНСКИХ ЗАСТОЈА

Експлоатациона праћења непланских застоја урађена су у времену трајања од 2011. до 2015. године на две парне турбине у ТЕ-ТО „Нови Сад“ у Новом Саду и то за турбине:

- PT 135/165-130/15
- T-110/120-130-4.

Од 2016. године до краја марта 2018. године извођена су експлоатациона праћења непланских застоја (отказа) за парну турбину Т-110/120-130-4 након примене модела одржавања на бази ризика.

У табели 10.3 дата су времена трајања непланских застоја у периоду од 2011. до 2015. године за парну турбину РТ-135/165-130/15.

Број одвода	Регенеративни загрејач	Величина стања паре у одводу		Количина паре која се одузима	Одвод је иза ступња №
		[bar]	[°C]	[t/h]	
1.	Производно нерегулисано одузимање	34.30		90.0	7
2.	ZVP-7	33.30	375	33.9	9
3.	ZVP-6	22.40	325	29.8	11
4.	ZVP-5	14.70	275	33.0÷4.8	13
5.	Деаератор	14.70	275	14.6	13
6.	ZNP-4	5.00	176	30.0	16
7.	ZNP-3	2.45	27	28.0	16
8.	ZNP-2	0.78	-	7.7	21
9.	ZNP-1	0.20	-	-	23

Табела 10.2: Основни подаци за регенеративно одузимање паре⁴⁵

Турбина РТ-135/165-130/15				
Година	Месећ	Дијагностика стања	Отказ - застој	Укупно застој
2011.	јануар		2 h 19 min	2 h 19 min
	новембар	1 h 02 min	1 h 57 min	2 h 59 min
	децембар		2 h 55 min	2 h 55 min
Укупно:		1 h 02 min	7 h 11 min	8 h 13 min
2012.	август		0 h 25 min	0 h 25 min
Укупно:		0 h 00 min	0 h 25 min	0 h 25 min
2013		Турбина није била у експлоатацији		
2014				
2015				
Укупно:		1 h 02 min	7 h 36 min	8 h 38 min

Табела 10.3: Времена трајања непланских застоја у периоду од 2011. до 2015. године за парну турбину РТ-135/165-130/15

У табели 10.4 дата су времена трајања непланских застоја у периоду од 2011. до 2015. године за парну турбину Т-110/120-130-4.

Турбина Т-110/120-130-4				
Година	Месец	Дијагностика стања	Отказ - застој	Укупно застој
2011.	јануар		0 h 32 min 0 h 27 min	0 h 32 min 0 h 27 min
	новембар		2 h 58 min 3 h 25 min	2 h 58 min 3 h 25 min
	децембар	0 h 49 min 1 h 24 min		0 h 49 min 1 h 24 min
Укупно:		2 h 13 min	7 h 22 min	9 h 35 min
2012.	јануар	1 h 41 min		1 h 41 min
	август		3 h 39 min 0 h 22 min 0 h 10 min 2 h 08 min 16 h 35 min 0 h 24 min	3 h 39 min 0 h 22 min 0 h 10 min 2 h 08 min 16 h 35 min 0 h 24 min
	децембар		1 h 34 min 213 h 47 min 5 h 54 min	1 h 34 min 213 h 47 min 5 h 54 min
Укупно:		1 h 41 min	243 h 53 min	245 h 34 min
2013	јануар		1 h 11 min 0 h 15 min	1 h 11 min 0 h 15 min
Укупно:		0 h 00 min	1 h 26 min	1 h 26 min
2014	јануар		1 h 15 min	1 h 15 min
Укупно:		0 h 00 min	1 h 15 min	1 h 15 min
2015	јануар	0 h 00 min	0 h 00 min	0 h 00 min
	децембар	0 h 00 min	0 h 00 min	0 h 00 min
Укупно:		0 h 00 min	0 h 00 min	0 h 00 min
Укупно 2011 - 2015. г.:		3 h 54 min	253 h 56 min	257 h 53 min

Табела 10.4: Времена трајања непланских застоја у периоду од 2011. до 2015. године за парну турбину Т-110/120-130-4.

Времена трајања непланских застоја у периоду од 2016. до 2018. године за парну турбину Т-110/120-130-4 дате су у табели 10.5, након примене модела одржавања на бази ризика парних турбина.

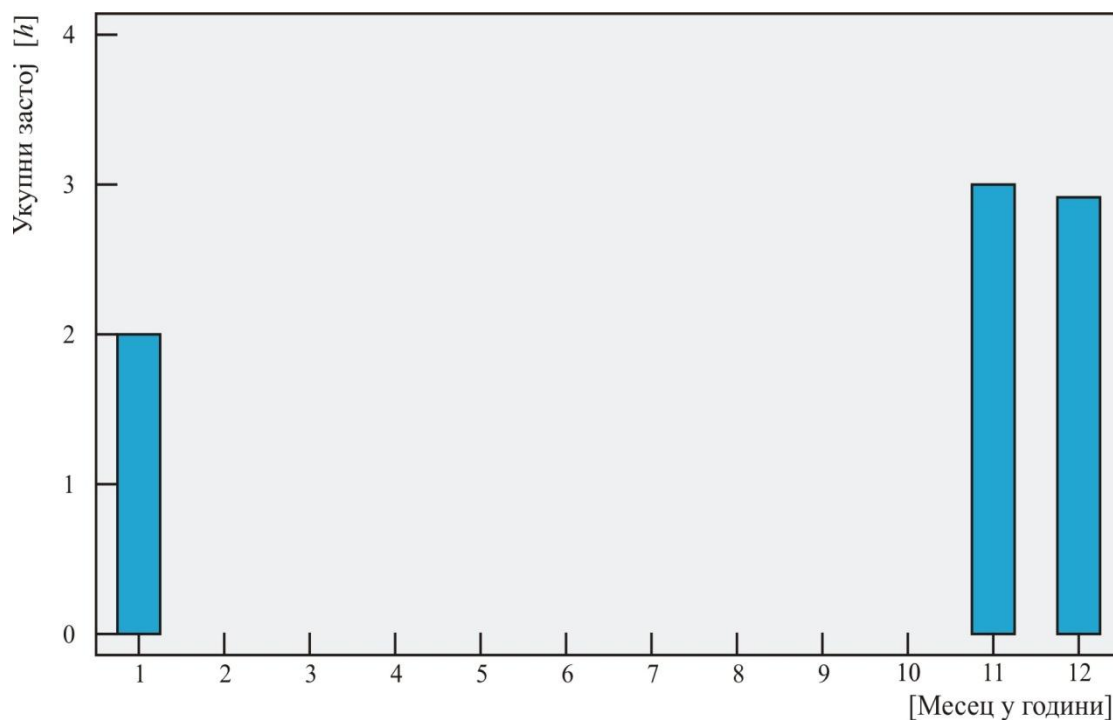
Правилном применом модела одржавања на бази ризика парних турбина јасно се може закључити да су смањени застоји (откази) у великој мери, тако да није било већих непланираних прекида у производњи електричне и топлотне енергије.

