UNIVERZITET U BANJOJ LUCI
MAŠINSKI FAKULTET BANJA LUKA

Dejan Branković

OPTIMIZACIJA POUZDANOSTI RADA PROIZVODNOG SISTEMA ZA PROIZVODNJU HIGIJENSKOG PAPIRA KORIŠĆENJEM KONCEPCIJA ODRŽAVANJA PREMA STANJU

- DOKTORSKA DISERTACIJA -

Banja Luka, 2018.

UNIVERSITY OF U BANJA LUKA
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

Dejan Branković

RELIABILITY OPTIMIZATION OF THE PRODUCTION SYSTEM FOR HYGIENE PAPER MANUFACTURING BY USING THE CONCEPT OF CONDITION BASED MAINTENANCE

- DOCTORAL DISSERTATION -

Banja Luka, 2018.

Република Српска
УНИВЕРЗИТЕТ У БАЊОЈ ЛУЦИ
Сенат Универзитета

Univerzitet u Banjoj Luci
MAŠINSKI FAKULTET BANJA LUKA
Broj: 16/1.1362/15
Datum: 03.08. 20 15.

Број: 02/04-3.2305-91/15
Дана, 16.07.2015. године

На основу члана 148. Закона о о високом образовању („Службени гласник Републике Српске“, 73/10, 104/11, 84/12, 108/13 и 44/15) и члана 33. Статута Универзитета у Бањој Луци, Сенат Универзитета на 45. сједници од 16.07.2015. године, д о н о с и

О Д Л У К У

Даје се сагласност на Извјештај о оцјени подобности теме и кандидата за израду докторске дисертације на Машинском факултету докторанта **мр Дејана Бранковића** под насловом **„Оптимизација поузданости рада производног система за производњу хигијенског папира коришћењем концепција одржавања према стању“.**

О б р а з л о ж е њ е

Машински факултет у Бањој Луци доставио је Сенату Универзитету на сагласност Извјештај о оцјени подобности теме и кандидата за израду докторске дисертације докторанта мр Дејана Бранковића под насловом „Оптимизација поузданости рада производног система за производњу хигијенског папира коришћењем концепција одржавања према стању“.

Сенат Универзитета је оцијенио да је Извјештај у складу са условима утврђеним Законом о универзитету, због чега је одлучено као у диспозитиву ове Одлуке.

ДОСТАВЉЕНО:
1. Именованом,
2. Машинском факултету 2х,
3. а/а.

ПРЕДСЈЕДАВАЈУЋИ СЕНАТА
Р Е К Т О Р
Проф. др Станко Ћ танић

UNIVERSITY OF BANJA LUKA

PODACI O MENTORU I DISERTACIJI

1) **Mentor rada**:
Red. prof. dr Zdravko N. Milovanović, Mašinski fakultet Banja Luka

2) **Naslov disertacije**:
Optimizacija pouzdanosti rada proizvodnog sistema za proizvodnju higijenskog papira korišćenjem koncepcija održavanja prema stanju

3) **Rezime**:
Predmet doktorske disertacije je istraživanje primjene koncepcije održavanja prema stanju s ciljem optimizacije pouzdanosti proizvodnog industrijskog sistema. Želja je da se realizacijom istraživanja ostvari teoretski doprinos održavanju kao naučnoj disciplini i da se poboljšaju procesi održavanja u praksi.

Posljednjih nekoliko decenija poklonjena je velika pažnja razvoju i primjeni različitih strategija i koncepcija održavanja u praksi. Uvidjelo se da troškovi kompletnog poslovnog sistema uveliko zavise od rezultata djelovanja službe održavanja. Na održavanje se danas ne gleda kao na aktivnost otklanjanja trenutnih problema/otkaza već na plansku aktivnost prevencije mogućih problema. Veliki proizvodni sistemi poklanjaju značajnu pažnju mogućnosti uvođenja on-line sistema praćenja proizvodnih procesa. Disertacija predstavlja nastojanje poboljšavanja procesa održavanja i proizvodnje primjenom metoda i sistema tehničke dijagnostike.

Održavanje prema stanju proizvodnih sistema za proizvodnju higijenskog papira primjenom metoda tehničke dijagnostike se pokazuje kao opravdana strategija jer se radi o kontinualnim proizvodnim procesima, kod kojih troškovni udio otkaza komponenti ili čitavog sistema premašuje visinu investicionog ulaganja u dijagnostičku opremu. Sistem papir mašine je izuzetno složena cjelina međusobno povezanih sklopova. Otkaz samo jednog elementa u serijskoj vezi kompletnog tehnološkog procesa dovodi do zastoja cijelog sistema. Potrebno je pokloniti veliku pažnju analizi kritičnih mjesta i izboru „uskih grla“, koje je potrebno posebno kontrolisati. Za kritična mjesta tehnološkog procesa analizira se opravdanost primjene mjera tehničke dijagnostike. Ukoliko rezultat analize pokaže pozitivnu ekonomsku isplativost odnosa visine investicionog ulaganja i troškova otkaza, realizacija investicione aktivnosti je opravdana, tj. oprema za praćenje parametara procesa se nabavlja. Samo ovakvim pristupom moguće je osigurati stabilnost proizvodnog procesa uz uvažavanje ekonomske politike i funkcije proizvodnog i poslovnog sistema.

4) **Ključne riječi**:
održavanje prema stanju, tehnička dijagnostika, efektivnost, pouzdanost, operativna gotovost, produktivnost

5) **Naučna oblast**:
Mašinstvo

6) **Naučno područje**:
Tehničke nauke

7) Klasifikaciona oznaka:
T 210

8) Tip odbrane licence Kreativne zajednice:
Autorstvo

9) UDK broj:
676.056.26:621.7/.9(043.3)

INFORMATION ABOUT THE MENTOR AND DISSERTATION

1) **Mentor of dissertation**:
Full professor PhD Zdravko N. Milovanović, Mašinski fakultet Banja Luka

2) **Title of dissertation**:
Reliability optimization of the production system for hygiene paper manufacturing by using the concept of condition based maintenance

3) **Resume**:
The subject of doctoral dissertation is the research of the application of the condition based maintenance concept in order to optimize the reliability of the production industrial system. The effort is to achieve a theoretical contribution to maintenance as a scientific discipline and to improve the maintenance processes in practice by realizing the research.

In the last few decades, great attention has been paid to the development and application of different strategies and concepts of maintenance in practice. It was perceived that the costs of a complete business system largely depend on the results of the operation of the maintenance service. Maintenance is not viewed today as an activity of removing current problems/failures, but rather on the planned activity of preventing possible problems. Large production systems pay great attention to the possibility of introducing an on-line monitoring system for production processes. The dissertation is an attempt to improve the maintenance and production process by applying methods and systems of technical diagnostics.

Condition based maintenance of the production systems for the production of hygienic paper by using the method of technical diagnostics proves to be a justified strategy because it is about continuous production processes in which the cost share of the failure of components or the entire system, exceeds the amount of investment in diagnostic equipment. The paper machine system is an extremely complex system of interconnected parts. The failure of only one element in the serial connection of the complete technological process leads to a standstill of the complete system. It is necessary to pay great attention to the analysis of critical parts and the choice of "bottlenecks" need to be specifically controlled. For the critical points of the technological process, the justification of the application of technical diagnostic measures is analyzed. If the result of the analysis shows the positive economic cost-effectiveness of the ratio of the investment level and the costs of the cancellation, realization of investment activity is justified, i.e the equipment for monitoring of process parameters will be procured. It is only by this approach that it is possible to ensure the stability of the production process, taking into account the economic policy and the function of the production and business system.

4) **Key words**:
condition based maintenance, technical diagnostic,effectiveness, reliability, operational readiness, productivity

5) **Science**:
Mechanical engineering

6) Scientific area:
Technical sciences

7) Classification mark:
T 210

8) The Creative Commons license defense type
Authorship (CC BY)

9) UDC number:
676.056.26:621.7/.9(043.3)

PREDGOVOR

Doktorska disertacija nastaje kao rezultat višegodišnjeg rada na poslovima organizovanja rada službe održavanja i obezbjeđenja uslova kontinualnog proizvodnog ciklusa u firmi za proizvodnju higijenskog papira. Glavni motiv ulaska u proces istraživanja veze održavanja i proizvodnje je poboljšavanje procesa održavanja u praksi. Završetku disertacije prethodio je niz stručnih radova objavljenih na domaćim i međunarodnim naučnim skupovima na temu događaja vezanih za problematiku koja je istraživana u radu.

S obzirom na to da je disertacija nastala uporedo s obavljanjem redovnih radnih dužnosti, tj. rukovođenjem kompletne službe održavanja industrijskog proizvodnog sistema, bilo je potrebno uložiti mnogo truda i vremena kako bi se sve aktivnosti uskladile i planski vremenski okvir ispoštovao. Izbor uže oblasti rada, definisanje i izdvajanje konkretnog problema istraživanja iz veoma širokog spektra tekućih događaja realnog proizvodnog sistema, kao i stalni zadatak da se iz inženjerske sfere iskorači u oblast naučnoistraživačkog rada bili su veoma zahtjevan i istovremeno izazovan cilj. U tom smislu veliku pomoć i razumijevanje mi je pružio profesor Zdravko N. Milovanović, kojem ovom prilikom neizmjerno zahvaljujem.

Iskreno sam zahvalan svojoj porodici na razumijevanju i podršci, a ponajviše ocu, koji nažalost nije dočekao da podijeli radost uspješnog završetka jednog životnog perioda.

Neprocjenjivo sam zahvalan poslovnom sistemu u kojem radim, u kojem sam stekao praktično iskustvo i u kojem sam realizovao eksperimentalna istraživanja. Velika je prednost imati realan sistem na koji se mogu primijeniti pozitivna naučna razmišljanja i koji može dati kvalitetnu povratnu vezu kao vodilju za dalja istraživanja.

Banja Luka, 2018. godine

SADRŽAJ

PREDGOVOR I
SADRŽAJ II
SPISAK SLIKA V
SPISAK TABELA VIII
OZNAKE IX

1. UVOD 1
1.1. Održavanje – osnova funkcionisanja proizvodnog sistema 1
1.2. Osnovni pojmovi, pretpostavke, metode, hipoteze i struktura rada 2

2. TEORIJSKE OSNOVE ODRŽAVANJA INDUSTRIJSKIH SISTEMA 6
2.1. Teorijske osnove 6
2.1.1. Pojam i definicija održavanja tehničkih sistema 6
2.1.2. Strategije i koncepcije održavanja 7
2.1.2.1. Korektivno održavanje 9
2.1.2.2. Preventivno održavanje 10
2.1.2.2.1. Plansko preventivno održavanje 10
2.1.2.2.2. Održavanje prema stanju 11
2.1.2.3. Terotehnološko održavanje 12
2.1.2.4. Logističko održavanje 13
2.1.2.5. Integrisano produktivno održavanje 13
2.1.2.6. Sveukupno efikasno upravljanje imovinom 15
2.1.2.7. Održavanje zasnovano na pouzdanosti 15
2.1.2.3. Ekspertni sistemi 15
2.1.2.3. Samoodržavanje 15
2.1.2.10. Usluge održavanja spoljnih specijalizovanih kompanija 15
2.2. Tehnička dijagnostika 18
2.2.1. Uvod 18
2.2.2. Stanje, promjene i kontrola stanja objekata praćenja 20
2.2.3. Metode mjerenja parametara procesa 21
2.2.3.1. Postupci tehničke dijagnostike 21
2.2.3.1.1. Subjektivni postupci tehničke dijagnostike 21
2.2.3.1.2. Objektivni postupci tehničke dijagnostike 22
2.2.3.1.2.1. Mjerenja pogonskih parametara 22
2.2.3.2. Ocjena stanja i prognoziranje ponašanja na osnovu dijagnoze 23
2.2.3.2.1. Alternativna ocjena 23
2.2.3.2.2. Prognoza preostalog perioda korišćenja 24
2.2.3.3. Metode prognoziranja 24
2.2.3.3.1. Greške dijagnoze 25
2.2.4. Tehnička dijagnostika realnog sistema 25
2.2.4.1. Metodi i modeli tehničke dijagnostike postrojenja za proizvodnju higijenskog papira 25
2.3. Optimizacija procesa održavanja – koncepcije održavanja prema stanju i uvođenje tehničke dijagnostike u realan proizvodni sistem 26

3. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA I ALGORITAM REALIZACIJE 29
3.1. Pregled dosadašnjih istraživanja 29

3.1.1. Teorija i koncepcije održavanja industrijskih sistema 29
3.1.2. Metode tehničke dijagnostike 33
3.1.3. Tehnička dijagnostika sistema papirne industrije 35
3.2. Algoritam (opis postupaka) realizacije 39
3.2.1. Formiranje baze podataka 41
3.2.2. Korak 1 - Implementacija 44
3.2.3. Korak 2 - Mjerenje 44
3.2.4. Korak 3 - Upoređivanje 45
3.2.5. Korak 4 - Verifikacija 45
4. UVOĐENJE TEHNIČKE DIJAGNOSTIKE U OKVIRU SISTEMA ODRŽAVANJA PREMA STANJU 46
4.1. Osnovni razlozi uvođenja dijagnostičkog sistema 46
4.2. Tehničke karakteristike ležajeva papir mašine 46
4.2.1. Usisna presa 46
4.2.2. Slijepobušena presa 50
4.3. Analiza uzroka otkaza ležajeva pres valjaka (usisne i slijepobušene prese) papir mašine vezanih za ležajeve i ležajna mjesta 52
4.4. Mogućnost primjene odgovarajućeg dijagnostičkog sistema 54
4.4.1. Sistem za kontinualno praćenje vibracija Octavis 55
4.4.1.1. Opis primjene on-line monitoring sistema ležajeva 56
4.1.1.2. Struktura on-line monitoring sistema ležajeva Octavis 57
4.4.3. Sistem za kontinualno praćenje vibracija Oradoc 61
4.4.3.1. Primjena metoda tehničke dijagnostike -provođenje korektivnih mjera . 62
5. REZULTATI ISTRAŽIVANJA I OPTIMIZACIJA POUZDANOSTI 68
5.1. Istraživanje rezultata djelovanja tehničke dijagnostike u realnom sistemu 68
5.1.1. Analiza djelovanja sistema Octavis u konkretnom događaju 68
5.1.2. Analiza rezultata tehničke dijagnostike i optimizacija tehnološkog postupka krepovanja papirne trake 71
5.2. Istraživanje efektivnosti proizvodnog sistema papir mašine 74
5.2.1. Efektivnost realnog sistema prije instalacije tehničke dijagnostike 74
5.2.1.1. Stepen efektivnosti do termina instalacije tehničke dijagnostike 76
5.2.2. Efektivnost realnog sistema nakon instalacije tehničke dijagnostike 77
5.2.2.1. Stepen efektivnosti nakon termina instalacije tehničke dijagnostike 79
5.3. Istraživanje i analiza operativne gotovosti i pouzdanosti proizvodnog sistema papir mašine 81
5.3.1. Analiza operativne gotovosti 81
5.3.1.1. Operativna gotovost do trenutka instalacije tehničke dijagnostike 84
5.3.1.2. Operativna gotovost nakon trenutka instalacije tehničke dijagnostike ... 85
5.3.2. Analiza pouzdanosti proizvodnog sistema 86
5.3.2.1. Analiza pouzdanosti proizvodnog sistema do trenutka instalacije tehničke dijagnostike 87
5.3.2.1.1. Pretpostavka broj 1 – provjera normalne raspodjele 87
5.3.2.1.1.1. Testiranje raspodjele: Kolmogorov–Smirnov test (K-S test) za period do instalacije tehničke dijagnostike 88
5.3.2.1.2. Pretpostavka broj 2 – provjera eksponencijalne raspodjele..... 89

5.3.2.1.3. Pretpostavka broj 3 – provjera Vejbulove(Weibull) raspodjele 89
5.3.2.1.3.1. Grafička interpretacija Vejbulove raspodjele 92
5.3.2.2. Analiza pouzdanosti proizvodnog sistema nakon trenutka instalacije tehničke dijagnostike 95
5.3.2.2.1. Pretpostavka broj 1 – provjera normalne raspodjele 96
5.3.2.2.1.1. Testiranje raspodjele: Kolmogorov–Smirnov test (K-S test) za period do instalacije tehničke dijagnostike 96
5.3.2.2.2. Pretpostavka broj 2 – provjera eksponencijalne raspodjele..... 97
5.3.2.2.3. Pretpostavka broj 3 – provjera Vejbulove raspodjele..... 98
5.3.2.2.3.1. Grafička interpretacija Vejbulove raspodjelenakon termina instalacije tehničke dijagnostike 101
5.4. Testiranje hipoteze o uticaju uvođenja tehničke dijagnostike u rad realnog proizvodnog sistema 104
5.4.1. Testiranje hipoteze o jednakosti sredina otkaza proizvodnog sistema 104
5.4.1.1. Realni sistem prije instalacije tehničke dijagnostike 104
5.4.1.2. Realni sistem nakon instalacije tehničke dijagnostike 105
5.4.1.3. Testiranje hipoteze i analiza rezultata 106

6. DISKUSIJA O REZULTATIMA 108
6.1. Analiza rezultata istraživanja 108
6.1.1. Istraživanje efektivnosti proizvodnog sistema 108
6.1.2. Istraživanje pouzdanosti proizvodnog sistema 109
6.1.2.1. Rezultati analize operativne gotovosti 109
6.1.2.2. Rezultati analize pouzdanosti 111
6.1.2.3. Rezultati analize srednjeg vremena rada do pojave otkaza 113
6.1.3. Testiranje hipoteze o jednakosti sredina otkaza proizvodnog sistema..... 113

7. ZAKLJUČCI 114

8. PREGLED BUDUĆIH ISTRAŽIVANJA 116

9. LITERATURA 118

10. BIOGRAFSKI PODACI 121

IZJAVA O AUTORSTVU..... 124

IZJAVA O OVLAŠĆENJU..... 125

IZJAVA O IDENTIČNOSTI..... 126

SPISAK SLIKA

2.1. *Sistemski prilaz održavanju*
2.2. *Prikaz razvoja postupaka i koncepcija održavanja*
2.3. *Podjela održavanja prema standardu EN 13306 (2001)*
2.4. *Razvoj koncepcija održavanja tokom vremena*
2.5. *Osnovni stubovi koncepta TPM*
2.6. *Nova uloga radnika u TPM koncepciji*
2.7. *Nova uloga radnika održavanja u TPM koncepciji*
2.8. *Nova uloga radnika tehničara/tehnologa u TPM koncepciji*
2.9. *Nova uloga radnika menadžera u TPM koncepciji*
2.10. *Uticaj zastoja održavanja na stepen iskorišćenja*
2.11. *Osnovni koncept izbora tehnologije održavanja*
2.12. *Uticaj dijelova životnog ciklusa tehničkog sistema na troškove*
2.13. *Odnos troškova i intervala održavanja tehničkog sistema*
2.14. *Zavisnost ulaganja u održavanje i posljedica*
2.15. *Procesi u okviru tehničke dijagnostike*
2.16. *Funkcije tehničke dijagnostike*
2.17. *Šematski prikaz tehničke dijagnostike*
2.18. *Uloga baze podataka u dijagnostičkom procesu*
2.19. *Osnove ponašanja sistema otkaza u vremenu*
3.1. *Algoritam realizacije optimizacije pouzdanosti*
3.2. *Primjer dnevnog izvještaja parametara proizvodnje papir mašine*
3.3. *Primjer mjesečnog izvještaja/analize otkaza održavanja papir mašine*
3.4. *Primjer prikaza istorije vrijednosti amplituda oscilovanja pres valjaka*
4.1. *Pozicija usisne prese papir mašine*
4.2. *Sklopni crtež usisne prese papir mašine*
4.3. *Radijalni sferni ležaj tipa BC2B*
4.4. *Tehničke karakteristike ležaja tipa BC2B*
4.5. *Aksijalni ležaj tipa 23264*
4.6. *Specifikacija aksijalnog ležaja tipa 23264*
4.7. *Pozicija i funkcija aksijalnog ležaja usisne prese (poz. 7)*
4.8. *Sklopni crtež slijepobušene prese papir mašine*
4.9. *Ležaj 23248 slijepobušene prese*
4.10. *Ležaj 23248 slijepobušene prese – tehničke karakteristike*
4.11. *Pozicija ležaja 23248 - pogonska strana slijepobušene prese*
4.12. *Pozicija presa na papir mašini PM2*
4.13. *Monitoring senzori*
4.14. *Priključne PLC jedinice*
4.15. *Šema konfiguracije monitoring sistema usisnog i pres valjka*
4.16. *Elektrorazvodni ormar Octavis*
4.17. *Izvor napajanja „GU-1“*
4.18. *Pozicija senzora br. 1 i 3 pres valjka - strana pogona*
4.19. *Pozicija senzora br. 1 i 3 usisnog valjka - strana pogona*
4.20. *Pozicija senzora br. 2 pres valjka – strana opsluge*
4.21. *Pozicija senzora br. 2 usisnog valjka – strana opsluge*
4.22. *Monitoring jedinice IFM VSA 100*
4.23. *Senzor oscilacija VSE100*

4.24. *Vizualni prikaz mjerenja vibracija presa papir mašine*
4.25. *Vizualizacija monitoring sistema Octavis – trend oscilacija*
4.26. *Vizualizacija monitoring sistema Octavis – spektralna analiza*
4.27. *Vizualizacija monitoring sistema Octavis – stanje ležajeva*
4.28. *Poprečne pruge – chatter marks i oštećenja površine sušionog cilindra*
4.29. *Odstupanja kvaliteta finalnog proizvoda – papirne trake*
4.30. *Korektivna mjera broj 1. – metalizacija sušionog cilindra*
4.31. *Vibrodijagnostički sistem Oradoc*
4.32. *Centralna radna stanica Oradoc*
4.33. *Vizualizacija monitoring sistema Octavis – stanje ležajeva*
4.34. *FFT dijagram*
4.35. *Istorija praćenja energije oscilovanja*
4.36. *Oradoc detekcije - dominacija frekvencije 26 Hz*
4.37. *Vibracija 26 Hz nakon zamjene slijepobušene prese*
4.38. *Stanje vibracija sa aktiviranjem noža za čišćenje sušionog cilindra*
5.1. *Aktivacija alarma na poziciji slijepobušene prese, 28.11.2015.*
5.2. *Kontrola zazora ležaja prese*
5.3. *Postojanje zazora od 5 mm između matice za stezanje i ležaja*
5.4. *Stanje vibracija nakon korektivnih mjera, 1.12.2015.*
5.5. *Trend porasta vibracija slijepobušene prese, 11.5.2016.*
5.6. *FFT dijagram ležajnih mjesta slijepobušene prese, 11.5.2016.*
5.7. *Vrijednosti brzine oscilovanja ležajnih mjesta slijepobušene prese, 11.5.2016.*
5.8. *Oštećenje cijevi od hlađenja slijepobušene prese*
5.9. *Oštećenje gumene obloge slijepobušene prese*
5.10. *Tehničko rješenje modifikacije nosača za krepovanje papirne trake*
5.11. *Provođenje korektivne mjere 2 – dodatni pneumatski cilindri i nosači/prsti*
5.12. *Nivo vibracija nosača – prstiju prije modifikacije (overal value 61,59 mm/s)*
5.13. *Nivo vibracija nosača – prstiju nakon modifikacije (overal value 1,566 mm/s)*
5.14. *Nivo vibracija nosača krep šabera prije modifikacije (overal value 11,192 mm/s, strana pogona horizontalan pravac)*
5.15. *Nivo vibracija nosača krep šabera nakon modifikacije (overal value 1,183 mm/s strana pogona horizontalan pravac)*
5.16. *Nivo vibracija nosača krep šabera prije modifikacije (overal value 5,937 mm/s, strana pogona vertikalan pravac)*
5.17. *Nivo vibracija nosača krep šabera nakon modifikacije (overal value 0,210 mm/s, strana pogona vertikalan pravac)*
5.18. *Grafikon koeficijenta operativne gotovosti do instalacije tehničke dijagnostike*
5.19. *Grafikon koeficijenta operativne gotovosti nakon instalacije tehničke dijagnostike*
5.20. *Grafikon operativne gotovosti do trenutka instalacije tehničke dijagnostike*
5.21. *Grafikon operativne gotovosti nakon trenutka instalacije tehničke dijagnostike*
5.22. *Dijagram vjerovatnoće Vejbul raspodjele za period do termina instalacije tehničke dijagnostike*
5.23. *Grafički prikaz funkcije pouzdanosti i nepouzdanosti do instalacije tehničke dijagnostike*
5.24. *Grafički prikaz funkcije intenziteta otkaza do instalacije tehničke dijagnostike*
5.25. *Dijagram vjerovatnoće Vejbulove raspodjele nakon termina instalacije tehničke dijagnostike*
5.26. *Presjek funkcija pouzdanosti i nepouzdanosti za period nakon instalacije tehničke dijagnostike*
5.27. *Grafički prikaz funkcije intenziteta otkaza nakon instalacije tehničke dijagnostike*
6.1. *Koeficijent operativne gotovosti prije instalacije tehničke dijagnostike*
6.2. *Koeficijent operativne gotovosti nakon instalacije tehničke dijagnostike*

6.3. *Operativna gotovost prije instalacije tehničke dijagnostike*
6.4. *Pouzdanost nakon instalacije tehničke dijagnostike*
6.5. *Pouzdanost prije instalacije tehničke dijagnostike*
6.6. *Pouzdanost nakon instalacije tehničke dijagnostike*
6.7. *Intenzitet otkaza prije instalacije tehničke dijagnostike*
6.8. *Intenzitet otkaza nakon instalacije tehničke dijagnostike*
8.1. *Varijanta idejnog rješenja novog sistema uležištenja usisne prese PM2*
8.2. *Šematski prikaz valjaka PM2*

SPISAK TABELA

2.1. *Subjektivne metode (postupci) tehničke dijagnostike*
2.2. *Objektivne metode (postupci) tehničke dijagnostike stanja*
3.1. *Primjer mjesečnog praćenja učinka papir mašine*
4.1. *Pregled aktivnosti održavanja na usisnim presama papir mašine*
4.2. *Pregled aktivnosti održavanja na slijepobušenim presama papir mašine*
4.3. *Pregled pozicija senzora vibracija na presama papir mašine*
5.1. *Proizvodnja papir mašine u vremenskom intervalu posmatranja*
5.2. *Parametri proizvodnje papir mašine po mjesecima za 2014. godinu*
5.3. *Parametri proizvodnje papir mašine po mjesecima za 2015. godinu*
5.4. *Vremensko iskorišćenje, produkcija i škart perioda prije instalacije tehničke dijagnostike*
5.5. *Parametri proizvodnje papir mašine po mjesecima za 2016. godinu*
5.6. *Parametri proizvodnje papir mašine po mjesecima za posmatrani period u 2017. godini*
5.7. *Vremensko iskorišćenje, produkcija i škart perioda nakon instalacije tehničke dijagnostike*
5.8. *Koeficijent operativne gotovosti do trenutka instalacije tehničke dijagnostike*
5.9. *Koeficijent operativne gotovosti nakon instalacije tehničke dijagnostike*
5.10. *Operativna gotovost do trenutka instalacije tehničke dijagnostike*
5.11. *Operativna gotovost nakon trenutka instalacije tehničke dijagnostike*
5.12. *Istraživanje pouzdanosti realnog sistema do termina instalacije tehničke dijagnostike*
5.13. *Numeričke vrijednosti pokazatelja pouzdanosti normalne raspodjele instalacije tehničke dijagnostike*
5.14. *Numeričke vrijednosti pokazatelja pouzdanosti eksponencijalne raspodjele do instalacije tehničke dijagnostike*
5.15. *Koncept grafičkog određivanja parametara Vejbulovom (Weibull) raspodjele za interval do instalacije tehničke dijagnostike*
5.16. *Tabelarni koncept analitičkog određivanja parametara za interval do instalacije tehničke dijagnostike*
5.17. *Test Kolmogorov–Smirnova za period do instalacije tehničke dijagnostike*
5.18. *Vejbul (Weibull) podaci za period do termina instalacije tehničke dijagnostike*
5.19. *Statističke vrijednosti pouzdanosti za period do instalacije tehničke dijagnostike*
5.20. *Grafička interpretacija Vejbulove (Weibull) raspodjele do instalacije tehničke dijagnostike*
5.21. *Istraživanje pouzdanosti realnog sistema nakon termina instalacije tehničke dijagnostike*
5.22. *Numeričke vrijednosti pokazatelja pouzdanosti normalne raspodjele nakon instalacije tehničke dijagnostike*
5.23. *Numeričke vrijednosti pokazatelja pouzdanosti eksponencijalne raspodjele nakon instalacije tehničke dijagnostike*
5.24. *Koncept grafičkog određivanja parametara Vejbulovom (Weibull) raspodjelom za interval nakon instalacije tehničke dijagnostike*
5.25. *Tabelarni koncept analitičkog određivanja parametara za interval nakon instalacije tehničke dijagnostike*
5.26. *Test Kolmogorov–Smirnova za period nakon instalacije tehničke dijagnostike*
5.27. *Vejbul podaci za periodnakon termina instalacije tehničke dijagnostike*
5.28. *Pouzdanosti za period nakon instalacije tehničke dijagnostike – statističke vrijednosti*
5.29. *Grafička interpretacija Vejbulove (Weibull) raspodjele nakon instalacije tehničke dijagnostike*
5.30. *Otkazi 2014/2015. godine*
5.31. *Otkazi 2015/2017. godine*

OZNAKE

Oznaka	Jedinica mjere	Opis
OECD	-	organizacija za ekonomsku saradnju i razvoj
CEN	-	Evropski komitet za standardizaciju
EN	-	Evropske norme
IEC	-	internacionalna elektrotehnička komisija
TPM	-	potpuno integrisano održavanje
TPEM	-	potpuno integrisano održavanje opreme
RCM	-	održavanje zasnovano na pouzdanosti
CBS	-	održavanje prema stanju
CM	-	korektivno održavanje
PM	-	preventivno održavanje
AM	-	samoodržavanje
PdM	-	prediktivno održavanje
SPM	-	impulsivna metoda dijagnostike
FFT	-	brza Furieova transformacija
PM2	-	papir mašina broj 2
DM	-	dublir mašina
OEE	–	ukupna efektivnost
EA	–	raspoloživost (*Equipment Avaliability*)
PE	–	iskorišćenje performansi (*Performance Efficiency*)
RQ	–	stepen kvaliteta (*Rate of Quality*)
$G(t)$	-	gotovost sistema
$\bar{t}_i$	sati	srednje vrijeme sistema u ispravnom stanju
$\bar{t}_o$	sati	srednje vrijeme sistema u otkazu
$\bar{t}$	sati	ukupno vrijeme posmatranja
$F(a)$	–	kumulativna funkcija raspodjele vjerovatnoće
$R(a)$	–	funkcija nepouzdanosti
$\lambda(t)$	–	funkcija intenziteta otkaza
FP	–	funkcionalna podobnost
N_R	–	planirani zadaci
μ	–	intenzitet stanja u otkazu
k_G	–	koeficijent gotovosti
$OG_{(t)}$	-	operativna gotovost
$\bar{t}_r$	sati	vrijeme sistema u radu
SV	–	srednja vrijednost sati rada do pojave stanja u otkazu
σ	–	disperzija
D_i	–	razlika vrijednosti kumulativnih funkcija
$F_o(t_i)$	–	kumulativne funkcije posmatranih podataka stanja realnog sistema

$F_E(t_i)$	–	kumulativna funkcija naznačena u pretpostavljenoj raspodjeli
$D_{\max}$	–	max. vrijednost razlike kumulativnih funkcija
D_{CR}	–	kritična vrijednost kumulativne funkcije
β	-	parametar oblika Vejbulove raspodjele
γ	-	parametar lokacije Vejbulove raspodjele
η	-	parametar razmjere Vejbulove raspodjele
SV	-	srednja vrijednost
SD	-	standardno odstupanje
μ_1	–	očekivana vrijednost slučajne promjenljive ili srednja vrijednost broja zastoja prije generalnog remonta
μ_2	–	očekivana vrijednost slučajne promjenljive ili srednja vrijednost broja zastoja nakon generalnog remonta
$\bar{x}_{i1}$	sati	srednja vrijednost zastoja prije generalnog remonta
$\sum \bar{x}_{i1}$	sati	ukupan broj zastoja za posmatrani period do generalnog remonta
$\bar{x}_{i2}$	sati	srednja vrijednost zastoja nakon generalnog remonta
$\sum \bar{x}_{i2}$	sati	ukupan broj zastoja za posmatrani period nakon generalnog remonta
H_o	–	hipoteza
Z_{tab}	–	kritična vrijednost slučajne promjenljive
$Z_{rač}$	–	računska vrijednost slučajne promjenljive

1.0. U V O D

1.1. Održavanje – osnova funkcionisanja proizvodnog sistema

Održavanje, kao dio integralne sistemske podrške, predstavlja neodvojiv i sastavni dio modernih proizvodnih i poslovnih sistema. Uloga održavanja sistema se ogleda u obezbjeđenju uslova za nesmetan i ekonomičan rad svih dijelova sistema. Ukoliko govorimo o proizvodnim sistemima sa kontinualnim procesom rada značaj organizacije sistema održavanja dolazi do posebnog izražaja. Danas kada govorimo o procesu održavanja u okviru industrijskog sistema, ne mislimo na skup aktivnosti usmjerenih na otklanjanje otkaza ili incidentnih, havarijskih situacija. Održavanje se posmatra kao:

- složen postupak praćenja ponašanja i poznavanja kompletnog tehničko-tehnološkog proizvodnog ciklusa,
- predviđanje ponašanja elemenata sistema u trenutnom i budućem vremenu,
- izradu plana preventivnih pregleda, popravki, zamjene dotrajalih dijelova ili dijelova za koje se predviđa pred/otkazno stanje,
- planiranje raspoloživih i buduće potrebnih resursa (kvalifikovanih radnika, materijala, dijelova...),
- planiranje mreže servisne i logističke podrške,
- izgradnju i planiranje međudjelovanja sa ostalim dijelovima proizvodnog i poslovnog sistema (naglasak na sektor proizvodnje)…

Danas o održavanju ne govorimo samo kao o disciplini koja je usko vezana za poznavanje tehničkih cjelina, njihove radne i funkcionalne sposobnosti, fizikalne zakonitosti ponašanja prema vezanim elementima ili okolini. Održavanje danas podrazumijeva usku integraciju sa kompletnim tehnološkim zakonitostima proizvodnog procesa jer on u sebi nerijetko daje odgovore na izvor tehničkih problema koji se pojavljuju tokom eksploatacije dijelova sistema. Od intervencija koje su se svodile na „čekanje na otkaz“ održavanje se razvilo u multidisciplinarnu aktivnost sa mnoštvom primijenjenih naučnih sadržaja u procesu ispunjenja svoje funkcije cilja. Na Kongresu OCDE 1963. godine [1] održavanje se definisalo kao „*funkcija, čija je nadležnost konstantan nadzor nad postrojenjima i vršenje određenih popravki i revizija, čime se omogućava stalna funkcionalna sposobnost i očuvanje proizvodnih i pomoćnih postrojenja i opreme*“. Danas se o održavanju ne razmišlja kao o potrebnoj aktivnosti koja ima slučajan karakter. Ona danas predstavlja skup segmenata ili elemenata koji zajedničkim djelovanjem obezbjeđuju održavanje tehničkog sistema u skladu sa postavljenim zahtjevima i kriterijumima. Proces održavanja sredstava za rad, kao jedan od bitnijih dijelova ukupnog proizvodnog procesa, ima zadatak sprečavanje i otklanjanje otkaza sistema, prije svega kroz racionalizaciju i optimizaciju njihovog korišćenja i povećanje produktivnosti i ekonomičnosti trošenja u samom procesu proizvodnje i eksploatacije [2].

Osnovni trendovi u razvijenom svijetu pokazuju maksimalno korišćenje nauke u praktičnim rješenjima racionalizacije proizvodnih procesa. Kao osnovni cilj za definisani proizvod ili uslugu uzima se sniženje troškova uz zadržavanje traženog kvaliteta i roka. Za realizaciju ovog cilja razvijene su različite strategije i metode koje racionalizuju pojedine funkcije ili cjelokupni proces u proizvodnom sistemu [3].

Poznavanje osobina ponašanja sistema i tehničko stanje mašina i opreme koja je na raspolaganju i koja se koristi u proizvodnom procesu utiče na izbor **strategije održavanja**. Pravilan

izbor načina realizacije aktivnosti na održavanju proizvodnog sistema može dati pozitivan rezultat u smislu smanjenja broja otkaza sistema, sprečavanja havarijskih situacija, smanjenju troškova koje nastaju kao rezultat korektivnih mjera, povećanju sigurnosti na radu i slično.

Razvoj i primjena novih metoda u proizvodnim sistemima uslovio je i primjenu novih metoda, postupaka i strategija u održavanju opreme i sredstava za rad. U praksi se mogu definisati različiti nivoi i strategije održavanja zavisno od razvijenosti proizvodnog sistema odnosno poslovne politike konkretnog poslovnog sistema. Održavanje proizvodnog sistema može biti: korektivno, preventivno, preventivno po stanju, terotehnološko, logičko, plansko, totalno produktivno, pouzdanosti orijentisano i kao najviši nivo – samoodržavanje. Razvijenost poslovnog sistema je u direktnoj vezi sa stepenom razvijenosti nivoa i usvojene strategije održavanja. Kontinualni proizvodni sistemi zahtijevaju poseban način planiranja aktivnosti održavanja. U tom smislu razvile su se koncepcije planskog preventivnog održavanja i održavanja prema stanju. Ovakav način planiranja popravki doprinosi smanjenju ukupnog broja otkaza jer se na osnovu analize postojećeg stanja dijelova sistema i ulaznih tehničkih karakteristika dijelova sistema može prilično tačno predvidjeti preostali radni vijek opreme u optimalnom režimu radnih preformansi.

Koncepcija **održavanja prema stanju** nalazi široku primjenu u modernim proizvodnim sistemima jer omogućava da se sagleda trenutno stanje sistema i na osnovu prethodnih informacija o ponašanju sistema i unaprijed poznatih tehničkih ograničenja predvidi ponašanje sistema u budućnosti. Ovo predviđanje budućih stanja i mogućnosti za potencijalan otkaz sistema daje dovoljno prostora da se neželjene situacije izbjegnu, čime se smanjuju troškovi i podiže efikasnost proizvodnog sistema. Osnov primjene koncepcije održavanja prema stanju je primjena određenih **sistema tehničke dijagnostike**. Ovi sistemi koriste osnovne fizikalne zakonitosti transformacije fizikalnih veličina u signale prepoznatljive korisniku. Ukoliko se izlazi sistema monitoringa definišu prema unaprijed utvrđenom pravilu/tolerancijama dobija se informacija koja ukazuje na trenutno ponašanje sistema ili radnih karakteristika elemenata sistema i pruža mogućnost trenutnog djelovanja ukoliko sistem izlazi iz zadatih/dozvoljenih granica. S obzirom na količinu podataka koje je neophodno brzo i tačno obraditi, potrebu praćenja istorije ponašanja opreme u eksploataciji, te potrebu planiranja i praćenja poslova i troškova održavanja, nametnula sa potreba razvoja i uvođenja informacionih sistema podržanih računarskim sistemima i komunikacijskom opremom i programskim sistemima za obradu i praćenje podataka.

Obezbijediti kontinualan rad proizvodnog sistema podrazumijeva sagledavanje svih aspekata proizvodnog procesa i sredstava za rad, te procjenu stanja i spremnosti proizvodnih kapaciteta.Ukoliko se može odrediti stanje operativne gotovosti i pouzdanosti postrojenja mogu se uočiti i kritična mjesta u procesu na koje je potrebno obratiti posebnu pažnju jer ova mjesta mogu u značajnijoj mjeri uticati na broj otkaza i efektivnost proizvodnog procesa.

1.2. Osnovni pojmovi, pretpostavke, metode, hipoteze i struktura rada

Osnovu doktorskog rada predstavlja istraživanje pouzdanosti tehničkog sistema u odnosu na sistem i koncepciju održavanja proizvodnog sistema. Analizom stanja radnih parametara proizvodnog sistema sagledavaju se načini na koji se može optimizovati pouzdanost primjenom savremenih koncepcija održavanja. Jedna od tih metoda je primjena koncepcije održavanja prema stanju. Kao osnovni preduslov implementacije održavanja prema stanju je uvođenje sistema tehničke dijagnostike koji mjeri radne parametre u realnom vremenu, upoređuje ih sa dozvoljenim/optimalnim vrijednostima i na osnovu kojih se mogu predvidje-

ti/planirati preventivne aktivnosti. Rad se zasniva na pretpostavci da se rezultati rada proizvodnog sistema mogu bitno pozitivno razlikovati ukoliko se pravilno primijeni odgovarajuća koncepcija održavanja. Ona podrazumijeva detaljnu analizu problema i definisanje kritičnih pozicija za koje je opravdano razmišljanje o drugačijem načinu kontrole radnih parametara i planu preventivnog djelovanja.

Značajan dio istraživanja u okviru doktorske disertacije biće primjerima vezan za funkciju i ulogu službe održavanja realnog industrijskog proizvodnog sistema za proizvodnju higijenskog papira SHP Celeks, Banja Luka. Pomenuta firma ima stalnu potrebu za djelovanjem službe održavanja jer se radi o kontinualnom proizvodnom procesu u kojem svaki pojedinačni otkaz sistema papir mašine znači trenutni gubitak proizvodnje od 4,8 t/satu, što predstavlja veliki proizvodni gubitak. Ovaj podatak je relevantan ulazni podatak za početno definisanje i praćenje elemenata ukupne efektivnosti sistema papir mašine i poređenje s podacima iz prethodnog perioda. Definisanjem i implementacijom modela optimizacije analiziraće se njegova primjena u realnim uslovima proizvodnje uz izvođenje odgovarajućih zaključaka.

Aktuelnost istraživanja metoda optimizovanja i povećanja efektivnosti proizvodnih industrijskih sistema, kao tema doktorske disertacije, je neupitna s obzirom na mogućnost stvaranja značajnih ekonomskih rezultata kompletnih poslovnih sistema koji predstavljaju osnovne stubove razvoja pojedinih razvijenih društava. Pružanje novih mogućnosti u smanjenju broja otkaza, povećanju pouzdanosti postrojenja, smanjenju troškova održavanja doprinose razvoju novih pogleda na ulogu i značaj službe održavanja u okviru proizvodnih i poslovnih sistema. Za očekivati je da će pozitivni rezultati primjene modela optimizacije pouzdanosti tehničkog sistema na primjeru fabrike za proizvodnju higijenskog papira naći širu primjenu u srodnim tehničkim sistemima čim dobijaju na širem značaju. Zaimplementaciju modela optimizacije odabrana je firma za proizvodnju higijenskog papira većinskog vlasnika iz Slovačke koja je članica evropske grupacije proizvodnje papira.Ovim pristupom, dobijena rješenja mogu naći primjenu i van granica naše zajednice. Smisao istraživanja se ogleda i u kompatibilnosti sa evropskim i svjetskim standardima, o čemu će se voditi posebna pažnja.

Ciljevi koji se nameću kao osnovni motivi za istraživanja u doktorskom radu su:

- obezbjeđenjekontinualnog režima rada industrijskih proizvodnih sistema, čime se smanjuju gubici i troškovi usljed otkaza proizvodnih sistema;
- povećanje životnog/radnog vijeka proizvodnog sistema za normalne uslove rada;
- poboljšanje efektivnosti korišćenja resursa održavanja (radne snage, proizvodnih kapaciteta, materijala, rezervnih dijelova, kooperacije);
- određivanje mjere povezanosti smanjenja obima tehničkog održavanja u odnosuna narušavanje maksimalne efikasnosti proizvodnog sistema u okviru kompletnog poslovnog sistema;
- eliminacija ili smanjenje rizika po radnike u proizvodnom procesu, ali i za sredstvaza rad;
- na osnovu specifičnosti proizvodnog procesa i same organizacije službe održavanja, otklanjanje svih evidentiranih uzroka problema koji proizilaze iz potrebe provođenja popravki, obezbjeđenja rezervnih dijelova, zamjenljivosti i dostupnosti;
- poštivanje mjera zaštite životne sredine.

Eksperimentalna istraživanja se odnose na praćenje realnih parametara s kritičnih mjesta koja generišu otkaze proizvodnog realnog sistema – u konkretnom slučaju firme SHP Celeks, Banja Luka. Ovaj korak predviđa kompletnu statističku analizu, utvrđivanje veza s ostalim tehničko-tehnološkim cjelinama, određivanje intervala povjerenja, te matematičko testiranje

postavljenih hipoteza. Rezultati primjene određenih poboljšanja procesa održavanja su konkretni - direktni i indirektni rezultati u proizvodnom procesu.

Obrada statističkih podataka će se odnositi na statističku analizu promjene stanja tehničkog sistema. Pošto je ta promjena slučajnog karaktera uzrokovana većim brojem faktora u eksploataciji, predstavlja se s funkcijom gustine raspodjele parametara stanja u bilo kom trenutku vremena i testira prema zakonima funkcija raspodjele. Analiza obuhvata testiranje intervala pouzdanosti, otkrivanje simptoma neispravnog stanja, određivanjem pojedinih parametara stanja i njihovim upoređivanjem sa dozvoljenim vrijednostima.

U postupku izrade doktorske disertacije korišćene su sljedeće **naučne metode**:
- metoda analize (odnosi se na početni dio pregleda teorijskih istraživanja),
- metoda deskripcije (prilikom opisa rezultata dosadašnjih istraživanja),
- metoda modelovanja (prilikom izrade modela optimizacije održavanja tehničkog sistema),
- metoda indukcije (prilikom izvlačenja opštih zaključaka o uspješnosti različitih dokazanih modela održavanja u sličnim tehničkim sistemima kao što je industrijsko proizvodno postrojenje za proizvodnju higijenskog papira),
- statističke metode (prikupljanje podataka/uzoraka, testiranje funkcija zakona raspodjele, parametarski testovi),
- metode sinteze (za analizu rezultata istraživanja).

Na osnovu postavljenog problema, analize dosadašnjih istraživanja rješenja datog problema i obrazloženog cilja istraživanja, u okviru disertacije pokušaće se dokazati sljedeće **hipoteze**:
- na radnu sposobnost industrijskog proizvodnog sistema, koji je dinamičan i u stalnoj interakciji sa ostalim elementima poslovnog sistema, može se aktivno uticati i držati je pod kontrolom primjenom naučnih metoda inženjerstva životnog ciklusa tehničkih sistema.
- postojeće strategije održavanja proizvodnih sistema za proizvodnju higijenskog papira prema stanju se mogu značajno unaprijediti implementacijom novih rješenja praćenja otkaza i savremenim sistemima tehničke dijagnostike, a sve u svrhu pravovremenog otkrivanja potencijalnog uzroka otkaza i to putem:
  - primjene novih metoda optimizacije pouzdanosti proizvodnog sistema uzkorišćenje savremenih metoda trenutne, periodične ili kontinualne kontrole parametara te analizu kritičnih mjesta koja uzrokuju otkaze kompletnog tehničkog sistema,
  - smanjenje broja otkaza proizvodnog sistema, a time i ostvarivanje boljeg poslovnog rezultata (naglasak na smanjenje troškova održavanja).
- analiza rezultata eksperimentalnih istraživanja ukazuje na pozitivnu promjenu stepena operativne gotovosti i pouzdanosti ključnih elemenata realnog industrijskog sistema primjenom metoda tehničke dijagnostike.

Efekti primjene novog modela optimizacije pouzdanosti proizvodnog sistema analiziraće se u odnosu na rezultate vezane za održavanje tehničkog sistema za prethodni period u kom su zabilježeni problemi i definisana kritična mjesta u funkcionisanju proizvodnog sistema. Naglasak će se dati na elemente koje je potrebno unaprijediti kako bi krajnji rezultat djelovanja i uloge sistema održavanja bio pozitivan, odnosno kako biukupan broj otkaza proizvodnog sistema bio sveden na najmanju moguću mjeru.
Ovaj rad je sastavljen iz devet poglavlja.

U uvodnom dijelu je dat pregled poglavlja opisanih u disertaciji. Prezentovani su ciljevi, metode i hipoteze. U prvom uvodnom poglavlju su dati osnovni podaci o ulozi i značaju održavanja industrijskih sistema. Poseban naglasak se daje pravilnom izboru koncepcija održavanja u odnosu na posebne zahtjeve koje nameće radno okruženje (tehnološki procesi, režimi rada, stepen savremenosti sredstava rada, itd.). Drugo poglavlje predstavlja sumarizaciju teorijskih istraživanja osnova održavanja tehničkih sistema: pojmovi, definicije, podjele koncepcija održavanja, standardi koji prate terminologiju održavanja. Teoretska istraživanja se zasnivaju na analizi dostupnih dosadašnjih istraživanja iz oblasti održavanja industrijskih proizvodnih sistema prema strategiji održavanja prema stanju s kontrolom parametara. Postojeće koncepcije održavanja industrijskih sistema su polazna osnova za analizu stanja i prijedlog modela optimizacije praćenja otkaza realnog proizvodnog sistema, te povećanje pouzdanosti kompletnog tehničkog sistema. Koncepcije i sistemi za planiranje popravki i predviđanje otkaza će poslužiti kao osnova za prijedlog optimalizacije modela praćenja i prevencije otkaza proizvodnog postrojenja. U drugom poglavlju se prezentuju osnovni pojmovi tehničke dijagnostike, metode mjerenja procesnih parametara, podjela postupaka tehničke dijagnostike, te optimizaciju postupaka održavanja primjenom metoda tehničke dijagnostike. Treće poglavlje daje pregled dosadašnjih istraživanja iz oblasti koncepcija održavanja prema stanju, tehničke dijagnostike uopšte i dijagnostike papir mašina i pojašnjava algoritam realizacije istraživanja. Četvrto poglavlje opisuje razloge, način i postupke uvođenja sistema za monitoring vibracija u okviru realnog industrijskog proizvodnog sistema. Opisane su kritične pozicije realnog sistema i pregled interventnih aktivnosti realizovanih u periodu posmatranja sistema. Prikupljanje realnih podataka se odnosi na evidenciju svih događaja koji uslovljavaju otkaze proizvodnog sistema u toku normalnog rada postrojenja. Otkazi koji su praćeni su usko povezani sa djelovanjem službe održavanja proizvodnog sistema, načinom organizacije i sistema praćenja svih odstupanja u procesu planiranja i prevencije otkaza. Veoma bitan element za dalju kompletnu analizu dobijenih rezultata je razdvajanje na faktore koji nisu u direktnoj vezi s održavanjem, kao što su uslovi tehnološke prirode, obezbjeđenja rezervnih dijelova ili uticaj aktivnosti sistema logističke podrške. Poglavlje četiri opisuje i nekoliko ključnih trenutaka djelovanja sistema monitoringa u realnom vremenu i opisuje preventivne aktivnosti proistekle iz tog djelovanja. Poglavlje pet se odnosi na analizu rezultata istraživanja i optimizaciju pouzdanosti. Pouzdanost se istražuje analizom parametara efektivnosti sistema prije i nakon realizacije metoda tehničke dijagnostike, analizom operativne gotovosti, testiranjem parametara raspodjele, grafičkom interpretacijom krivih raspodjele, te provjerom hipoteze o postojanju uticaja tj. hipoteze o jednakosti sredina skupova uzoraka u posmatranom periodu. Obrada dobijenih rezultata je realizovana s ciljem potvrđivanja valjanosti rezultata instalacije sistema tehničke dijagnostike na postupak optimizacije pouzdanosti, praćenja i prevencije otkaza. Rezultati optimizacije biće korišćeni u verifikacionim istraživanjima opisanim u okviru postavljenih ciljeva radi izvođenja zaključaka. Diskusija o rezultatima istraživanja je predstavljena u poglavlju šest, a zaključci su izvedeni u poglavlju sedam. Uspostavljanje modela optimizacije pouzdanosti primjenom metoda tehničke dijagnostike u okviru koncepcije održavanja prema stanju i praćenje proizvodnog sistema za proizvodnju higijenskog papira predstavlja nastojanje da se tehnički sistem osavremeni, smanje stanja otkaza sistema te postignu što bolji rezultati u proizvodnom ciklusu. Rezultati istraživanja daju potvrdu za opravdanost razmišljanja u kom pravcu se može nastaviti s obzirom na sve uslove procesa koji se unaprijed definišu i te smjernice su naznačene u poglavlju osam. Pregled korištene literature je dat u poglavlju devet.

2.0 TEORIJSKE OSNOVE ODRŽAVANJA INDUSTRIJSKIH SISTEMA

2.1. Teorijske osnove

2.1.1. Pojam i definicija održavanja tehničkih sistema

Pojam održavanja tehničkih sistema se može veoma široko posmatrati. Iz tog razloga postoje brojne definicije koje u suštini predstavljaju opis aktivnosti koje uzrokuju realizaciju zadanih ciljeva postavljenih pred ovaj pojam. Jedna od prvih definicija predstavljena je 1963. godine na kongresu OECD (*Organisation for Economic Co-operation and Development*):

„*Održavanje je funkcija preduzeća kojoj su povjereni stalna kontrola nad postrojenjima i obavljanje određenih popravaka i revizija, čime se omogućava stalna funkcionalna sposobnost i očuvanje proizvodnih postrojenja, pomoćnih postrojenja i ostale opreme*."

Udruženje logističara definiše održavanje kao *skup disciplina, metoda i aktivnosti koje teže organizovanju efikasnosti nekog proizvoda za proizvođače i korisnike*.

Održavanje kao proces, predstavlja naziv za sva sredstva i aktivnosti neophodne za ispunjenje unaprijed određenih uslova i karakteristika posmatranog sistema u okviru zadanog vremenskog intervala. Objašnjenje definicije i shvatanja održavanja se mijenjalo godinama. Tsang (1999) definiše iskorak od tradicionalnog pristupa shvatanja održavanja kao aktivnosti koja se odnosi na popravku oštećenih dijelova sistema. Ovim novim shvatanjem se usvaja standard terminologije održavanja EN 13306:2001 od strane CEN (*Comite Europeen de Normalisation, European Committee for Standardization*). Standard EN 13306:2001 je djelimično zasnovan na standardu IEC 60050 (191) i pojam održavanja definiše na sljedeći način [4], [5]:

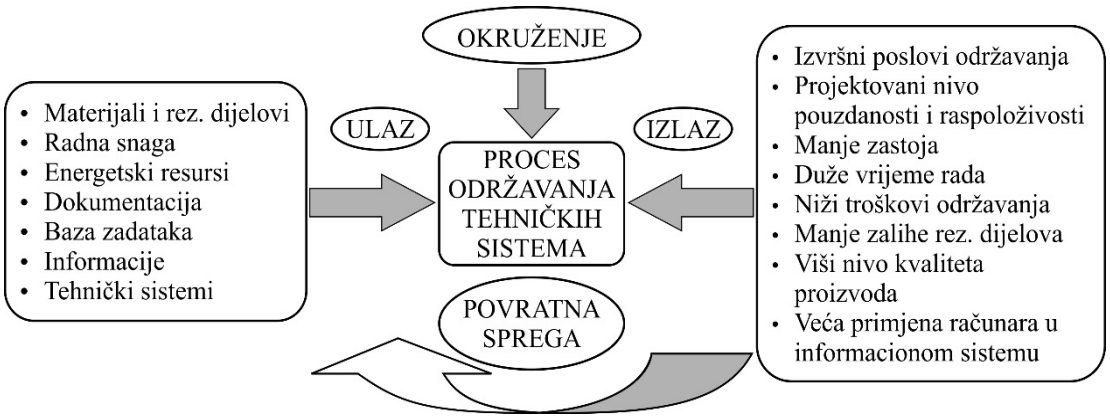
„Održavanje predstavlja kombinaciju svih tehničkih, administrativnih i upravljačkih aktivnosti tokom životnog ciklusa dijelova namijenjenih za zadržavanje ili obnavljanje stanja sistema u kom se može obezbijediti zahtijevana funkcija."

Jasno se može uočiti mogućnost različitog tumačenja pojma održavanja, ali se najčešće može govoriti o *procesu sprovođenja svih mjera nužnih da bi jedna mašina, postrojenje ili cijela fabrika funkcionisali na propisan način, razvijajući performanse u propisanim granicama, tj. s traženim učincima i kvalitetom, bez otkaza i uz propisno obezbjeđenje životne sredine, a pod pretpostavkom dobre obezbijeđenosti svih uslova, odnosno uz potrebnu logističku podršku* [6].

Glavna karakteristika proizvodnog sistema je njegovo radno stanje u kome sistem ispunjava planiranu funkciju cilja, odnosno ostvaruje svoju projektovanu ulogu. Proizvodni sistem se tokom vremena može naći u dva stanja: stanja u radu i stanja u otkazu. Razumljiva je težnja da se realno vrijeme stanja u otkazu svede na najmanju moguću mjeru, a u tom nastojanju sistem održavanja proizvodnih sistema ima ključnu ulogu. Samim kreiranjem proizvodnog sistema uslovljena je i potreba definisanja određenih postupaka koji obezbjeđuju eliminaciju mogućih uzroka nastanka otkaza u radu sistema.

Najčešće se pod pojmom održavanja podrazumijeva *sprovođenje svih mjera nužnih da bi jedna mašina, postrojenje ili cijela fabrika funkcionisala na propisan način razvijajući performanse u propisanim granicama, odnosno sa traženim učincima i kvalitetom, bez otkaza i uz propisano obezbjeđenje životne sredine, a pod pretpostavkom dobre obezbijeđenosti svih uslova, odnosno uz potrebnu logističku podršku,* [2].

Danas se o održavanju ne razmišlja kao o potrebnoj aktivnosti koja ima slučajan karakter. Održavanje danas predstavlja skup segmenata ili elemenata koji zajedničkim dejstvom obezbjeđuju održavanje tehničkog sistema u skladu sa postavljenim zahtjevima i kriterijumima. Slika 2.1. prikazuje sistemski prilaz održavanju.



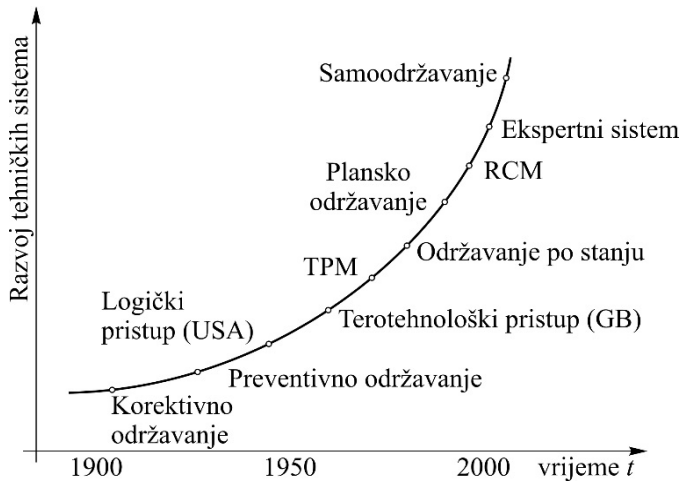
Slika 2.1. Sistemski prilaz održavanja

2.1.2. Strategije i koncepcije održavanja

Osnovna funkcija održavanja jeste obezbjeđenje visokog nivoa pouzdanosti i raspoloživosti (sigurnost funkcionisanja) tehničkih sistema u toku njihovog životnog ciklusa. Pri tom je neophodno provesti niz metoda održavanja na sastavnim dijelovima tehničkog sistema uz optimalne troškove održavanja (direktne i indirektne). Na troškove održavanja direktno utiče izbor metode - koncepta održavanja koji zavisi od složenosti i funkcije proizvodnog sistema. U literaturi se najčešće pominju:

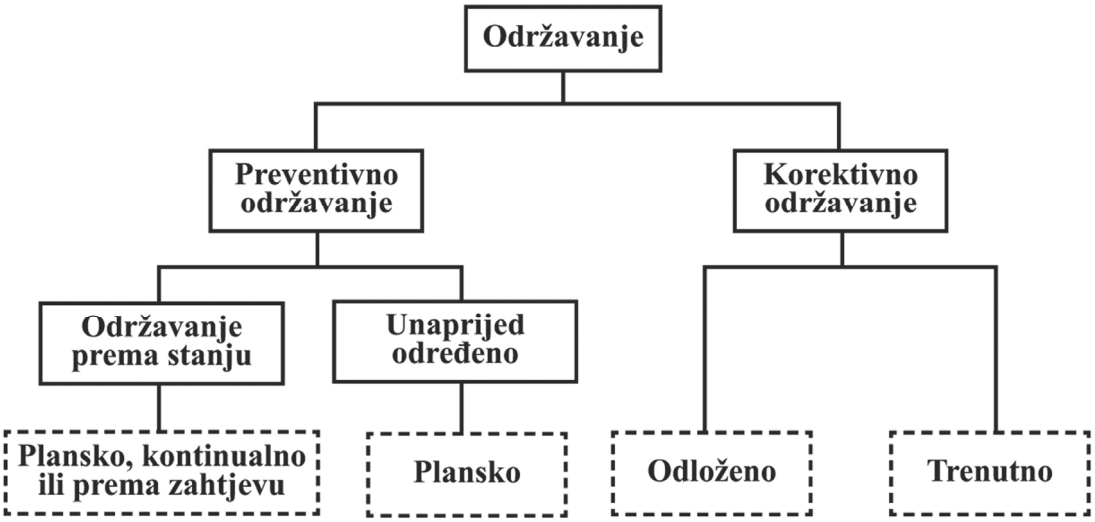
- korektivno održavanje,
- preventivno održavanje,
- održavanje prema stanju (*Condition Based Maintenance* – CBM),
- terotehnološko održavanje,
- logističko održavanje,
- plansko održavanje sa remontima (tzv. zakonsko održavanje),
- održavanje po ukazanoj prilici,
- totalno produktivno održavanje (*Total Productive Maintenance – TPM*),
- održavanje zasnovano na pouzdanosti (*Reability-Centered Maintenance – RCM*),
- ekspertni sistemi,
- samoodržavanje.

Slika 2.2. pokazuje trend u razvoju koncepata održavanja sa razvojem tehničkih sistema.



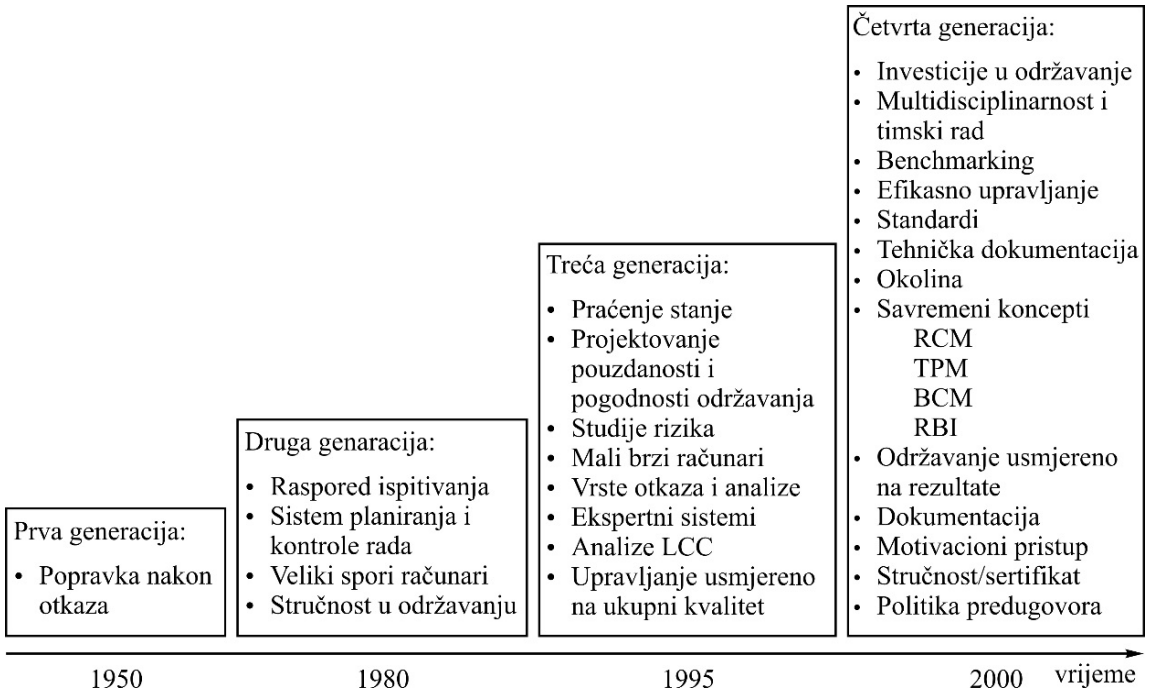
Slika 2.2. Prikaz razvoja postupaka i koncepcija održavanja, [2]

S obzirom na isticanje značaja zadržavanja ili obnavljanja stanja odnosno radnih karakteristika, postaje jasnija osnovna podjela tipa ili strategije održavanja na preventivno i korektivno održavanje. Preventivno održavanje se može shvatiti kao niz aktivnosti usmjerenih na sprečavanje otkaza ili kvarova. Korektivno održavanje se odnosi na aktivnosti koje se preduzimaju nakon pojave otkaza ili očiglednog kvara.



Slika 2.3. Podjela održavanja prema standardu EN 13306 (2001) [4], [5]

Razvoj održavanja usavršavan je i mijenjan s razvojem novih tehničkih sistema. Sve više se napuštao koncept otklanjanja otkaza nakon što se isti dogode jer su se oni pokazali kao izuzetno veliki trošak za proizvodni i poslovni sistem koji kontinualno radi i koji se s povećanjem složenosti elemenata sistema razvio u veoma skup sistem funkcionalno usko integrisanih dijelova. Nerijetko otkaz samo jednog manjeg dijela ili podsklopa dovodi u otkaz kompletan sistem, ovo nadalje predstavlja znatan gubitak produkcije, a time i poslovanja. Moderni poslovni sistemi ulažu velike napore i značajna investiciona sredstva, kako u opremu, tako i u sistem održavanja proizvodnog sistema, jer su ovo dva usko povezana elementa. Prikaz generacijskog koncipiranja razvoja održavanja dat je na slici 2.4.



Slika 2.4. Razvoj koncepcija održavanja tokom vremena, [2]

2.1.2.1. Korektivno održavanje

Korektivno održavanje (*Corrective Maintenance*) se definiše kao niz mjera za dovođenje sistema u funkcionalno stanje nakon što otkaz sistema nastupi ili se otkaz jednoznačno dijagnostifikuje. Standard EN 13306 (2001) [4] definiše terminologiju korektivnog održavanja kao:

Održavanje izvedeno nakon uočavanja otkaza i namijenjeno za postavljanje sistema u stanje u kome se mogu obezbijediti zahtijevane funkcije.

Ukoliko priroda uočenog kvara nije takva da može direktno ugroziti funkciju čitavog sistema odnosno da posljedice na sistem nisu takve da bi uzrokovale havarijske situacije onda se može govoriti o odloženom korektivnom održavanju. Ono se može provesti u trenutku koji više odgovara planovima proizvodnih sistema, čime se izbjegavaju dodatni proizvodni troškovi. Ukoliko se priroda kvara može ocijeniti kao značajan potencijalni rizik u smislu nastanka havarija po sigurnost na radu, zaštiti životne sredine ili daljim kvarovima značajna troškovna stavka, onda se može govoriti o trenutnim popravkama/intervencijama. Generalno, ukoliko je moguće korektivno održavanje je poželjnije primjenjivati u slučajevima malih troškovnih stavki, niskog nivoa sigurnosnog rizika, malih posljedica od nastanka kvarova i slučajeva gdje se kvarovi mogu lako uočiti, a opravke jednostavno i lako provesti (Starr, 1997).

Korektivno održavanje može imati karakter servisne popravke ili jednostavne zamjene oštećenog dijela ili komponenti sistema i dovođenje sistema u normalno funkcionalno stanje. Ukoliko se servisnim popravkama sistem povrati iz nefunkcionalnog u normalno radno stanje neposredno nakon otkaza, isključujući kompletne zamjene, možemo govoriti o *minimalnim popravkama*. Ovim se stanje sistema posmatra kao da se ništa nije desilo. Opravdano je u slučajevima nedostatka vremena, nedostatka rezervnih dijelova ili kompetencija u smislu provođenja složenijih popravki. Ukoliko se opravka odnosi na zamjenu oštećenih dijelova ili komponenti sistema čime se sistem dovodi u stanje „kao novo“ uz obezbjeđenje potpune fun-

kcionalnosti, možemo govoriti o *obnovljenom procesu* ili *maksimalnoj popravci*. Oba slučaja su ekstremne situacije. Uglavnom su realne popravke komponenti sistema negdje između ovih slučajeva pa se mogu nazvati i *nesavršene popravke*.

Korektivno održavanje predstavlja održavanje koje se izvodi poslije otkrivanja greške, s ciljem dovođenja određenog elementa u stanje u kojem može izvoditi zahtijevanu funkciju kriterijuma. Ovo podrazumijeva da ovaj sastavni dio sistema ostane u sistemu do momenta pojave otkaza ili prestanka rada (otkaza). Pozitivna strana ovog modela je u činjenici potpunog iskorišćenja dijelova, nisu potrebna dopunska znanja o stanju elemenata u radu te njihova veza sa zakonitostima oštećenja u radu. Osnovni nedostaci su: nemogućnost predviđanja otkaza, otkaz ostalih elemenata u sistemu, te veoma često zaustavljanje rada kompletnog proizvodnog sistema, duži zastoji, veći troškovi i angažovanje neophodnih resursa (ljudski i materijalni). Ovaj sistem održavanja obuhvata neplanske aktivnosti podešavanja, malih, srednjih i generalnih popravaka, kao i zamjenu i revitalizaciju elemenata sistema. Danas se ovaj model primjenjuje samo na pomoćne tehničke sistema čiji rad ne utiče direktno na proizvodni proces.

2.1.2.2. Preventivno održavanje

Prema standardu EN 13306 (2001), preventivno održavanje (*Preventive Maintenance*) se definiše kao:

„Održavanje u okviru prethodno planiranih intervala, a u skladu sa unaprijed opisanim kriterijumima s ciljem smanjenja vjerovatnoće nastanka otkaza ili degradacije funkcionisanja dijelova sistema.“

Pod pojmom „sistema“, standard EN 13306 (2001) definiše:

„*Bilo koji dio, komponentu, uređaj, podsistem, funkcionalnu cjelinu, opremu ili sistem koji se može pojedinačno posmatrati*.“

Preventivno održavanje predstavlja obavljanje radova prema ranije definisanom planu i s rokovima prije pojave samog otkaza sistema. Sve aktivnosti se dogovaraju s pripremom proizvodnje, jer zahtijevaju planske zastoje, a osnovni cilj je smanjenje vjerovatnoće pojave otkaza i slabljenja funkcionalnosti tehničkog sistema.

Odrednica „prethodno planiranih intervala, a u skladu s unaprijed opisanim kriterijumima“ u prethodnoj definiciji ukazuje na to da se preventivno održavanje može vršiti na dva načina:

- plansko preventivno održavanje,
- održavanje prema stanju.

2.1.2.2.1. Plansko preventivno održavanje

Plansko preventivno održavanje se prema standardu EN 13306 (2001) definiše kao:

„Održavanje u okviru prethodno planiranih/utvrđenih vremenskih intervala ili broja dijelova koji su u upotrebiu okviru sistema bez prethodne analize stanja dijelova sistema.“

Plansko održavanje se realizuje prema unaprijed utvrđenom vremenskom planu i tačno određenom planu aktivnosti bez prethodno realizovanog monitoringa i analize trenutnog stanja dijelova sistema. Sve aktivnosti se realizuju nakon isteka vremenskih intervala u okviru kojih se procjenjuje da dijelovi sistema imaju sposobnost normalnog funkcionisanja i da neće nastupiti otkaz. Opravdanost ovakvog načina planiranja opravki bez obzira na stvarno trenutno stanje je u slučajevima starije opreme i vidljive pohabanosti dijelova kada se aktivnostima održavanja zaista može spriječiti pojava otkaza (Starr, 1997).

2.1.2.2.2. Održavanje prema stanju (*Condition Based Maintenance*)

Veliki broj istraživača je definisao pojam održavanja prema stanju. Mitchell (1998) definiše aktivnosti održavanja zasnovane na trenutnom stanju (neophodnost objektivnih činjenica) na licu mjesta, neinvazivno, operativno uz mjerenje stanja/parametara. Butcher (2000) definiše tehnologiju održavanja kao niz aktivnosti održavanja u smislu procjene stanja opreme u realnom ili blizu realnog vremena. Procjena stanja se dobija od strane namjenski ugrađenih senzora i/ili spoljnih testova ili mjerenja pomoću prenosivih mjernih uređaja/instrumenata. Moya i Vera (2003) definišu svrhu programa održavanja prema stanju kao „...poboljšanje sistema pouzdanosti i dostupnosti, kvaliteta proizvodnje, sigurnosti, boljeg programiranja aktivnosti održavanja, smanjenje direktnih troškova održavanja, smanjenje potrošnje energenata, sertifikacija pogona i dobijanje preduslova za ISO 9000 standard...“. Održavanje prema stanju se prema EN 13306 (2001) definiše kao:

„*Preventivno održavanje zasnovano na monitoringu performansi i/ili parametara i naknadnim korektivnim aktivnostima*.“

Monitoring se prema standardu EN 13306 (2001) definiše kao:

„*aktivnost realizovana manuelno ili automatski, s ciljem posmatranja trenutnog stanja sistema*.“

Osnovna razlika između monitoringa i inspekcije je u tome što se monitoring koristi za procjenu bilo kakvih promjena parametara sistema u vremenu. Monitoring može biti kontinualan, u okviru vremenskih intervala ili u okviru određenog broja operacija. Obično se realizuje u uslovima radnog stanja sistema.

Monitoring parametara i performansi može biti unaprijed određen i to kao kontinualni ili povremeni. Ova tehnologija održavanja koristi uslove i sredstva dijagnostičkih uređaja za analizu trenutnog stanja promatranih dijelova sistema i koristeći znanja tehničke dijagnostike, uslova eksploatacije opreme i tehnoloških postupaka u okviru proizvodnih procesa, utvrđuje odgovarajuće aktivnosti preventivnog održavanja. Koristeći intervale održavanja i zadatke zasnovane na održavanju prema stanju, aktivnosti održavanja postaju unaprijed predvidivi. U tom smislu, standard EN 13306 (2001) definiše prediktivno održavanje kao:

„*Održavanje prema stanju koje se sprovodi nakon prognoze dobijene analizom i procjenom jednoznačnih parametara degradacije sistema*.“

Pojam degradacije sistema je prema standardu EN 13306 (2001) definisan kao:

„*Nepovratan proces narušavanja jedne ili više karakteristika sistema bilo vremenski ili djelovanjem vanjskog faktora*.“

Osnovna odrednica pojma degradacija je mogućnost dolaska u stanje otkaza. Često se pojam degradacije odnosi i na habanje. U smislu prethodne definicije, pojam degradacije se može objasniti i kao pojam narušavanja uslova rada sistema jer je osnovni zadatak strategije održavanja prema stanju dijagnostifikovati poremećaj prije nego što postane nepovratni proces.

Gledajući finansijske aspekte, veoma je važno odrediti ekonomsku opravdanost određene strategije održavanja. Za slučaj velikog kapitalnog značaja, kritičnosti i sigurnosti kompletnog sistema, sigurnosti procesa proizvodnje itd. održavanje prema stanju predstavlja bolje rješenje iako se radi o značajnim ulaganjima u dijagnostičku opremu. Naravno, osnovni preduslov je da posmatrani sistem ima mjerljive parametre radnog procesa. Postoje brojne analize odlučivanja koji će se metod i strategija održavanja primijeniti za svaki konkretan slučaj (Al-Najjar i Alsyouf, 2003).

Osnova monitoringa je postojanje *sistema za održavanje prema stanju* koji se može definisati kao:

„*Sistem koji koristi održavanje prema stanju da bi odredio i planirao aktivnosti prediktivnog održavanja samostalno ili u interakciji sa drugim sistemima ili čovjekom*“.

Održavanje prema stanju ima funkciju pretvaranja mjerljivih energetskih ulaznih veličina (temperatura, vibracija, buka...) u željenu formu ili efekat (stanje elemenata, poređenje sa dozvoljenim vrijednostima za siguran rad, prognoze za nastanak otkaza, i slično) u prostoru i vremenu. Sistem održavanja prema stanju koristi karakteristike i parametre tehnike monitoringa (vibracije, zvuk, toplota...) u smislu detektovanja narušavanja performansi ili promjena radnih karakteristika posmatranog sistema.

Tehnike ili aktivnosti sistema monitoringa, na osnovu prethodnih definicija, mogu biti:
- subjektivne – uočene i posmatrane od strane radnika,
- upotreba prenosivih mjernih uređaja – manuelno,
- samostalni kontinualni sistemi za mjerenje unaprijed definisanih parametara.

Treba napomenuti da se aktivnosti monitoringa obično provode tokom normalnog rada sistema, što u mnogim slučajevima predstavlja sposobnost dobijanja relevantnih podataka stanja sistema. Monitoring može biti planiran, na zahtjev ili kontinualan.

Slijedeći karakteristike i parametre monitoringa, sistem održavanja prema stanju treba utvrditi naknadne aktivnosti koje se provode u okviru prediktivnog održavanja. Napredni sistemi održavanja po stanju, koristeći podršku računarskih programa, imaju mogućnost autonomnog planiranja aktivnosti održavanja. Oni daju ulazne podatke o trenutnom stanju sistema i procjenu gdje bi posmatrani sistem trebao biti u budućnosti s obzirom na zahtijevane radne uslove. Nakon predviđanja stanja sistema, uloga čovjeka se svodi na odluku o rasporedu aktivnosti održavanja. Ovom integracijom čovjeka u sastavni dio sistema stvara se mogućnost realizacije svih postavljenih zahtjeva u okviru sistema održavanja prema stanju.

2.1.2.3. Terotehnološko održavanje

Terotehnološko održavanje (*Terotechnology*) je zasnovano na principu da stručna lica održavanja učestvuju direktno ili indirektno poznavanjem u svim fazama životnog ciklusa (vijeka) opreme i to od početne ideje do njenog otpisa, a u cilju osiguranja funkcionalne i ekonomske podrške sistema.

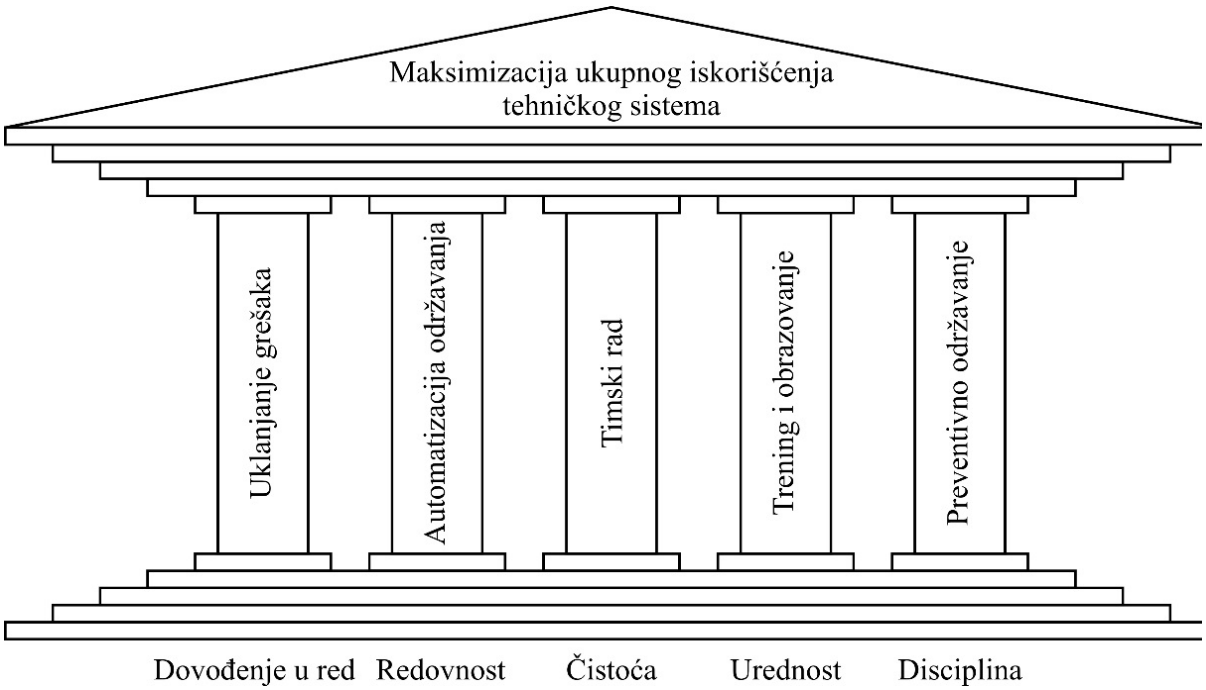
2.1.2.4. Logističko održavanje

Logističko održavanje (*Logistics Engineering*) ima za osnovu podršku instalisanoj opremi u proizvodnom pogonu, pri čemu se akcenat stavlja na njeno projektovanje, proizvodnju opreme i na kraju na uslove korišćenja. Prioritet ove koncepcije je razvoj elemenata logističke podrške u vidu opštih poslova (administracija, normativi, motivacioni, ergonomski i ekološki faktori, ostvarenje i raspodjela dobiti). Značajna pažnja se poklanja na nabavku rezervnih dijelova i repromaterijala, ali i na mogućnost proizvodnje i popravke rezervnih dijelova u uslužnim ili vlastitim radionicama.

2.1.2.5. Integrisano produktivno održavanje

Integrisano produktivno održavanje (*Total Productive Maintenance – TPM*) daje prioritet osoblja u odnosu na raspolaganje opremom i sredstvima rada. Ukazano povjerenje radnicima predstavlja najveći motiv za nesmetan rad i uspjeh proizvodnog sistema. U određenim istraživanjima grupe gubitaka u proizvodnji pokazalo se da gubici izazvani prekidima i neplanskim zastojima, podešavanjima zbog posla i malim prekidima poslužitelja (operatora), čestim zaustavljanjem i pokretanjem u rad, doradama zbog niskog kvaliteta krajnjeg rezultata rada (proizvoda) predstavljaju veliki udio u ukupnim proizvodnim troškovima. Iz tog razloga ovaj model održavanja ima značajnu zastupljenost u modernim sistemima, ali zahtjeva puno angažovanje svih zaposlenih i visok nivo svijesti i motivisanosti za rad.

Slika 2.5. daje šemu koncepta TPM.



Slika 2.5. Osnovni stubovi koncepta TPM, [2]

Jedna od glavnih karakteristika TPM je i promjena shvatanja procesa i odgovornosti svih učesnika u organizacionom i tehnološkom lancu. Na slikama 2.6, 2.7, 2.8 i 2.9. prikazana je razlika tradicionalnog shvatanja radnih dužnosti i pristupa koje TPM razvija kod svih odgovornih učesnika u proizvodnom procesu.