Овим је и оправдана примена новоразвијених модела одржавања на бази ризика, као и њихов утицај на поузданост парних турбина.

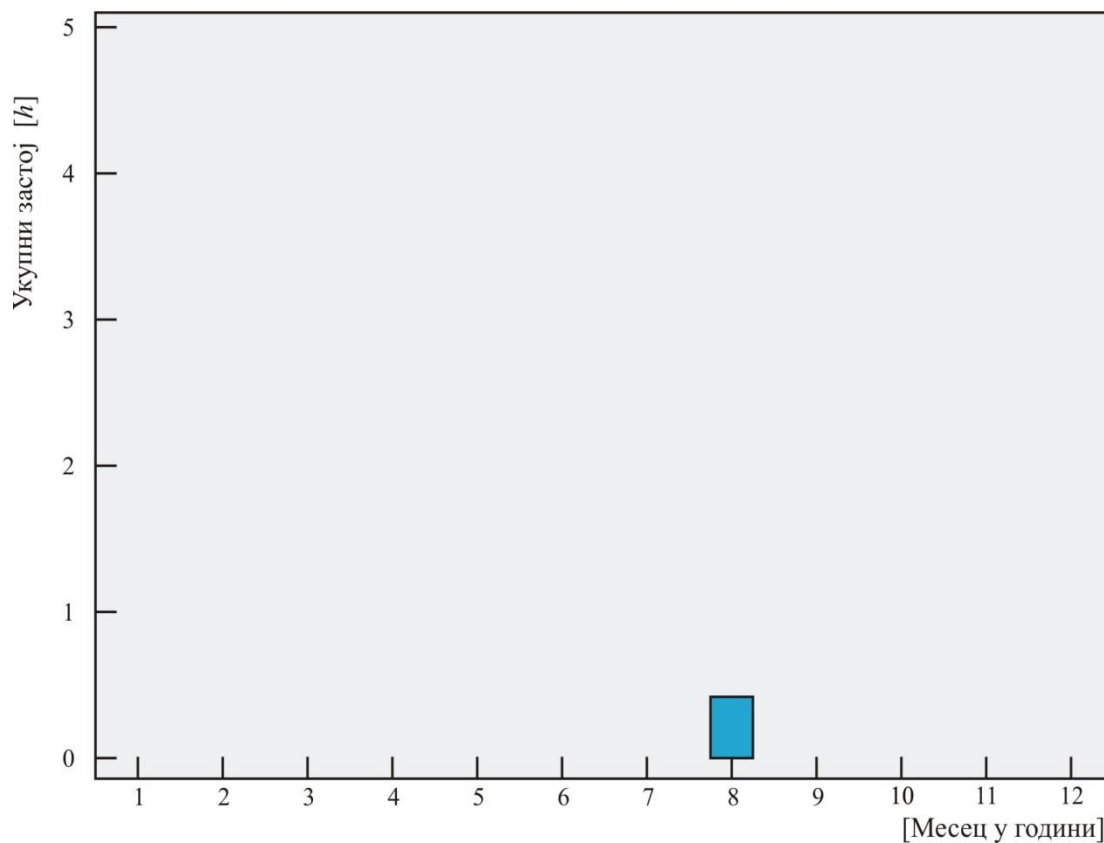
Турбина Т-110/120-130-4				
<i>Година</i>	<i>Месећ</i>	<i>Дијагностика стања</i>	<i>Отказ - застој</i>	<i>Укупно застој</i>
2016	јануар	0 h 00 min	1 h 50 min	1 h 50 min
	децембар	0 h 00 min	1 h 36 min	1 h 36 min
Укупно:		0 h 00 min	0 h 00 min	3 h 26 min
2017	јануар – децембар	0 h 00 min	0 h 00 min	0 h 00 min
	Укупно:	0 h 00 min	0 h 00 min	0 h 00 min
2018	јануар - март	0 h 00 min	0 h 00 min	0 h 00 min
	Укупно:	0 h 00 min	0 h 00 min	0 h 00 min
Укупно 2016 - 2018. г.:		0 h 00 min	3 h 26 min	3 h 26 min

Табела 10.5: Времена трајања непланских застоја у периоду од 2016. до 2018. године за парну турбину Т-110/120-130-4, након примене развијених модела одржавања на бази ризика парних турбина