Tradicionalna uloga

- dobija instrukcije šta treba raditi
- nikada ga ne pitaju za mišljenje, ideje
- koristi ruke, noge, manje razum
- ne osjeća nikakvu povezanost sa poslom, kupcem i društvom

TPM uloga

- odgovoran je za određeni dio biznisa
- posjećuje i komunikuje sa kupcem
- obučen je za dnevne aktivnosti preventivnog održavanja.
- Vrši sitne popravke

Slika 2.6. Nova uloga radnika u TPM koncepciji

Tradicionalna uloga

- otklanja kvarove, nikada nema vremena za ispravno rješenje
- fizički i mentalno nije povezan sa društvom, proizvodnjom i kupce
- razvija sposobnosti "gašenja požara" dobija instrukcije šta treba raditi

TPM uloga

- obučava osoblje
- razmišlja u intencijama preventivnog održavanja
- vrši preventivne aktivnosti tokom planiranih zastoja
- pomaže kod dijagnostifikovanja

Slika 2.7. Nova uloga radnika održavanja u TPM koncepciji

Tradicionalna uloga

- odgovorni za dizajn postrojenja i izbor dobavljača
- kada se pojavi problem sa postrojenjem, riješi ga

TPM uloga

- sarađuje sa dobavljačem postrojenja na dokumentaciji i vršenju održavanja
- sarađuje sa osobljem i supervizorom na rješavanju problema
- obučava tehničare
- poboljšava aktualno postrojenje

Slika 2.8. Nova uloga radnika tehničara/tehnologa u TPM koncepciji

Tradicionalna uloga

- nisko povjerenje od strane radnika
- udaljen od proizvodnih procesa (osim supervizora)
- slaba komunikacija sa operaterima
- "Dobar" je sa održavanjem nakon kvara

TPM uloga

- 20 % posvećuje radu kao TPM katalizator
- podržava planirane zastoje
- otvorena i trenutna komunikacija posredstvom dnevnih i mjesečnih sastanaka preduzeća
- zahtjeva i podržava treninge i razvoj radnika

Slika 2.9. Nova uloga radnika menadžera u TPM koncepciji

2.1.2.6. Sveukupno efikasno upravljanje imovinom

Sveukupno efikasno upravljanje imovinom s uključivanjem TPM (*Total Productive Equipment Management – TPEM*) je oblik produktivnog održavanja uz potpuno uključivanje svakog zaposlenog radnika kao i kontrolu upravljanja opremom. Osnovne komponente TPEM su: održavanje prema stanju TPM-PM (Preventive/Predictive Maintenance), samostalne grupe za održavanje TPM-AM (*Autonomous Maintenance*) i kontrola i poboljšanje performansi opreme TPM-EM (*Equipment Management/Improvement*).

2.1.2.7. Održavanje zasnovano na pouzdanosti

Održavanje zasnovano na pouzdanosti (*Reliability-Centered Maintenance – RCM*) je proces primijenjen za svaki tehnički sistem s ciljem obezbjeđenja kontinualnog rada, a u skladu s potrebama i zahtjevima krajnjeg korisnika. Ovakav vid koncepcije održavanja je pogodan kod sistema gdje se zahtijeva visok nivo pouzdanosti i raspoloživosti. Za obezbjeđenje RCM potrebno je prethodno riješiti niz organizacionih zadataka: definisati trenutni nivo pouzdanosti proizvodnog sistema preko organizacije sistema praćenja rada i prikupljanja i obrade podataka, razradu svih elemenata i metodologije za određivanje granica pouzdanosti, provesti neophodne kompleksne analize s ciljem upoređivanja trenutne pouzdanosti sa dopuštenim graničnim vrijednostima, predviđanje i analizu posljedica promjene pouzdanosti i definisanje vrijednosti pokazatelja za budući rad tehničkog sistema. Prednost sistema RCM u odnosu na druge koncepcije održavanja je u činjenici da pomenuti sistem omogućava jednostavno shvatanje uslova koji su neophodni u procesu donošenja ispravnih odluka za tehnički moguće i primjenljive korake održavanja tehničkih sistema.

2.1.2.8. Ekspertni sistemi

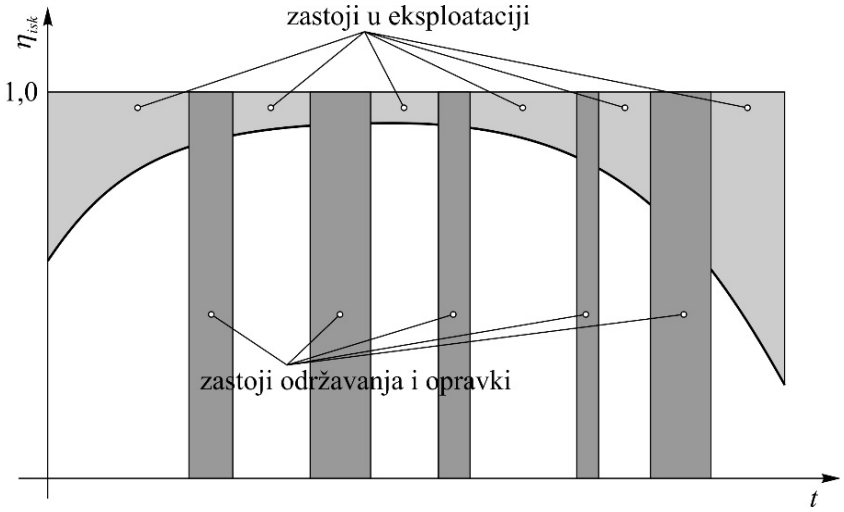
Ekspertni sistemi (*Expert Systems*) se razvijaju uporedo s razvojemhardvera i softvera početkom osamdesetih godina dvadesetog vijeka. Osnovu čine velike baze podataka podržane računarskim sistemima sa definisanim pojmovima i znanjem, te mehanizmima zaključivanja tj. sistemima vještačke inteligencije. Ovi sistemi predstavljaju programe koji se ponašaju adekvatno stručnjaku za određeno područje i koji rade po određenim pravilima, koristeći tehnologiju postavljanja pitanja i odgovora. Naravno da su i ovi sistemi podržani računarskim sistemima koji su dostupni.

2.1.2.9. Samoodržavanje

Samoodržavanje je karakteristično za potpuno automatizovane kompanije s visokim stepenom automatizacije i predstavlja najviši nivo funkcije održavanja. Ovakav vid održavanja susrećemo u sistemima robotizovanih tehnoloških linija.

2.1.2.10. Usluge održavanja spoljnih specijalizovanih kompanija

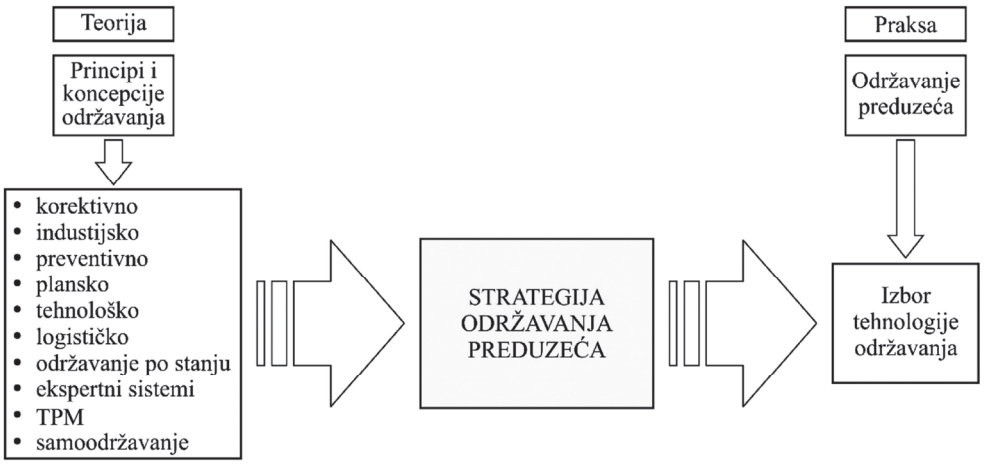
Usluge održavanja spoljnih specijalizovanih kompanija (*Outsourcing*) je koncept povjeravanja svih poslova održavanja specijalizovanim kompanijama koje posjeduju odgovarajuće ljudske i materijalne resurse za pružanje kvalitetne usluge održavanja i podrške proizvodnim sistemima. Prelazak na sistem *Outsourcing* treba da obezbijedi bolje upravljanje i planiranje, raspored i praćenja rada, obezbjeđenje nadzora i smanjenje ukupnih troškova. Slika 2.10. prikazuje uticaj zastoja održavanja na stepen iskorišćenja sistema.



Slika 2.10. Uticaj zastoja održavanja na stepen iskorišćenja, [7]

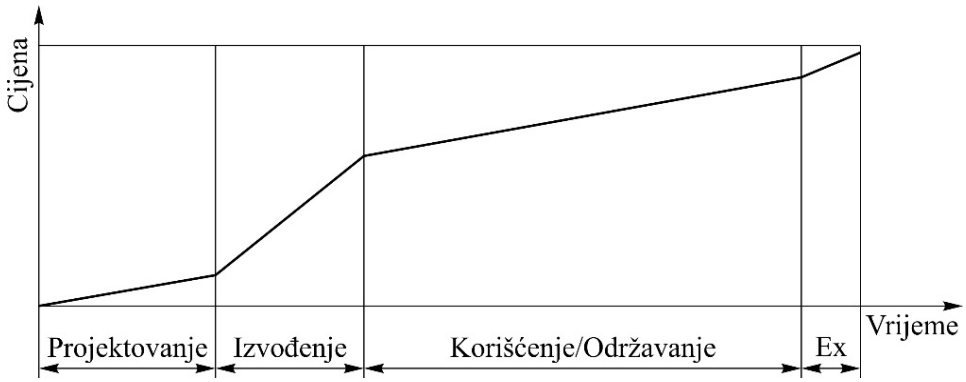
Za izbor strategije održavanja potrebno je definisati osnovni cilj koji se želi postići, a to je svakako minimalizacija zastoja. Kao ulazni podaci koriste se podaci o zastojima i ponašanju sistema u prethodnom periodu. Oni se analiziraju zajedno sa zahtjevima za pouzdanost i raspoloživost koje sistem treba da obezbijedi.

Pravilan izbor strategije održavanja ima za zadatak da obezbijedi ispunjenje dugoročnih ciljeva održavanja: visoku pouzdanost pogona i postrojenja, ekološku prihvatljivost, skraćivanje vremena trajanja remonta kao i produženje perioda između remonta te što veći udio održavanja po stanju opreme, poboljšanje stepena korisnosti, uz smanjenje troškova održavanja, slika 2.11.



Slika 2.11. Osnovni koncept izbora tehnologije održavanja

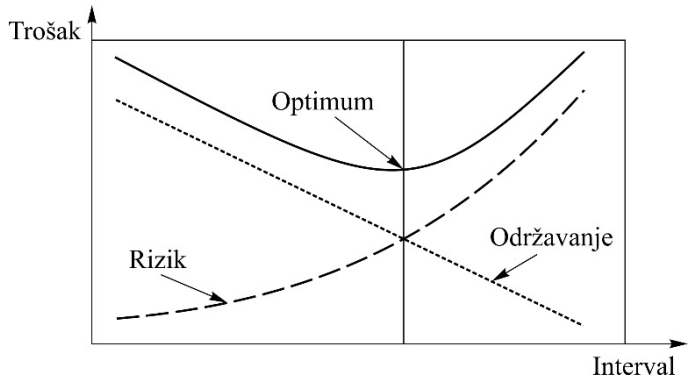
Ukoliko je strategija održavanja definisana, odnosno pristupa održavanju, definišu se i tehnološki procesi održavanja koji razdvajaju postupke defektaže, dijagnostike, analize i popravke elemenata sistema. Karakteristike odabrane tehnologije održavanja zavise od karakteristika samog tehničkog sistema. Optimizacija sistema održavanja predstavlja iznalaženje najpovoljnijih rješenja, prema određenim kriterijumima, i ima za cilj obezbjeđenje zadovoljavajućeg nivoa pouzdanosti pri minimalnim troškovima održavanja. Na slici 2.12. su prikazani troškovi u okviru životnog ciklusa tehničkog sistema i to u okviru ukupnih troškova nastalih tokom njegovog vijeka trajanja.



Slika 2.12. Uticaj dijelova životnog ciklusa tehničkog sistema na troškove, [2]

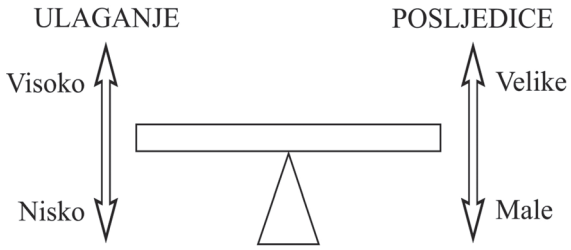
Nastanak troškova je prisutan još u fazi projektovanja i razrade projektne dokumentacije, da bi intenzivnije rasli pri samom izvođenju/instalaciji. U toku korišćenja i pratećeg održavanja imaju umjeren rast, a završavaju se isključivanjem iz procesa rada, uz prateću sanaciju životne sredine.

Zavisnost troškova od intervala održavanja, odnosno od nivoa pouzdanosti tehničkog sistema u odnosu na moguće rizike prikazana je na slici 2.13.



Slika 2.13. Odnos troškova i intervala održavanja tehničkog sistema, [2]

Ukoliko govorimo o ulaganjima u održavanje može se uočiti da niska ulaganja mogu dovesti do velikih negativnih posljedica po tehničke sisteme, a time i do negativnog poslovnog rezultata. S druge strane visoka ulaganja koja imaju svoju opravdanost sigurno će rezultirati manjim negativnim posljedicama iako sama ulaganja imaju direktan uticaj na poslovanje sistema. Međusobna zavisnost ulaganja u sistem održavanja tehničkog sistema i posljedica prikazana je slikom 2.14.



Slika 2.14. Zavisnost ulaganja u održavanje i posljedica, [2]

Upravo optimizacija ovih veličina predstavlja izazov kako za sistem održavanja tako i za cjelokupan poslovni sistem.

2.2. Tehnička dijagnostika

2.2.1. Uvod

Termin dijagnostika, odnosno, dijagnoza, se javio najprije u medicinskim naukama, gdje ima široko značenje. Potiče od grčke riječi "diagnosis", koja označava prepoznavanje (zaključivanje) i (pr)ocjenjivanje.

U posljednjih nekoliko decenija pojam tehnička dijagnostika je prodro u sve grane tehnike, posebno u elektrotehniku i mašinstvo. Pod tim pojmom se podrazumevaju sve mjere koje služe za ocjenu trenutnog stanja ili davanje prognoze ponašanja mašine, uređaja, opreme i slično, bez rastavljanja/demontaže ili razaranja u određenom vremenskom periodu. Osnovni zadatak koji se ostvaruje mjerama tehničke dijagnostike je pravovremeno predviđanje pojave neispravnosti dijelova tehničkog sistema. Realizacijom mjera tehničke dijagnostike povećava se ukupan stepen pouzdanosti, raspoloživosti i efektivnosti kompletnog tehničkog sistema.

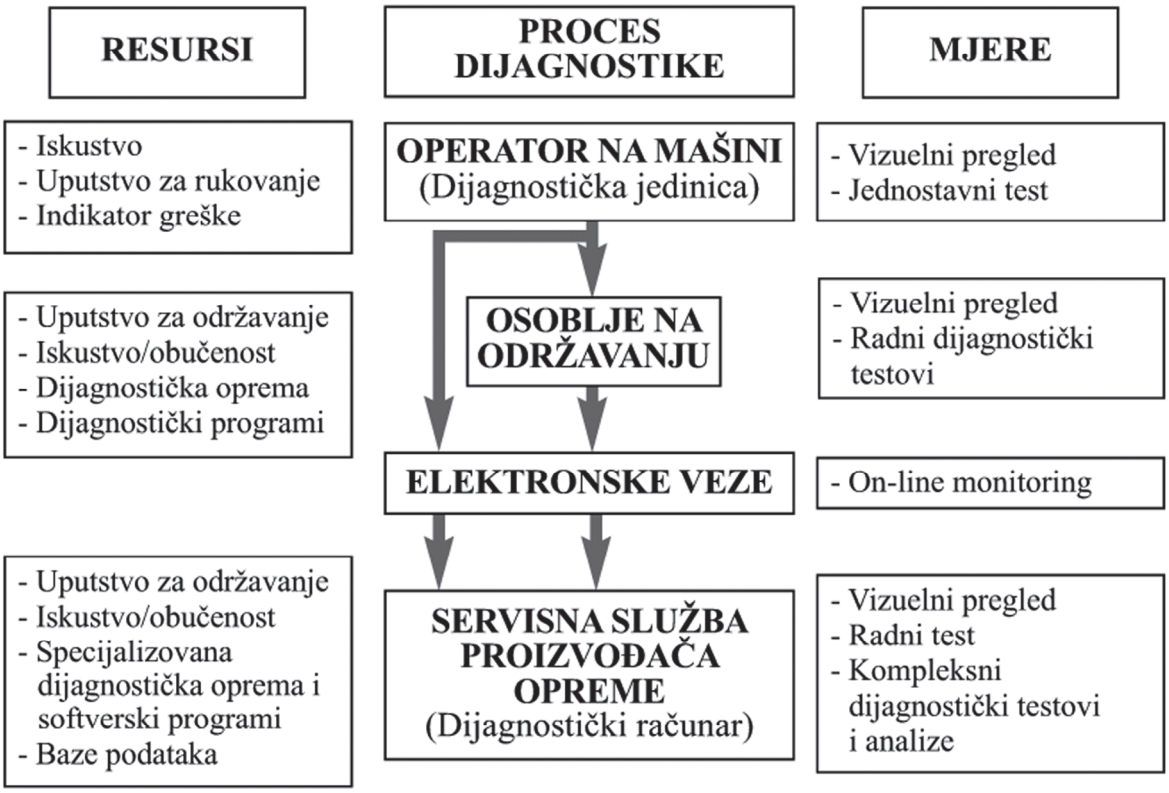
Tehnička dijagnostika je nauka o prepoznavanju stanja tehničkog sistema i zahvaljujući sistemima za praćenje veličina stanja se može predvidjeti pojava neispravnosti. Eliminacijom faktora moguće pojave otkaza sistema, povećava se efikasnost i pouzdanost sistema [6].

Tehnička dijagnostika pruža veliki broj pogodnosti kako za normalan i siguran rad proizvodnog tehničkog sistema tako i za ostvarivanje funkcije cilja službe održavanja. Najznačajnije karakteristike su sljedeće:
- optimizacija planiranja preventivnih popravki i remontnih radova postrojenja na osnovu ocjene stvarnog stanja tehničkog sistema,
- izbjegavanje uslova u toku eksploatacije koji sistem mogu dovesti u stanje otkaza,
- smanjenje zastoja i neplaniranih aktivnosti koje za posljedicu ima optimizaciju pouzdanosti, sprečavanje havarijskih stanja,
- produžavanje eksploatacionog vijeka opreme pošto rezultati tehničke dijagnostike određuju i ukazuju na termine zamjene pojedinih dijelova i sklopova,
- formiranje baze podataka pogodne za jednostavniji pogled i pristupu svrhu budućih investicionih ulaganja u kritična mjesta i dotrajalu opremu.

U okviru pojma tehnička dijagnostike postoje različiti kriterijumi za ocjenu mjera tehničke dijagnostike, a s tim u vezi i nekoliko vrsta podjela. Stanje sistema je osnovna karakteristika posmatranog tehničkog sistema. Pojam stanje se može opisati sljedećim osobinama:
- stanje „u radu“,
- stanje „u otkazu“,
- kvalitet funkcionisanja,
- sigurnost i bezbjednost i dr.

Otkaz tehničkog sistema se definiše kao prestanak mogućnosti nekog elementa ili sistema u cjelini da vrši funkcije za koje je projektovan. Tehnički sistem može imati narušenu radnu sposobnost na osnovu djelovanja različitih faktora koji mogu izazvati različite stepene oštećenja. Uzroci narušavanja radne sposobnosti mogu biti:
- tehnološki (uslovi tehnoloških procesa),
- konstrukcioni (greške prilikom procesa konstrukcije dijelova),
- eksploatacioni (periodi rada/korišćenja, načini upotrebe i održavanja),
- istrošenost dijelova (trenje, habanje...).

Ocjena stanja dijagnostikovanog objekta se definiše graničnim vrijednostima odgovarajuće karakteristike ili parametra. Vrijednosti koje određuju normalno funkcionisanje sistema su uslovljene projektom sistema, načinom izrade, načinom funkcionisanja i uslovima odnosno promjenom uslova okruženja (*Design, Production Technology, Operational, Change of Condition - DPTOCC*). Upoređivanjem izmjerenih vrijednosti posmatranog parametra (vrijednostima koje uslovljavaju normalno funkcionisanje) s graničnim propisanim vrijednostima stvaraju se osnove za donošenje odluke da li posmatrani objekat ili dio ispunjava projektovanu funkciju cilja ili je potrebno izvršiti odgovarajuću aktivnost održavanja u smislu podešavanja.



Slika 2.15. Procesi u okviru tehničke dijagnostike [5]

Proces tehničke dijagnostike obuhvata sljedeće aktivnosti:
- istraživanja predmeta tehničke dijagnostike,
- analizu rezultata mjerenja, ispitivanja i kontrole,
- donošenja zaključaka o stanju i osobinama tehničkog sistema,
- prognoze budućeg stanja sistema, uz definisanje preporuka o održivosti tog stanja.

Zavisno od toga da li se definisanje uzroka otkaza tehničkog sistema ostvaruje u toku rada odnosno eksploatacije ili u okviru zastoja postrojenja, može se govoriti o eksploatacionoj i remontnoj dijagnostici. Oba pojma predstavljaju sastavni dio strategije održavanja prema stanju.

U praksi, ne postoji jednoznačan kriterijum za uvođenje jedinstvenog dijagnostičkog sistema koji bi bio odgovarajući za sve tehničke proizvodne sistema. Izbor koncepta kontrolno-dijagnostičkog sistema koji će biti predložen i izabran zavisi od niza faktora, i to:

- prirode tehnološkog odnosno proizvodnog procesa;
- tehničkih osobina proizvodnih kapaciteta (medij, mašine, oprema...),
- raspoloživosti mjernih veličina odnosno dijagnostičkih parametara;
- dostupnosti mjerne opreme na tržištu,
- postojanje edukovanih radnika za realizaciju i praćenje rada dijagnostičkog sistema,
- finansijskih mogućnosti poslovnog sistema i dr.

Sistem tehničke dijagnostike predstavlja prateći sistem u okviru proizvodnog tehničkog sistema koji pokriva određeni segment mjerljivih vrijednosti i utvrđivanje njihovih veza s promjenom parametara stanja sistema, karakteristikama njihove promjene, davanje dijagnoze stanja dijelova sistema u određenom vremenskom intervalu i predviđanje razvoja stanja radnih karakteristika u budućnosti.

Primjena mjera dijagnostike služi za:
- trajnu ili
- periodičnu dijagnozu.

Kod trajne odnosno permanentne dijagnoze, uređaji za dijagnostiku su ugrađeni u objekat posmatranja (ili su "samo" povezani s objektom posmatranja), s ciljem kontinualnog praćenja odabranih karakteristika, odnosno parametara. U praksi je značajno zastupljenije periodično dijagnostikovanje, pošto je potrebno posjedovati samo jedan uređaj (ili mali broj uređaja) za dijagnostiku za sve objekte koji su predmet ispitivanja.

2.2.2. Stanje, promjene i kontrola stanja objekta praćenja

Stanje objekta se opisuje određenim skupom parametara (karakteristika), koji treba da vrše projektovanu funkciju, pri određenim uslovima i u određenom vremenskom periodu. Karakteristike objekta praćenja, u zavisnosti od osnovne namjene posmatranog sistema, mogu biti: napon struje, nivo buke, protok fluida, radna temperatura, vibracije ležaja, debljina zida nekog suda pod pritiskom itd. Promjene parametra mogu da uzrokuju snižavanju stepena funkcionalnosti objekta, a u dužem vremenskom periodu to može da dovede i do potpunog prekida vršenja projektovane funkcije - otkaza.

Parametri koji utiču na funkciju objekta mogu biti sa:
- konstantnim (monotonim),
- rastućim ili
- iznenadno dejstvujućim uticajem na stanje posmatranog objekta.

Osnovni preduslov donošenje bilo kakve odluke vezane za dalje korišćenje posmatranog objekta je poznavanje radnih uslova i dozvoljenih granica istrošenosti. Granica istrošenosti posmatranog dijela predstavlja granicu između pogonske upotrebljivosti elemenata ili dijelova sistema i njegove oštećenosti. Zadatak tehničke dijagnostike je da se utvrdi tehničko stanje elemenata sistema u tačno definisanom vremenu i precizno određenim granicama tačnosti. Postupci utvrđivanja tehničkog stanja promatranog elementa sistema podrazumijevaju odgovarajuću instrumentaciju ili opažanja čulima specijaliste za dijagnostiku.

Granice stanja elemenata sistema u postupcima dijagnostifikovanja, koje su od posebnog interesa, odnose se prvenstveno na stanja oštećenja (zamor, habanje, istrošenost, i dr.). Kriterijumi za utvrđivanje granica su:

- tehničko-tehnološki (proizvodni, montažni i dr.),
- ekonomski (cijena zamjene dijelova sistema, rizika i dr.),
- ergonomski,
- sigurnosno-bezbjednosni i dr.

Npr. tehničko-tehnološki kriterijumi mogu biti debljina termički obrađenog sloja vratila, zazor sklopa vratila i ležaja i sl. Ekonomisti uzimaju u obzir troškove izrade/opravke itd. Sigurnost i bezbjednost se moraju razmatrati u skladu sa mogućim posljedicama pojave otkaza. Ergonomski aspekti se u posljednje vrijeme sve više analiziraju zbog odnosa čovjek - mašina (npr. vibracije, buka, potrebna radna snaga pri opsluživanju itd.). Najćešće se pri ocjeni stanja uzima u obzir više kriterijuma. Granice se mogu odrediti na osnovu:
- empirijskih postupaka odnosno iskustava,
- eksperimentalnih istraživanja u okviru realnih sistema,
- ispitivanja na ispitnim stolovima,
- teorijskih proračuna.

2.2.3. Metode mjerenja parametara procesa

Metoda mjerenja predstavlja skup postupaka koji definišu odnose između izmjerenih veličina. Postoji nekoliko različitih kriterijuma na osnovu kojih se vrši podjela metoda mjerenja. Ukoliko se mjerena veličina trenutno očitava kao apsolutna vrijednost onda govorimo o apsolutnoj metodi. Ako se određuje odnos mjerene i unaprijed definisane neke druge veličine, onda se radi o relativnoj metodi. S obzirom na to da li se radi o mjerenju na predmetu mjerenja bez uzimanja uzorka ili mjerenju na eksperimentalan način preko ispitivanja karakteristika materijala koji reprezentuju predmet mjerenja, govorimo o metodama sa ili bez razaranja materijala. Ukoliko se mjerena veličina direktno očitava radi se o direktnim metodama. Ako se mjerna veličina dobija računski preko unaprijed definisanog odnosa, govorimo o indirektnim metodama. Kontaktna metoda mjerenja koristi mjerne uređaje koji su u direktnom kontaktu s mjernom sredinom. U protivnom, ukoliko se mjerenje realizuje putem medija ili talasno, onda možemo govoriti o beskontaktnim metodama. Ako se mjerenje odnosi na veći broj pojedinačnih rezultata na osnovu kojih se donosi zaključak radi se o diferencijalnim metodama. Istovremeno mjerenje više parametara definiše kompleksne metode mjerenja.

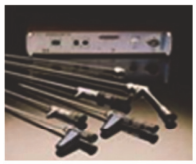
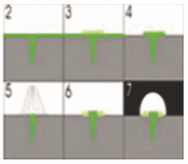
2.2.3.1. Postupci tehničke dijagnostike

Osnovni postupci tehničke dijagnostike su:
- subjektivni i
- objektivni.

2.2.3.1.1. Subjektivni postupci tehničke dijagnostike

U subjektivne postupke tehničke dijagnostike spadaju:
- vizuelna i optička ispitivanja,
- ispitivanje šuma i buke i
- ispitivanja mirisa.

Tabela 2.1. Subjektivne metode (postupci) tehničke dijagnostike [2]

Oblast ispitivanja	Oprema	Prikaz opreme	
Ispitivanje šuma i buke	- ljudsko uho (osluškivanjem)		
	- sonde		
	- stetoskopi		
	- elektronski stetoskop		
	- fonometri		
	- SPM metoda		
Vizuelna i optička ispitivanja	- ogledala i lupe		
	- mikroskopi		
	- endoskopi, fiberskopi, boroskopi i stroboskopi		
	- TV sistemi		
	- Alenov posmatrač		
	- penetranti (1 - nanošenje penetranta, 2 - nanošenje razvijača, 3 - razvijanje, 4 - pranje vodom, 5 - pregled, 6 - završno čišćenje, 7 - pranje, tj. čišćenje)		
Ispitivanja bojama, mirisom i dodirom	- termo krede, papir i kuglice		
	- varničenje		
	- miris sagorjele gume, plastike i sl.		
	- temperatura površinske neravnine (pukotine) i sl.		

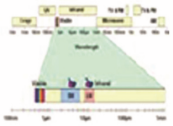
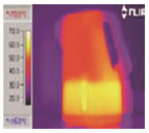
2.2.3.1.2. Objektivni postupci tehničke dijagnostike

2.2.3.1.2.1. Mjerenja pogonskih parametara

Osnovni zadatak prilikom izbora metode mjerenja je uočavanje karakteristika sistema i fizičkih veličina koje je moguće pratiti. Najčešći objektivni dijagnostički postupci su vezani za određivanje:

- temperature,
- broja obrtaja/ugaone brzine,
- pritiska,
- obrtnog momenta,
- opterećenja/snage,
- buke,
- vibracija,
- stepena iskorišćenja,
- vremena,
- jačine struje,
- magnetnog fluksa itd.

Tabela 2.2. Objektivne metode (postupci) tehničke dijagnostike stanja [2]

Radni parametar	Oprema		Prikaz opreme
Temperatura	Kontaktni termometri	- termoelementi - termistorski elementi - elektrootporni elementi - termička ekspanzija	
	Bezkontaktni termometri	- optički pirometar - pirometar za zračenje - infracrvene (termovizijske) kamere	
Broj obrtaja	Stroboskopi		
	Mehanički mjerači (tahometri)	- indukcioni - centrifugalni - indukcioni tahogeneratori	
	Mjerenje obimne brzine	- magnetna metoda - svjetlosni snop	
Mjerenje pritiska	- manometri - kvarc-krtistalni uređaji		
Mjerenje protoka	- sonde - digitalni mjerači protoka - hodomjer		
Ispitivanje stanja toplotnih instalacija	- termografija - termovizija		

2.2.3.2. Ocjena stanja i prognoziranje ponašanja na osnovu dijagnoze

Za procjenu dijagnoze stanja, a zatim i prognozu ponašanja praćenog elementa sistema potrebno je odrediti granice dijagnostifikovane veličine (parametra, karakteristike, mjere itd.). Ocjena granica se u principu može izvesti na dva načina:

- prognoza preostalog perioda korišćenja,
- alternativna ocjena.

2.2.3.2.1. Alternativna ocjena

Alternativna ocjena određuje odnosno ocjenjuje stanje funkcije sistema metodom upoređivanja mjerenih vrijednosti stanja s postavljenim graničnim vrijednostima. Rezultat ocjene stanja može biti: sistem je funkcionalan (tj. može da nastavi da radi) ili sistem nije funkcionalan.

Odluka se donosi na osnovu ovih alternativa - ili će sistem nastaviti da se koristi ili će se preduzeti odgovarajuće aktivnosti održavanja. Alternativna ocjena može biti verbalna ili uporedna.

2.2.3.2.2. Prognoza preostalog perioda korišćenja

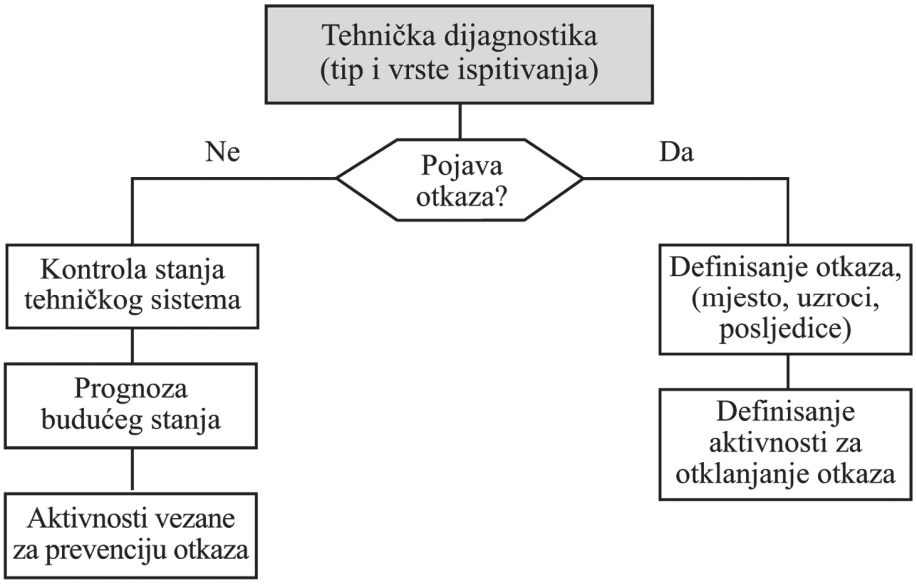
Na osnovu izmerenih parametara stanja sistema, prognozira se zavisnost parametara stanja od perioda korišćenja, tj. promjena stanja do očekivanih pojava otkaza. Određivanje granične vrijednosti parametara stanja je prvi preduslov za prognoziranje. Na osnovu poznavanja perioda korišćenja (vijeka) objekta posmatranja i dostignutih vrijednosti parametara stanja, moguće je ekstrapolacijom postaviti prognozu ponašanja parametra (npr. oštećenje) u budućnosti. Prognoza preostalog perioda korišćenja se može postaviti na osnovu direktnog parametra stanja (istrošenost) ili indirektnog parametra stanja (npr. temperatura ili pritisak ulja i sl.).

Normalno je da postoji određeno područje rasipanja krive oštećenja za iste elemente u vremenu, zavisno od radnih režima i uslova okoline (npr. održavanje, promjene uslova okoline, kvalitet obrade i dr.).

Primjena tehničke dijagnostike stvara preduslove za smanjenje preventivnih i korektivnih aktivnosti u vezi sa održavanjem uz zadržavanje ili postavljanje višeg nivoa pouzdanosti sistema u cjelini.

2.2.3.3. Metode prognoziranja

Naučni pristup predviđanja stanja odnosno ponašanja sistema zasnovan je na kombinaciji determinističko-stohastičkih metoda. Osnovu razvoja tehničke dijagnostike predstavlja primjena naučnih saznanja u oblasti teorije predviđanja, mjerne tehnike, kibernetike i teorije pouzdanosti tehničkih sistema. Tehnička dijagnostika treba da ukaže na trend pojave i nastanka nepravilnosti, pruži što jasniju sliku tehničkog stanja, kontroliše radnu sposobnost i funkcionalnost sistema te dapruži što precizniju procjenu/prognozu preostalog vremena korišćenja, slika 2.16.



Slika. 2.16. Funkcije tehničke dijagnostike [2]

Postoje dva načina ili metode za prognoziranje ponašanja parametra:
- metoda srednje statističke vrednosti toka habanja odnosno pogoršanja stanja i
- metoda pojedinačne vrijednosti toka habanja (pogoršavanja stanja).

Prognoza na osnovu srednje vrijednosti se primjenjuje kada nije poznat (ili je nedovoljno poznat) pojedinačni tok pogoršanja stanja konkretnog elementa ili sklopa. Prognoza se bazira na izmjerenoj vrijednosti stanja u trenutku ispitivanja. Prognozu na osnovu pojedinačnog toka pogoršanja stanja je moguće dati ako postoje informacije o ispitivanju jednog elementa/sklopa.

2.2.3.3.1. Greške dijagnoze

Greška dijagnoze može nastati iz dva razloga:
- greška usljed utvrđivanja stanja i
- greška usljed ocjene stanja.

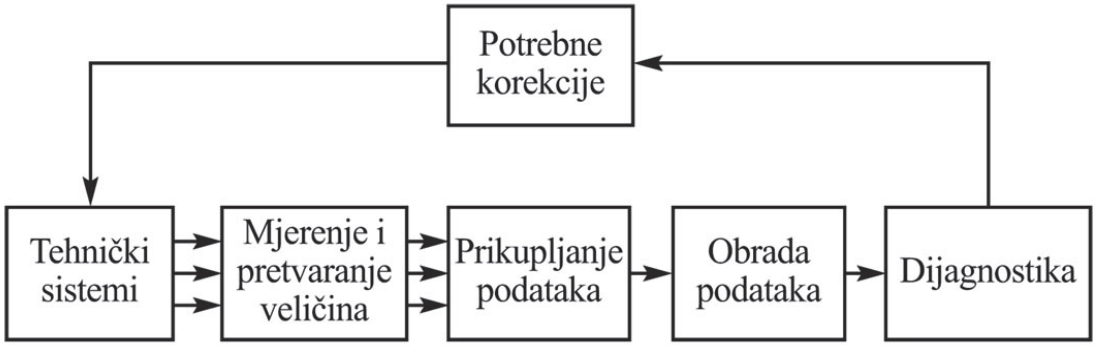
Greške usljed utvrđivanja stanja mogu biti npr. zbog:
- greške očitavanja,
- netačnosti mjerenih uređaja,
- uslova dijagnostifikovanja i dr.

Greške usljed ocjene stanja mogu biti:
- netačnost utvrđivanja granica stanja zbog stohastičkih uticaja,
- nepoštovanje propisanih uslova ispitivanja,
- subjektivne greške ocjene i sl.

2.2.4. Tehnička dijagnostikarealnog sistema

2.2.5. Metode i modeli tehničke dijagnostike postrojenja za proizvodnju higijenskog papira

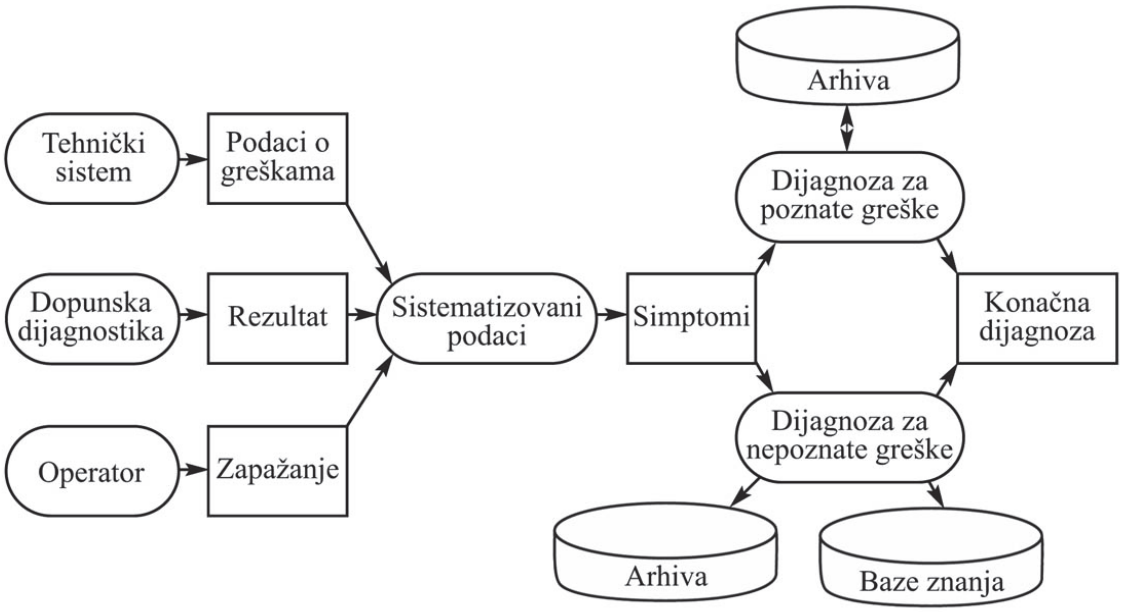
Postrojenja za proizvodnju higijenskog papira su složeni tehnički sistemi u sklopu tehnološkog postupka prerade celuloze. Osnovu sistema čini papir mašina sastavljena iz niza tehničkih sklopova povezanih jedinstvenim tehnološkim postupkom proizvodnje papira. Kao i kod drugih tehničkih sistema, postrojenje papir mašine predstavlja takođe predmet tehničke dijagnostike i ovim radom će biti posebno analizirana.



Slika 2.17. Šematski prikaz tehničke dijagnostike [8]

Procedura tehničke dijagnostike papir mašine podrazumijeva:
- postavljanje mjernih senzora na objekat (promatrani sistem),
- stabilizaciju režima rada (sistema i opreme) za dobijanje relevantnih rezultata,
- mjerenje dijagnostičkih signala,
- upoređivanje dobijenih vrijednosti s propisanim vrijednostima iz normativa,
- donošenje zaključka o trenutnom stanju elemenata sistema koji se posmatra,
- donošenje zaključka o stanju sistema.

Postojanje tehničkog sistema s mjerljivim parametrima je prvi preduslov uspostavljanja tehničke dijagnostike. Stalno praćenje omogućava formiranje baze podataka koji se analiziraju i koriste za različite načine prognoziranja budućih događaja, slika 2.18.