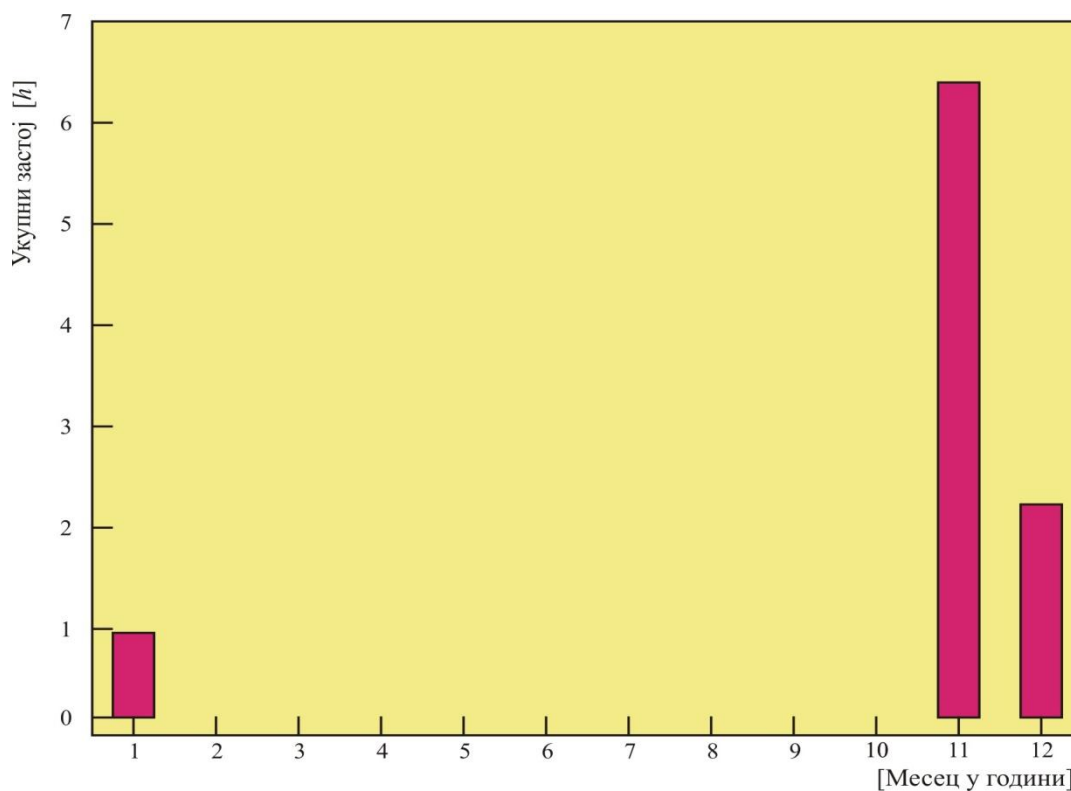
На сликама 10.5 – 10.12 графички су приказани застоји за поједине године по месецима парних турбина РТ-135/165-130/15 и Т-110/120-130-4.



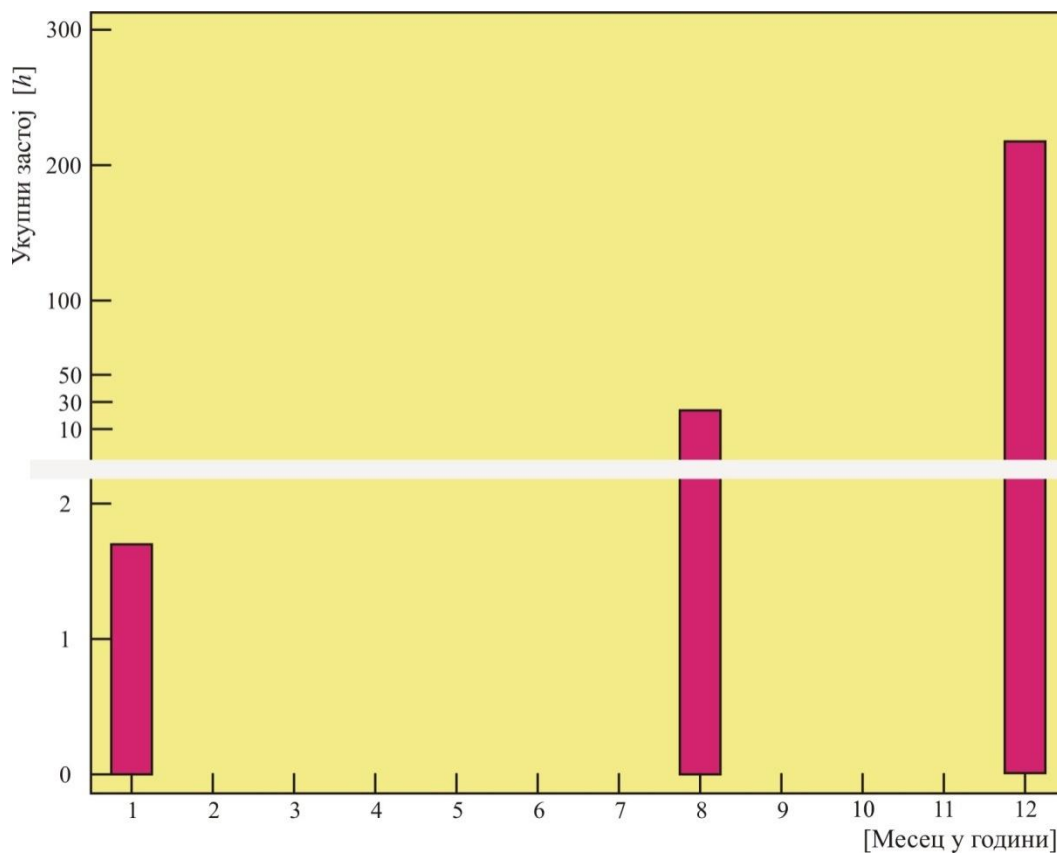
Слика 10.5: Укупни застој по месецима у експлоатацији парне турбине РТ-135/165-130/15 за 2011. годину



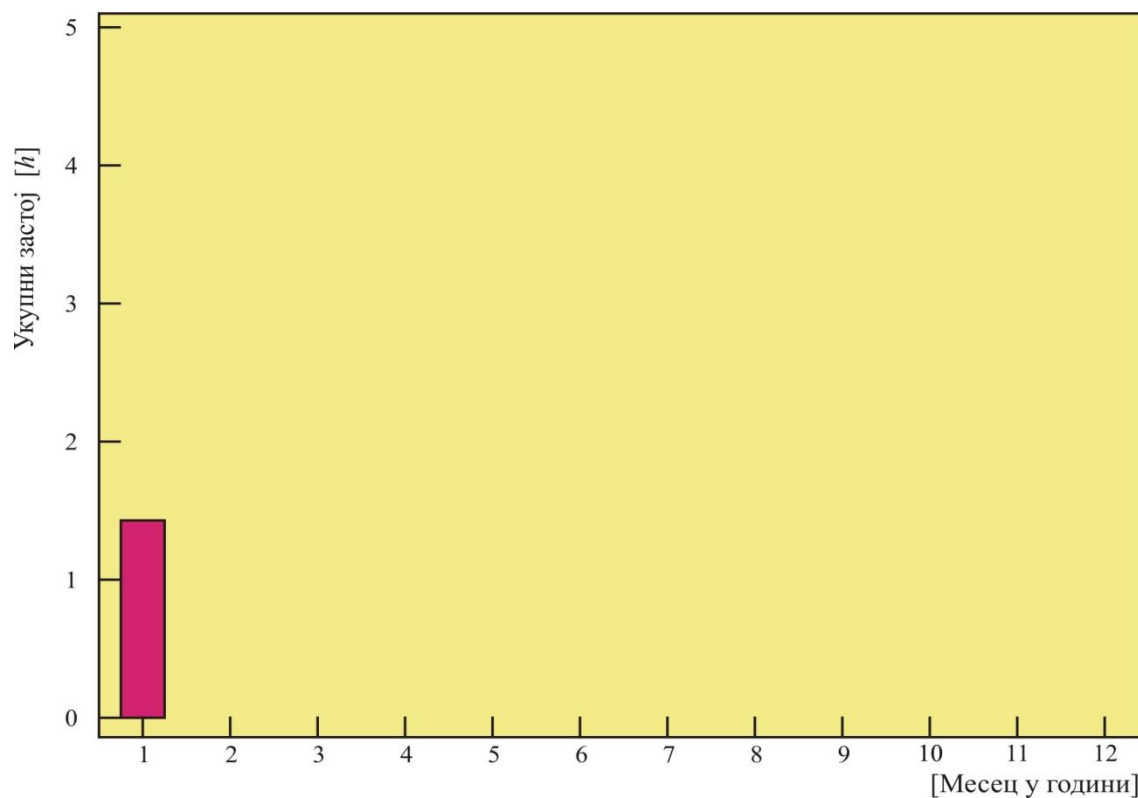
Слика 10.6: Укупни застој по месецима у експлоатацији парне турбине PT-135/165-130/15 за 2012. годину



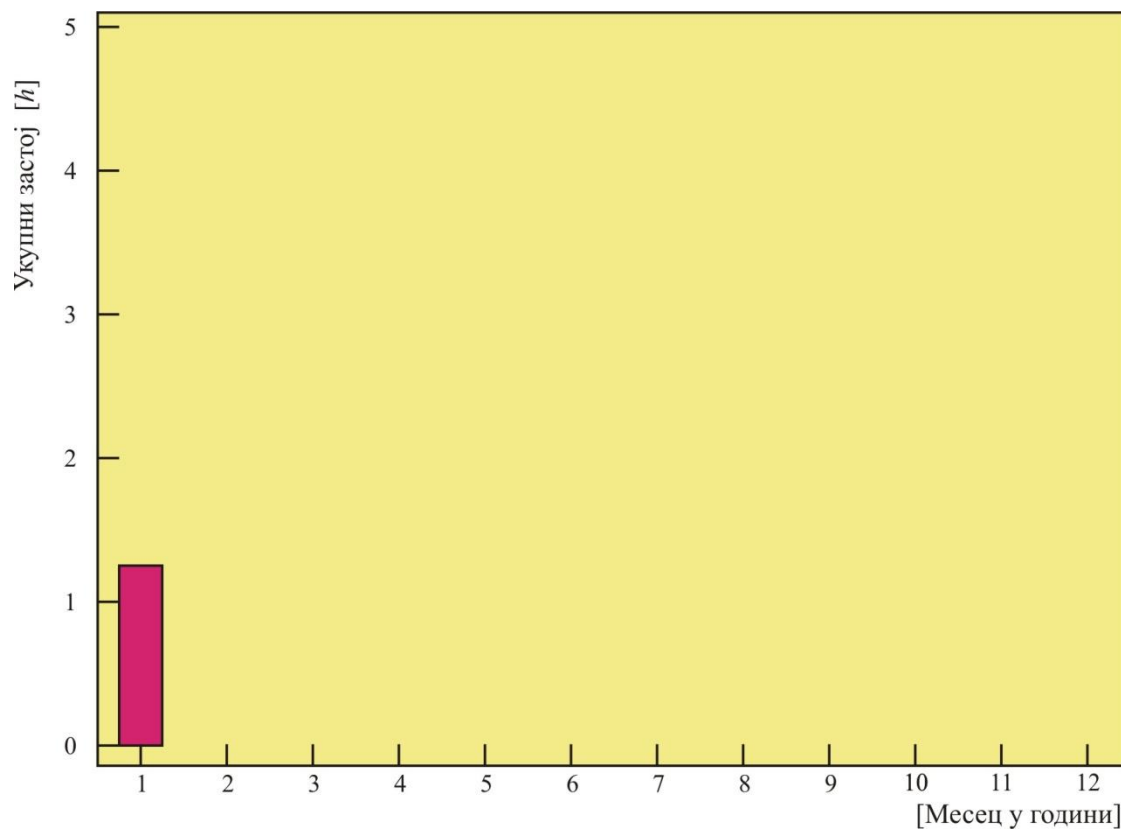
Слика 10.7: Укупни застој по месецима у експлоатацији парне турбине T-110/120-130-4 за 2011. годину



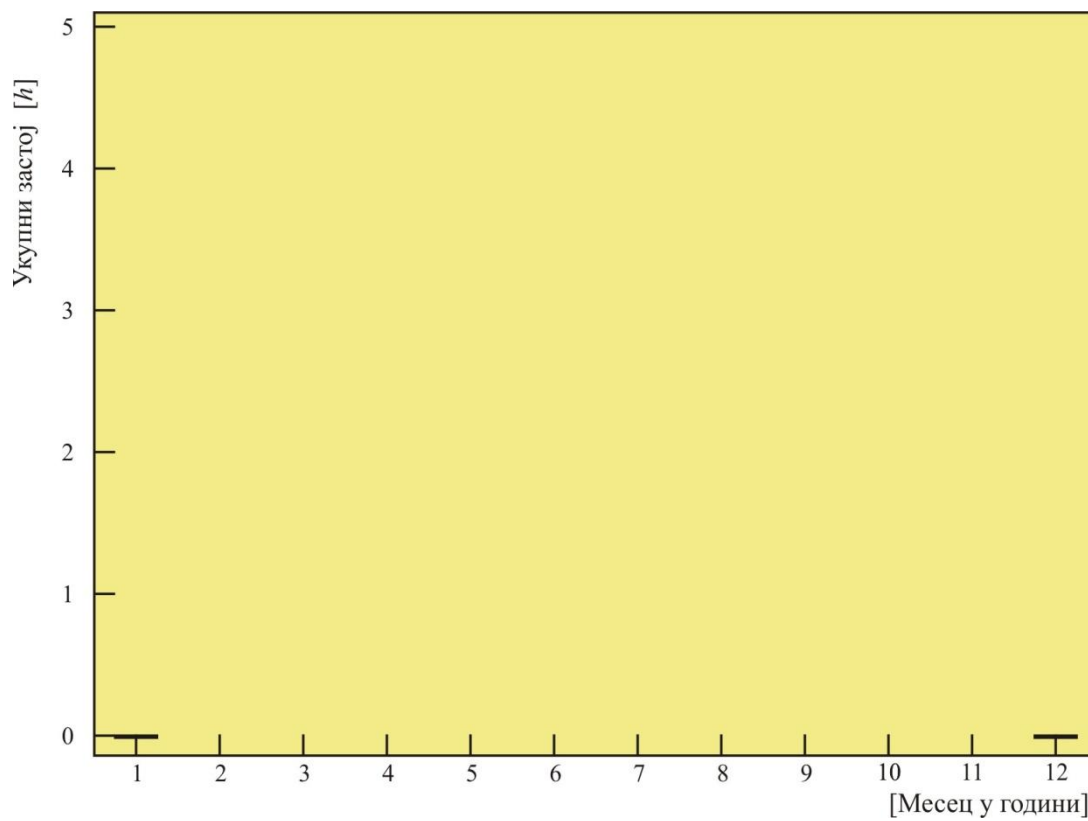
Слика 10.8: Укупни застој по месецима у експлоатацији парне турбине T-110/120-130-4 за 2012. годину