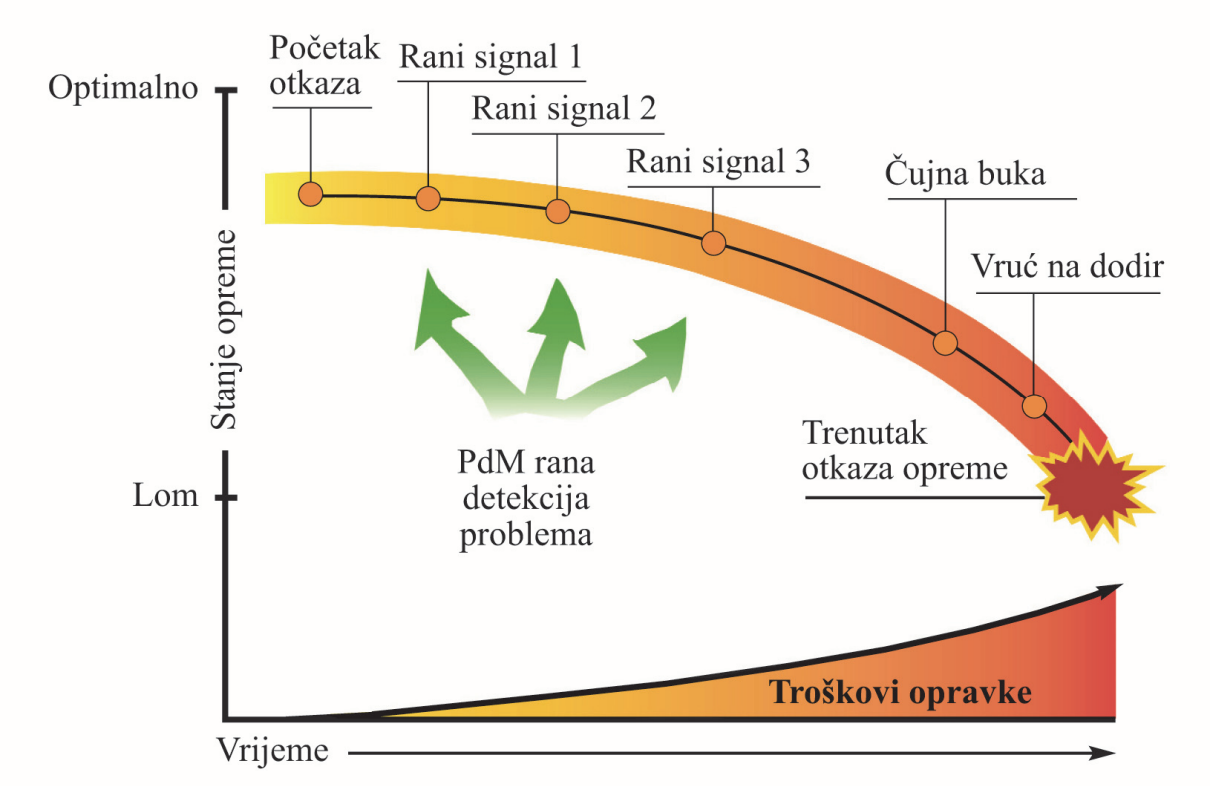
Slika 2.18. Uloga baze podataka u dijagnostičkom procesu [8]

Definisanje kritičnih mjesta u smislu dijelova sistema koji svojom funkcijom mogu izazvati otkaze dijelova ili kompletnog sistema sužava proces eliminacije potencijalnih rizika koji ugrožavaju sistem. Svako pojedino kritično mjesto treba da sadrži neku od mjerljivih fizikalnih veličina koje se tokom rada mijenjaju u vremenu. Na kritična mjesta se postavljaju senzori za praćenje i mjerenje karakterističnih veličina stanja sistema. Proces podrazumijeva mjerenja i pretvaranje ovih veličina u vrijednosti koje se mogu prikazati na jasan i pregledan način. Izmjerene vrijednosti se upoređuju s propisanim vrijednostima iz normativa, na osnovu čega se izvlači zaključak o stanju radnih karakteristika sistema.

2.3. Optimizacija procesa održavanja– koncepcije održavanja prema stanju i uvođenje tehničke dijagnostike u realan proizvodni sistem

Održavanje prema stanju (CBM), ili kako se može u literaturi pronaći i kao prediktivno održavanje (PdM), se definiše kao rezultat ponašanja opreme/mašine prije potpunog otkaza, dok proaktivno održavanje može zahtijevati redizajn i/ili modifikaciju usvojene procedure održavanja, gdje je to potrebno. Svaka od ovih tehnika ima prednosti i nedostatke. Održavanje prema stanju predstavlja kombinaciju preventivne i proaktivne strategije [9]. Osnovni koncept održavanja prema stanju predstavlja sumiranje aktivnosti i djelovanja u smislu po-

boljšanja jedne ili više od sljedećih karakteristika mašina: dostupnost, pouzdanost, održivost, sigurnost, efikasnost itd., kao i smanjenje energetske potrošnje i zagađenja životne sredine. Kao rezultat toga, implementacija održavanja prema stanju obično omogućava korisniku da ima dovoljno vremena za planiranje, vremenski raspored i neophodne popravke pre nego što oprema dođe u tehničko stanje otkaza. Tako se mogu izbjeći veliki otkazi i skupe popravke. Na slici 2.19 prikazana je zavisnost ponašanja sistema u vremenu djelovanjem CBM ili PdM na pojavu i progres otkaznog stanja u odnosu na troškove popravke.



Slika 2.19. Osnove ponašanja sistema otkaza u vremenu

Osnovu primjene koncepcije održavanja prema stanju je uvođenje sistema tehničke dijagnostike kao pomoćnih alata koji služe za realnu procjenu trenutnog stanja. Tehnički sistemi, u koje spadaju i industrijska postrojenja za proizvodnju papira, koji nemaju mogućnost monitoringa praćeni su od strane osoblja održavanja metodama koje se oslanjaju na korišćenje čula sluha, dodira i vida, ali zaključci i djelovanje u smislu eliminacije trenutnih ili potencijalnih problema često nisu pouzdani. Sve fizičke strukture i mašine, koje su povezane s rotirajućim komponentama, podstiču vibraciju. Vibracije koje su generisane mašinama postale su dobro iskorišteni parametar za procjenu u okviru monitoringa stanja. To je jedna od najsvestranijih tehnika koja može da otkrije oko 70% zajedničkih mehaničkih grešaka povezanih s rotirajućim mašinama [10].

Prethodna dugogodišnja praksa u održavanju tehničkih sistema isticala je da je najbolji način za optimizaciju performansi elemenata sistema bio remont ili zamjena na fiksnom intervalu. Ovo je zasnovano na pretpostavci da postoji direktna povezanost između količine vremena (ili broja ciklusa) opreme koja se prati i vjerovatnoće da će doći do otkaza. U [11] se naglašava da je veza između vremena rada (starosti) i otkaza tačna za neke tipove otkaza, ali da ona više nije vjerodostojna jer je oprema sada mnogo složenija i sofisticiranija nego što je to bilo

prije petnaest godina. Ovakav način shvatanja održavanja je doveo do značajnih promjena u tehnikama za predviđanje termina za otkazivanje opreme. Ukoliko nema jasne naznake postojanja faktora starosti i dotrajalosti opreme, remont u okviru fiksnih intervala ili zamjena može veoma malo ili beznačajno uticati na poboljšanje pouzdanosti rotacione opreme. U ovom slučaju, realnije je razviti strategije održavanja koje će pretpostaviti da se otkaz opreme može pojaviti u bilo kom trenutku, a ne u fiksnom vremenu.

Izbor odgovarajuće strategije održavanja je veoma stručan i osjetljiv postupak. On dugoročno može da rezultuje nizom događaja koji imaju odlučujući uticaj na ukupan rezultat poslovnog sistema. Izabrati odgovarajuću strategiju održavanja u okviru proizvodnog sistema u kontinualnim uslovima rada predstavlja planiranje projekcije rada kompletnog sistema i uslova u kojima se isti obezbjeđuje. Pravilan izbor strategije održavanja u okviru kontinualnog procesa proizvodnje znači obezbjeđenje sljedećih uslova:

- optimalan broj kvalifikovanih radnika održavanja raspoređenih u okviru smjenskog i interventnog rada,
- optimalan broj rezervnih dijelova koji se mogu naći na raspolaganju,
- dostupnost i primjena savremenih tehničkih sistema za praćenje radnih parametara,
- pozitivan uticaj na stepen efektivnosti proizvodnog sistema (pouzdanost, raspoloživost, gotovost),
- planiranje i provođenje popravki u smislu prevencije otkaza,
- kontrolu praćenja troškova,
- primjenu mjera zaštite na radu,
- pozitivan uticaj na očuvanje životne sredine.

Obezbjeđenje pomenutih uslova znači optimizaciju postupaka održavanja. Pogrešan ili neadekvatan izbor strategije održavanja znači kratkoročno možda bolji finansijski rezultat s obzirom na to da se uglavnom misli na izbjegavanje finansijskih ulaganja u službu održavanja (kadrovi, oprema, organizacija, menadžment...). Dugoročno, pogrešna strategija neminovno zahtijeva velika investiciona ulaganja. Pod pojmom ulaganja se misli kako na ulaganje u opremu, stručne kadrove tako i na unapređenje tehničkih sredstava koje koristi služba održavanja u smislu obezbjeđenja projektovane strategije. Danas moderno shvatanje održavanja ne posmatra ovaj fenomen kao „popravku“ već se održavanju treba pristupiti kao načinu provođenja ciljanih aktivnosti u smislu prevencije otkaza. Pravilan izbor strategije održavanja predstavlja racionalno planiranje troškova poslovanja kompletnog proizvodnog sistema u dužem vremenskom periodu.

3.0 PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA I ALGORITAM REALIZACIJE

3.1. Pregled dosadašnjih istraživanja

Održavanje prema stanju predstavlja kategoriju tehnike/načina održavanja sistema koja je bila predmet brojnih istraživanja i koja i danas predstavlja veliki izazov u smislu unapređenja procesa i ostvarivanja boljih poslovnih rezultata. Poseban značaj se pripisuje **metodama tehničke dijagnostike** koja je analizirana i opisana gotovo u svakom pojedinačnom slučaju koji se vezuje za sisteme održanja prema stanju. Pregled dosadašnjih istraživanja se može klasifikovati na radove koji se odnose na:

- teoriju i koncepcije održavanja industrijskih sistema;
- metode tehničke dijagnostike;
- tehnička dijagnostika sistema papirne industrije.

3.1.1. Teorija i koncepcije održavanja industrijskih sistema

U monografiji [2]: *Održavanje i pouzdanost tehničkih sistema*, 2007, Papić, Lj., Milovanović, Z. dajukompleksnu analizu osnova održavanja tehničkih sistema, metodologije i primjene metoda unapređenja procesa održavanja i pouzdanosti tehničkih sistema te odnosa efekata ulaganja u komponente proizvodnog ciklusa prema rezultatima povećanja efektivnosti (pouzdanosti, gotovosti i pogodnosti održavanja). Dobro izabran koncept održavanja, s pravilnom organizacijom, programiranjem i ostvarivanjem pojedinih aktivnosti održavanja u toku eksploatacije, uz dobru obučenost osoblja i obezbijeđen menadžment kvaliteta u održavanju, utiče i na poboljšanje ekonomskih rezultata poslovnog sistema. Istraživanja usmjerena na povećanje stepena pouzdanosti i upravljanje pouzdanošću tokom životnog ciklusa sistema imaju za cilj definisanje skupa mjera zaštite i njihovu optimizaciju s aspekta istovremenog obezbjeđenja ekonomičnosti eksploatacije i ostvarivanja složenih propisa vezanih za zaštitu čovjekove sredine i sigurnost kako samog poslovnog sistema tako i životne sredine.

Mjere i metode preventivnog održavanja po stanju opisane su u dijelu članka [12]: *Primjena dijagnostike kao osnove održavanja po stanju na primjeru motora osobnog automobila*, Tehnički glasnik 7 od strane Kondić, V., Horvat, M., Maroević, F.U članku se posebno ističu mjere i metode preventivnog održavanja po stanju. Tehnička dijagnostika je jedan od ključnih elemenata u sklopu pomenute metode preventivnog održavanja. Konkretizacija uloge tehničke dijagnostike je data u okviru eksperimentalnih istraživanja i to na konkretnom primjeru automobila, odnosno na njegovom motoru. Rezultati istraživanja pokazuju da se u postupcima projektovanja i razvoja novih tehničkih sistema od projektanata i konstruktora zahtijeva da uobzire i razvoj dijagnostičke opreme koja se ugrađuje ili posebno isporučuje uz novi tehnički sistem.

U knjizi [13] Adamović, Lj., Nestrović, G., Radojević, M., Paunović, Lj.: *Menadžment industrijskog održavanja*, Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin“, Zrenjanin, izlaže se sistematičan opis metodologije, strategije i menadžmenta održavanja sa primjerom organizacije službe održavanja u velikom preduzeću. Održavanje se definiše kao identifikacija i ublažavanje degradacije funkcionisanja tehničkog sistema, ali i kao vraćanje projektovanih funkcija sistema, njihovih komponenata i strukture u otkazu, u prvobitno stanje. Poseban osvrt se daje na

značaj održavanja na konkurentnost proizvoda na svjetskom tržištu. To znači ostvariti proizvodni proces s minimalnim troškovima održavanja uz istovremeno obezbjeđenje kvaliteta proizvoda ili usluga u dogovorenim rokovima i uz najnižu moguću cijenu, a da sistem ostane u granicama profitabilnosti.

Grupa autora Aleksić, M., Stanojević, P., Mitrović, S. u radu [14].: *Izbor koncepcije održavanja kompleksnih brodskih sistema*, 51. Konferencija ETRAN, Herceg Novi, 2007. stavlja akcenat na problem izbora koncepcije održavanja na primjeru održavanja složenih tehničkih sistema kao što je sistem upravljanja brodom. Prikazana je originalna metodologija izbora koncepcije održavanja na bazi ekspertskog znanja poslužilaca i održavalaca mornaričkih sistema, a prema principima RCM održavanja prema pouzdanosti, i to iz razloga statističke nedovoljnosti podataka o otkazima. Pilot-analize koje se napravljene po ovoj metodologiji pokazale su njenu primjenjivost i potencijal za smanjenje troškova održavanja, u konkretnom slučaju u održavanju brodskih sistema.

Kutin, M. u svojoj doktorskoj disertaciji [15]: *Optimizacija primjene dijagnostičkih tehnika i njihov uticaj na pouzdanost tehničkih sistema*, opisuje i analizira optimizaciju dijagnostičkih tehnika kao osnovni predmet istraživanja. Dokazivanjem hipoteze o postojanju uticaja uvođenja termografije, nekonvencionalne dijagnostičke metode i monitoringa tehničkog stanja na povećanje pouzdanosti, smanjenje troškova proizvodnje, produženje vijeka eksploatacije, većoj zaštiti životne sredine i višem nivou sigurnosti u radu, disertacija je potvrdila postojanje značajne i neodvojive veze između efektivnosti tehničkog sistema i primjene modernih dijagnostičkih metoda.

Monografija [16]: *Projektovanje pouzdanosti mašinskih sistema*,Popović, P., Ivanović, G. daje odgovore na pitanje uloge projektovanja pouzdanosti u fazama projektovanja tehničkih sistema, odnosno prije same izrade tehničkog sistema. Konkretan primjer se odnosi na motorna vozila i analizu projektovanja pouzdanosti. Značaj istraživanja je u univerzalnosti, jer se primijenjena metodologija može koristiti i na druge mašinske sisteme.

Bulatović, M. knjizi [17]: *Održavanje i efektivnost tehničkih sistema*, prikazuje sumarizaciju istraživanja i analize pouzdanosti tehničkih sistema na konkretnom primjeru promjene operativne gotovosti i pouzdanosti u Fabrici za proizvodnju glinice u Podgorici. Doprinos naučnom istraživanju je i predstavljena Metoda inkorporacije parametara stanja i vjerovatnoće otkaza u ekspertni sistem. Složeni problemi održavanja s aspekta utvrđivanja i praćenja stanja sistema u funkciji predviđanja i sprečavanja otkaza efikasno se rješavaju primjenom ekspertnih sistema.

Analiza [18]: *Razvojno održavanje jedinke*,Šćepanović, S., Vujović, L, Vujović J. opisuje model održavanja zasnovan na timskoj organizaciji projekta održavanja s osnovnim ciljem da unapređuje jedinku u procesu održavanja, da joj produži vijek trajanja i da se permanentno razvija proces održavanja. Savremene tendencije u oblasti razvojnog održavanja idu u pravcu produženja radnog vijeka jedinke, produženja radnog perioda između remonta, skraćenju remontnog perioda do optimalne vrijednosti, uz postepeni prelaz održavanja prema utvrđenom stanju, osobinama i planiranom budućem stanju jedinke.

Problemom modeliranja u okviru razvoja koncepcije održavanja prema stanju bavi se i Adamović, Ž., Radovanović, Lj. u radu [19]: *Modeli održavanja na bazi tehničke dijagnostike*. U radu su prikazana dva nova modela održavanja prema stanju i to: održavanje prema stanju s kontrolom parametara i održavanje prema stanju s kontrolom nivoa pouzdanosti. Ako se go-

vori o kontroli parametara sistema, izabrani parametri tehničkog stanja (vibracije, temperatura, pritisak i dr.) treba u potpunosti da definišu stanje sastavnih dijelova sistema, što omogućuje predviđanje momenta kada će doći do odstupanja osnovnih karakteristika sastavnih dijelova i/ili sistema od nominalnih (dozvoljenih) vrijednosti. Osnovni prilaz pri definisanju održavanja prema stanju sa kontrolom nivoa pouzdanosti svodi se na to da se sastavni dijelovi sistema koriste bez ograničenja međuremontnog resursa uz izvršenje neophodnih aktivnosti održavanja pri otklanjanju nastalih otkaza, dok se stvarni nivo pouzdanosti nalazi u granicama utvrđenih (dozvoljenih) normi. Ako dođe do odstupanja, preduzimaju se mjere za povećanje nivoa pouzdanosti pojedinih sastavnih dijelova sistema. Kao kriterijum tehničkog stanja, kod ovog modela održavanja, usvojen je nivo pouzdanosti koji se izražava pokazateljima pouzdanosti. U radu su dati i moduli razvijenih modela i analizirane etape razvoja. Razvijen je algoritam prognoze tehničkog stanja sistema.

Analizu uticaja održavanja prema stanju na rad dvokomponentnog sistema koji su u međusobnoj zavisnosti dali su Phuc, D., Phil, S., Benoit, I. u radu [20]: *Condition-based maintenance for a two-component system with dependencies*. Istraživanje je usmjereno na dvije vrste zavisnosti. Prva je zavisnost pri kojoj brzina starenja svake komponente ne zavisi samo od vlastitog stanja (nivoa istrošenosti) već i od stanja ostalih komponenti sistema. Druga je zavisnost pri kojoj je kombinacija aktivnosti održavanja povoljnija/jeftinija nego izvršavanje pojedinačnih aktivnosti održavanja odvojeno. Predložena je selekcija komponenata/grupe elemenata koje se preventivno održavaju kao i utvrđivanje normi prilagođenog održavanja u sklopu prilagođenog preventivnog održavanja. Razvijen je model troškova da bi se pronašla optimalna vrijednost parametara odlučivanja. Uvedeni su numerički pokazatelji koji ilustruju korišćenje i prednosti pristupa okvira optimizacije održavanja za dvokomponentne sisteme.

Rosmaini, A., Shahrul, K. u radu [21]:*An overview of time-based and condition-based maintenance in industrial application* daju pregled dve tehnike održavanja: održavanje prema vremenu (TBM) i održavanje prema stanju (CBS). U radu se razmatra kako tehnike TBM i CBM reaguju u smislu donošenja odluke o održavanju. U radu se analizira i upoređuje implementacija svake tehnike s praktične tačke gledišta, s fokusom na pitanja određivanja potrebnih podataka, prikupljanje, analizu podataka/modeliranje i donošenje odluka. Zaključak se odnosi na značajna razmatranja za buduća istraživanja. Utvrđeno je da svaka od tehnika ima jedinstvene koncepte/principe, procedure i izazove za stvarnu industrijsku praksu. Može se zaključiti da je primjena tehnike CBM realnija, a samim tim i korisnija u primjeni nego TBM. Istraživanje daje korisne informacije u vezi s primjenom tehnika TBM i CBM u održavanju, donošenju odluka u izazovima sprovođenja svake od navedenih tehnika iz praktične perspektive.

U istraživanju [22]: *On condition based maintenance policy*, Jong-Ho, S., Hong-Bae, J. analiziraju nekoliko aspekata koncepcije održavanja prema stanju: definicije međunarodnih standarda, postupaka i tehnika održavanja s prikazom konkretnih slučajeva uvođenjem studija slučaja. U slučajevima visokovrijednosne industrijske imovine, aktivnosti rada i održavanja proizvodnih sistema zahtijevaju značajno veće troškove i ulaganje mnogo više napora nego u aktivnostima/fazama instalacije opreme. Period korišćenja industrijske opreme je mnogo duži nego period instalacije i tokom korišćenja opreme nastaju situacije potencijalnog rizika/otkaza sistema koji mogu imati katastrofalne učinke na industrijski sistem. U novije vrijeme, pojavom informaciono-komunikacionih tehnologija, može se dobiti pregled informacija o statusu imovine tokom perioda korišćenja. Nove sofisticirane tehnologije daju nova rješenja za poboljšanje efikasnosti poslovanja imovine. Jedan od osnovnih problema sprovođenja koncepcije održavanja prema stanju je definisanje dijagnoze stanja imovine na osnovu sistem-

skog praćenja, predviđanje trenutka i uslova otkaza sistema te planiranje odgovarajuće mjere održavanja da bi se otkaz sistema izbjegao.

U istraživanju [23]: *How to use Condition Based Maintenance Strategy for Equipment Failure Prevention*, Sondalini, M. naglašavadada je samo na osnovu starosti oko 80% od otkaza na opremi potpuno nepredvidivo i da strategija održavanja prema stanju može da se nosi s njima. U oko 20% otkaza preventivno i plansko održavanje održavanje može da blagovremeno spriječi neželjene pojave. Ali iznenadni otkazi sistema nisu uvijek direktno povezani za ne/primjenu jedne od metoda vremenski zasnovane koncepcije održavanja i zahtijevaju složenija i kombinovana rješenja. Postoji još jedan bitan korak koji je neophodno definisati kako bi se moglo značajnije uticati na smanjenje troškova održavanja, a to je prepoznati i izbjeći uslov/režim za otkaz – *failure mode*. Ukoliko se metodama monitoringa utvrdi predotkazno stanje iz njega je neophodno pravovremeno izaći i definisati uslove za izbjegavanje ovakvog stanja sistema u budućnosti. Veoma značajan faktor predstavljaju i slučajne greške, koje predstavljaju veliki stres nastao tokom rada i određenih događaja/anomalija. Sve dok se ne otkloni uzrok incidenta, isti se može ponovo dogoditi, prouzrokovati značajne troškove, angažman ljudi, njihovo vrijeme i trud. Uvođenjem prediktivne koncepcije održavanja, a takođe i studije slučaja pojave uzroka nastanka otkaza kvalitativno se oplemenjuje kompletan poslovni sistem.

Pregled koncepcije održavanja prema stanju sa definicijama različitih termina, pregled istorije i trenutnog razvoja, aplikacije i izazove istraživanja koncepcije preventivnog održavanja prikazan je u radu [24]: *Condition based maintenance: a survey*, Prajapati, A., Bechtel, J., Ganesan, S. Prikazane su različite strategije održavanja sa svojim prednostima i nedostacima jednih u odnosu na druge. Analiza uključuje primjenu različitih metodologija i tehnika koje se primjenjuju u praksi. Koncepcije održavanja prema stanju su praktičnu primjenu našle u različitim oblastima, kao što su automobilska industrija, proizvodnja, avijacija, medicina i slično. Provođenje koncepcije uključuje različite discipline, kao što su prikupljanje i pretraga podataka, vještačka inteligencija, statističke metode obrade podataka i druge. Ove discipline omogućuju predviđanje budućih uslova/događaja na osnovu baze podataka prethodnog vremenskog intervala i trenutnog ponašanja posmatranog sistema. Ova predviđanja budućeg ponašanja sistema su moguća primjenom određenih softverskih rješenja za obradu i sprovođenje tehnika prognoze. Društveni aspekt sprovođenja naprednog sistema održavanja se ogleda u smanjenju troškova poslovanja kompletnog poslovnog sistema.

Glavni fokus istraživanja [25]: *Application of Statistical Techniques and Neural Networks in Condition-Based Maintenance*, Prajapati, A., Ganesan, S., predstavlja korišćenje dvije široko primijenjene oblasti predviđanja: statistika i neuronske mreže. Statističke i nuronske mreže su veoma moćni alati/tehnike za predviđanje budućih stanja na osnovu sadašnjih i prethodnih stanja sistema i podsistema. Istraživanje je zasnovano na studiji slučaja praćenja pritiska u gumama vozila u okviru ocjene pet metoda istraživanja predviđanja budućeg ponašanja sistema. Statističke metode uključuju primjenu *Random variables And Random numbers* (RAR)i Holt-Winters (HV) metoda matematičkog predviđanja. S druge strane, primjena zasnovana na vremenski određenom intervalu, linearnom prediktoru i neuronskim mrežama čini ovaj statistički pristup veoma složenim. Rad prikazuje detaljne studije komparativne simulacije i pokazuje pogodnost i izvodljivost u svim tehnikama. Pretpostavljeno je da senzori direktno montirani na gumama prijavljuju trenutni pritisak u gumama za kontrolu ili analize. Kontrolna jedinica vrši analizu pritiska u gumi i prenosi odluku operatora ili namenjene grupe o trenutnom pritisku, kao i predstojeće uslove pritiska. Konačno, istraživanje se završava zaključkom da je

HV metoda najbolja među ovih pet pristupa za predviđanje pritiska u gumama i može biti korisna za implementaciju koncepcije održavanja prema stanju za bilo koji sistem.

3.1.2. Metode tehničke dijagnostike

Analiza i istraživanje [26]:*Optimizing condition-based maintenance decisions for equipment subject to vibration monitoring*, Jardine, A., Joseph, T., Banjević, D. prikazuju razvoj optimalnog programa održavanja zasnovanog na monitoringu vibracija ključnih ležajnih pozicija proizvodnog sistema u prehrambenoj industriji. Statistička analiza mjerenih rezultata vibrodijagnostike se vrši pomoću softverskog paketa EXAKT. Sistem utvrđuje glavne vibracijske signale/vrijednosti koje su neophodne za procjenu rizika. Nakon utvrđivanja krive rizika pomoću modela proporcionalnog hazarda i dobijanjem podataka o troškovima, vrši se identifikacija optimalnog modela održavanja. U vremenu praćenja vibracija moguće je identifikovati i provesti ključna mjerenja/ispitivanja koja su od koristi sistemu upravljanja održavanjem i značajno smanjiti troškove dodatnih analiza i ispitivanja opreme koja se koristi i posmatra u proizvodnom procesu.

Primjer implementacije koncepcije održavanja prema stanju u industrijskom sistemu Volvo u Švedskoj prikazan je u radu [27]: *Implementation of Condition Based Maintenance in manufacturing industry - A pilot case study*, Rastegari, A., Marcus, B. Podaci istraživanja su prikupljeni tokom implementacije pilot projekta uvođenja sistema održavanja prema stanju. Cilj pilot projekta je uvođenje sistema monitoringa stanja nekih od ključnih kritičnih komponenti u sklopu procesa termičke obrade. Primijenjene su dvije tehnike on-line monitoringa na poziciji ležaja elektromotora: analiza vibracija i *Shock Pulse Metod* (SPM). Rad opisuje elemente procesa, implementaciju novog sistema, praćenje i način analize rezultata monitoringa. Podaci mjerenja na pozicijama motora ventilatora peći za termičku obradu su analizirani, kao i podaci o broju otkaza posmatranog sistema. Dobijanjem baze podataka o ponašanju sistema moguće je procijeniti u kom pravcu razvijati proces održavanja pomenutih pozicija, kontrolisati troškove i značajno uticati na ukupnu efektivnost sistema. Veoma važan element predstavlja i uticaj na zaštitu čovjekove sredine, o čemu takođe treba posvetiti značajnu pažnju.

Prednosti korišćenja naprednih tehnologija kao što su sistemi neuronskih mreža opisani su u radu [28]: *A Real-Time Predictive Maintenance System for Machine Systems - An Alternative to Expensive Motion Sensing Technology*, Bansal, D., Evans, D., Jones, B. Parametri stanja/mašina mogu obezbijediti veliki broj korisnih informacija o stanju sistema, zahtjevima održavanja i produktivnosti. Dosad su se parametri sistema predviđali na osnovu sirove detekcije pokreta i promjene položaja elemenata sistema. Ova detekcija zahtijeva posebnu opremu i velike troškove održavanja. Posebno visoki zahtjevi se odnose na korišćenje opreme za identifikaciju i procjenu parametara stanja i kretanja u slučaju složenih pokreta u više osa kretanja. Potreba za boljim i jeftinijim tehnikama za procjenu parametara mašina motiviše razvoj intuitivnih sistema održavanja u realnom vremenu. Ovaj rad opisuje intuitivni neuronski sistem za mašinski sklop u realnom vremenu. Pristup neuronske mreže se koristi za predviđanje parametara mašina/sistema koji koriste trenutni položaj elemenata sistema. Za razliku od mnogih neuronskih mreža zasnovanih na monitoring stanja sistema, ovaj pristup je potvrđen u sklopu off-line procedure bušenja, koristeći podatke eksperimentalnog testa na jednoj proizvodnoj mašini. Poređenja očekivanih i stvarnih rezultata testa pokazala su dobre rezultate. Uspjeh testa je motivisao razvoj on-line sistema prediktivnog održavanja sa dodatnim uslovima/parametrima u procesu bušenja kao što su trene i uvijanje. Rad opisuje primjenu on-line sistema prediktivnog održavanja u slučaju procesa kliničkog mikrobušenja intervencije na

uhu čovjeka. On-line sistem prediktivnog održavanja se koristi za procjenu inercije bušenja koja se obezbjeđuje u postupku bušenja od strane hirurga.

Napredak po pitanju prikupljanja i obrade mjernih podataka te razvoj kompjuterske tehnologije glavna je karakteristika eksperimentalnih istraživanja posljednjih nekoliko godina. U radu [29]: *Optimal Bayesian maintenance policy and early fault detection for a gearbox operating under varying load*, Lin, C., Makis, V. analizirana je koncepcija održavanja prema stanju, optimizacija troškova i predviđanje preostalog životnog vijeka na bazi ranog otkrivanja oštećenja reduktora. Istraživanje se zasniva na vektorskom modeliranju signala vibracija, korišćenjem skrivenog Markovog modela zasnovanog na Bajesovoj mreži. Kontinualni Markov model opisuje tri stanja: zdravo stanje – 0, upozorenje na moguć otkaz – 1 i primjetan otkaz – 2. Proračun parametara modela koristi algoritam maksimalnog očekivanja. Optimalizacija modela tri stanja zasnovana je na Bajesovom dijagramu za viševarijantni proces odlučivanja.Grafikon prati posljednju vjerovatnoću da je sistem u stanju upozorenja 1. i sistem se zaustavlja kada ova verovatnoća prelazi optimalnu granicu kontrole. Predviđanje srednje preostalog vijeka koristi metodologiju teorije vjerovatnoće. Potvrda predloženih metodologija je izvedena korišćenjem stvarnog stanja zupčanika dobijenog na osnovu podataka mjerenja vibracija.

Istraživanje veze između potencijalnih rizika za rad tehničkih sistema i provođenja mjera tehničke dijagnostike opisuje i rad [30]: *Upravljanje rizikom korišćenjem metoda tehničke dijagnostike i pouzdanosti*, Grujić, N. Upravljanje rizikom u tehnici podrazumijeva pravovremeno preduzimanje potrebnih mjera i aktivnosti na planu obezbjeđenja sigurnosti funkcionisanja tehničkih sistema prema projektovanoj namjeni. Sigurnost pri eksploataciji tehničkih sistema pretpostavlja normalan rad bez havarijskih i drugih rizika i sigurnost za okolinu posebno za ljudski faktor. Primjena metoda tehničke dijagnostike je nezaobilazni činilac i kod upravljanja rizikom tehničkih sistema. Nivo pouzdanosti je značajan u svim fazama životnog ciklusa tehničkih sistema. Rezultati tehničke dijagnostike i pouzdanosti kao pokazatelji kvaliteta tehničkih sistema mogu se koristiti kod revitalizacija, rekonstrukcija, remonta itd. Istraživanje opisuje tehnike upravljanja rizikom metodama funkcionalne dijagnostike, test dijagnostike i metodama pouzdanosti.

U radu [31]: *Informacioni sistemi u industrijskoj proizvodnji s podrškom za preventivno održavanje i tehničku dijagnostiku*, Krunić, V., Krunić, M., Četić, N. predstavljen je model informacionog sistema u industrijskoj proizvodnji s podrškom za preventivno održavanje i automatsku tehničku dijagnostiku. Podrška se realizuje jednim dijelom kroz SCADA aplikaciju i drugim dijelom kroz bazu podataka i aplikacije kojima se ažuriraju stanja infrastrukture. Softverski sistem BlendIS komunicira sa SCADA aplikativnim rješenjem za nadzor i upravljanje procesima izrade proizvoda, konkretno od doziranja komponenti po recepturama do kontrole tehnoloških parametara i uskladištenja. Softver za nadzor i kontrolu procesa ima formu standardnog rješenja razvijenog primjenom specijalizovanih SCADA razvojnih softverskih paketa. Softversku platformu čini Microsoft Windows, Microsoft SQL Server, Microsoft Visual Studio. Za razvoj SCADA aplikacije korišćen je Wonderware InTouch 8.0 paket. Model IS je razvijen za potrebe Rafinerije nafte Novi Sad. Tehnička dijagnostika je utemeljena na rezultatima FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*) metode primijenjene na industrijske linije i relevantnu infrastrukturnu opremu. Model informacionog sistema je nastao kao rezultat višegodišnjeg istraživanja autora u oblasti razvoja informacionog sistema u procesnoj industriji, odnosno modelovanju proizvodnih procesa. Ekspertiza koja je proistekla iz mnogo godina rada na projektovanju sistema automatskog upravljanja u kojima je značajno mjesto

zauzimala podrška za preventivno održavanje i automatsku tehničku dijagnostiku je pomogla pri projektovanju opisanog sistema.

Jedan od primjera prelaska s uobičajenog korektivnog načina održavanja na sistem održavanja prema stanju uvođenjem sistema vibrodijagnostičkog praćenja stanja vibracija prikazan je u radu [32]: *Vibrodiagnostic surveying of industrial electrical equipment*, Radionov, A., Evdokimov, A., Petukhova, O., Shokhina, G., Yabbarova, L. U radu su dati tipični primjeri otkaza rotirajućih elemenata instaliranih u postojećem proizvodnom procesu. Analize obuhvataju otkaze uzrokovane mehaničkim oštećenjima na pumpama, oštećenja na ležajnim mjestima elektromotora, spojnicama te analizu direktnog spektra vibracija na pomenutim pozicijama. Druga vrsta analiza se odnosi na rotirajuće elemente sa valjkastim uležištenjem, te oštećenjem rukavaca vratila. Ove analize obuhvataju spektralnu analizu vibracija. Rad uključuje i pregled vrsta otkaza u slučaju rada asinhronih motora. Uz stacionarne sisteme za vibrodijagnostička mjerenja opisan je rad i pogodnosti koje se mogu ostvariti sa prenosnim vibrodijagnostičkim analizatorima.

U radu [33]: *Experience based diagnostic and condition based maintenance within production systems* Funk, P., Jackson, M. analizira se veza između iskustvene dijagnostike i koncepcije održavanja prema stanju u proizvodnim sistemima i sistemima koji koriste robotske komponente. Istraživanja pokazuju da u prosjeku efikasnost proizvodnih procesa iznosi oko 60%, a da su realna očekivanja oko 80%. Na stepen efikasnosti najveći uticaj ima broj otkaza i zastoja u proizvodnom ciklusu. Održavanje sistema je u direktnoj vezi sa otkazima sistema tako da razvoj i optimizacija koncepcija održavanja direktno utiče na povećanje stepena efikasnosti kompletnog sistema. Jedan od načina utvrđivanja stanja komponenti sistema je i iskustvena dijagnostika. Lako dostupna iskustva i znanja o ponašanju i stanju sistema predstavljaju veliku pomoć u okviru inžinjerske prakse. Danas se prikupljanje i obrada podataka iskustvene dijagnostike vrši upotrebom računarskih sistema za podršku i odlučivanje kao i sistemima vještačke inteligencije. Samo iskusni operater i dobro edukovano osoblje može izvršavati kvalitetno skupljanje podataka o stanju opreme i isti arhivirati u lako dostupnu bazu podataka. Ovaj pristup značajno smanjuje mogućnost greške, skraćuje vrijeme identifikacije te omogućava eventualne korekcije u konkretnim posebnim praktičnim slučajevima.

Primjena dijagnostičkog modela analize vibracija za slučaj centrifugalnih pumpi snaga od 15 do 300 kW prikazana je o radu [34]: *Condition-Based Diagnostic Approach for Predicting the Maintenance Requirements of Machinery*, Ugechi, C., Ogbonnaya, E., Lilly, M., Ogaji, S., Probert, S. Analiza je pokazala odgovarajuću vrijednost nivoa vibracija od 0,9 do 2,7 mm/s za siguran rad postrojenja, a da su za vrijednosti vibracija od 2,8 do 7,0 mm/s neophodne mjere kontinualnog mjerenja stanja sistema jer isti prelazi u stanje povećanog rizika. Opisan dijagnostički model koristi računarsku podršku u okviru modela vještačke inteligencije i neuronskih mreža i primjenljiv je za druge rotacione elemente koji su u okviru naznačenih raspona snage. I u pomenutom slučaju pokazuje se uzajamna povezanost postizanja visoke produktivnosti industrijskog sistema i postizanjem nižih troškova proizvodnje s primjenom politike održavanja prema stanju i primjene savremenih dostignuća u oblasti tehničke dijagnostike. Osiguranje stepena pouzdanosti i dostupnosti opreme proizvodnog sistema predstavlja trajni cilj u okviru razvoja koncepcija održavanja.

3.1.3. Tehnička dijagnostika sistema papirne industrije

Prikaz implementacije sistema za detekciju oštećenja ležajeva Bruel&Kjaer u sklopu sistema papir mašine opisan je u radu [35]: *Machine-Condition Monitoring using Vibration Analysis*

The use of Spectrum Comparison for Bearing Fault Detection -A Case Study from Alma Paper Mill, Quebec, Canada, Brown, D., Jensen, T. Rad prikazuje niz prednosti instalacije sistema za ranu detekciju oštećenja ležajeva. Detekcija mogućnosti oštećenja daleko prije nastupanja kritičnog nivoa omogućava značajno smanjenje zastoja i uštedu troškova proizvodnje. Analiza rezultata primjene vibrodijagnostičkih sistema prikazana je preko sedam studija slučaja konkretnih događaja u proizvodnom procesu papir mašine Alma Paper u Kvebeku, Kanada. Posebni slučajevi detekcije kvarova na sušionim valjcima, valjcima filca i napojnoj pumpi, kao i intervencije na pomenutim pozicijama spriječili su nastanak daleko ozbiljnijih oštećenja opreme. U analizi je detaljno opisana korišćena oprema i način njene primjene u konkretnim događajima (npr. analiza frekventnog spektra korišćenjem uskog spektra, 3-D prikaz amplituda, analiza trenda vibracija,…).

Jedan od moguće primjenjivih sistema u okviru pogona prerade u papirnoj industriji je i sistem podrške robotima. U radu [36]: *Methodology for the vibration measurement and evaluation on the industrial robot Kuka*, Vagaš, M., Semjon, J., Balaž, V., Varga, J., ukazano je na potrebu primjene proaktivnog i intuitivnog održavanja kao ključnog instrumenta za maksimalnu operativnu pouzdanost i upotrebljivosti industrijskih robota koristeći uslov minimalnih troškova i upotrebe ljudskih resursa. Upotreba metoda vibrodijagnostike obezbjeđuje operativnost robota, produženje životnog vijeka i uštedu energije. Mjerenje vibracija je u konkretnom slučaju realizovano s tri vrste senzora ubrzanja. Procjena rezultata je obezbijeđena preko računarskog softvera ScopeWin. FFT (*Fast Fuorier Transformation*) transformacija je primijenjena za analizu spektra vibracija. Cilj rada leži u predlaganju sveobuhvatne metodologije za mjerenje i procjenu vibracija za industrijski robot i služi kao način da se dobiju dodatne preporuke i nacrt procedura za održavanje i dijagnostika kvara industrijskih robota.

Projekcija primjene rezultati uvođenja koncepcije održavanja prema stanju na papir mašini u kompaniji SCA u Collodi, Italija, prikazani su u članku [37] *Condition Based Maintenance in the Paper Industry*, MaintWorld, April 2014. Aktivnost rekonstrukcije koncepcije održavanja nastala je nakon brojnih problema na mašinama i sistemskim komponentama koje su uzrokovale česte i dugotrajne zastoje postrojenja. Napustila se koncepcija korektivnog održavanja i pristupilo se implementaciji koncepcije održavanja prema stanju koja podrazumijeva instalaciju mjera tehničke dijagnostike na prethodno definisanim kritičnim mjestima. Kao strateškog partnera za oblast uvođenja dijagnostičkih sistema i obrade rezultata mjerenja izabrana je eksterna italijanska firma ISE Industrial Service Engineering. Istaknuta je činjenica da je za pravilan postupak održavanja bila potreba uvođenja odgovarajuće tehnologije, a tačan izbor takvih tehnologija rezultirao je uspjeh politike održavanja u cjelini. Ova činjenica ima osnovnu važnost. Politika rekonstrukcije sistema održavanja provedena je kroz nekoliko faza: analiza kritičnih komponenti sistema, inspekcija od strane stručnjaka u smislu provođenja kompleksnih mjerenja, formiranje izvještaja - liste o prikupljenim podacima, njihovoj analizi kao i o preporukama za njihovu eliminaciju. Svakako da je neizostavan dio i procjena troškova odnosno ostvarivanje dobiti realizacijom određene aktivnosti. Implementacija efikasnog plana održavanja zasnovanog na prethodno definisanim uslovima određuje neposredne prednosti smanjenja gubitaka u proizvodnji i troškova popravke, optimizujući dostupnost mašina.