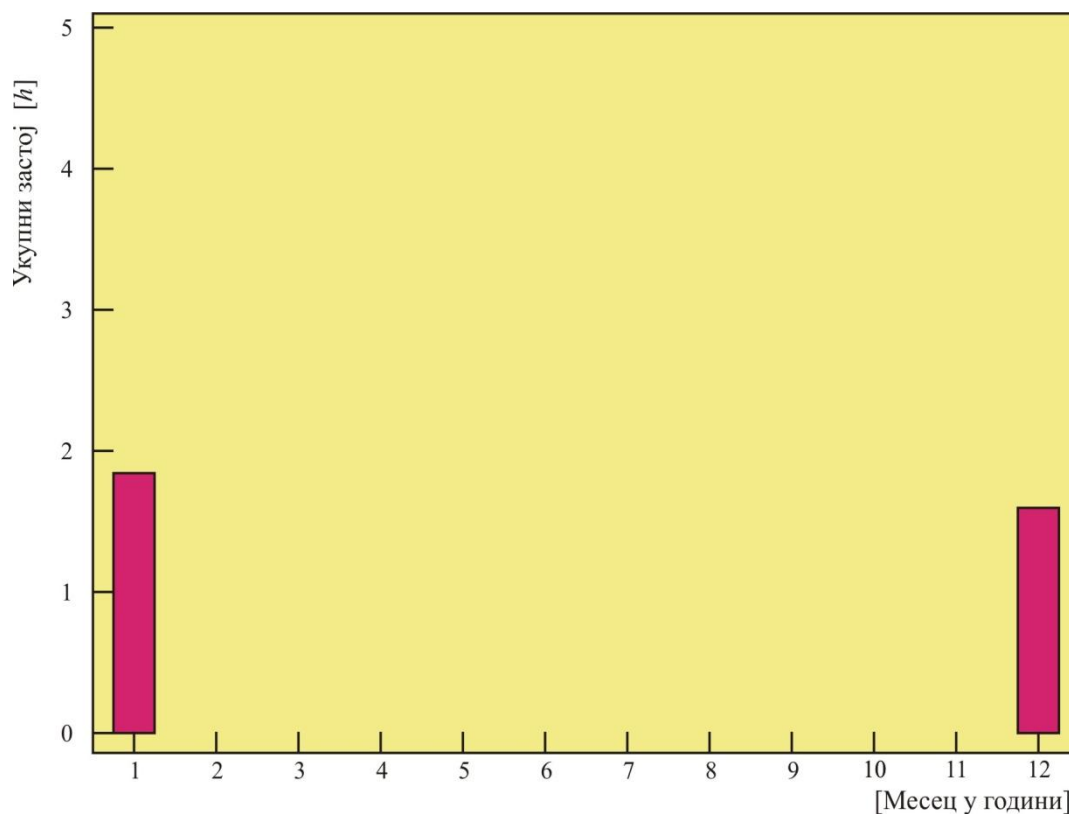
Слика 10.9: Укупни застој по месецима у експлоатацији парне турбине T-110/120-130-4 за 2013. годину



Слика 10.10: Укупни застој по месецима у експлоатацији парне турбине T-110/120-130-4 за 2014. годину



Слика 10.11: Укупни застој по месецима у експлоатацији парне турбине T-110/120-130-4 за 2015. годину



Слика 10.12: Укупни застој по месецима у експлоатацији парне турбине T-110/120-130-4 за 2016. годину

У табели 10.6. дат је преглед стартовања и застоја блока А1 (турбина РТ 135/165-130/15) и блока А2 (турбина Т-110/120-130-4) ТЕ-ТО “Нови Сад” у времену од 2011. до 2015. године

Редни број	Година	Датум	Агрегат		Време [h:min]	Стање агрегата пре операције	Разлог	Напомена (коментар узрока застоја)
			Блок А1	Блок А2				
1	2011.	06.01. 2011	ТА-1		22 h 35min	топло	искључење по налогу диспечера	
2		17.01. 2011		ТА-2	13 h 35min	топло	испад по заштити	испад турбине по заштити од осног помака који су грешком активирали радници из Суботице
3		17.01. 2011		ТА-2	14 h 07min	топло	Синхронизација са мрежом	
4		17.01. 2011		ТА-2	14 h 17min	топло	испад турбине по заштити	испад турбине по лажној проради заштите "висока температура уља и пад притиска воде за хлађење уља"
5		17.01. 2011		ТА-2	14 h 44min	топло	синхронизација са мрежом	

6	28.01.2011	ТА-1		21 h 25min	хладно	синхронизација са мрежом	
7	29.01.2011	ТА-1		04 h 46min	хладно	синхронизација са мрежом	
8	29.01.2011	ТА-1		07 h 05min	хладно	синхронизација са мрежом	
9	03.11.2011	ТА-1		04 h 24min	хладно	синхронизација са мрежом	
10	04.11.2011		ТА-2	22 h 28min	хладно	синхронизација са мрежом	
11	05.11.2011		ТА-2	04 h 17min	топло	испад турбине по заштити	искључена турбина по испад КЗ (висок ниво)
12	05.11.2011		ТА-2	08 h 15min	топло	синхронизација са мрежом	
13	11.11.2011	ТА-1		12 h 42min	топло	искључење по налогу диспечера	
14	11.11.2011	ТА-1		13 h 44min	топло	синхронизација са мрежом	
15	15.11.2011		ТА-2	13 h 17min	топло	испад турбине по заштити	искључење на захтев рук. ЕЕП због поремећаја у напајању сопствене мреже
16	15.11.2011	ТА-1		13h 18min	топло	ручно искључење турбине	искључење на захтев рук. ЕЕП због поремећаја у напајању сопствене мреже
17	15.11.2011	ТА-1		15 h 15min	топло	синхронизација са мрежом	
18	15.11.2011		ТА-2	15 h 42min	топло	синхронизација са мрежом	
19	09.12.2011	ТА-1		16 h 30min	топло	испад турбине по заштити	испад турбине по заштити по сигналу "течност у генератору"
20	09.12.2011	ТА-1		19 h 24min	топло	синхронизација са мрежом	
21	12.12.2011	ТА-1		19 h 34min	топло	искључење по налогу диспечера	
22	28.12.2011		ТА-2	05 h 29min	топло	ручно искључење турбине	плански искључена турбина ради интервенције на вентилу 022-полуга сервомотора
23	28.12.2011		ТА-2	06 h 09min	топло	синхронизација са мрежом	

24		28.12.2011		ТА-2	06 h 39min	топло	ручно искључење турбине	плански искључена турбина ради корекције радова на регулационом вентилу ЦВП-а
25		28.12.2011		ТА-2	08 h 13min	топло	синхронизација са мрежом	
26	2012.	30.01.2012		ТА-2	03 h 16min	топло	Испад турбине по заштити	Испад турбине због испада осигурача на вези брегасте осовине – полуга серво мотора
27		30.01.2012		ТА-2	04 h 57min	топло	синхронизација са мрежом	
26		15.08.2012		ТА-2	09 h 48min	хладно	синхронизација са мрежом	
28		15.08.2012		ТА-2	22 h 33min	топло	испад турбине по заштити	испад турбине услед лажне сигнализације осног помака
29		16.08.2012		ТА-2	02 h 12min	топло	синхронизација са мрежом	
30		16.08.2012		ТА-2	16 h 01min	топло	испад турбине по заштити	испад турбине због појаве сигнала преко струјне заштите
31		16.08.2012		ТА-2	16 h 23min	топло	синхронизација са мрежом	
32		16.08.2012		ТА-2	16 h 30min	топло	испад турбине по заштити	пао стоп вентил по вакуумској заштити иако је вакуум био -0,97
33		16.08.2012		ТА-2	16 h 40min	топло	синхронизација са мрежом	
34		16.08.2012		ТА-2	17h 41min	топло	испад турбине по заштити	пао стоп вентил не зна се разлог
35		16.08.2012		ТА-2	19 h 49min	топло	синхронизација са мрежом	
36		16.08.2012		ТА-2	20h 20min	топло	испад турбине по заштити	долази до гашења горионика К-1, наглог пада терета а затим и до наглог напајања котла. Касније обиласком утврђено: пуцање цевног система котла.
37		16.08.2012	ТА-1		11 h 33min	хладно	синхронизација са мрежом	
38		17.08.2012		ТА-2	13 h 55min	топло	синхронизација са мрежом	

39		17.08.2012	ТА-1		07 h 01min	топло	испад турбине по заштити	испад турбине услед лажне сигнализације пада вакуума
40		17.08.2012	ТА-1		07 h 26min	топло	синхронизација са мрежом	
41		26.08.2012		ТА-2	12 h 22min	топло	испад турбине по заштити	изненадан пад снаге на ТА-2 услед затварања вентила 022 (без манипулисања)искључена ТА-2 кључем
42		26.08.2012		ТА-2	12 h 46min	топло	синхронизација са мрежом	
43		25.09.2012		ТА-2	08 h 33min	топло	искључење по налогу диспечера	
44		02.12.2012		ТА-2	10 h 09min	хладно	синхронизација са мрежом	
45		03.12.2012		ТА-2	00 h 18min	топло	испад турбине по заштити	
46		03.12.2012		ТА-2	1 h 52min	топло	синхронизација са мрежом	
47		17.12.2012		ТА-2	15 h 23min	топло	испад турбине по заштити	искључена турбина због појаве паре у машинској сали, пуцања компензатора на преструјној цеви ниског притиска
48		26.12.2012		ТА-2	13 h 10min	хладно	синхронизација са мрежом	
49		30.12.2012		ТА-2	12 h 00min	топло	испад турбине по заштити	испад турбине због испада когла (касније обиласком К-3 уочено дување паре на левом отвору у бубањ)
50		30.12.2012		ТА-2	17 h 54min	топло	синхронизација са мрежом	
51	2013.	11.01.2013		ТА-2	11 h 06min	топло	испад турбине по заштити	испад турбине по осном помаку
52		11.01.2013		ТА-2	12 h 17min	топло	синхронизација са мрежом	
53		30.01.2013		ТА-2	09 h 31min	топло	испад турбине по заштити	испад турбине због лажног осног помака
54		30.01.2013		ТА-2	09 h 46min	топло	синхронизација са мрежом	
55	2014.	16.01.2014		ТА-2	21 h 56min	топло	искључење по налогу диспечера	
56		24.01.		ТА-2	07 h	хладно	синхронизација са мрежом	

		2014			17min			
57		24.01.2014		ТА-2	11 h 50min	топло	испад турбине по заштити	удар из мреже - искључио циркулациону пумпу бр.2 и КЦ пумпу бр.2
58		24.01.2014		ТА-2	13 h 10min	топло	синхронизација са мрежом	
59		14.01.2015		ТА-2	21 h 57min	топло	искључење по налогу диспечера	
60	2015.	26.12.2015		ТА-2	11 h 31min	хладно	синхронизација са мрежом	
61		26.12.2015		ТА-2	14 h 22min	топло	искључење због функционалних испитивања-пробни рад	функционална испитивања
62		26.12.2015		ТА-2	14 h 48min	топло	синхронизација са мрежом	
63		26.12.2015		ТА-2	15 h 15min	топло	искључење због функционалних испитивања-пробни рад	функционална испитивања
64		26.12.2015		ТА-2	15 h 19min	топло	синхронизација са мрежом	
65		26.12.2015		ТА-2	20 h 37min	топло	искључење због функционалних испитивања - пробни рад	функционална испитивања
66		26.12.2015		ТА-2	20 h 40min	топло	синхронизација са мрежом	