U literaturi se može pronaći veliki broj istraživačkih radova od strane specijalizovanih firmi koje pružaju podršku sistemima održavanja papir mašina. Istraživanje razlike primjene inovativnih programa za održavanje radnih karakteristika valjaka papir mašina podržanih sistemima stalnog monitoringa u odnosu na tradicionalni način praćenja i korektivnog djelovanja prikazan je u članku [38] Twogether Voith Paper, 2010. Kao ključne parametre praćenja funkcionalnosti valjaka papir mašine definisani su temperatura ležajeva, stanje vibracija i kvali-

tete površine obloge valjaka. Rezultat istraživanja i praćenja ekonomskih parametara u okviru vrednovanja održavanja daje pozitivan rezultat u smislu dužeg radnog perioda bez rizika od nastanka otkaza. Ovaj pristup ima značajne prednosti ne samo u poređenju sa korektivnim aktivnostima već i u slučaju uobičajenog pristupa preventivnog održavanja kada se dijelovi papir mašine servisiraju u unaprijed određenim intervalima bez obzira na preostalu upotrebljivost.

Značaj i glavni razlozi implementacije sistema preventivnog održavanja u sistemima proizvodnje higijenskog papira sa posebnim naglaskom na sisteme papir mašina prokazani su u studiji slučaja [39] *Implementing Preventive Maintenance at a speciality paper mill*, Shire. Prikazan je razvoj fabrika papira od devedesetih godina u smislu dostupnih rješenja održavanja sistema, pojavu kriznih ekonomskih perioda uporedo sa nastojanjima za povećanje profitabilnosti i neophodnosti investicionog ulaganja i rješenja preventivnog održavanja u smislu smanjenja otkaza i smanjenja troškova. Nova organizacija održavanja podrazumijeva nove koncepcije na širokom spektru aktivnosti koje obuhvata održavanje industrijskih sistema a odnosi se na:

- definisanje strategije u okviru postavljenih zahtjeva dozvoljenih troškova, dostupnosti, radnih karakteristika i postavljenih ciljeva;
- organizaciju (CMMS – *Computerised Maintenance Management System*);
- zaštitu životne okoline (SHE – *Safety, Health and Environmental*);
- procjena rizika i kritičnosti postrojenja;
- dosljedno planiranje aktivnosti na osnovu stanja procjene postrojenja;
- primjenu koncepta TPM (*Total Productive Maintenance*) i uključivanje svih korisnika u procese održavanja proizvodnog sistema;
- utvrđivanje centralno-procesnog orijentisanog plana održavanja – PM (*Plan of Maintenance Tasks*) koji je osnova daljeg postupka planiranja.

Smisao ovog postupka planiranja je minimizacija aktivnosti i osmišljavanja najrealnije varijante planiranja aktivnosti;

- inspekcija trenutnog stanja opreme i uvođenje autonomnog održavanja u dijelovima gdje je to moguće;
- standardizacija radnih postupaka i uvođenje rutina u okviru svakodnevnih radnih aktivnosti i planiranja...

Kao krajnji rezultat ovakvog načina shvatanja nove koncepcije održavanja u okviru proizvodnog procesa za proizvodnju higijenskog papira ističe se veća pouzdanost postrojenja. Vremena zastoja proizvodnje više nisu prijetnja za proizvodnju, a brzina proizvodne linije i brzina proizvodnje postepeno se stalno povećavaju. Primjena PM se sprovodi bez povećanja resursa radne snage što postaje u stvari sveobuhvatni trend održavanja i redovna radna procedura/rutina.

Veoma zanimljivo razmišljanje o ulozi monitoringa u smislu očuvanja troškova poslovanja proizvodnog industrijskog sistema prikazano je u [40] *Don't waste your time and money with Condition monitoring*, Lifetime Reliability Solutions. U ovom radu se na monitoring stanja gleda kao na aktivnost pronalaska potencijalnog problema koja nesporno uzrokuje veliki angažman službe održavanja, veće troškove i opterećenje ljudskih resursa održavanja. U ovoj analizi se primat daje ekonomskom aspektu koji prati proces implementacije preventivnog odnosno održavanja prema stanju. Kao glavni značaj monitoringa održavanja prema stanju naglašava se njegova uloga u eliminaciji svih potencijalnih anomalija što mu je i osnovni benefit. Najbolji rezultat se može dobiti ako se može odrediti granica kada postavljena strategija predstavlja pozitivan balans između ukupnih troškova održavanja tj. poslovanja sistema u

odnosu na dostizanje željenog nivoa pouzdanosti uz minimalne troškove. Svaka aktivnost zamjene strategije održavanja mora da prati konačnu projekciju troškova i u tom slučaju postaje smislena i svrsishodna aktivnost.

Sistemi monitoringa i mogućnosti kontrole tehnološkog procesa primjenom metoda i uređaja tehničke dijagnostike u sklopu sistema za proizvodnju papira veliki značaj imaju u procesu kontrole hemijskih procesa i komponenti koje se koriste. Jedno od istraživanja koje opisuje praćenje procesa preko analize signala *Fault Detection and Isolation* (FDI) procedure za kontrolu upotrebe hemijskih komponenti prikazano je u [41]: *Multi-scale PCA based fault diagnosis on a paper mill plant*. Kontrole procesa proizvodnje naprednim tehnologijama omogućavaju poštovanje normi sigurnosti i zaštite čovjekove sredine i u velikoj mjeri zavise od kvaliteta podataka koje pružaju senzori. Poznato je da su hemijski procesi u okviru proizvodnog procesa dobro opremljeni senzorima za mjerenje, kao što su senzori temperature, protoka, pritiska i električnih veličina. Dostupnost mnogih senzora pruža mogućnost za otkrivanje i identifikaciju grešaka, jer su mjerenja senzora u normalnim uslovima u korelaciji. Ove korelacije su uglavnom posljedica fizičkih i hemijskih principa koji regulišu procesne operacije, kao što su maseni i energetski bilansi. Industrija papira je proizvodni sektor sa visokim stepenom automatizacije i, s obzirom na to da savremeni papirni mlin ima stotine senzora i aktuatora povezanih sa svojim sistemima za automatizaciju, evidentno je da su neke sistematske metode potrebne za obradu podataka.

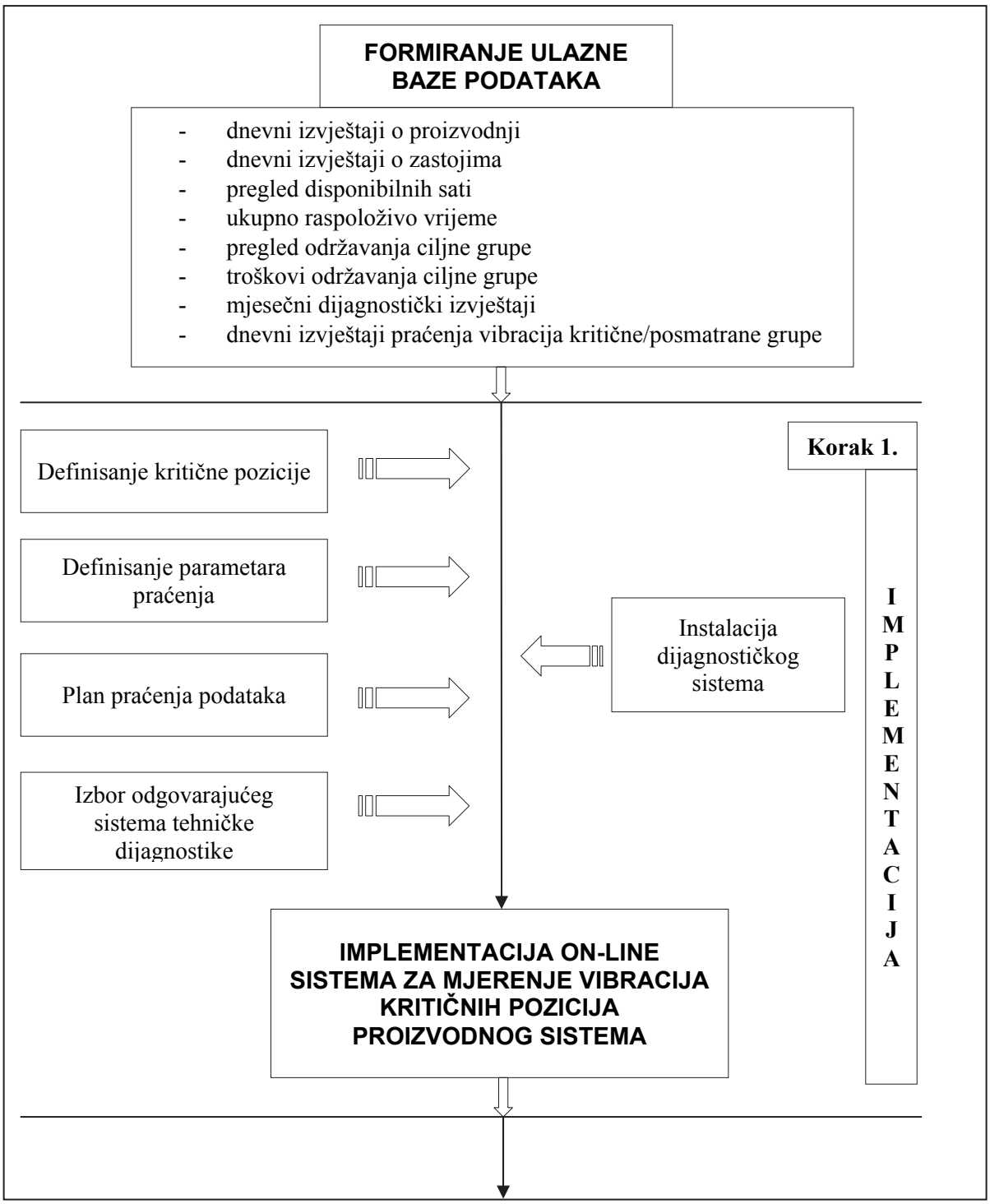
Direktna primjena savremenih dijagnostičkih sistema i rezultata praćenja karakteristika rada sistema i ponašanja ležajnih mjesta pozicije presa papir mašine prikazana je u [42]: *SKF Pulp and Paper Practices*. U okviru nekoliko, tačnije 15 karakterističnih slučaja iz prakse, dat je prikaz uticaja korišćenja dijagnostičkih uređaja u smislu dobijanja rezultata koji pomažu u donošenju ključnih odluka o načinu rada i korišćenju opreme proizvodnog procesa. Primjena dijagnostičkih uređaja se odnosi na postupke i kontrolu montaže velikih ležajeva presa papir mašine, definisanje radijalnih i aksijalnih zazora te softversku podršku koja obezbjeđuje zahtijevani nivo tačnosti i pouzdanosti. Jedan dio istraživanja i edukacije se odnosi i na kontrolu stanja ležaja u procesima postupaka revizionog brušenja obloge prese koji predstavljaju redovne periodične servisne aktivnosti. Smisao dijagnostike je davanje uputa i mišljenja oko mogućnosti povećanja radne brzine papir mašine i mogućih posljedica po proizvodni proces i stanje korištene oprema. Osnova procesa donošenja zaključaka je kontrola stanja ponašanja ležajeva i uslova koji definišu ležajna mjesta. Kako se radi o veoma zahtjevnim pozicijama, jedan dio istraživanja se odnosi i na rezultate dijagnostičkih mjerenja i kalkulacije opterećenja specifičnih pres valjaka papir mašine uz mogućnost vizualizacije deformacija valjaka pod djelovanjem radnih opterećenja.

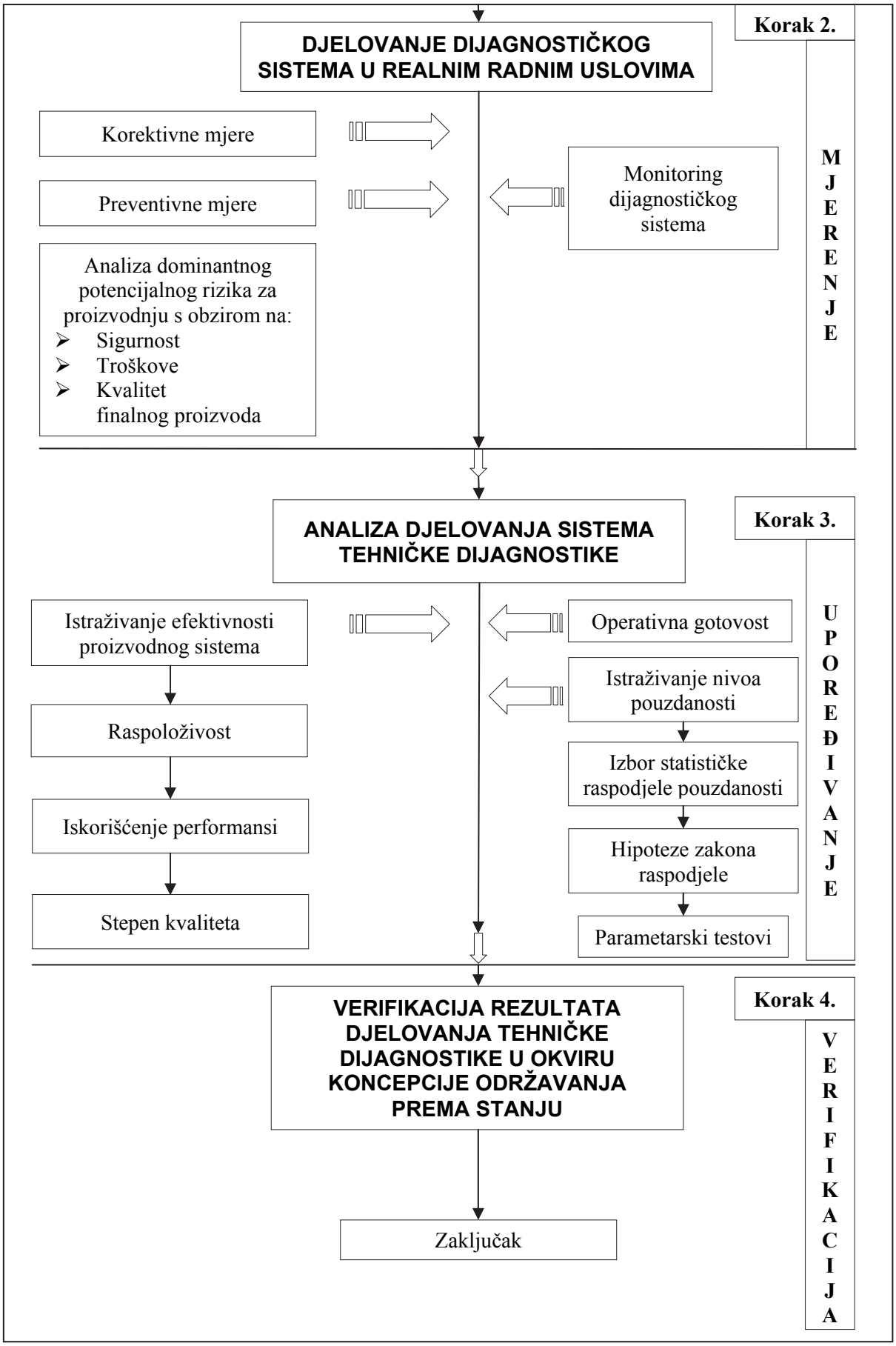
Korišćenje savremenih dijagnostičkih uređaja u procesima kontinualnog rada sistema papir mašine mogu u značajnoj mjeri uticati na prevenciju otkaznih stanja i nastanku velikih troškova održavanja, odnosno troškova proizvodnje. U studiji slučaja [43]:*Case Studies on Paper Machine Vibration Problems*, Andrew K. Costain, dati su primjeri analize rezultata mjerenja dijagnostičkih sistema instaliranih na različite radne pozicije papir mašina, kao što su problemi reduktora pogonskog valjka sitove grupe valjaka papir mašine za proizvodnju grafičkog papira, naboravanje obloge pres valjka u V-nip konstrukciji, rezonancija noseće strukture sušionog valjka u papir mašini za grafički papir i vibracije vodilnog valjka za namotavanje natrona. Svi opisani slučajevi predstavljaju širok spektar različitih problema koji se mogu pojaviti na papir mašinama u toku proizvodnog procesa. Rana dijagnoza i otkrivanje potencijalnih i uzroka već nastalih problema moguća je jedino u slučaju postojanja odgovarajuće sofisticirane dijagnostičke opreme. Analizom rezultata mjerenja radnih fizičkih karakte-

ristika koji svaki pojedinačni poremećaj uzrokuje moguće je izvući zaključke i dati prijedloge za eliminaciju problema ili u krajnjoj liniji izbjegavanju većih štetnih posljedica.

3.2. Algoritam (opis postupaka) realizacije

Da bi primijenili koncepciju održavanja prema stanju u okviru proizvodnog sistema za proizvodnju papira i optimizovali pokazatelje efektivnosti potrebno je na metodološki način definisati postupke koji imaju logičku povezanost i čija realizacija može dati konkretan i mjerljiv rezultat. Na slici 3.1. prikazan je algoritam metodologije optimizacije pouzdanosti tehničkog sistema primjenom metoda tehničke dijagnostike.





Slika 3.1. Algoritam realizacije optimizacije pouzdanosti

3.2.1. Formiranje ulazne baze podataka

Osnovu svakog procesa praćenja veličina koje opisuju stanje promatranog sistema čini baza podataka. U konkretnom slučaju, baza podataka formirana je na osnovu analize koje sve radne procedure i mjerljivi podaci su odgovarajući u smislu mjerljivosti i veze sa pokazateljima efikasnosti. U prvom redu, bazu podataka čine dnevni izvještaji o proizvodnji koji se kumulativno sumiraju u mjesečnom pregledu. Primjer dnevnog praćenja parametara proizvodnje prikazan je na slici 3.2.

31.1.2017 — **DNEVNI IZVJEŠTAJ PAPIR MAŠINE 2**

I SMJENA		II SMJENA		III SMJENA	
POSLOVOĐA	MITROVIĆ	POSLOVOĐA	LEKIĆ	POSLOVOĐA	SAVIĆ
VOĐA MAŠINE	PETKOVIĆ	VOĐA MAŠINE	UDOVČIĆ	VOĐA MAŠINE	VULIN

SAT	BRZINA					natok		VAKUMI			1 PRESA		2 PRESA		VISOKOTL.ŠPRICA			ŠABERI				SUŠNI CIL.					OPTEREĆENJE				VODA		
	KREP CILINDAR	NAMOTAČ	BROJ OBRTAJA MIŠ PUMPE	KREP	ŠIRINA TRAKE	VIŠ. STRANA PRITISAK	POG.STRANA PRITISAK	VAKUM PRES ZONE	VAKUM SAUGERA NA FILCU	VAKUM NA PICK UP	RADNA	?OGONSKA	RADNA	?OGONSKA	DONE SITO	GORNE SITO	FILC	ČISTAĆ	KREP	ODVJAČ	BROJ ŠABERIŠA U SMJENI	PRITISAK ulaz	PRITISAK izlaz	Δ p	temperatura pare	brzina isticanja	DSR 2 na L1	DSR 2 na L2	DSR1	DSR1	POČETNO STANJE	KRAJNJE STANJE	
h	m/min	m/min	l/min	%	cm	mm	bar	bar	bar	bar	bar	bar	bar	bar	bar	bar	bar	bar	bar	bar	kom	bar	bar	bar	°C	m/s	kW/h	kW/h	kW/h	kW/h	m3/h	m3/h	m3/h
06:30	1205	979	950	18.8	492	1.66	1.58	0.25	0.00	0.34	5.6	5.6	5.3	4.8	27	27	25	2.5	4.0		5	3.2	2.8	0.40	125	23		280		190	49,676	50,384	708.00
09:30	1205	979	950	18.8	492	1.66	1.58	0.25	0.00	0.34	5.6	5.6	5.3	4.8	27	27	25	2.5	4.0			3.1	2.7	0.40	120	23.2		280		190			
11:30	1205	979	950	18.8	492	1.66	1.58	0.25	0.00	0.34	5.6	5.6	5.3	4.8	27	27	25	2.5	4.0			3.2	2.7	0.50	120	23.2		290		190			
13:30	1205	979	950	18.8	492	1.66	1.58	0.25	0.00	0.34	5.6	5.6	5.3	4.8	27	27	25	2.5	4.0			3.2	2.7	0.50	120	23.2		290		190			
14:30	1205	979	950	18.9	246	1.66	1.57	0.26	0.00	0.34	5.6	5.6	5.3	4.8	28	28	25	2.4	4.0	4.0	4	4.4	3.8	0.60	130	23		300		180	50,384	51,049	665.00
17:30	1205	979	950	18.9	246	1.66	1.57	0.26	0.00	0.34	5.6	5.6	5.3	4.8	28	28	25	2.4	4.0	4.0		4.4	3.8	0.60	130	22.9		300		180			
19:30	1205	979	950	18.9	246	1.66	1.57	0.26	0.00	0.34	5.6	5.6	5.3	4.8	28	28	25	2.4	4.0			4.4	3.8	0.60	130	23		300		180			
21:30	1205	979	950	18.9	246	1.66	1.57	0.26	0.00	0.34	5.6	5.6	5.3	4.8	28	28	25	2.4	4.0			4.4	3.8	0.60	130	23		300		180			
22:30	1205	979	950	18.9	492	1.66	1.57	0.26	0.18	0.32	5.6	5.6	5.3	4.8	28	28	25	2.4	4.0	4.0	4	3.2	2.6	0.60	130	23		300		180	51,049		-51049.00
01:30	1205	976	950	19.0	246	1.67	1.57	0.26	0.18	0.32	5.6	5.6	5.3	4.8	28	28	25	2.4	4.0	4.0		4.6	4	0.60	135	23		320		180			
03:30	1205	981	950	18.6	246	1.67	1.57	0.26	0.18	0.32	5.6	5.6	5.3	4.8	28	28	25	2.4	4.0	4.0		4.7	4.2	0.50	135	22.8		320		180			
05:30	1205	980	950	18.6	246	1.67	1.57	0.26	0.18	0.32	5.6	5.6	5.3	4.8	28	28	25	2.4	4.0	4.0		4.7	4.2	0.50	135	22.9		320		180			
	-49,676	VODA																13							0.5								-49676.0

SMJ	RADNI NALOZI	GRAMATURE	OZNAKA PAPIRA	NETO kg	AUŠUS kg	RAZLOG NASTANKA	SATI h	ZASTOJ h	RAZLOG ZASTOJA	ŠIRINA
I	IO2170033	15.0	MD--15.0E80---438H02	24,890	300		7.00	0.00		492
	IO2170034	15.0	MD--15,0J80---438H02	3,750	0		1.00			438
	0	0.0	0	0	0		0.00			0
	0	0.0	0	0	0		0.00			0
	0	0.0	0	0	0		0.00			0
II	IO2160595	17.0	MP--17.0E80---246T02	28,156	0		6.00	0.00		246
	IO2170034	15.0	MD--15,0J80---438H02	8,130	0		2.00			492
	0	0.0	0	0	0		0.00			0
	0	0.0	0	0	0		0.00			0
	0	0.0	0	0	0		0.00			0
III	IO2170034	15.0	MD--15.0J80---438H02	11,180	0		3.00	0.00		438
	IO2160595	17.0	MP--17.0E80---246T02	23,054	0		5.00			246
	0	17.0	0	0	0		0.00			0
	0	0.0	0	0	0		0.00			0
	0	0.0	0	0	0		0.00			0
SUMA		99,460	99,160		300		24.00	0.00		

Slika 3.2. Primjer dnevnog izvještaja parametara proizvodnje papir mašine

Primjer mjesečnog praćenja učinka papir mašine prikazan je u tabeli 3.1.

Tabela 3.1. Primjer mjesečnog praćenja učinka papir mašine

Dan	Proizvodnja na PM2		Gramatura - brzina		Zastoj			Uzrok zastoja	**Beta PM2 %**
			Prosjek		Tehnologija	Održavanje	Ukupno		
	Budget(t)	Reality (t)	g/m^2	m/min	sati	sati	sati		
1	103,9	106,1	18,8	1083	0,5	0	0,5	Čišćenje predgrijača	112,41
2	103,9	113,9	19,0	1069	0,5	0	0,5	Povlačenje trake pod haubu	97,71
3	103,9	99,2	18,7	1051	3	0	3	1h povlačenje trake pod haubu, 2h zamjena filca	89,88
4	103,9	33,5	17,0	908	9	5	14	5h zamjena filca, 4h grijanje cilindra, 5h PPO	90,00
5	103,9	97,5	17,8	1074	0	1,5	1,5	Sistem za podmazivanje ležaja, šaber odvajač	84,39
6	103,9	102,9	17,5	1141	1	0	1	Povlačenje trake pod haubu, pucanje i provođenje trake	101,15
7	103,9	110,0	17,3	1162	0,5	0	0,5	Propuštanje trake, zamjena šabera	100,37
8	103,9	98,3	15	1201	0	0	0		94,69
9	103,9	96,3	15	1200	0	0	0		95,65
10	103,9	96,1	15,7	1200	1	0,5	1,5	1h zamjena šabera, čišćenje predgrijača, oscilacija krep šabera	109,72
11	103,9	112,6	17,3	1162	0	0	0		104,56
12	103,9	123,9	19,2	1149	0	0	0		100,64
13	103,9	105,7	16,8	1200	0	0,5	0,5	Vanjski izbačaj struje	87,38
14	103,9	91,4	15	1199	0,5	1	1,5	1h vanjski izbačaj struje, 0,5h pranje mašine	78,04
15	103,9	84,3	15,4	1198	2	0	2	Zamjena šabera, povlačenje trake, pranje mašine	75,39
16	103,9	110,3	16,9	1200	0	0	0		86,24
17	103,9	116,5	17,6	1192	0,5	0	0,5	Povlačenje trake pod haubu	92,74
18	103,9	119,9	19,3	1153	0	1	1	Pregled plašta na pogonskoj strani Zamjena šabera i provođenje trake slijepobušene prese	98,12
19	103,9	107,9	16,2	1203	0,5	0	0,5	Zamjena šabera i provođenje trake	90,19
20	103,9	105,5	16,3	1196	0	0,75	0,75	Zamjena crijeva na VT šprici i pregled slijepobušene prese	35,78
21	103,9	101,2	15,4	1203	0	0	0		66,61
22	103,9	108,6	16,4	1194	0	0	0		61,40
23	103,9	114,1	18,4	1142	0,5	0	0,5	Povlačenje trake pod haubu, zamjena šabera	233,01
24	103,9	101,6	16,9	1174	0	2	2	PPO (provjera dinamičkog otiska na presama)	102,00
25	103,9	97,5	15	1204	0	0	0		91,46
26	103,9	85,5	16,2	1204	1	3,5	4,5	1h zamjena šabera, 3,5h PPO	97,00
27	103,9	45,0	17	1042	4	8	12	8h PPO (zamjena slijepobušene prese), 4h grijanje cilindra	99,44
28	103,9	100,7	17,2	1167	1	0	1	Povlačenje trake pod haubu i zamjena šabera	94,38
29	103,9	106,2	16,4	1167	0	0	0		83,99
30	103,9	93,8	15,0	1201	0,5	0,5	1	0,5h rad na sistemu podmazivanja, 0,5h povlačenje trake pod haubu	97,90
31	103,9	99,2	16,0	1205	0	0	0		3,07
	3219	**3085,1**	**16,8**	**1156**	**26,00**	**24,25**	**50,25**		**92.237**

Tabela parametara mjesečnog izvještaja o proizvodnji, pored realizovane proizvodnje na papir mašini, sadrži i podatke o vremenskom iskorišćenju mašine (beta %) kao i broj i karakter otkaza postrojenja papir mašine.

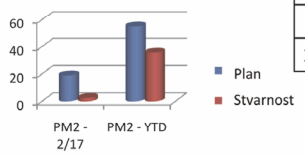
Analiza dnevnog praćenja broja i karaktera otkaza sistema papir mašine sadržana je u formi mjesečnog izvještaja. Primjer dijela mjesečne analize otkaza papir mašine dat je na slici 3.3.

4. Otkazi u proizvodnom sistemu 3/2017.

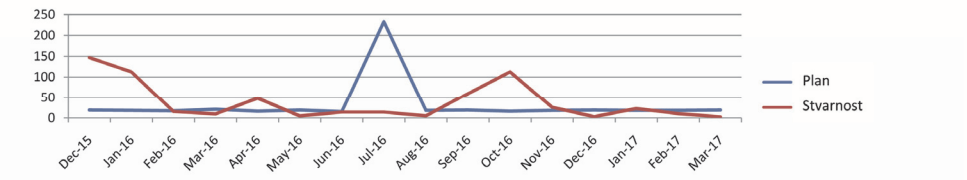
4.1. Otkazi na PM2 3/2017.

	PM2 - 2/17	PM2 - YTD
Plan	19	55
Stvarnost	2,5	35,5

Br	Opis	Trajanje	Napomene
1	Pregled sistema podmazivanja press valjka	1	MO
2	Čišćenje cijevi spajanja natoka	0,5	MO
3	Otkaz pumpe posude za miješanje 16	1	EO
Σ		2,5	



Grafička interpretacija otkaza PM2 2015/2016/2017. **Grafikon: Plan - Stvarnost**



2017.														
Mjesec	Januar	Februar	Mart	April	Maj	Jun	Jul	Avgust	Septembar	Oktobar	Novembar	Decembar	ukupno sati	plan popravki
Stvarnost	22,75	10,25	2,5										33	0
Plan (sati)	18	18	19	18	19	17	17	18	19	13	18	19	213	429

Slika 3.3. Primjer mjesečnog izvještaja/analize otkaza održavanja papir mašine

Kao sastavni dio velike baze podataka su i izvještaji o trenutnom stanju vibracija na kritičnim pozicijama papir mašine. Sistem monitoringa daje podatke o ponašanju sistema u prethodnom vremenskom periodu (istorija vrijednosti amplituda oscilovanja), što je od velikog značaja za postupak planiranja preventivnih aktivnosti, a u nepovoljnom slučaju i provođenje korektivnih mjera/opravki. Primjer prikaza vrijednosti amplituda oscilovanja kritičnih pozicija papir mašine (pres valjaka) dat je na slici 3.4.

Slika 3.4. Primjer prikaza istorije vrijednosti amplituda oscilovanja pres valjaka

3.2.2. Korak 1 - Implementacija

Nakon formiranja baze podataka izvodi se analiza ključnih parametara koji imaju odlučujući uticaj na realizovanu proizvodnju, sate otkaza i troškovnu stranu održavanja proizvodnog sistema koja je sastavni dio glavnih parametara koji se prate od strane održavanja. Kritična pozicija tehničkog sistema može imati značajan uticaj bilo da se radi o troškovnoj strani ili u odnosu na obezbjeđenje kontinuiteta proizvodnog procesa.

Analizom uslova u kojima kritična pozicija djeluje u okviru tehnološkog sistema dobijaju se podaci o parametrima praćenja, tj. mjerljivim veličinama koje opisuju stanje radnih karakteristika kritične pozicije u vremenu posmatranja. Od pravilnog izbora veličina koje se prate zavisi i kvalitet dobijene informacije na koju se može korektivno djelovati. Informacija koja se dobija praćenjem treba da je svrsishodna, da opisuje upravo onu karakteristiku sistema na koju se množe djelovati i kao krajnji rezultat djelovanja može eliminisati uočeni problem. Izborom parametara praćenja utvrđuje se plan praćenja koji se planira za određeni vremenski period posmatranja, ukoliko se radi o trenutnom problemu ili kontinualno, ukoliko se radi o stalnom nadzoru kritične pozicije.

Rezultat formiranja baze i analize ulaznih veličina je izbor odgovarajućeg tehničkog sistema za monitoring sistema, odnosno pojedinog elementa sistema.

3.2.3. Korak 2 - Mjerenje

Djelovanje odabranog dijagnostičkog sistema u realnim proizvodnim uslovima predstavlja proces mjerenja definisanih radnih veličina i njihovo poređenje sa optimalnim vrijednostima. Sistem za mjerenje se projektuje da ima mogućnost upozorenja na povećanje izmjerenih vrijednosti ukoliko vrijednosti mjerenja pređu unaprijed definisane granice. Dozvoljene granice optimalnog rada sistema odnosno vrijednosti u okviru kojih bi trebalo da se nađu mjerene veličine zavise od tehničkih karakteristika sistema, uslova tehnološkog procesa i uslova koje propisuje proizvođač svake od komponenti sistema koji se posmatra. Nerijetko je slučaj da npr. uslovi tehnološkog procesa značajno smanjuju optimalne granice mjerenih veličina u odnosu na vrijednosti koje propisuje proizvođač elemenata sistema i to upravo iz razloga povećanja sigurnosti proizvodnog sistema. Razlog je najčešće u troškovnoj strani jer su troškovi otkaza i havarije daleko veći nego što su uslovi rada sa strožim tolerancijama mjerenih veličina.

Rezultat djelovanja procesa mjerenja i upoređivanja stvarnih i propisanih vrijednosti je donošenje odluke o realizaciji korektivnih ili preventivnih mjera. Korektivne mjere su trenutnog karaktera i odnose se na eliminaciju uočenog problema. Najčešće su to situacije otkaza ili visokog rizika po nastanak značajnih oštećenja opreme na osnovu kojih se provode trenutne popravke uz neizbježan prekid proizvodnog procesa. Ovaj postupak je troškovno najnepovoljniji jer se odnosi na filozofiju „radi dok ne stane“, što nije optimalan postupak, ali je nekada i neizbježan. Drugi način eliminacije uočenog problema je planiranje popravki ukoliko je to vremenski izvodljivo tj. ukoliko priroda uočenog kvara daje dovoljno vremena da sistem može da radi u uslovima rizika bez narušavanja normalnih radnih uslova (radnih brzina, kvaliteta proizvoda, sigurnosti radnika...). U okviru planiranja aktivnosti popravki veoma je bitno definisati termine realizacije planskih popravki. Idealna situacija je planiranje termina popravke neposredno prije gubitka radnih karakteristika elementa sistema koji je dijagnostički uočen kao problematičan, jer to znači da sistem koristi maksimalan radni vijek opreme, dobija se na ukupnom vremenu u kojem sistem radi uz značajnu uštedu troškova na zamjeni rezervnih dijelova. Donijeti odluku o pravovremenom terminu planske popravke nije jednostavno.

Savremeni i visokosofisticirani dijagnostički sistemi mogu mnogo pomoći kod izbora termina popravke, ali je i veliki uticaj iskustva odgovornih radnika koji rade na planiranju aktivnosti održavanja. Pokazalo se da iskusni i dobro edukovani rukovodeći radnici svojim analizama činjenica i podataka te pravovremenim odlukama u najvećoj mjeri utiču na krajnje rezultate poslovanja kompletnog sistema.

3.2.4. Korak 3 - Upoređivanje

Sve rezultate djelovanja sistema tehničke dijagnostike neophodno je analizirati da bi se mogao donijeti zaključak da li mjere monitoringa imaju značajan uticaj na efektivnost proizvodnog sistema i da li su opravdale očekivanja u smislu preventivnih mjera tehničke zaštite tj. održavanja i poboljšanja ekonomskih rezultata. U tom smislu, algoritam predviđa analizu pokazatelja uspješnosti sistema i to vrjednovanja efektivnosti proizvodnog sistema preko analize raspoloživosti, iskorišćenja performansi i stepena kvaliteta. Takođe, relevantan podatak o uspješnosti implementiranog modela predstavlja istraživanje operativne gotovosti i pouzdanosti tehničkog sistema, što ujedno predstavlja mjeru uspješnosti sistema održavanja u okviru kojeg je i predstavljen sistem tehničke dijagnostike. Kao pomoćni alati za proces vrjednovanja koriste se statističke metode, testiranje hipoteze i parametarski testovi. Svi ovi rezultati daju realnu sliku uspješnosti primijenjenog sistema tehničke dijagnostike u okviru koncepcije održavanja prema stanju.

3.2.5. Korak 3 - Verifikacija

Sva teorijska razmatranja o mogućem uticaju implementacije novog sistema na realan proces dobijaju na značaju ukoliko ih je moguće verifikovati u okviru realnog industrijskog proizvodnog sistema. Algoritam će se verifikovati u realnom proizvodnom sistemu za proizvodnju higijenskog papira. Na kraju se može donijeti zaključak o mjeri uspješnosti i postojanju uticaja primjene koncepcije održavanja prema stanju na rezultate proizvodnog sistema. Zaključak treba da prikaže da li i u kojoj mjeri možemo optimizovati pouzdanost proizvodnog sistema primjenom metoda tehničke dijagnostike. Kako se radi o kontinualnom proizvodnom procesu primjena organizacije i koncepcije održavanja prema stanju ima poseban značaj. Vrijednosti dobijenih rezultata su relevantan podatak primjenljiv za sve srodne proizvodne sisteme kontinualnog režima rada.

4.0 UVOĐENJE TEHNIČKE DIJAGNOSTIKE U OKVIRU SISTEMA ODRŽAVANJA PREMA STANJU

4.1. Osnovni razlozi uvođenja dijagnostičkog sistema

Uvođenje sistema za tehničku dijagnostiku u realnom proizvodnom tehničkom sistemu SHP Celex rezultat je analize stanja kritičnosti postrojenja. Uočeno je da jedan od kritičnih elemenata proizvodnog sistema, sistem pres valjaka papir mašine, uzrokuje povećane troškove održavanja u smislu otkazivanja ležajeva valjaka presa. Kako se radi o specifičnom tipu ležaja, pogotovo ako govorimo o usisnoj presi, čiji rok izrade prelazi 6 mjeseci i čija cijena od cca 17.000 € predstavlja značajan ekonomski trošak za poslovni sistem, nametnuo se kompleksan zadatak – kako preventivno djelovati u okviru službe održavanja kako bi se spriječili otkazi tehničkog sistema uzrokovani otkazom pomenutih ležajeva.

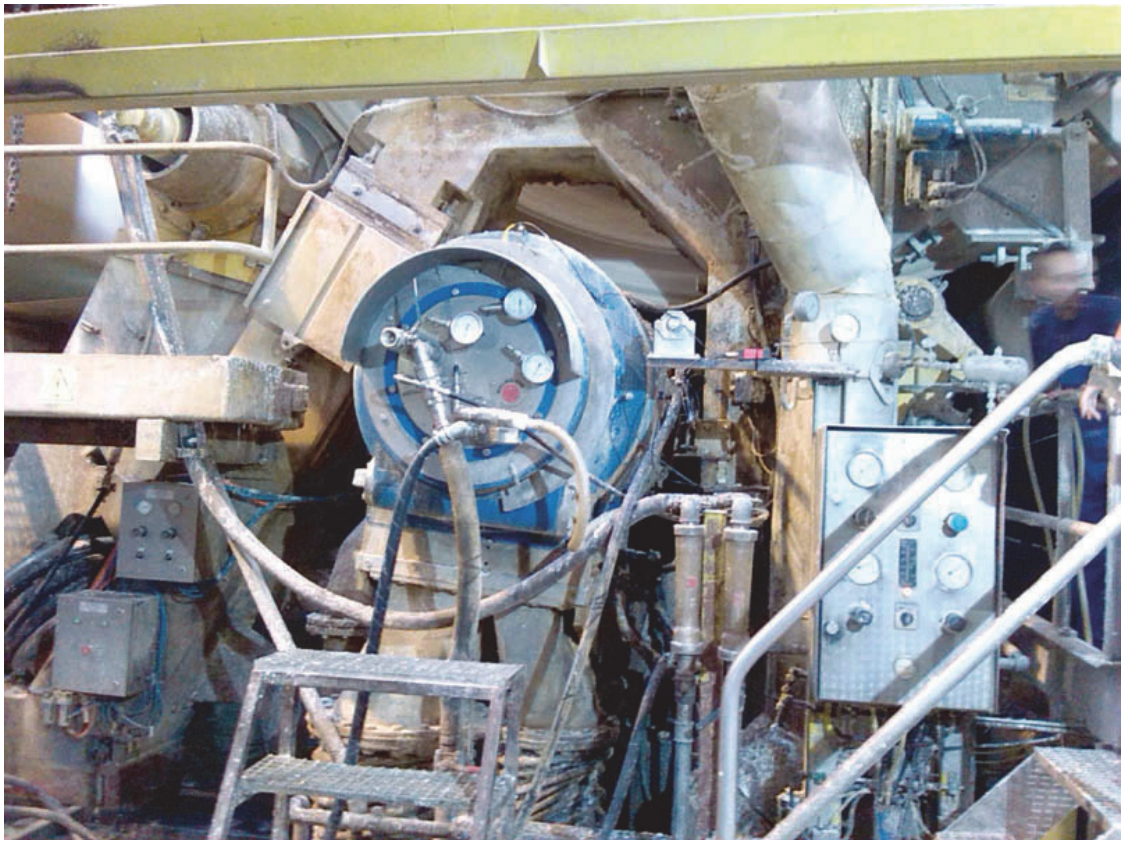
Da bi predložili adekvatno prihvatljivo rješenje morala se provesti kompleksna analiza postojećeg stanja. Ona je obuhvatala:

- analizu tehničkih karakteristika pomenutih pozicija i pripadajućih ležajeva,
- analizu istorije otkaza ležajeva pres valjaka (usisne i slijepobušene prese),
- mogućnost primjene odgovarajućeg dijagnostičkog sistema u realnim uslovima proizvodnog procesa,
- izlazni parametar koji bi se pratio i koji može da blagovremeno ukaže tj. upozori na mogućnost otkaza tehničkog sistema (davanje relevantne prognoze),
- način valorizacije tj. vrednovanja učinka djelovanja sistema tehničke dijagnostike,
- analizu uticaja djelovanja primijenjene tehničke dijagnostike na stepen pouzdanosti proizvodnog sistema,
- analizu uticaja na smanjenje troškova održavanja.