Табела 10.6: Преглед стартовања и застоја блока А1 (турбина РТ 135/165-130 /15) и блока А2 (турбина Т-110/120-130-4) ТЕ-ТО "Нови Сад" од 2011. до 2015. године

У табели 10.7. дат је преглед стартовања и застоја блока А2 (турбина Т-110/120-130-4) ТЕ-ТО "Нови Сад" у току 2016. године након примене развијених модела одржавања на бази ризика

Редни број	Година	Датум	Агрегат		Време [h:min]	Стање агрегата пре операције	Разлог	Напомена (коментар узрока застоја)
			Блок А1	Блок А2				
1	2016.	08.01.2016		ТА-2	22 h 42min	топло	искључење по налогу диспечера	

2	16.01.2016		ТА-2	11 h 13min	хладно	синхронизација са мрежом	
3	21.01.2016		ТА-2	08 h 02min	топло	испад турбине - прорадила електро заштита	испад турбине због пада активне снаге, узроковано радовима на трансмитеру вакуума
4	21.01.2016		ТА-2	08 h 22min	топло	синхронизација са мрежом	
5	26.01.2016		ТА-2	22 h 53min	топло	искључење по налогу диспечера	
6	02.12.2016		ТА-2	10 h 57min	хладно	синхронизација са мрежом	
7	12.12.2016		ТА-2	07 h 17min	топло	испад турбине прорадила надбрзинска заштита турбинског регулатора	испад турбине прорадила надбрзинска заштита турбинског регулатора (лажни сигнал)
8	12.12.2016		ТА-2	07 h 57min	топло	синхронизација са мрежом	
9	15.12.2016		ТА-2	21 h 07min	топло	испад турбине прорадила надбрзинска заштита турбинског регулатора	испад турбине прорадила надбрзинска заштита турбинског регулатора (лажни сигнал). По подацима систем инжењера мерење притиска уља на шеми заштите турбине су биле без комуникације
10	15.12.2016		ТА-2	21 h 32min	топло	синхронизација са мрежом	
11	16.12.2016		ТА-2	14 h 51min	топло	испад турбине прорадила надбрзинска заштита турбинског регулатора	узрокован радовима службе САО на РТУ-овима
12	16.12.2016		ТА-2	15h 06min	топло	синхронизација са мрежом	
13	26.12.2016		ТА-2	15 h 26min	топло	испад турбине прорадила турбинска заштита	оштећен кабал који је имао кратак спој.
14	26.12.2016		ТА-2	16 h 24min	топло	синхронизација са мрежом	

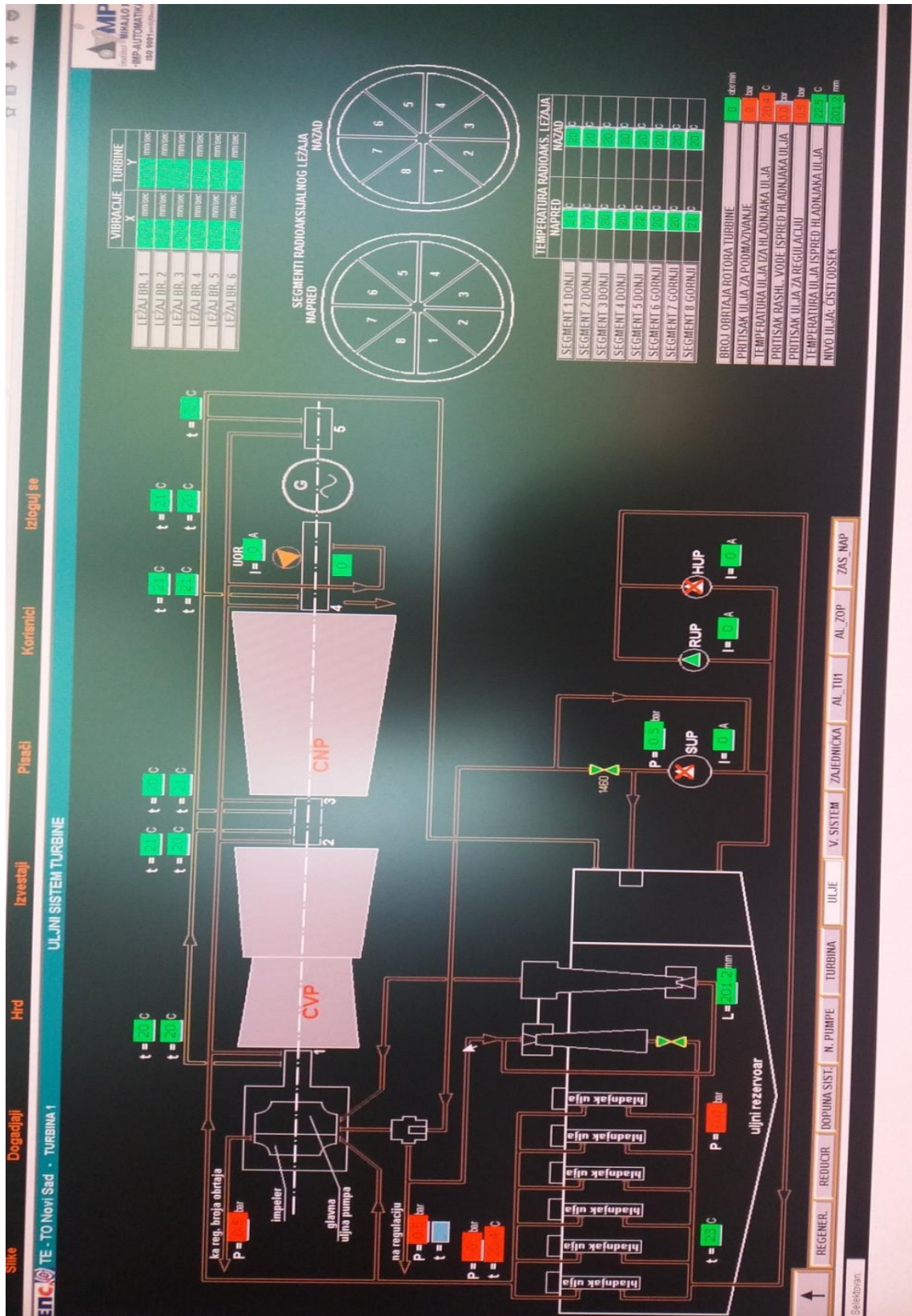
15	26.12.2016		ТА-2	18 h 12min	топло	испад турбине прорадила турбинска заштита	оштећен кабл који је имао кратак спој.
16	26.12.2016		ТА-2	18 h 23min	топло	синхронизација са мрежом	
17	26.12.2016		ТА-2	19 h 07min	топло	испад турбине прорадила турбинска заштита	оштећен кабл који је имао кратак спој.
18	26.12.2016		ТА-2	19 h 11min	топло	синхронизација са мрежом	