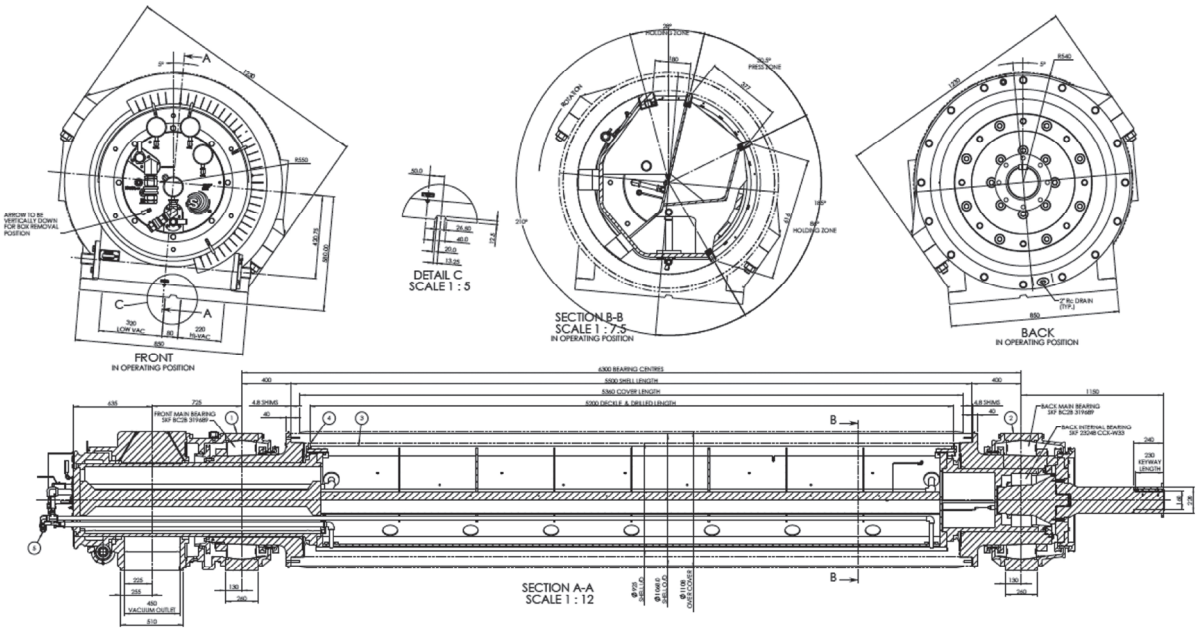
4.2. Tehničke karakteristike ležajeva presa papir mašine

4.2.1. Usisna presa

Usisna presa je dio papir mašine čija je radna funkcija zapresavanje papirne trake/mase na sušioni cilindar uz istovremeno odvajanje/cijeđenje vode iz papirne mase pomoću vakuuma generisanog u posebnom vakuum postrojenju.Unutrašnjost se sastoji od tri zone: dvije zone niskog vakuuma i jedne zone visokog vakuuma, koji uvlače vodu iz papirne mase u komore usisne prese i dalje je predaju natrag u sistem vodokruga.Presa je u suštini valjak - rotaciono tijelo oslonjena na dvije strane - pogonsku i vodilnu. Na vodilnoj strani je oslonjena preko velikog sfernog ležaja sa cilindričnim valjcima koji podnosi radijalna opterećenja. Originalni ležajevi su tipa SKF BC2B 319689 ili FAG Z-541696.ZL.K.C3. Na slikama 4.1 i 4.2 prikazana je radna pozicija i sklopni crtež usisne prese papir mašine.



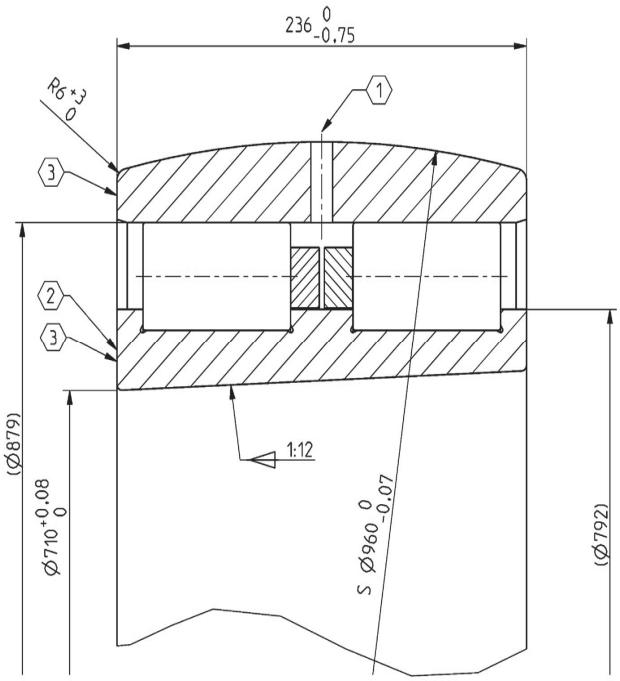
Slika 4.1. Pozicija usisne prese papir mašine



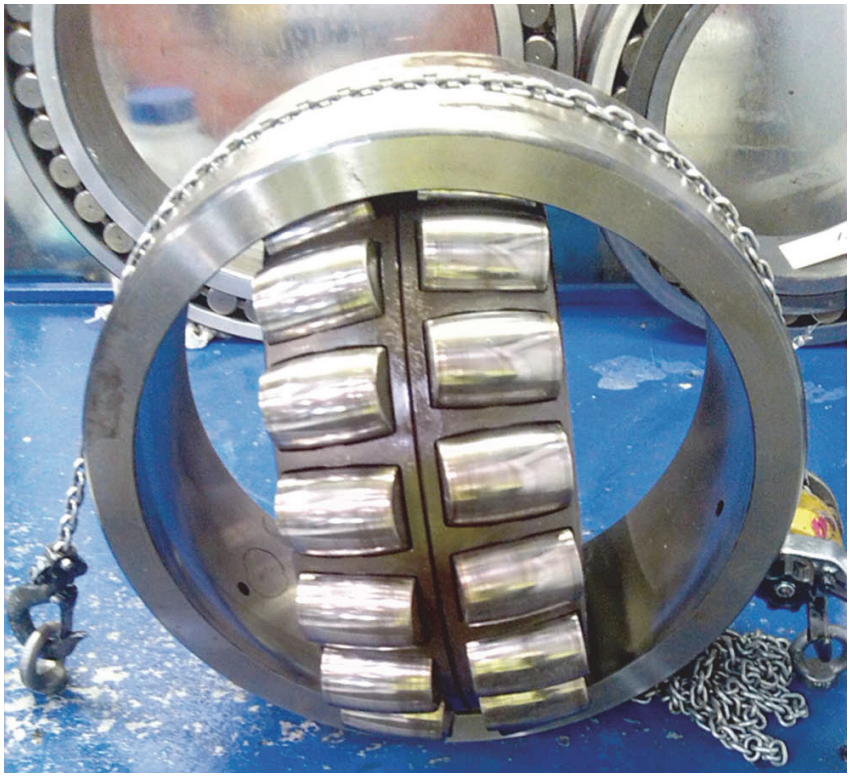
Slika 4.2. Sklopni crtež usisne prese papir mašine

Na pogonskoj strani usisna presa je oslonjena na dva ležaja: radijalni sferni sa cilindričnim valjcima (BC2B) koji podnosi radijalna opterećenja i aksijalni ležaj tipa 23264 SKF koji prima opterećenja u aksijalnom pravcu, slike 4.3 do 4.6.

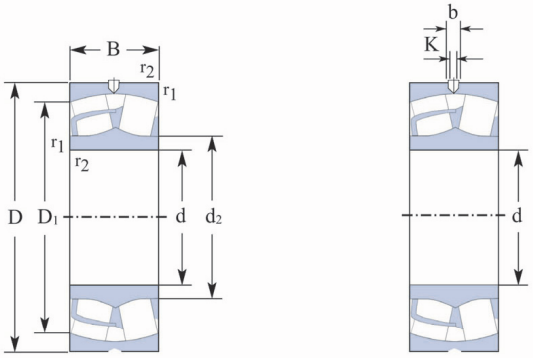
Slika 4.3. Radijalni sferni ležaj tipa BC2B



Slika 4.4. Tehničke karakteristike ležaja tipa BC2B



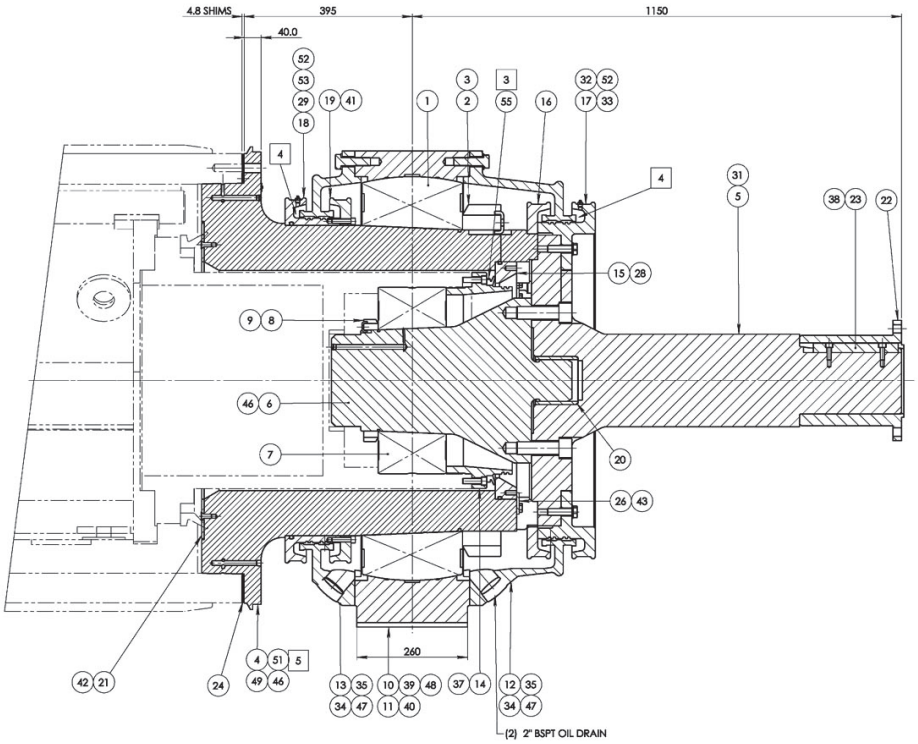
Slika 4.5. Aksijalni ležaj tipa 23264



Principal dimensions			Basic load ratings dynamic	static	Fatigue load limit	Speed ratings Lubrication grease	oil	Mass	Designations Bearing with cylindrical bore	Tapered bore
d	D	B	C	C_o	P_u					
mm			kN		kN	r/min		kg	-	
320	440	90	1430	2700	212	900	1200	42,0	23964 CC/W33	23964 CCK/W33
	480	121	2240	3800	285	800	1000	78,0	23064 CC/W33	23064 CCK/W33
	480	160	2850	5100	400	560	700	100	24064 CC/W33	26046 CCK30/W33
	540	176	3750	6000	440	630	800	165	23164 CC/W33	23164 CCK/W33
	540	218	3740	7100	210	480	600	210	24164 CC/W33	24164 CCK30/W33
	580	150	3160	4900	375	670	850	175	22264 CC/W33	22264 CCK/W33
	580	208	3850	6700	480	500	630	240	23264 CC/W33	23264 CCK/W33

Slika 4.6. Specifikacija aksijalnog ležaja tipa 23264

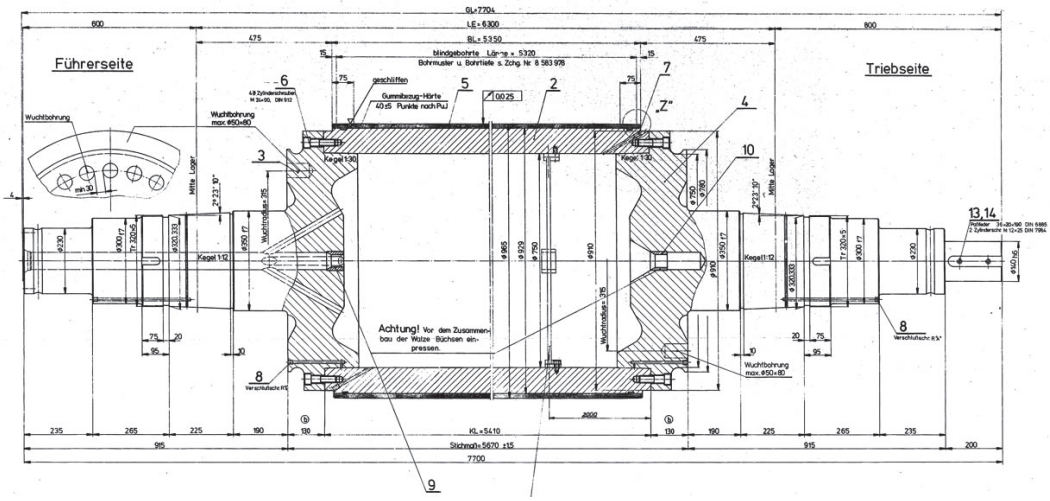
Svi ležajevi se podmazuju preko centralnog uljnog sistema – male uljne centrale. Unutrašnji ležaj ima mogućnost pozicije za monitoring vibracija koja je izvedena na suprotnu, vodilnu stranu radi lakšeg pristupa/manipulacije. Unutrašnji ležaj ima osnovnu funkciju primanja aksijalnih sila u toku zapresavanja i eventualno pojave istih u toku proizvodnog procesa.



Slika 4.7. Pozicija i funkcija aksijalnog ležaja usisne prese (poz. 7)

4.2.2. Slijepobušena presa

Slijepobušena presa je dio papir mašine čija je radna funkcija zapresavanje papirne trake/mase na sušioni cilindar uz istovremeno odvajanje/cijeđenje vode iz papirne mase pomoću konstrukcije slijepih otvora u gumenoj oblozi.

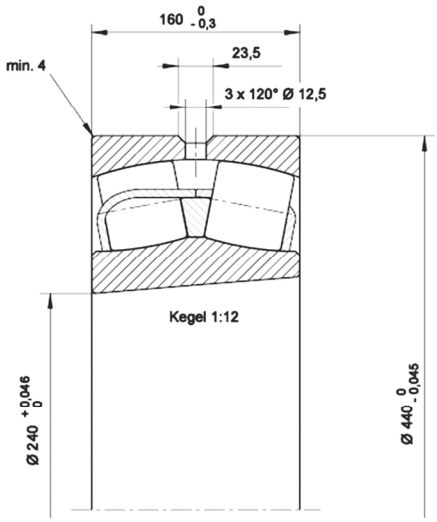


Slika 4.8. Sklopni crtež slijepobušene prese papir mašine

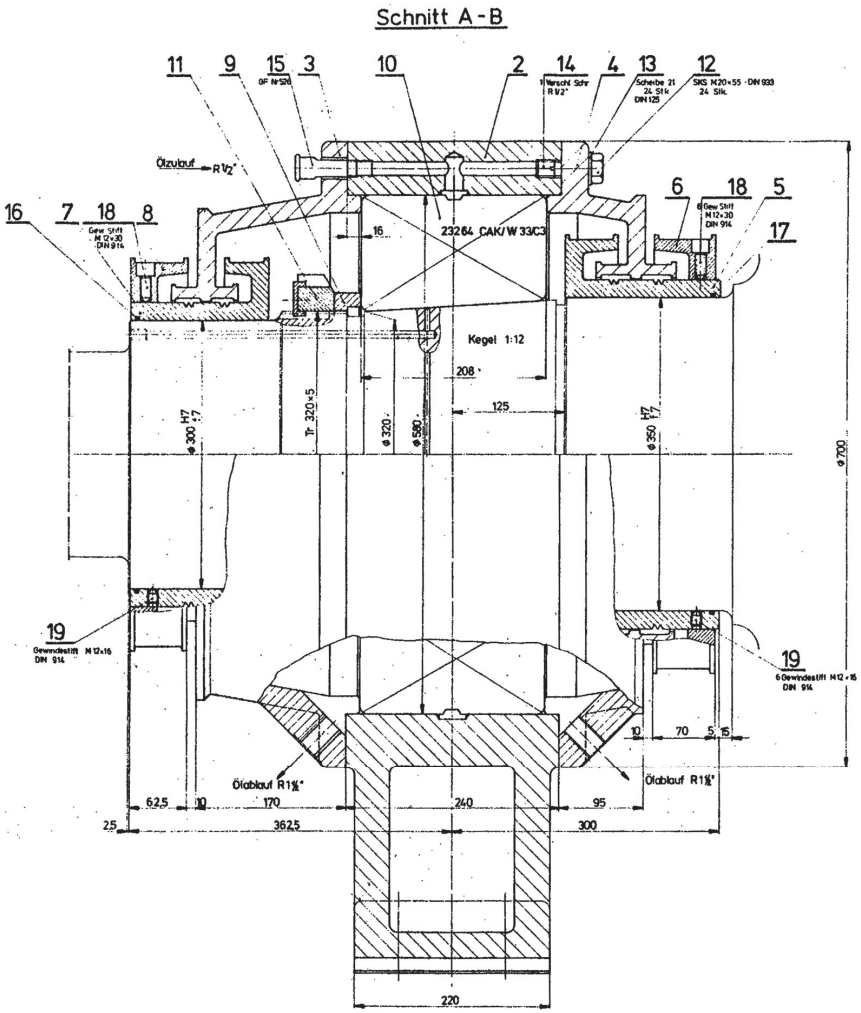
Odvodnjavanje se ostvaruje fizikalnim svojstvom kreiranja vakuuma prolaskom filca papirne mase preko slijepih otvora. Uz izvlačenje vode slijepobušena presa značajno utiče na ravnomjernost profila vlage u poprečnom pravcu presjeka papirne trake.

I slijepobušena presa je u suštini valjak - rotaciono tijelo, oslonjena na dvije strane – pogonsku i vodilnu. Na obje strane je oslonjena preko ležajeva tipa SKF 23248 E1.K, koji je konstrukcionim rješenjem aksijalno slobodan na vodilnoj strani, što omogućava podnošenje aksijanog pomaka.

Slika 4.9. Ležaj 23248 slijepobušene prese



Slika 4.10. Ležaj 23248 slijepobušene prese – tehničke karakteristike



Slika 4.11. Pozicija ležaja 23248 - pogonska strana slijepobušene prese

4.3. Analiza istorije otkaza pres valjaka (usisne i slijepobušene prese) papir mašine vezanih za ležajeve i ležajna mjesta

Praćenje istorije otkaza realnog tehničkog sistema predstavljalo je osnovnu bazu podataka. Na osnovu sumiranja broja otkaza i troškova koji su nastali neophodnošću zamjene pomenutih ležajeva došlo se do jasnog zaključka o stepenu kritičnosti ovih pozicija. Istorija otkaza i zamjene ovih ležajeva datira od 2004. godine.

Hronološki pregled zamjene ležajeva usisne i slijepobušene prese, kao i troškova nastalih u vezi s problematikom ležaja i ležajnih mjesta na presama prikazan je u tabelama 4.1. i 4.2.

Tabela 4.1. Pregled aktivnosti održavanja na usisnim presama papir mašine

Datum	Aktivnost	Trošak (€) vezan za ležajeve
26.08.2004.	Zamjena ležaja tipa BC2B na strani opsluge (1.130€) Novi ležaj tipa BC2B (17.855€)	18.985
22.08.2005.	Brušenje plašta (1.950€) Zamjena plašta	1.950
29.09.2006.	Brušenje plašta (2.090€) Zamjena plašta Revizija usisne komore	
02.07.2007.	Novi ležajevi BC2B 2 kom i 23248 CK-W33 (1.640€) u sklopu nove usisne komore (228.000€)	37.640
05.11.2007.	Nova obloga (37.000€)	
21.08.2009.	Dva nova plašta za usisne prese (167.500€+150.000€)	
Septembar 2009.	Novi ležajevi BC2B 2 kom (39.996€) i 23248 CK-W33 (1.640€) u sklopu servisa usisne komore	41.636
24.03.2010.	Reparacija BC2B 2 kom i 23248 u SKF Stayer	20.291
16.03.2011.	Brušenje plašta (V)	
11/2011.	Brušenje plašta (E)	
14.08.2012.	Brušenje plašta (V)	
03/2013.	Novi ležajevi BC2B 2 kom (39.906€ D) i 23248 CK-W33 (1.880€ M) u sklopu servisa usisne komore (E), analiza ležaja u KRW (500€)	42.286
12/2013.	Brušenje plašta (V) (7.110€)	
21.11.2014.	Novi PU plašt (E) (52.760€)	
31.03.2015.	Novi ležaj BC2B (E DS Sel.)	21.937
27.12.2015.	Novi ležaj BC2B (E VS LT strana opsluge Dijago), novi PU plašt (52.760€)	12.695
10.08.2015. (25.02.2016)	Novi rukavac pogonska strana (27.000€), novi ležajevi BC2B 2 kom (31542€ LT) i 23248 CK-W33 (2.162€ LT)	60.704

Ukupni troškovi nastali kao posljedica potrebe zamjene ležajeva na poziciji usisne prese u periodu od 2004. godine iznosili su 258.124 €.

Tabela 4.2. Pregled aktivnosti održavanja na slijepobušenim presama papir mašine

Datum	Aktivnost	Trošak (€)
08/2004.	Novi ležajevi 23264	8.750€
18.12.2006.	Brušenje II prese	
10/2007.	Nova kućišta prese 2 (V) (39.740€)	
19.01.2007.	Gumiranje II prese (15.870€)	
30.03.2007.	Brušenje prese 2 (V)	
05.11.2007.	Brušenje prese 3 (S)	
01.09.2008.	Popravka rukavca DS prese 2 (V)	7.370€
19.07.2010.	Brušenje prese 3 (S) (2.900€)	
23.02.2012.	Brušenje prese 3 (S) (4.000€)	
20.01.2013.	Nova obloga 3 (S) 20.550€	
19.07.2014.	Nova obloga 2 (V) 20.710€	
16.04.2015.	Novi ležaj 3 (PS) 23248 E1.K	4.550
31.07.2015.	Brušenje prese 3 (S) 4.360€	
05.10.2015.	Novi ležaj prese 2 (PS) 23248 E1.K	4.550
12/2015.	Popravka kućišta ležaja 3 (PS) (V)	4.450
05.01.2016.	Novi ležaj 3 (PS) 23248 E1.K	4.550
22.04.2016.	Brušenje prese 3 (2.280€) + sanacija rukavca PS (4.250€) + servis (12.260€)	6.530
06/2016.	Gumiranje prese 2 (21.780€) + sanacija hlađenja (4.250€) + servis (16.400€)	
02/2017.	Zamjena oba ležaja	9.100

Ukupni troškovi nastali kao posljedica potrebe zamjene ležajeva na poziciji slijepobušene prese prese u periodu od 2004. godine iznosili su 49.850 €. Ukupni troškovi nastali kao rezultat potrebe zamjene ležajeva na presama papir mašine za period od 2004. do 2017. godine iznosili su 307.974 €, što predstavlja značajan trošak za održavanje ukupnog sistema papir mašine. Preventivnim djelovanjem održavanja na pomenutim pozicijama obezbijedila bi se značajna ušteda u ukupnim troškovima održavanja proizvodnog sistema.

4.4. Mogućnost primjene odgovarajućeg dijagnostičkog sistema

Optimizacija pouzdanosti sistema papir mašine na poziciji presa uslijedila je nakon evidencije i analize svih otkaza i na osnovu njih nastalih troškova. Kako se radi o sistemu koji je u kontinualnom radu i koji zavisi od velikog broja slučajnih promjenjivih parametara u procesu, došlo se do zaključka da bi monitoring kritičnih uočenih pozicija, u ovom slučaju presa, mogao dati konkretne rezultate u pogledu smanjenja zastoja i troškova, a samim tim i povećanju pouzdanosti čitavog sistema.

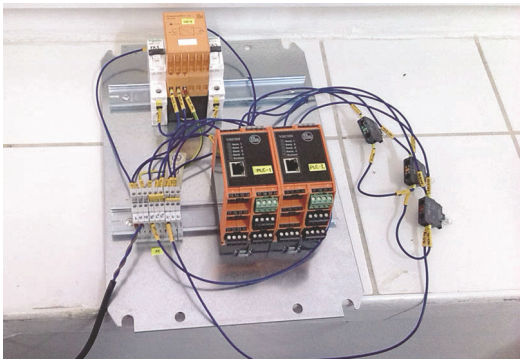
Slika 4.12. Pozicija presa na papir mašini PM2

Razmišljanja su išla u nekoliko pravaca i to da li ići s trenutnim praćenjem radnih karakteristika više dijelova sistema koji su u neposrednoj vezi ili se odlučiti za on-line sistem isključivo na kritičnim posmatranim pozicijama presa. Rezultat razmišljanja je sveobuhvatna analiza i odluka za instalaciju kombinovanih sistema kontinualnog praćenja vibracija na pres valjcima uz vremenski ograničene sisteme kontinualnog praćenja ostalih dijelova sistema koji su u neposrednoj vezi sa kritičnim pozicijama.

4.4.1. Sistem za kontinualno praćenje vibracija - Octavis

Na osnovu poznavanja rada pres valjaka i opterećenja ležajeva analiziran je i predložen vibrodijagnostički sistem tipa Octavis. Dijagnostički sistem je postavljen na poziciju usisne prese strana opsluge u radijalnom pravcu, strana pogona u radijalnom i aksijalnom pravcu, slijepobušena presa strana opsluge u radijalnom pravcu i strana pogona u radijalnom i aksijalnom pravcu.

Slika 4.13. Monitoring senzori



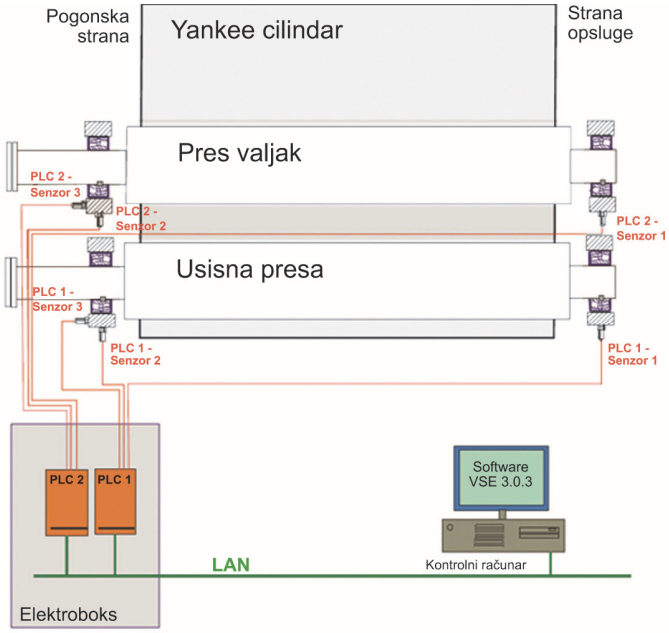
Slika 4.14. Priključne PLC jedinice

Senzori postavljeni u radijalnom pravcu nasuprot kontakta prese i krep cilindra omogućavaju očitanje vrijednosti amplituda oscilovanja u horizontalnom i vertikalnom pravcu dok senzor aksijalnog pomaka očitava vrijednosti amplitude oscilovanja duž ose pres valjaka. Ovim sistemom od ukupno 6 senzora su pokrivene kompletne vibracije oba pres valjka.

Sistem od 2 priključne jedinice sa po 4 ulaza dozvoljava trenutno još dva slobodna ulaza koji se mogu instalirati na drugim pozicijama. Ukoliko je potreba veća, sistem omogućava nadogradnju daljim priključnim jedinicama i senzorima.

4.4.1.1. Opis primijenjenog on-line monitoring sistema ležajeva

On-line monitoring sistem usisne i slijepobušene prese papir mašine PM2 u proizvodnom industrijskom sistemu SHP Celex a.d. Banja Luka služi za neprekidno praćenje stanja usisnog i pres valjka na osnovu mjerenja vibracija. Zadatak sistema je osigurati neprekidnu kontrolu vibracija i stanja ležajeva valjka presa papir mašine sa ciljem osiguranja pouzdanog i bezbjednog rada glavnih valjaka papir mašine, pratiti pojavu eventualnih anomalija tokom rada valjaka i izbjeći eventualne neželjene havarije navedenih ključnih elemenata složenog sistema papir mašine.
Za praćenje stanja bio je predložen, a zatim i odabran dijagnostički sistem Octavis, proizvođača IFM Electronic.



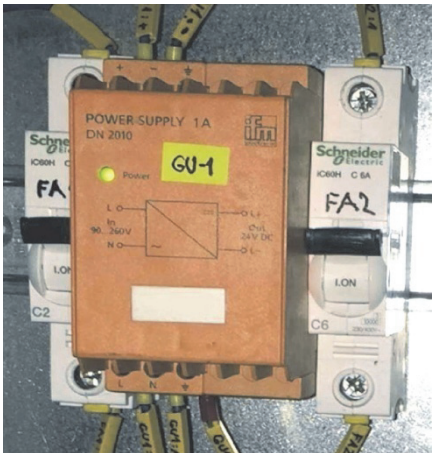
Slika 4.15. Šema konfiguracije monitoring sistema usisnog i pres valjka

Dijagnostički sistem Oradoc je jednostavan modularni sistem koji ima mogućnost praćenja stanja ležajeva i vrijednosti vibracija pomoću visokofrekventne analize signala. Četvorokanalna PLC jedinica tipa VSE100 čini osnovu dijagnostičkog sistema i ista ima mogućnost kontinualnog mjerenja i procjene signala dobijenog od VSE001 senzora ubrzanja. Sve prikupljene vrijednosti se pohranjuju na već unaprijed podešenoj strukturi softverskog sistema. Izmjereni rezultati se uz pomoć mreže Ethernet prosljeđuju u upravljački sistem s instaliranim *software* VES003, gdje su arhivirane u obliku dugoročnih trendova pojedinih mjerenja. Sistem omogućava kreiranje frekventne analizu oscilovanja u realnom vremenu, na bilo kojem senzoru priključenom u sistem.

4.4.1.2. Struktura on-line monitoring sistema ležajeva Octavis

Monitoring sistem se sastoji od dvije četvorokanalne monitoring PLC jedinice VSE100. smještene u zajednički elektrorazvodni ormar, slika 4.16. i 4.17.

Slika 4.16. Elektrorazvodni ormar Octavis



Slika 4.17. Izvor napajanja „GU-1“

Elektrorazvodni ormar pozicioniran je na konstrukciji zgrade PM2, na pogonskoj strani, u oblasti usisnog i ampres valjka. U ormaru su postavljene osnovne komponente monitoring sistema Octavis. Na čeonoj strani elektrorazvodnog ormara postavljene su tri svjetleće LED diode:

- Zeleno kontrolno svjetlo – informacija o napajanju sistema. Dok kontrolna dioda svijetli, garantovano je napajanje sistema Octavis sa naponom od 24V.
- Narandžasto kontrolno svjetlo – upozorenje br. 1 – signalizira da je na nekom od šest senzora usisnog i pres valjka došlo do prekoračenja neke izmjerene vrijednosti iznad granice prvog alarma.
- Crveno kontrolno svjetlo – upozorenje br. 2 – signalizira da je na nekom od šest senzora usisnog i pres valjka došlo do prekoračenja neke izmjerene vrijednosti iznad granice drugog alarma.

Za utvrđivanje na kojem senzoru je došlo do prekoračenja sistema potrebna je analiza izmjerenih vrijednosti u upravljačkom računaru sistema Octavis.

Uz monitoring PLC jedinice VSE100 u elektrorazvodnom ormaru smješten je i izvor napajanja „GU-1“, koji dolazni naizmjenični napon 230V pretvara na jednosmjerni napon 24V sa kojim se napajaju monitoring jedinice IFM VSE100 i svjetleće diode, slika 4.17. Za zaštitu izvora napajanja od struje ispred izvora je postavljena 2A sklopka „FA1“. Za zaštitu monitoring jedinica VSE100 od struje iza izvora napajanja je postavljena 6A sklopka „FA2“.

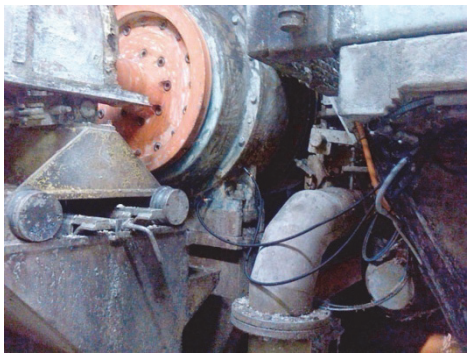
U svaku monitoring jedinicu priključena su tri senzora ubrzanja VSE001, koji su postavljeni na usisnom i pres valjku prema tabeli 4.3.

Tabela 4.3. Pregled pozicija senzora vibracija na presama papir mašine

Usisni valjak		
Monitoring jedinica	Senzor broj	Pozicioniranje senzora
PLC-1	Senzor 1	Vodiljna strana – radijalni pravac
PLC-1	Senzor 2	Pogonska strana – radijalni pravac
PLC-1	Senzor3	Pogonska strana – aksijalni pravac
Pres valjak		
PLC-2	Senzor 1	Vodiljna strana – radijalni pravac
PLC-2	Senzor 2	Pogonska strana – radijalni pravac
PLC-2	Senzor 3	Pogonska strana – aksijalni pravac

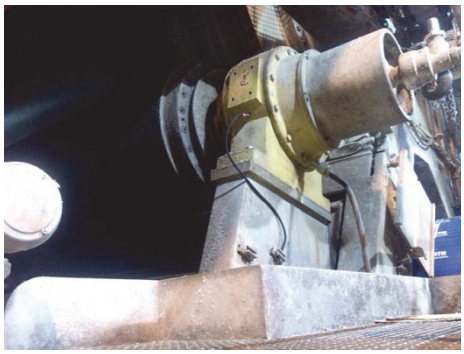
Senzori br. 1 obezbjeđuju monitoring radijalnih vibracija tijela ležaja usisnog i pres valjka na vodiljnoj strani i istodobno praćenje stanja ležaja usisnog i pres valjka na vodiljnoj strani, slike 4.18 i 4.19.

Slika 4.18. Pozicija senzora br. 1 i 3 pres valjka - strana pogona



Slika 4.19. Pozicija senzora br. 1 i 3 usisnog valjka - strana pogona

Senzori br. 2 obezbjeđuju praćenje radijalnih vibracija tijela ležaja usisnog i pres valjka na pogonskoj strani i istodobno praćenje stanja ležaja usisnog i pres valjka na pogonskoj strani, slike 4.20 i 4.21.



Slika 4.20. Pozicija senzora br. 2 pres valjka – strana opsluge

Slika 4.21. Pozicija senzora br. 2 usisnog valjka – strana opsluge

Senzori br. 3 prati aksijalne vibracije kućišta ležaja usisnog i pres valjka na pogonskoj strani.

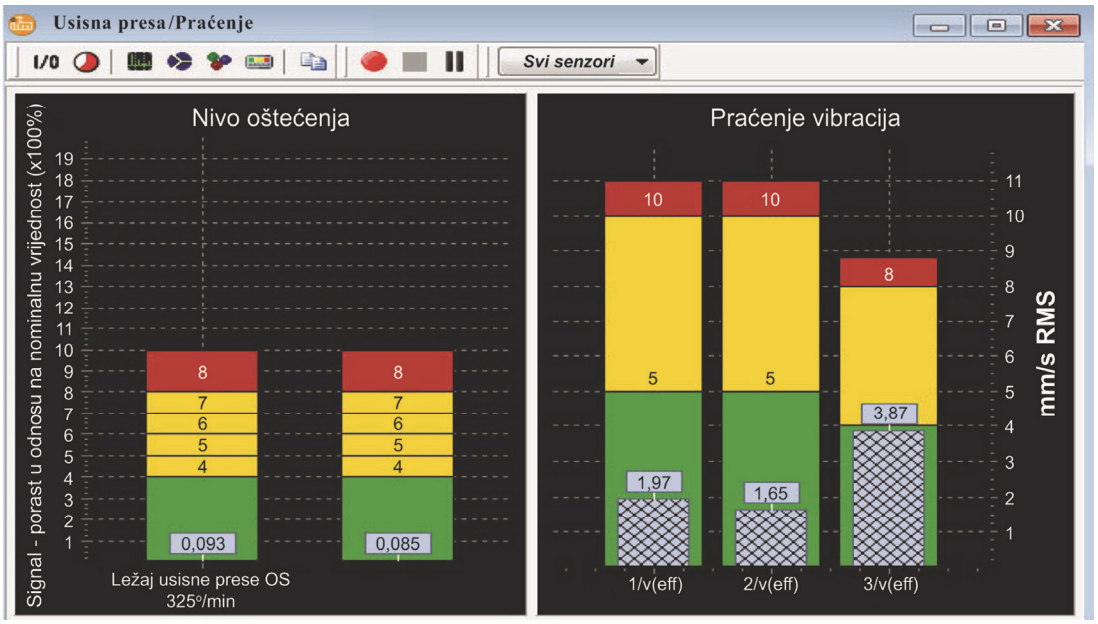
Monitoring jedinice VSE100 označene PLC1 i PLC2 osiguravaju neprekidno praćenje i procjenjivanje signala iz senzora ubrzanja postavljenih na usisnom i pres valjku. U jedinicu PLC-1 priključena su tri senzora koja prate usisni valjak i u jedinicu PLC-2 tri senzora koja prate oscilovanje pres valjka, slika 4.22.

Senzori oscilacija VSE001 postavljeni su na unaprijed definisanim mjernim mjestima na usisnom i pres valjku, slika 4.23. Senzori su uz pomoć kablova ECV108 priključeni na monitoring jedinicu VSE100.

Slika 4.22. Monitoring jedinice IFM VSA 100

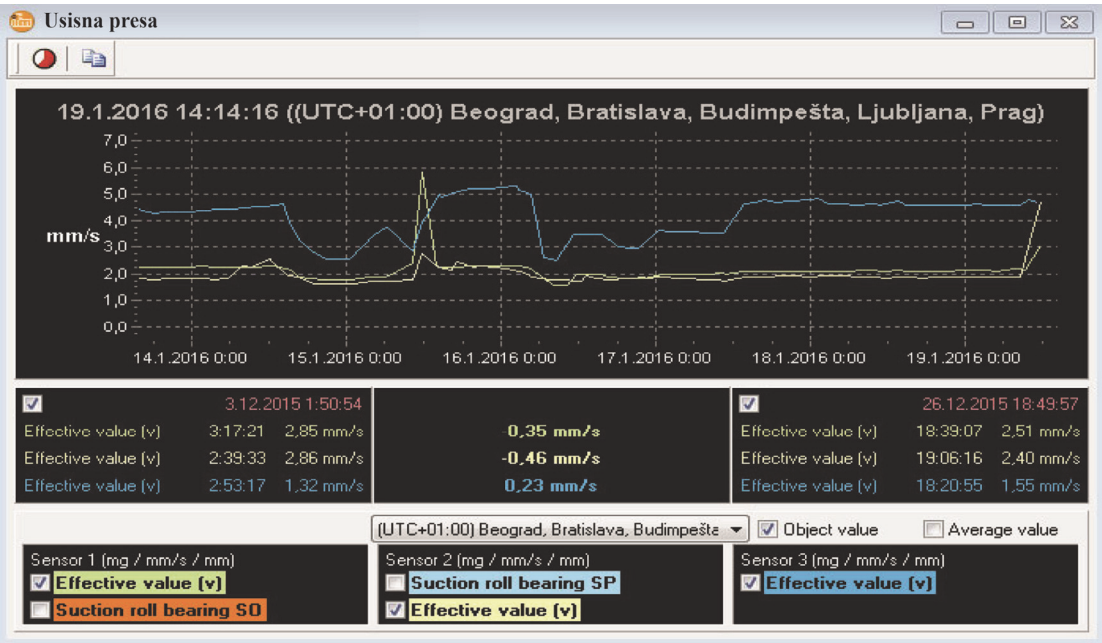
Slika 4.23. Senzor oscilacija VSE100

Monitoring jedinice VSE100 su uz pomoć mreže Ethernet priključene na upravljački računar s instaliranim softwareom VSE 3.0.3. Putem upravljačkog software teče konfiguracija strukture mjerenih podataka, prikupljanje izmjerenih podataka, njihovo arhiviranje i prikazivanje analize oscilovanja u realnom vremenu. Slika 4.24. prikazuje vizualizaciju vrijednosti vibracija ležajeva presa papir mašine.



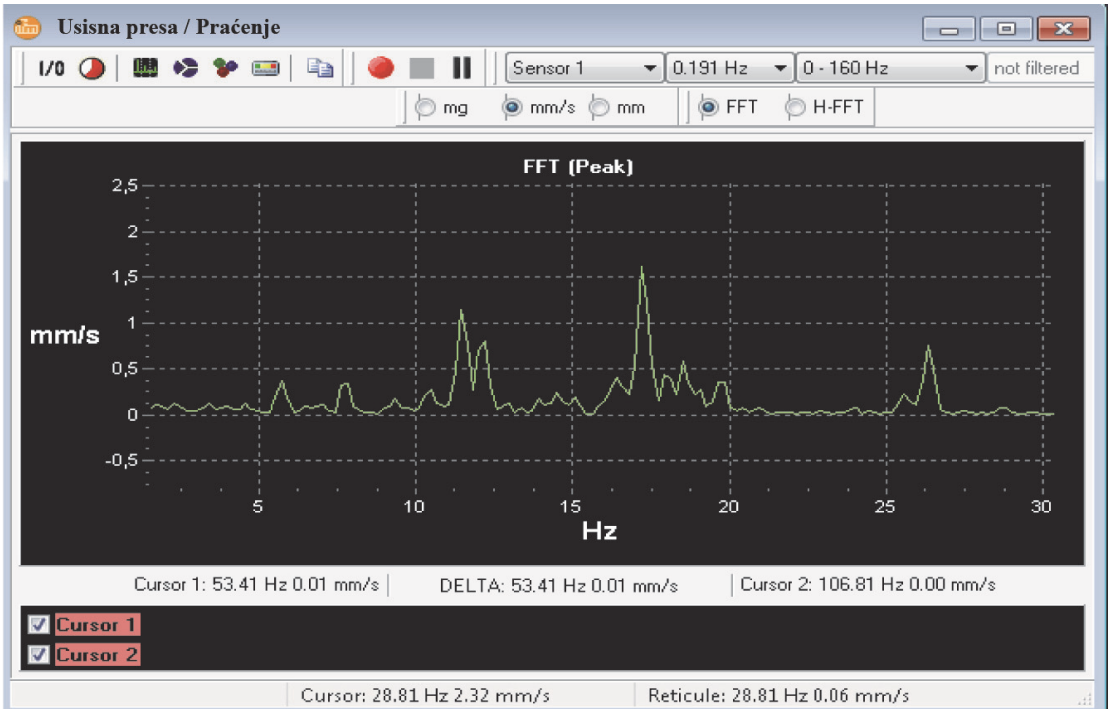
Slika 4.24. Vizualni prikaz mjerenja vibracija presa papir mašine

U okviru mjerenja vrijednosti vibracija sistem Octavis vrši snimanje mjerenih vrijednosti u bazu podataka računara i kreira trend/istoriju ponašanja mjerenih veličina, slika 4.25.

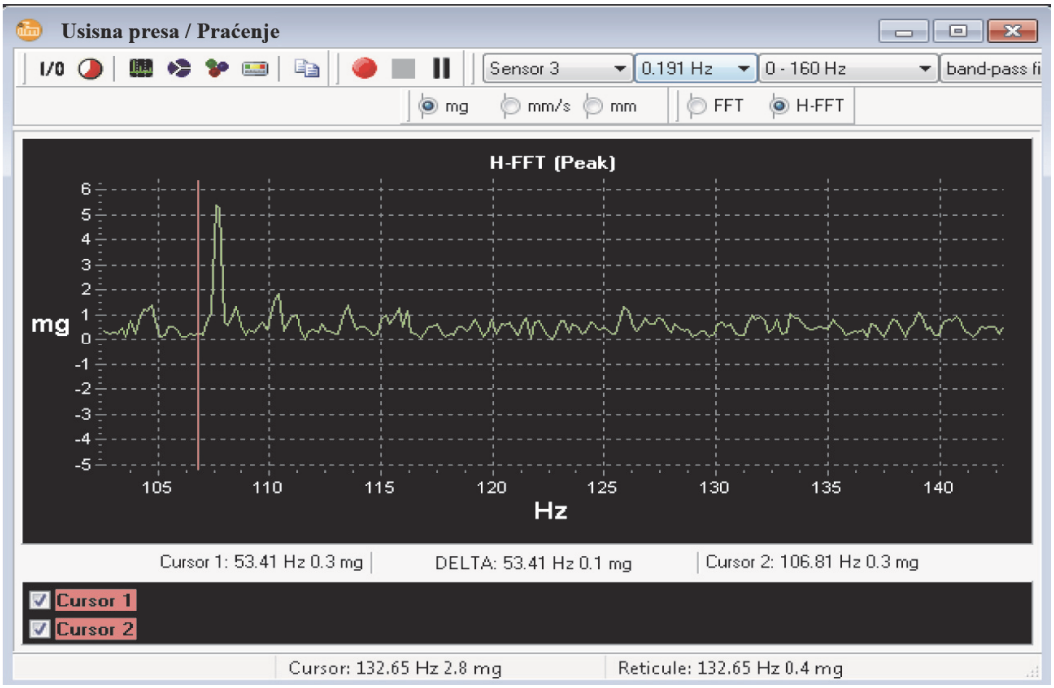


Slika 4.25. Vizuelizacija monitoring sistema Octavis – trend oscilacija

Vibrodijagnostički sistem Octavis takođe ima mogućnost frekventne analize vibracija i stanja ležajeva u realnom vremenu, slike 4.26 i 4.27.



Slika 4.26. Vizuelizacija monitoring sistema Octavis – spektralna analiza

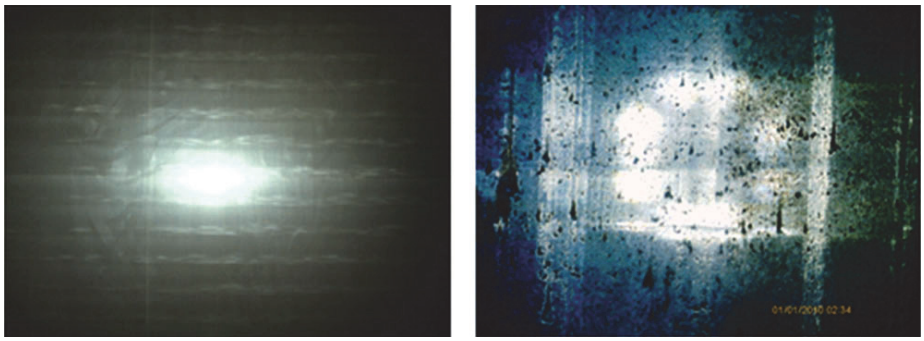


Slika 4.27. Vizuelizacija monitoring sistema Octavis – stanje ležajeva

4.4.3. Sistem za kontinualno praćenje vibracija - Oradoc

Uporedo s instalacijom sistema za kontinualno praćenje vibracija na kritičnim pozicijama presa, kao rezultat nastojanja da se analiziraju i definišu uzroci nepovoljnih vibracija na nosaču krep šabera, instaliran je on-line sistem za ranu detekciju *chatter marks* sa vremenskim trajanjem od 3 mjeseca.

Pojava problema povećanih vibracija identifikovana je na kvalitetu gotovog proizvoda, rolne papira, i to u vidu uzdužnih i poprečnih pruga unutar papirne trake. Pojava ovih anomalija praćena je nastankom poprečnih i uzdužnih depozita na sušionom cilindru koje se u tehnološkoj terinologiji definišu kao *chatter marks*, slika 4.28.

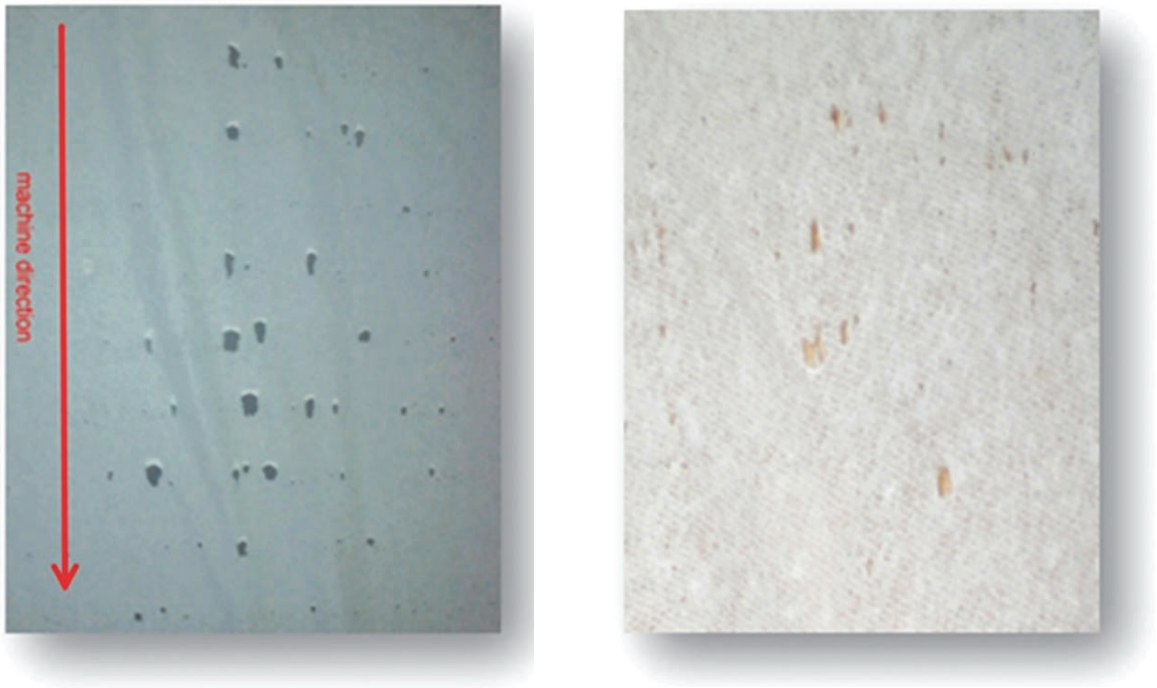


Slika 4.28.Poprečne pruge – chatter marks i oštećenja površine sušionog cilindra

Problem nastanka fenomena *chatter marks* u toku tehnološkog procesa proizvodnje papira analiziran je brojim stručnim radovima. Uopšte je poznato da chatter nastaje kao rezultat trenja između površine sušionog cilindra i noža za krepovanje ili noža za čišćenje papirne mase. Nastanak vibracija se veže za postojanje mnogobrojnih faktora u sklopu tehnološkog procesa koje se kreću u rasponu frekvencija od 0 do 20 kHz. Periodični pregledi stroboskopom te pojedinačna zapažanja radnog osoblja nisu dovoljan i pouzdan metod za uočavanje i definisanje

štetnih vrijednosti vibracija. U tom smislu su razvijeni tehnički sistemi za praćenje i analizu trenda vibracija.

Kao krajnji rezultat nepovoljnog djelovanja štetnih vibracija u papirnoj traci su se pojavljivale i sitne rupice i to u velikom broju, slika 4.29.

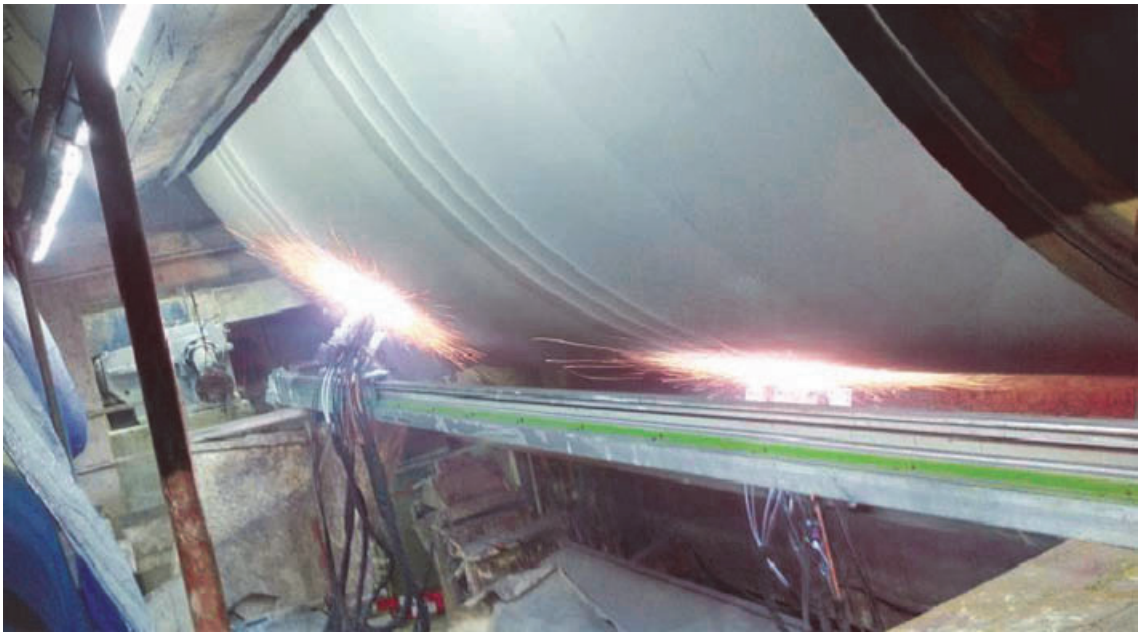


Slika 4.29. Odstupanja kvaliteta finalnog proizvoda – papirne trake

Pojava ovog problema uzrokovala je nepovoljnu situaciju u smislu ispunjenja kvalitativnih normi, koja je eskalirala krajem 2015. godine u smislu da je bilo gotovo nemoguće dobiti finalni proizvod traženog kvaliteta.

4.4.3.1. Primjena metoda tehničke dijagnostike - provođenje korektivnih mjera

Definisanje korektivnih mjera je bio izuzetno zahtjevan zadatak jer se nije mogao utvrditi tačan uzrok problema. Zahtjev za kontinualan rad postrojenja bio je limitirajući faktor u smislu nemogućnosti provođenja testova u smislu utvrđivanja uzroka problema. Kao rezultat višemjesečnog praćenja kvaliteta gotovog proizvoda i praćenja ponašanja sistema i nivoa oscilacija, definisan je početni korak – provođenje investicione aktivnosti metalizacije površine sušionog cilindra, slika 4.30.



Slika 4.30. Korektivna mjera broj 1. – metalizacija sušionog cilindra

Ovaj korak je bio iznuđen u smislu eliminacije sitnih mikroskopskih šupljina u površini plašta sušionog cilindra koje su uzrokovale pojavu rupica u papiru. Korektivna mjera – metalizacija, uspješno je realizovana u terminu generalnog remonta papir mašine, od 27.12.2015. do 5.1.2016. godine i to od strane specijalizovane firme iz Velike Britanije.

Nakon provođenja korektivne mjere – metalizacije, stvoreni su uslovi za nesmetan rad u smislu dobijanja optimalnog kvaliteta finalnog proizvoda, ali je problem prisutnosti štetnih vibracija u sistemu papir mašine i dalje ostao prisutan. Ovaj fenomen se nije mogao ignorisati s obzirom na opasnost oštećenja nove oplemenjene obloge sušionog cilindra i vjerovatnog nastanka istih problema u smislu kvaliteta finalnog proizvoda u bliskoj budućnosti.

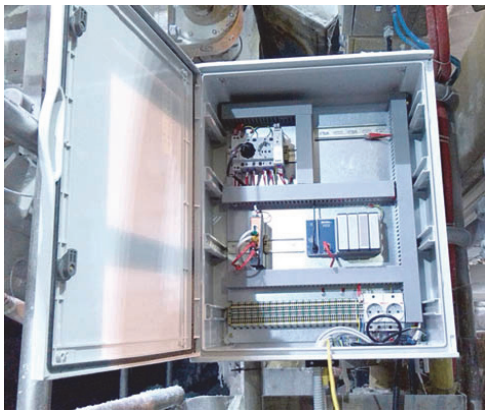
Kako je problem oscilovanja sistema bilo moguće identifikovati samo u uslovima izrazito visokih amplituda koje su se sporadično pojavljivale u uslovima kontinualne proizvodnje, odlučeno je da se angažovanjem specijalizovane firme instalira novi moderan on-line vibrodijagnostički sistem tipa Oradoc, koji je prilagođen za uslove tehnološkog procesa proizvodnje papira. Kao referentna pozicija odabrane su pozicije nosača noža za krepovanje papirne trake i nosača noža čistača.

Sistem za kontinualno mjerenje vibracija Oradoc je instaliran u februaru 2016. godine i sastojao se od:

- senzora vibracije postavljenih na poziciji noža za krepovanje papirne trake i noža za čišćenje sušionog cilindra,
- glavne upravljačke stanice sa mjernim jedinicama,
- upravljačkog sistema smještenog u kontrolnu sobu papir mašine.

Cilj vibrodijagnostičkog sistema je prikupljanje i analiza podataka o ponašanju kompletnog sistema u smislu pronalaženja uzroka štetnih vibracija. Primarni efekat uvođenja dijagnostičkog sistema Oradoc bio je obezbjeđenje zaštite obloge sušionog cilindra, a sekundarni efekat je monitoring stanja komponenti papir mašine: noža za krepovanje papirne trake, noža za čišćenje sušionog cilindra, ležajnih pozicija presa itd.

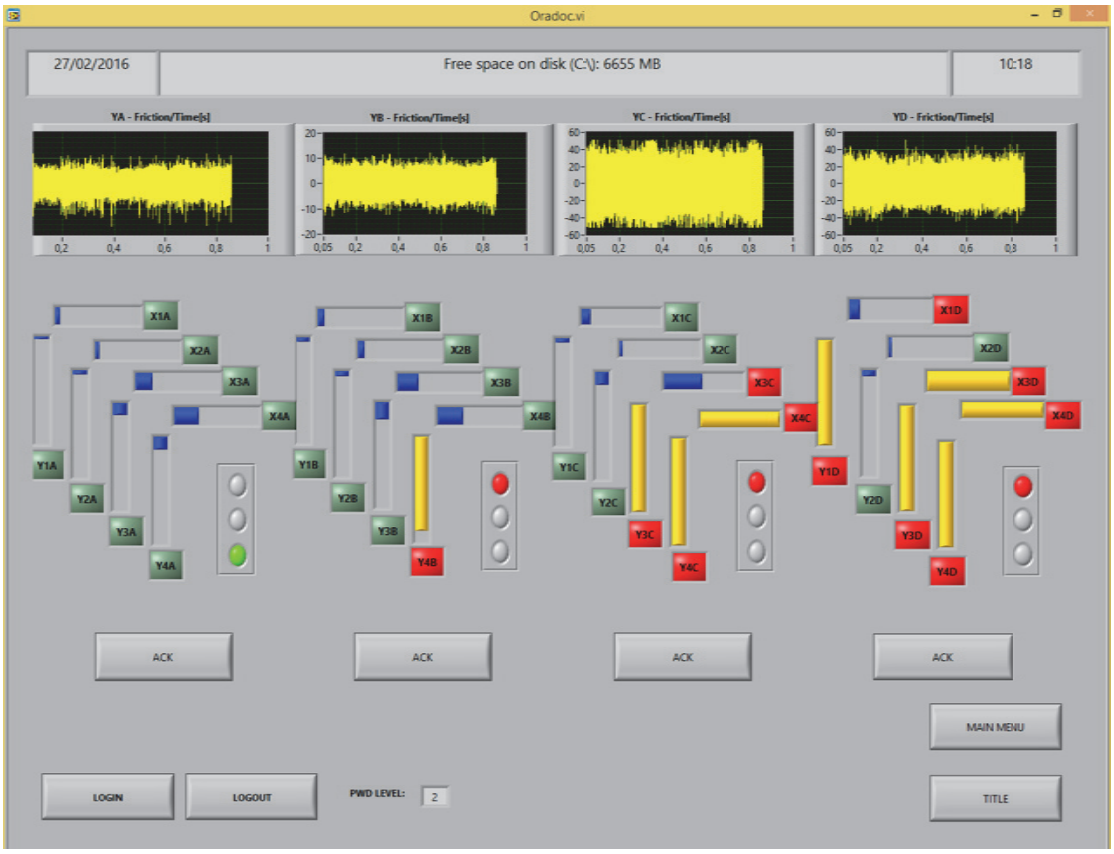
Slika 4.31 Vibrodijagnostički sistem Oradoc



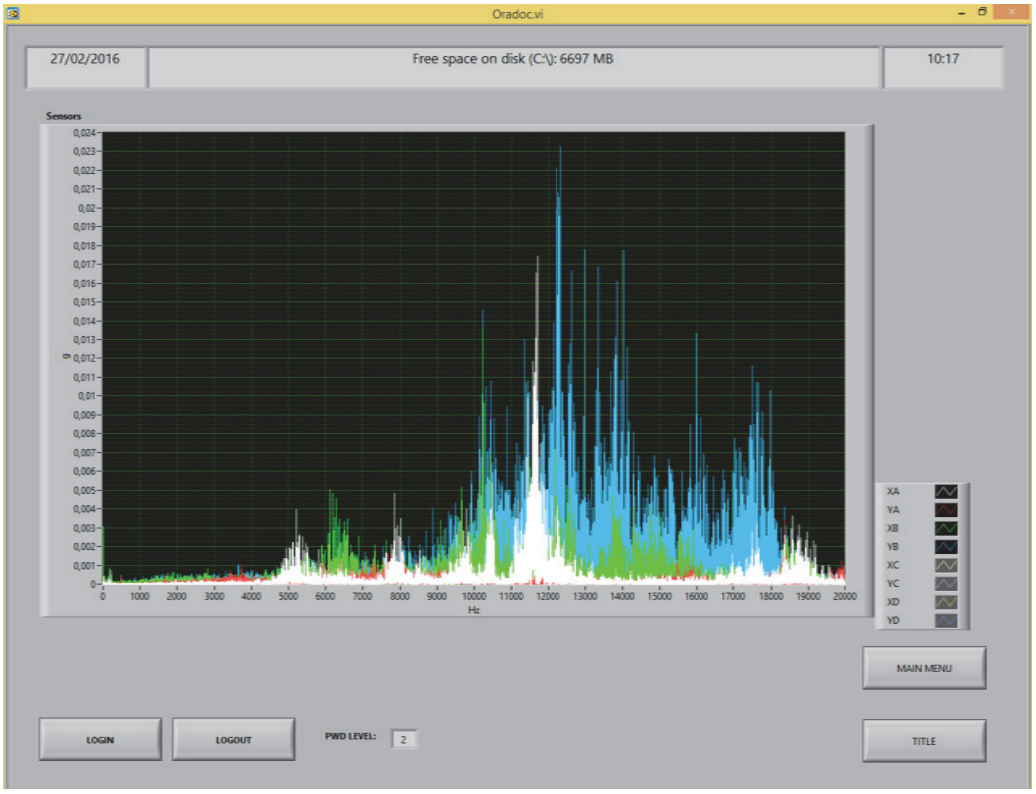
Slika 4.32 Centralna radna stanica Oradoc

Štetne vibracije nepovoljno djeluju na nosač noža za krepovanje papirne trake koji svojim oscilovanjem narušava uslove nastanka papirne trake (rupice u papiru) te uzrokuje nastanak pruga na sušionom cilindru (oštećenje površine sušionog cilindra).

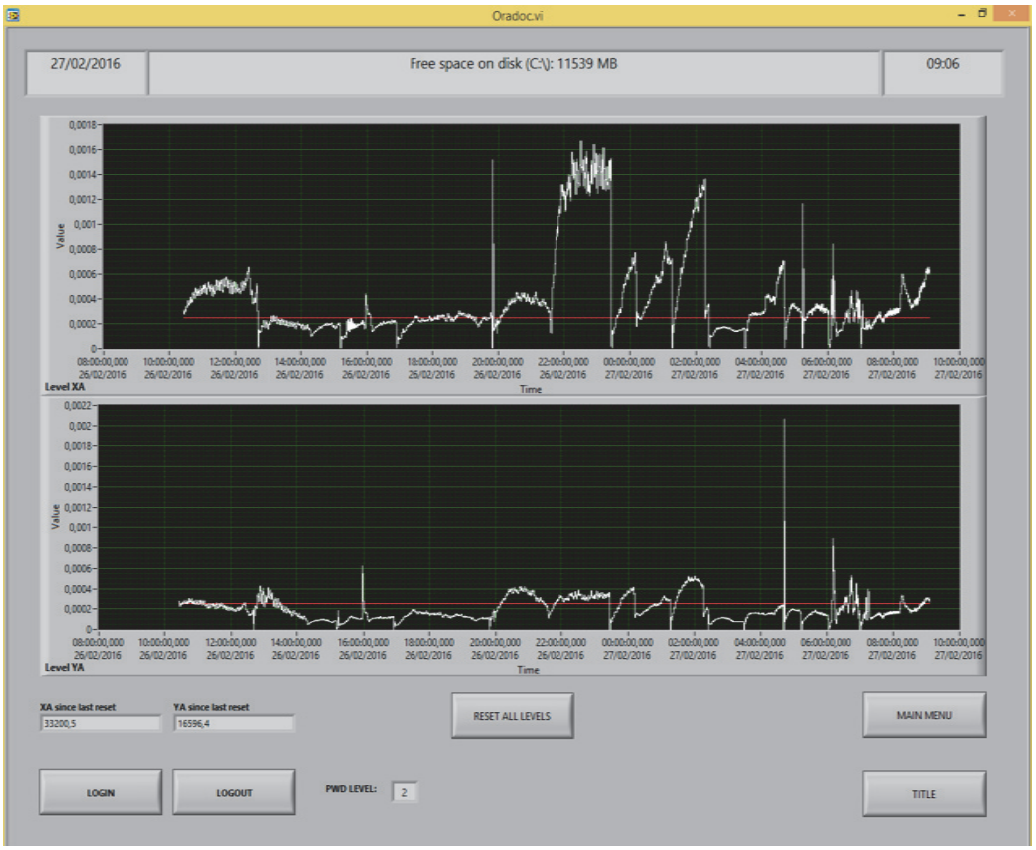
Vizuelizacija dijagnostičkog mjerenja sistema Oradoc i praćenje ciljanih parametara (frekvencije i amplitude oscilovanja) prikazane su na slikama 4.33, 4.34 i 4.35.



Slika 4.33. Vizuelizacija monitoring sistema Octavis – stanje ležajeva

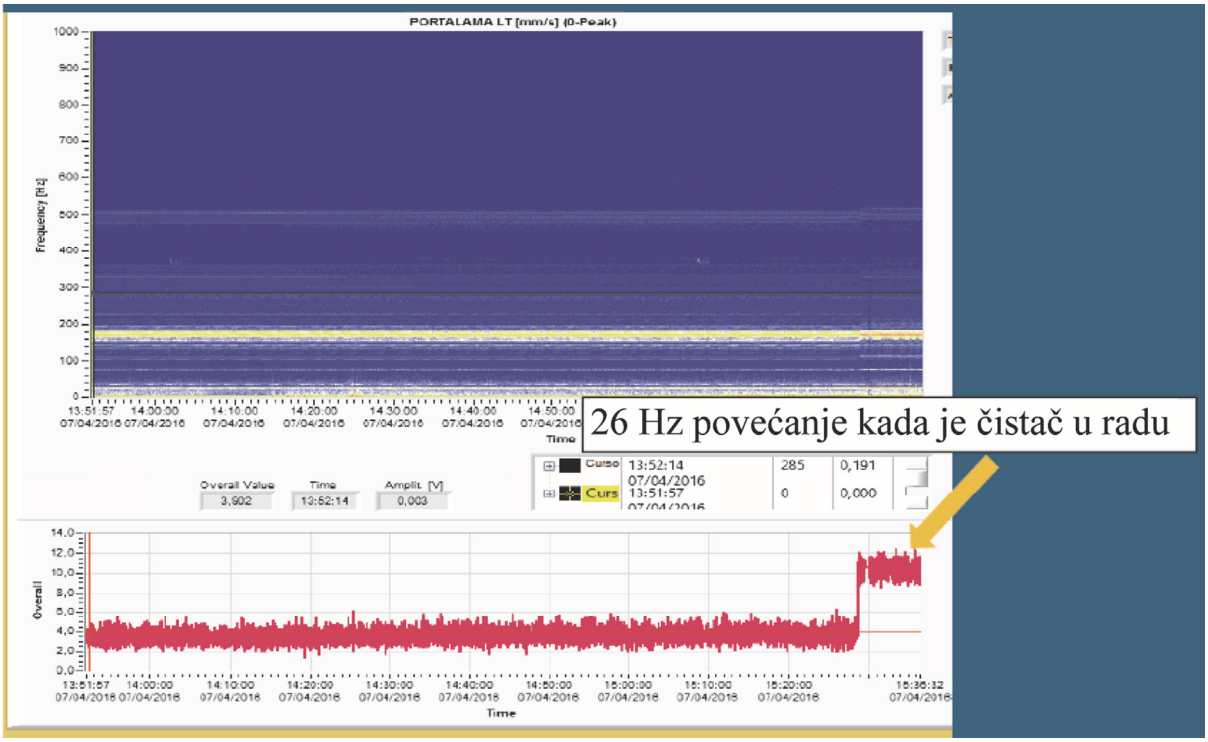


Slika 4.34. FFT dijagram



Slika 4.35. Istorija praćenja energije oscilovanja

Veza s kritičnim pozicijama presa se ostvaruje kontaktom sa sušionim cilindrom, s jedne strane, i s prenošenjem vibracija preko zajedničkog rama sa druge strane. Rezultati tromjesečnog on-line dijagnostičkog mjerenja vibracija na poziciji noževa za krepovanje papira i čišćenje sušionog cilindra bili su predmet kompleksne analize projekt tima i eksterne podrške.

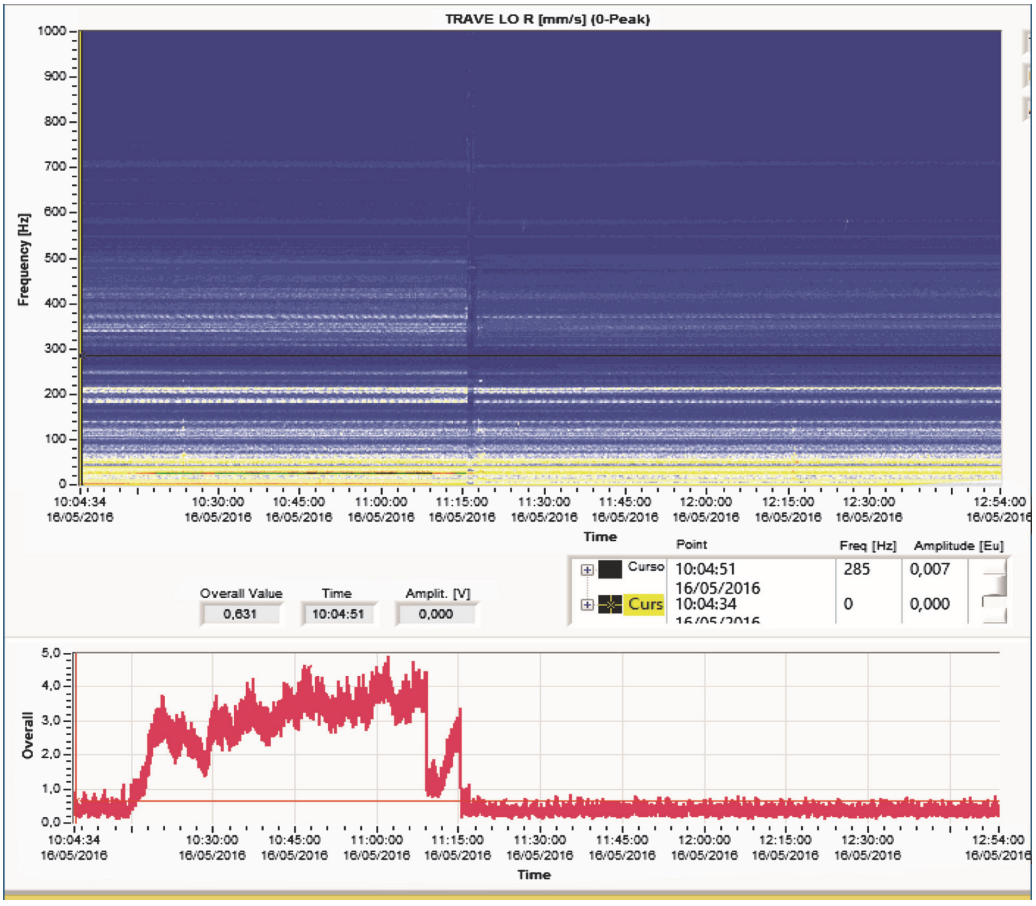


Slika 4.36. Oradoc detekcije - dominacija frekvencije 26 Hz

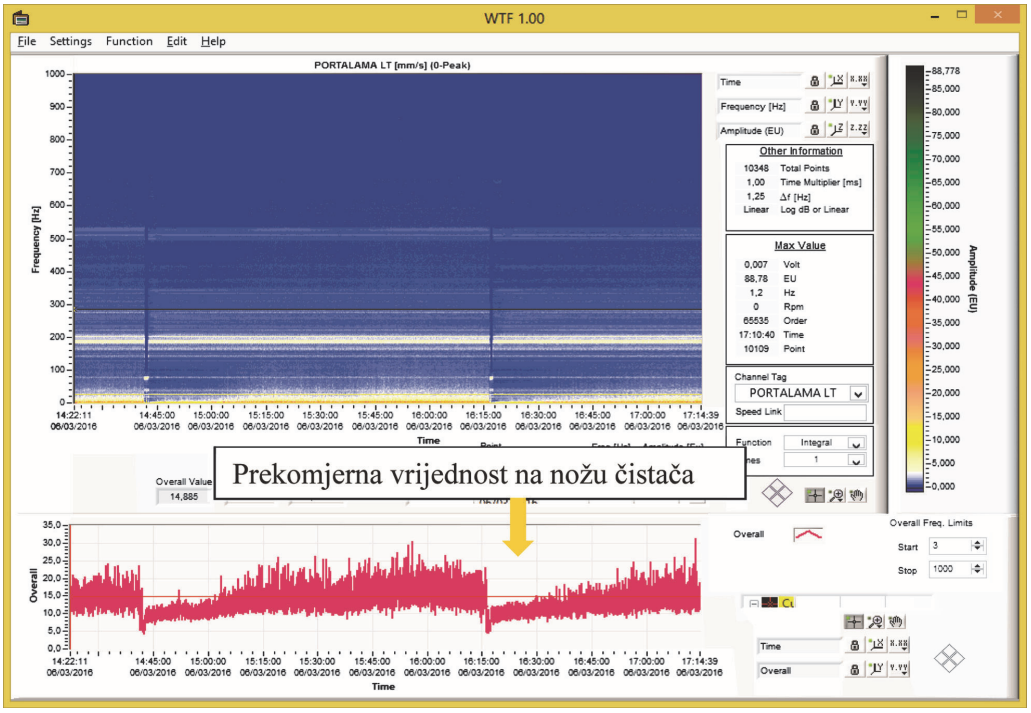
Generalno, izvor štetnih vibracija generiše veliku količinu energije oscilovanja dijelova sistema u području od 25 do 30 Hz, što se dovodi u vezu sa sopstvenom frekvencijom noža za krepovanje i pobuđuje sistem u rezonantnu frekvenciju.

Prema sistemu Oradoc, metodologija mjerenja ukupne energije oscilovanja daje mogućnost pravovremenog djelovanja na elemente sistema u okviru tehnološkog procesa (regulacija pritiska na noževima, nanošenje komponenti zaštite sušionog cilindra...) u smislu izbjegavanja uslova nepovoljnog režima rada. Sistem koji radi u uslovima rezonantnog područja svakako može imati negativan uticaj na stanje vibracija kritičnih pozicija kao što su i pres valjci. Jedan od zaključaka proizašlih iz rezultata mjerenja je i dovođenje u vezu vibracija slijepobušene prese s promjenom energije oscilovanja sistema, slika 4.37.

Drugi značajan rezultat je identifikovanje uticaja nekorektnog rada noža za čišćenje sušionog cilindra s indukovanjem energije oscilovanja na nož za krepovanje papirne trake, slika 4.38.



Slika 4.37. Vibracija 26 Hz nakon zamjene slijepobušene prese



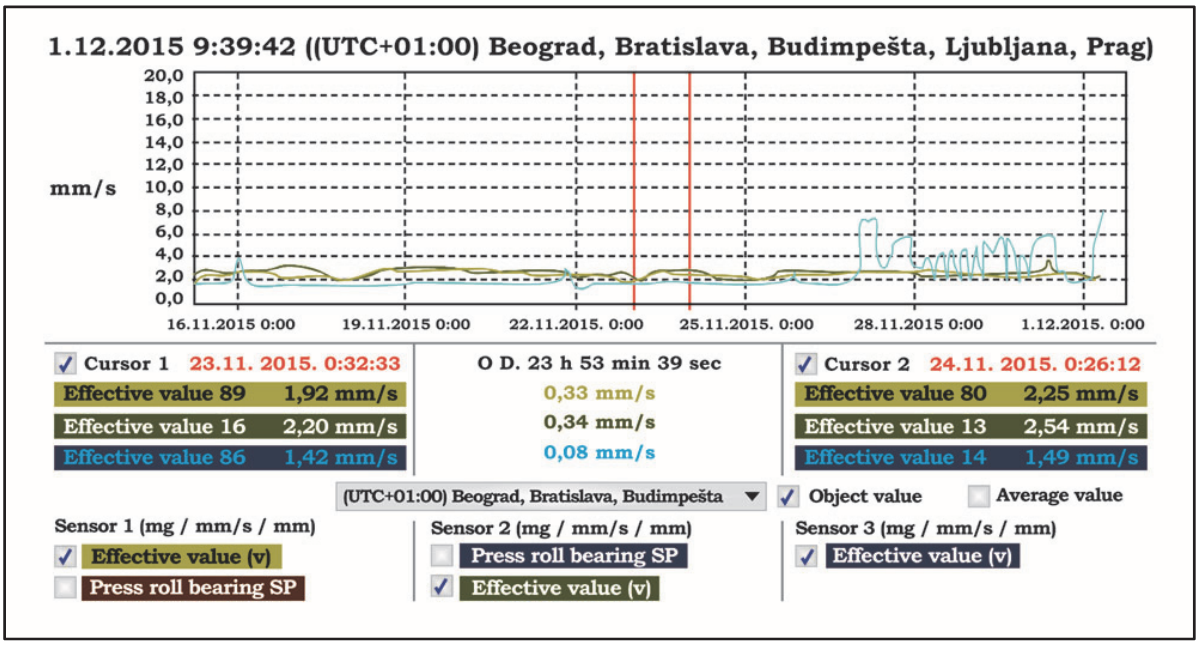
Slika 4.38. Stanje vibracija s aktiviranjem noža za čišćenje sušionog cilindra

5.0 REZULTATI ISTRAŽIVANJA I OPTIMIZACIJA POUZDANOSTI

5.1. Istraživanje rezultata djelovanja tehničke dijagnostike u realnom sistemu

5.1.1. Analiza djelovanja sistema Octavis u konkretnim događajima

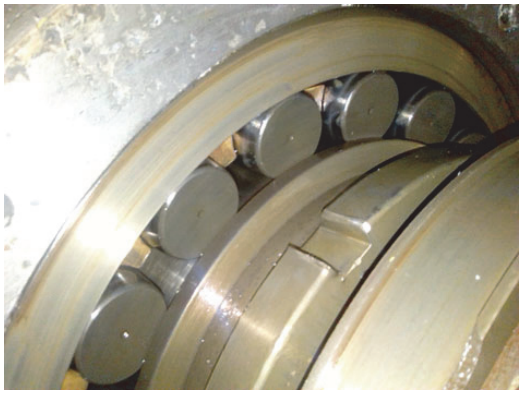
Nakon instalacije dijagnostičkog sistema Oktavis 11.11.2015. godine, vibrodijagnostički sistem je kontinualno prikupljao informacije o stanju vibracija na poziciji ležajeva presa papir mašine PM2. Prvo aktiviranje alarma vibracija zabilježeno je 28.11.2015. godine naglim porastom vibracija na poziciji pogonske strane slijepobušene prese u aksijalnom pravcu.



Slika 5.1. Aktivacija alarma na poziciji slijepobušene prese, 28.11.2015.

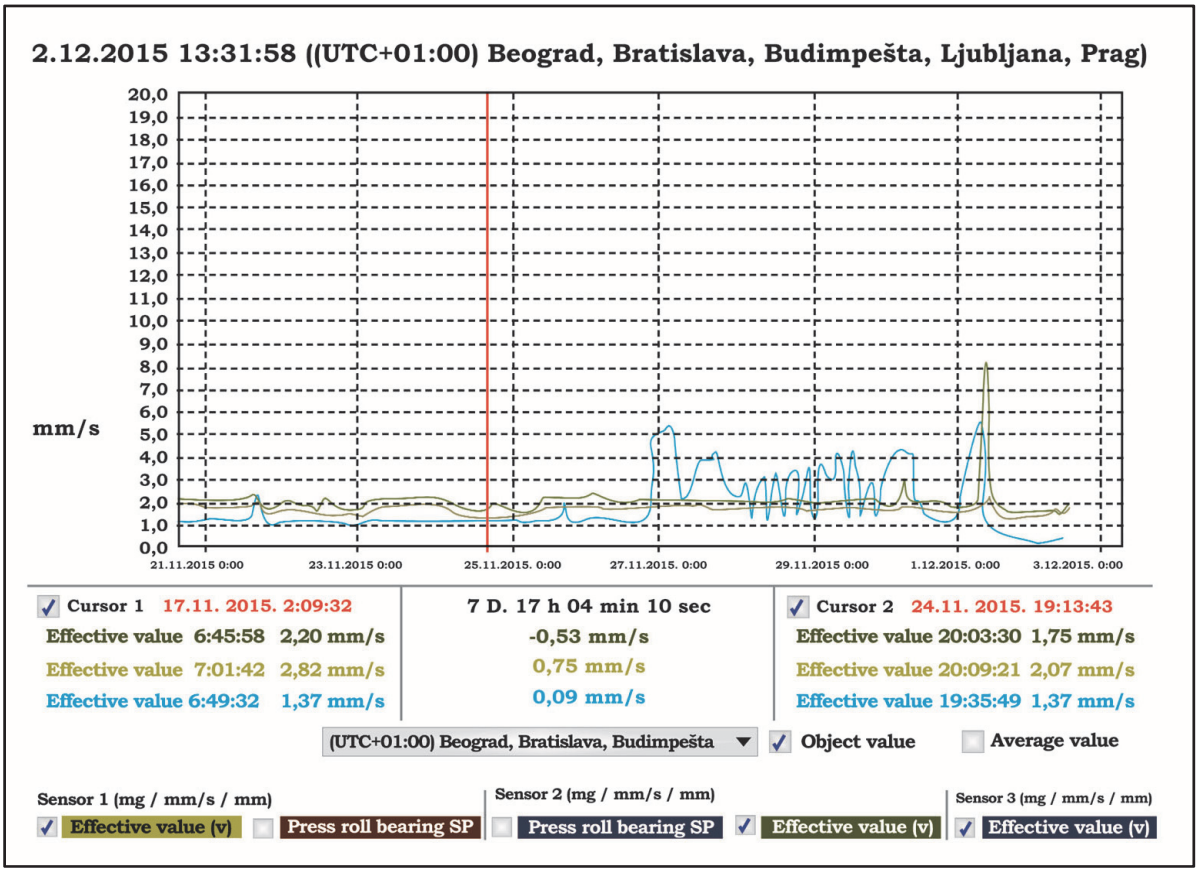
Iako temperatura ležaja/kućišta pogonske strane slijepobušene prese nije prelazila maksimalno dozvoljeni nivo - žuti alarm, vrijednost amplitude oscilovanja od gotovo 8 mm/s je ukazivao na potencijalu opasnost u smislu mogućeg otkaza ležaja i rizika od stradavanja rukavca. Dodatna komplikacija predstavljala je činjenica da je rezervna presa bila trenutno izvan fabrike na redovnom servisu (brušenju gumene obloge) te da bi vrijeme na otklanjanju otkaza trajalo dugo uz neizvjestan ishod opravke vlastitim snagama. Ovakav događaj bi sigurno uslovio veliki zastoj u proizvodnji i samim tim velike ekonomske gubitke u poslovanju proizvodnog sistema. Trenutna naložena preventivna mjera bila je kontinualno praćenje temperature kućišta/ležaja od strane dežurnih radnika mašinskog održavanja (jedno mjerenje svakih sat vremena). Kao preventivna i korektivna mjera planiran je zastoj proizvodnje i kontrola ležajnog mjesta pogonske strane slijepobušene prese. Planski zastoj je proveden 1.12.2015. godine.