Табела 10.7: Преглед стартовања и застоја блока А2 (турбина Т-110/120-130-4) ТЕ-ТО “Нови Сад” у току 2016. године након примене развијених модела одржавања на бази ризика

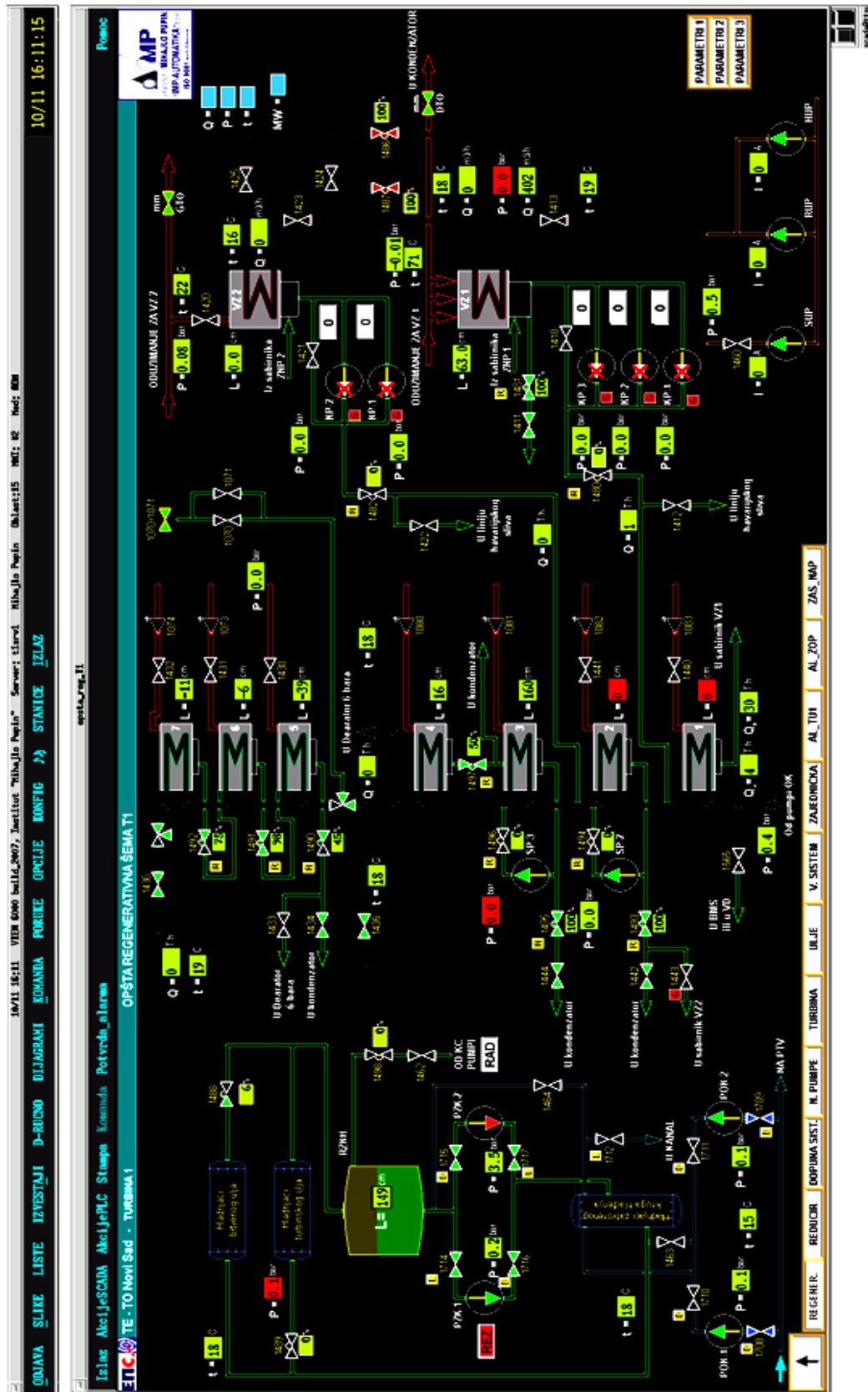
На слици 10.13 дат је развијени нумерички системски софтвер за брзине вибрација клизних лежишта, температуре радиоаксијалног лежишта, број обртаја ротора турбине, притисак уља за подмазивање, температура уља иза и испред хладњака уља, притисак расхладне воде испред хладњака уља, притисак уља за регулацију и ниво уља за парну турбину број 1 *PT-135/165-130/15* са измереним вредностима.³⁵

На слици 10.14 је дат визуелни приказ опште регенеративне шеме турбине и стања система у SCAD-систему на термокомандној табли (оператеру), где су приказане:

- актуелне вредности сигнала статуса уређаја (мотора, вентила, регулационих вентила итд...), положаја регулационих вентила, сигнала дојаве стања и сигнала аларма у систему
- актуелне вредности мерења
- дијалошке функције.



10.13: Razvijeni numerički sistemski softver za brzine vibracije i temperaturu radioaksijalnog ležišta, broj obrtaja rotora, pritisak ulja za podmazivanje, pritisak ulja za regulaciju, pritisak rashladne vode ispred hladnjača ulja, temperatura ulja iza i ispred hladnjača ulja i nivo ulja za parnu turbinu broj 1 - PT-135/165-130/15³⁵



Слика 10.14: Општа регенеративна шема турбине³⁵