Slika 5.2.Kontrola zazora ležaja prese



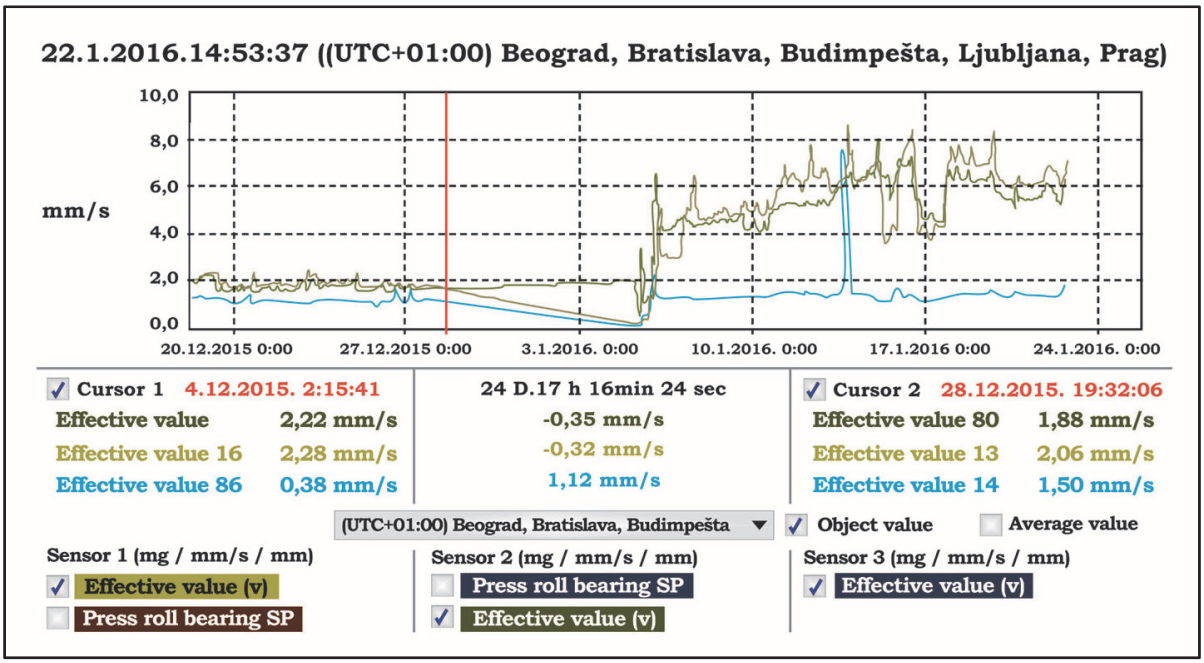
Slika 5.3. Postojanje zazora od 5 mm između matice za stezanje i ležaja

Rezultat kontrole kritične pozicije je evidentno postojanje zazora između matice za dotezanje ležaja i ležaja koja je predstavljala opasnost od obrtanja unutrašnjeg prstena i oštećenja rukavca, slike 5.2 i 5.3. Korektivna mjera je dotezanje matice, podešavanje unutrašnjeg zazora ležaja osiguravanjem matice za dotezanje. Nakon kretanja vibracijesu vraćene u normalan nivo, čime je ova kritična situacija uspješno eliminisana, slika 5.4.

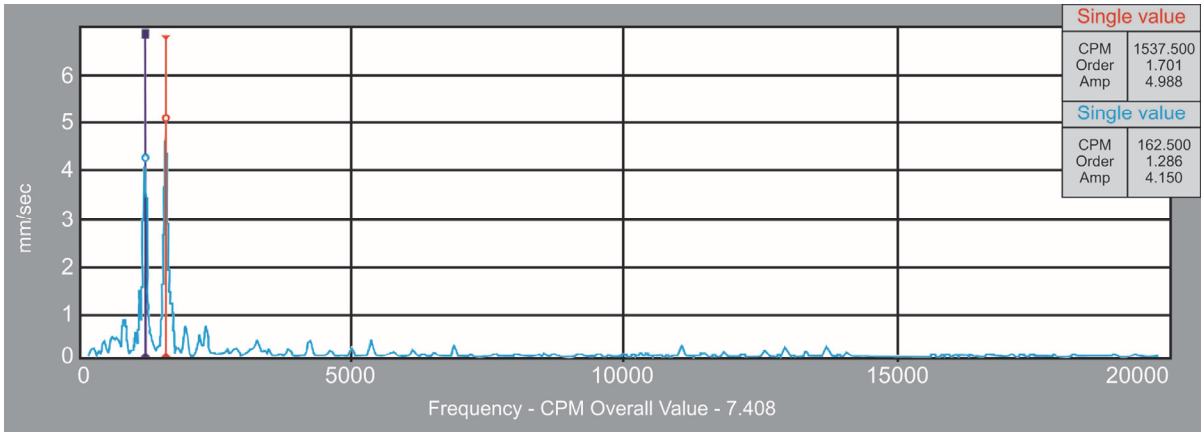


Slika 5.4.Stanje vibracija nakon korektivnih mjera, 1.12.2015.

Druga intervencija proizašla nakon djelovanja i alarmiranja sistema Octavis je preventivni planski zastoj papir mašine u maju 2016. godine i pregled stanja slijepobušene prese pošto je zabilježen duži trend kontinualnog porasta vibracija na ležajnim pozicijama.

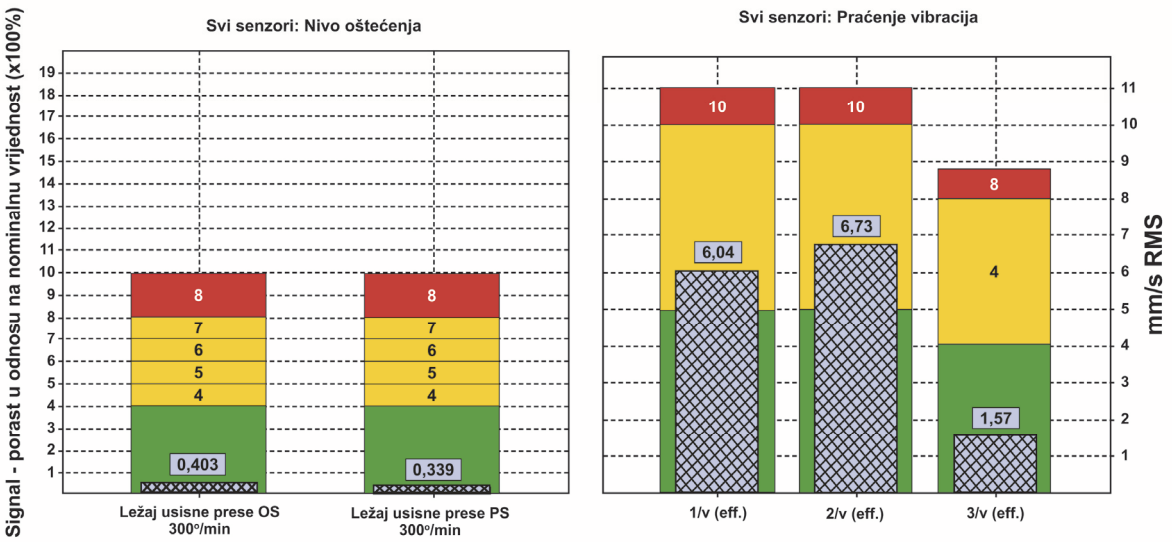


Slika 5.5.Trend porasta vibracija slijepobušene prese, 11.5.2016.



Slika 5.6.FFT dijagram ležajnih mjesta slijepobušene prese, 11.5.2016.

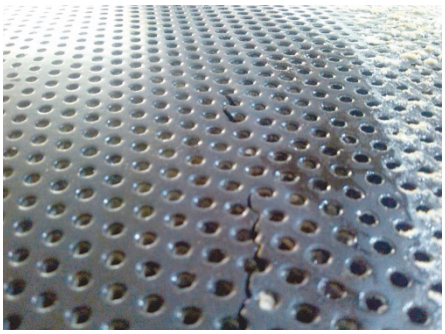
U frekventnom spektru dominirala je frekvencija koja odgovara 1162 i 1537°/min. Detektovane frekvencije odgovarale su trećem i četvrtom harmoniku okretanja slijepobušene prese, što je ukazivalo na problem povezan s oblogom valjka. U planskom zastoju papir mašine 11.5.2016. godine zamijenjena je slijepobušena presa sa detektovanim problemom i rezultat pregleda je oštećena gumena obloga na strani pogona pres valjka.



Slika 5.7. Vrijednosti brzine oscilovanja ležajnih mjesta slijepobušene prese, 11.5.2016.

Nakon zamjene slijepobušene prese uz oštećenja na omotaču (gumenoj oblozi) prese uočeno je i pucanje glavne cijevi za hlađenje prese, slike 5.8 i 5.9.

Slika 5.8. Oštećenje cijevi od hlađenja slijepobušene prese

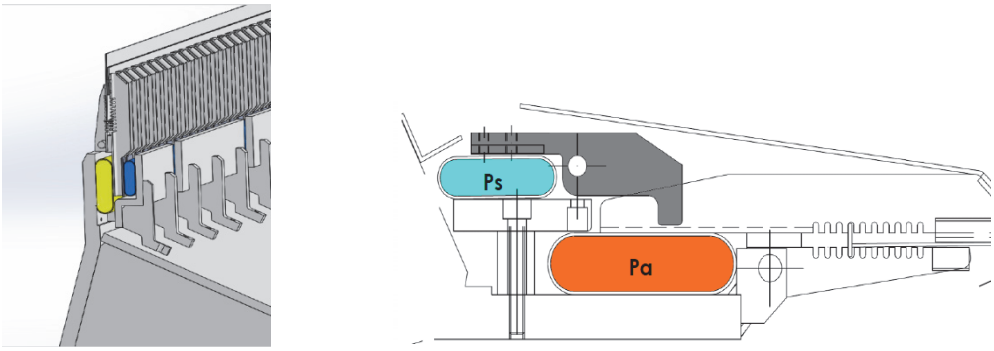


Slika 5.9. Oštećenje gumene obloge slijepobušene prese

Dalji rad u ovakvim uslovima bi vjerovatno mogao rezultovati ozbiljnijim oštećenjima kako same slijepobušene prese (rukavci, ležajevi), tako i ostalih elemenata sistema sušioni cilindar – usisna presa – filc – slijepobušena presa. Ovakav razvoj događaji bi uzrokovao veliki zastoj papir mašine i velike troškove na sanaciji oštećenja. Korektivna mjera je slanje slijepobušene prese na servis sistema za hlađenje i gumiranje obloge pres valjka u eksternoj firmi.

5.1.2. Analiza rezultata tehničke dijagnostike i optimizacija tehnološkog postupka krepovanja papirne trake

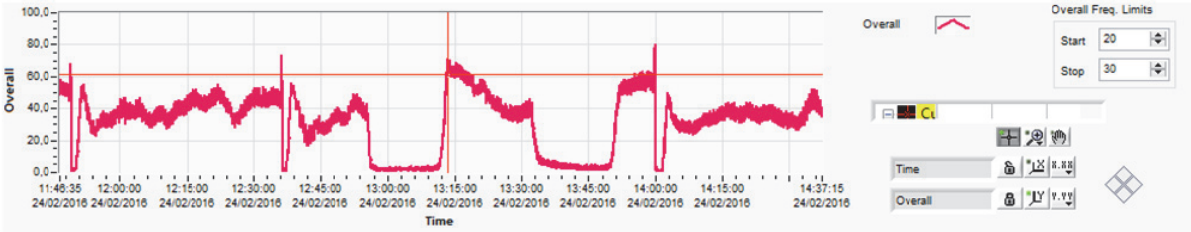
Osnovne veličine koje su analizirane i poređene sistemom za kontinualno praćenje vibracija su amplitude oscilovanja dijelova nosača za krepovanje papirne trake (pozicije tijela nosača i nosača noža za skidanje papirne trake) i nosača noža za čišćenje površine sušionog cilindra. Nakon višemjesečnog praćenja, niza brojnih tehničkih sastanaka i analize potencijalnih uzroka problema zajednički su konstatovane korektivne mjere koje je bilo neophodno realizovati u terminu duže planske popravke – generalnog remonta papir mašine u oktobru 2016. godine. Korektivne mjere broj 2 su se odnosile na instalaciju dodatnih elemenata sistema nosača noža za krepovanje papira, čime se kompletan sistem značajno ukrućuje i izlazi iz zone rezonantnih frekvencija, slike 5.10 i 5.11.



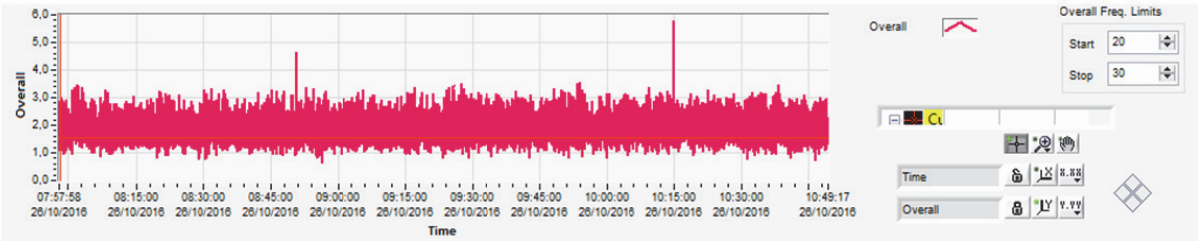
Slika 5.10. Tehničko rješenje modifikacije nosača za krepovanje papirne trake

Slika 5.11. Provođenje korektivne mjere 2– dodatni pneumatski cilindri i nosači/prsti

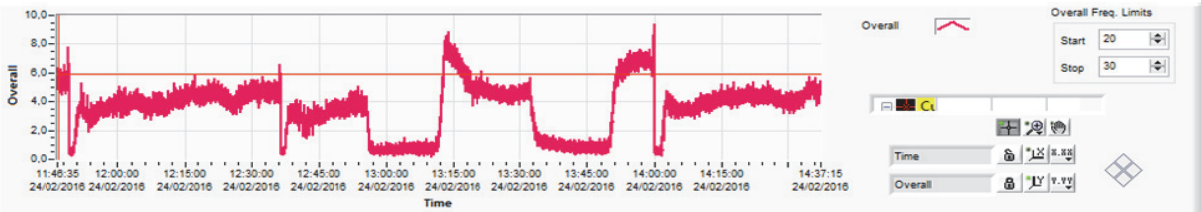
Rezultat jednomjesečnog on-line praćenja vrijednosti amplituda oscilovanja i poređenje s vrijednostima prije provođenja modifikacije govori da je nivo garantovanih vrijednosti zadržan u dozvoljenim granicama tokom čitavog intervala kontinualnog praćenja. Ovim su stvoreni uslovi za normalan rad kompletnog sistema u zoni praćenja niskih vibracija koje se direktno mogu dovesti u vezu s mehaničkim komponentama sistema. Vrijednosti amplituda vibracija prije i nakon modifikacije sistema prikazane su na slikama 5.12 do 5.17.



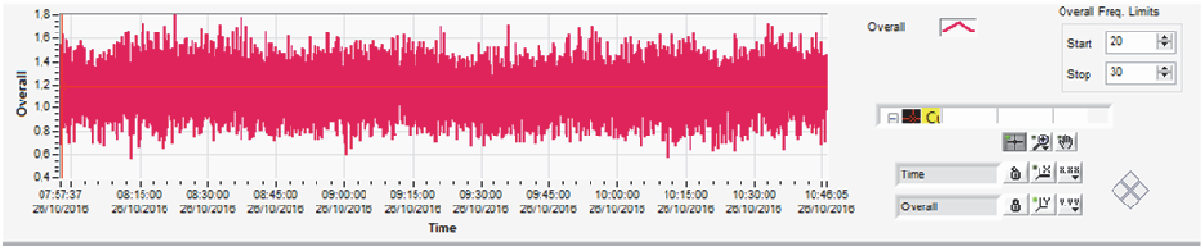
Slika 5.12. Nivo vibracija nosača – prstiju prije modifikacije (max. vrijednost 61,59 mm/s)



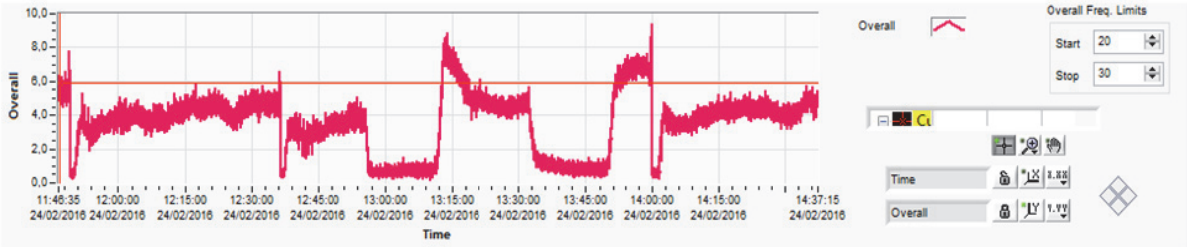
Slika 5.13. Nivo vibracija nosača – prstiju nakon modifikacije (max. vrijednost 1,566 mm/s)



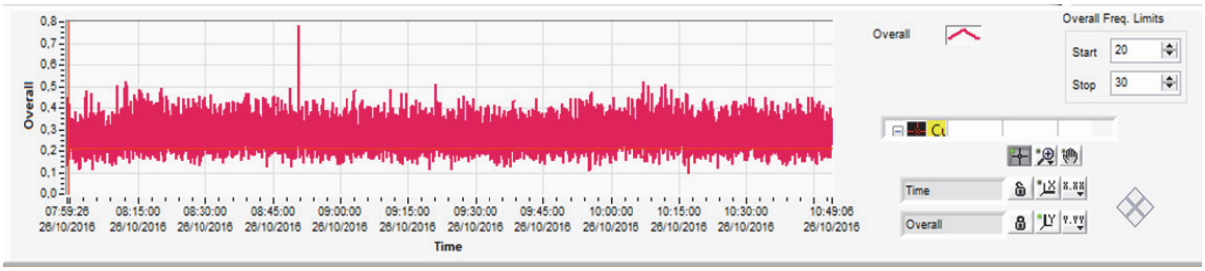
Slika 5.14. Nivo vibracija nosača krep šabera prije modifikacije (max. vrijednost 11,192 mm/s, strana pogona horizontalan pravac)



Slika 5.15. Nivo vibracija nosača krep šabera nakon modifikacije (max. vrijednost 1,183 mm/s strana pogona horizontalan pravac)



Slika 5.16. Nivo vibracija nosača krep šabera prije modifikacije (max. vrijednost 5,937 mm/s, strana pogona vertikalan pravac)



Slika 5.17. Nivo vibracija nosača krep šabera nakon modifikacije (max. vrijednost 0,210 mm/s, strana pogona vertikalan pravac)

Konkretan primjer predstavlja potrebu i opravdanost instalacije i korišćenja modernih dijagnostičkih sistema u smislu optimizacije tehnoloških i proizvodnih procesa. Iako su potrebna značajna finansijska sredstva za implementaciju, novi napredni tehnički sistemi obogaćeni savremenim softverskim rješenjima imaju veliku ekonomsku opravdanost u slučajevima kontinualnih proizvodnih procesa s visokim zahtjevom efektivnosti sistema.

5.2. Istraživanje efektivnosti proizvodnog sistema papir mašine

Ocjena učinka djelovanja tehničke dijagnostike predstavljena je istraživanjem i analizom pokazatelja efektivnosti sistema papir mašine i to za period do instalacije sistema tehničke dijagnostike na pozicijama presa papir mašine i za isti vremenski period nakon instalacije pomenutog sistema. Da bi ocijenili efektivnost realnog sistema – papir mašine koristićemo izraz [3].:

$$OEE = EA \cdot PE \cdot RQ \tag{5.1}$$

EA – raspoloživost (*Equipment Avaliability*),
PE – iskorišćenje performansi (*Performance Efficiency*),
RQ – stepen kvaliteta (*Rate of Quality*).

Za ocjenu efektivnosti potrebni su sljedeći podaci rada papir mašine:

- broj sati zastoja uzrokovan otkazom uređaja,
- ukupna raspoloživost,
- ukupna neto proizvodnja papir mašine,
- škart.

5.2.1. Efektivnost realnog sistema prije instalacije tehničke dijagnostike

Za proračun efektivnosti proizvodnog sistema papir mašine formirana je baza podataka koja je obuhvatila praćenje i evidenciju radnih parametara u toku proizvodnog procesa. Kao ključni faktori definisani su: neto ostvarena proizvodnja, sati otkaza, vremensko iskorišćenje, planirani zastoji postrojenja… U konkretnom slučaju, u sklopu praćenja radnih parametara uveden je sistem evidencije koji se svakodnevno ažurira u računarski sistem od strane odgovornih radnika tokom smjena u okviru radnih ciklusa. Ovaj postupak omogućava postojanje stalne relevantne baze podataka koja se može koristiti u slučajevima pojave odstupanja planiranih normi i radnih veličina proizvodnog procesa.

Proračun efektivnosti izvršen je analizom podataka iz tabela 5.1, 5.2. i 5.3. i to je prikazano u tabeli 5.4.

Tabela 5.1. Proizvodnja papir mašine u vremenskom intervalu posmatranja

Proizvodnja neto papir mašine u posmatranom periodu (tona)				
mjesec	2014.	2015.	2016.	2017.
januar		3.269	2.811	3.085
februar		2.450	2.785	2.880
mart		3.226	3.147	3.489,6
april		2.975	2.927	
maj		3.395	3.130	
jun		3.281	3.138	
jul		3.198	3.201	
avgust	3.316	3.221	3.305	
septembar	2.942	2.921	2.852	
oktobar	3.130	2.995	2.749	
novembar	2.847	2.999	3.088	
decembar	3.250	2.710	3.412	

Tabela 5.2. Parametri proizvodnje papir mašine po mjesecima za 2014. godinu

Papir mašina		Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Maj	Jun	Jul	Avg.	Sept.	Okt.	Nov.	Dec.	2014.
	broj dana	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
Mogući sati		744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744	8760
Disponibilni sati		743,5	671,5	742,5	706	712,3	712,8	743,8	742,5	711	744	714	741,5	8685
Čisti produktivni sati		666,5	617,25	695	670,7	688,7	685,2	599,5	724,2	643,2	698	621,7	700,2	8010
Vremensko iskorišćenje %		**89,6**	**91,9**	**93,6**	**95,0**	**96,7**	**96,1**	**80,61**	**97,54**	**90,25**	**93,8**	**87,1**	**94,4**	**92,23**
Zastoji održavanje		**61**	**12,75**	**8,75**	**22,5**	**17,25**	**8**	**137,2**	**11,5**	**43,25**	**18,5**	**62,25**	**20**	**423**
	GP							132						132
	SP													
	PPP	19,25		4	2					5,5	4	41,75		76,5
	mašinski kvarovi	40,75	1,25	2,75	5	3,5	7	2,75	9	23	6,5	15,25	4,75	121
	elektro kvarovi	1	2	2	1		1	2,5	2	12,5	2,5	4	7,5	37,75
	MRU, SRTP		9,5		14,5	13,75			1	2,5	5,5	1,25	7,75	62,5
Ostali zastoji		**0,5**	**0,5**	**1,5**	**14**	**31,75**	**7,25**	**0,25**	**1,5**	**9**	**0**	**6**	**2,5**	**74,75**
	media i sirovine	0,5				6,25	1		0,5	6,5		4	2,5	21,25
	para		0,5					0,25		2,5		1		4,25
	el. struja													
	voda					25,5								25,5
	vanjski izbačaj el.energije			1,5					1			1		3,5
	ostali zastoji				14		6,25							20,25
	probe													
	praznici													
	nedostatak naloga													
Zastoji papir mašina ukupno		**70,50**	**54,75**	**49**	**49,25**	**55,25**	**34,75**	**144,50**	**19,75**	**76,75**	**46,00**	**98,25**	**43,75**	**749,50**

Tabela 5.3. Parametri proizvodnje papir mašine po mjesecima za 2015. godinu

Papir mašina		Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Maj	Jun	Jul	Avg.	Sept.	Okt.	Nov.	Dec.	2015.
	broj dana	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
Mogući sati		744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744	8760
Disponibilni sati		743	654,5	744	712,3	742	715	742	743,5	719,5	737	720	743,5	8716
Čisti produktivni sati		704,2	534	729,5	664	717,7	696,5	718,2	719	664	694	689	590,5	8120
Vremensko iskorišćenje %		**94,8**	**81,6**	**98,1**	**93,2**	**796,7**	**97,4**	**96,8**	**96,7**	**92,3**	**94,2**	**95,7**	**79,4**	**93,17**
Zastoji održavanje		**10,5**	**76,25**	**6,5**	**26,5**	**2,75**	**1,25**	**4,75**	**6,5**	**25,5**	**21,7**	**11,25**	**146,7**	**340,2**
	GP												126	126
	SP													
	PPP	3,5	61,5		20,5				4	9				98,5
	mašinski kvarovi	0,75	10,5	5	3	1,75		4,25		2,8	16	10,25	15,75	70
	elektro kvarovi	5,25	0,5		2				1	12,8	2,5		1,5	25
	MRU, SRTP	1	3,75	1,5	1	1	1,25	1	2	1	3,2	1	3,5	20,75
Ostali zastoji		**1**	**17,5**	**0**	**7,75**	**2**	**5**	**2**	**0,5**	**0,5**	**7**	**0**	**0,50**	**43,75**
	Media i sirovine		0,75		7,75	2	5	2		0,5	5		0,5	23,5
	para										1,5			1,5
	el. struja								0,5					0,5
	voda													
	vanjski izbačaj el.energije	1	0,75								0,5			2,25
	Ostali zastoji		16											16
	probe													
	praznici													
	nedostatak naloga													
Zastoji papir mašina ukupno		**39,75**	**138**	**14,5**	**56**	**26,25**	**23,5**	**25,75**	**25**	**56**	**50**	**31**	**153,5**	**639,2**

Podaci vezani za zastoje se posmatraju preko:

- zastoja tehnološke prirode
  (čišćenja, prelasci s jednog na drugi proizvodni program...),
- zastoja usljed otkaza (papir mašina u potpunom otkazu
  koji zahtijeva intervenciju službe održavanja),
- ostali zastoji (vanjski ispadi uzrokovani nedostatkom medija).

Tabela 5.4. Vremensko iskorišćenje, produkcija i škart perioda prije instalacije tehničke dijagnostike

Pokazatelji proizvodnje na Papir mašini 2014 – 2015. (Period do instalacije tehničke dijagnostike)							
Mjesec		Ukupno radno vrijeme (sati)	Planirani zastoji održavanja (sati)	Stepen iskorišćenja – ukupna raspoloživost (sati)	Zastoji uzrokovani održavanjem (sati)	Izlaz iz proizvodnje (tona)	Škart PM2 (tona)
2014.	avgust	744	18	724,25	11,5	3316	26,41
	septembar	720	19	643,25	43,25	2942,5	17,51
	oktobar	744	14	698	18,5	3130,5	46
	novembar	720	14	621,75	62,25	2847,5	13,95
	decembar	744	21	700,25	20	3250,1	26,61
2015.	januar	744	42	704,25	10,5	3269,7	23,91
	februar	672	18	534	76,25	2450	27,7
	mart	744	18	729,5	6,5	3226,5	15,79
	april	720	18	664	23,5	2975,8	39,5
	maj	744	19	717,75	2,75	3395	19,83
	jun	720	18	696,5	1,25	3281,6	17,87
	jul	744	157	718,25	4	3198,3	16,4
	avgust	744	18	719	6,5	3221,6	21,76
	septembar	720	19	664	25,5	2921,9	14,66
	oktobar	744	19	694	21,75	2995,1	30,71
	novembar	720	18	689	11,25	2999,3	10,8
Ukupno:		11688	450	10917,75	345,25	49421,4	369,41

Koristeći sređene podatke iz tabele 5.4. izvršen je proračun efektivnosti proizvodnog sistema prema formuli (5.1).

5.2.1.1. Stepen efektivnosti do termina instalacije tehničke dijagnostike

Ukupna efektivnost (*Overall Equipment Effectiveness*):

$$OEE_1 = EA \cdot PE \cdot RQ$$

$$EA = \frac{ukupno\ raspoloživo\ vrijeme - zastoji}{ukupno\ raspoloživo\ vrijeme} = \frac{10918-345{,}25}{10918} = 96{,}83\% \quad (5.2)$$

$$PE = \frac{izlazna\ količina \cdot idealno\ vrijeme\ izrade}{ukupno\ raspoloživo\ vrijeme - zastoji} = \frac{49421{,}4 \cdot 0{,}211}{10918-345{,}25} = 98{,}63\% \quad (5.3)$$

Idealno vrijeme izrade:

$$i_{vr} = \frac{ukupna\ raspoloživost\ pri\ max.proizvodnji}{maksimalna\ proizvodnja} = \frac{717{,}75}{3395} = 0{,}211 \quad (5.4)$$

$$RQ = \frac{izlazna\ količina - škart}{izlazna\ količina} = \frac{49421{,}4-369{,}41}{49421{,}4} = 99{,}25\% \quad (5.5)$$

Prema rezultatima izraza 5.2, 5.3 i 5.5 ukupna efektivnost iznosi:

$$OEE_1 = EA \cdot PE \cdot RQ = 96{,}83 \cdot 98{,}63 \cdot 99{,}25 = 94{,}78\%.$$

Na osnovu dobijenih rezultata ukupna efektivnost proizvodnog sistema do trenutka implementacije tehničke dijagnostike na PM2 iznosila je 94,78%. Ukoliko govorimo o uticaju stepena efektivnosti proizvodnog sistema papir mašine na finansijske pokazatelje proizvodnog procesa možemo uobziriti podatak da se tokom jednog sata rada papir mašine prosječno proizvede 4,8 tona papira prosječne grube marže (JM) od 290 €/t. Ukoliko se pomenuti posmatrani period od 16 mjeseci definiše kao radni interval sa dnevnim prosjekom ukupne vremenske raspoloživosti od 22 sata i stepen efektivnosti sistema PM2 podigne samo za 0,1%, to bi značilo:

0,1 x 22 sata x 4,8 tona produkcije/satu x 12 mjeseci = 126,72 t/godišnje,

što je dovoljan razlog za ulaganje značajnih napora u optimizaciju procesa koji obezbjeđuju veću pouzdanost i veću efektivnost sistema papir mašine.

5.2.2. Efektivnost realnog sistema nakon instalacije tehničke dijagnostike

Kao i u slučaju istraživanja efektivnosti za period do instalacije tehničke dijagnostike, isti postupak koristimo i za ocjenu stanja nakon uvođenja novog sistema praćenja stanja. Bitno je istaći da se praćenje radnih parametara odnosi na dva jednaka vremenska intervala s istim radnim rutinama. Kao značajnija karakteristika odstupanja u okviru ovog posmatranog perioda mogu se istaći dva vremenski duža remontna intervala (januar i decembar 2016. godine), ali se oni odnose na realizaciju investicionih aktivnosti, odnosno nisu rezultat otkaza postrojenja usljed aktivnosti službe održavanja.

Proračun efektivnosti izvršen je sabiranjem podataka iz tabela 5.1, 5.5. i 5.6 i to je prikazano u tabeli 5.7.

Tabela 5.5. Parametri proizvodnje papir mašine po mjesecima za 2016. godinu

Papir mašina		Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Maj	Jun	Jul	Avg.	Sept.	Okt.	Nov.	Dec.	2016.
	broj dana	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
Mogući sati		744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744	8760
Disponibilni sati		743,5	672	744	717,8	744	720	737,3	744	718	744	720	743	8747
Čisti produktivni sati		522,2	619	710	640,5	699,7	691	705,7	724,7	630,2	609	672,5	732,5	8057
Vremensko iskorišćenje %		**83,7**	**92,1**	**95,4**	**89,2**	**94,1**	**96,17**	**95,73**	**97,41**	**87,8**	**81,9**	**93,4**	**98,6**	**92,11**
Zastoji održavanje		**122,2**	**15,5**	**8,75**	**48**	**4,75**	**14,25**	**13,75**	**5**	**59,7**	**112,5**	**25,75**	**2,5**	**418**
	GP	102									104			206
	SP													
	PPP							6		3	7	14,5		30
	mašinski kvarovi	2	5,25	2	31,25	1	6	0,5		4,5	1,5	3,75	2,5	60
	elektro kvarovi	6,75	1	1,75	6	1		7,5	5	33,8		3		66,25
	MRU, SRTP	1,5	9,25	5	10,75	2,75	8			18,5		4,5		60,75
Ostali zastoji		**0,5**	**0**	**1**	**2,25**	**0**	**0**	**6,75**	**0**	**2**	**0**	**0**	**1**	**13,5**
	Media i sirovine	0,5		1	2,25			6,75		2			1	13,5
	para													
	el. energija													
	voda													
	vanjski izbačaj el.energije													
	ostali zastoji													
	probe													
	praznici													
	nedostatak naloga													
Zastoji papir mašina ukupno		**121,7**	**53**	**34**	**79,5**	**44,25**	**28,25**	**38,25**	**19,25**	**89,75**	**135**	**47,75**	**11,5**	**702,2**

Tabela 5.6. Parametri proizvodnje papir mašine po mjesecima za posmatrani period u 2017. godini

Papir mašina		Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Maj	Jun	Jul	Avg.	Sept.	Okt.	Nov.	Dec.	2017.
	broj dana	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
Mogući sati		744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744	8760
Disponibilni sati		742,5	671,5	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744	...
Čisti produktivni sati		693,7	639	732	720	744	720	744	744	720	744	720	744	...
Vremensko iskorišćenje %		**93,4**	**95,2**	**98,4**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**95,3**
Zastoji održavanje		**22,75**	**8,75**	**2,5**										**34**
	GP													
	SP													
	PPP	18,5	2											
	mašinski kvarovi	3,75	5,25	1,5										
	elektro kvarovi		1	1										
	MRU, SRTP	0,5	0,5											
Ostali zastoji		**1,5**	**0,5**	**0**										**2**
	Media i sirovine	1,5	0,5	0										
	para													
	el. energija													
	voda													
	vanjski izbačaj el.energije													
	ostali zastoji													
	probe													
	praznici													
	nedostatak naloga													
Zastoji papir mašina ukupno		**50,25**	**41**	**12**										**…**

Tabela 5.7. Vremensko iskorišćenje, produkcija i škart perioda nakon instalacije tehničke dijagnostike

Pokazatelji proizvodnje na Papir mašini 2015 – 2017. (Period nakon instalacije tehničke dijagnostike)							
Mjesec		Ukupna raspoloživost (sati)	Planirani zastoji održavanja (sati)	Stepen iskorišćenja – ukupno radno vrijeme(sati)	Zastoji uzrokovani održavanjem (sati)	Izlaz iz proizvodnje (tona)	Škart PM2 (tona)
2015.	Decembar	744	19	590,5	20,75	2710,8	21,33
2016.	Januar	744	18	622,25	10,25	2811,9	12,706
	Februar	696	17	643	15,5	2785,8	20,159
	Mart	744	21	710	9,75	3147,7	22,24
	April	720	16	640,5	48	2927,2	10,8
	Maj	744	19	699,75	4,75	3130,9	13,07
	Juni	720	15	691,75	14,25	3138,5	17,547
	Juli	744	16	705,75	14,25	3201,5	19,774
	Avgust	744	18	724,75	5	3305,8	15,141
	Septembar	720	19	630,25	59,75	2852,8	14,042
	Oktobar	744	233	609	8,5	2749,9	9,7
	Novembar	720	18	672,25	25,75	3088,2	16,6
	Decembar	744	19	732,5	2,5	3412,9	14,7
2017.	Januar	744	18	693,75	22,75	3085	12
	Februar	672	18	631	8,75	2880	13
	Mart	744	19	740	2,5	3489,6	11,4
Ukupno:		11688	503	10736,5	273	48718,5	244,2

Koristeći sređene podatke iz tabele 5.7. izvršen je proračun efektivnosti proizvodnog sistema prema formuli (5.1).

5.2.2.1. Stepen efektivnosti nakon termina instalacije tehničke dijagnostike

Ukupna efektivnost (*Overall Equipment Effectiveness*):

$$OEE_2 = EA \cdot PE \cdot RQ$$

$$EA = \frac{ukupno\ raspoloživo\ vrijeme - zastoji}{ukupno\ raspoloživo\ vrijeme} = \frac{10736{,}5-273}{10736{,}5} = 97{,}46\% \qquad (5.6)$$

$$PE = \frac{izlazna\ količina \cdot idealno\ vrijeme\ izrade}{ukupno\ raspoloživo\ vrijeme - zastoji} = \frac{48718{,}5 \cdot 0{,}212}{10736{,}5-273} = 98{,}70\% \qquad (5.7)$$

Idealno vrijeme izrade:

$$i_{vr} = \frac{ukupna\ raspoloživost\ pri\ max.proizvodnji}{maksimalna\ proizvodnja} = \frac{740}{3489,6} = 0,212 \quad (5.8)$$

$$RQ = \frac{izlazna\ količina - škart}{izlazna\ količina} = \frac{48718,5-244,2}{48718,5} = 99,49\% \quad (5.9)$$

Prema rezultatima izraza 5.6, 5.7 i 5.9 ukupna efektivnost iznosi:

$$OEE_2 = EA \cdot PE \cdot RQ = 97,46 \cdot 98,70 \cdot 99,49 = 95,70\%.$$

Prema prethodnom proračunu ukupna efektivnost nakon provedenih investicionih aktivnosti iznosi 95,70%, što u odnosu na ukupnu efektivnost prije realizacije od 94,78% predstavlja razliku *ΔOEE* od:

$$\Delta OEE = OEE_2 - OEE_1 = 95,70 - 94,78 = 0,92\%\ ,$$

tj. povećanje ukupne efektivnosti proizvodnog sistema za 0,92%. Preračunato na proizvodnju (*T*/godina) to iznosi:

T = 0,92× 21,71 sati × 4,8 tona produkcije/satu × 12 mjeseci = 1150,4 t/godišnje,

gdje je:

- 21,71 sati – mjesečni prosjek broja ukupnih radnih sati za posmatrani period od 16 mjeseci rada sa monitoringom (instaliranom tehničkom dijagnostikom),
- 4,8 tona – prosječna proizvodnja papir mašine za sat vremena rada.

Ukoliko se računa sa prosječnom GM od 290 €/toni proizvedenog papira dobija se godišnja ušteda (*U*):

$$U = GM * T = 290\frac{€}{t} * 1150,4t = 333.616\frac{€}{god}\ ,$$

što predstavlja zavidan stepen povećanja efektivnosti u odnosu na uložena sredstva za instalaciju tehničke dijagnostike kritičnog mjesta u proizvodnom sistemu.

5.3. Istraživanje i analiza operativne gotovosti i pouzdanosti proizvodnog sistema papir mašine

5.3.1. Analiza operativne gotovosti

Veoma važan pokazatelj rada i spremnosti realnog sistema je gotovost (G) proizvodnog sistema, koju možemo definisati kao vjerovatnoću da će realni sistem uspješno djelovati u određenom vremenskom presjeku uz određene realne uslove okoline. Gotovost realnog sistema se izračunava sljedećom matematičkom relacijom [17]:

$$G(t) = \frac{\bar{t}_i}{\bar{t}_i + \bar{t}_o}$$

gdje je:

$\bar{t}_i$ – srednje vrijeme sistema u ispravnom stanju,

$\bar{t}_o$ – srednje vrijeme sistema u otkazu.

Gotovost je eksponencijalna funkcija vremena u radu i otkazu te se može iskazati kao:

$$G(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \cdot e^{-(\lambda+\mu)\cdot t}, \tag{5.10}$$

gdje je:

$\mu = \frac{1}{\bar{t}_o}$ – intenzitet stanja u radu,

$\lambda = \frac{1}{\bar{t}_i}$ – intenzitet stanja u otkazu ili intenzitet otkaza.

Ukoliko izračunamo graničnu vrijednost funkcije $G(t)$ dobijemo koeficijent gotovosti k_G odnosno:

$$k_G \lim G(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} = \frac{\bar{t}_i}{\bar{t}_i + \bar{t}_o} = k_{OG}. \tag{5.11}$$

Kada $t \to \infty$ dobijamo operativnu gotovost (OG) i to kao funkciju vremena kada je sistem u radu i otkazu:

$$OG(t) = \lim G(t) = \frac{\bar{t}_r}{\bar{t}_r + \bar{t}_o} = k_{OG}, \tag{5.12}$$

gdje je:

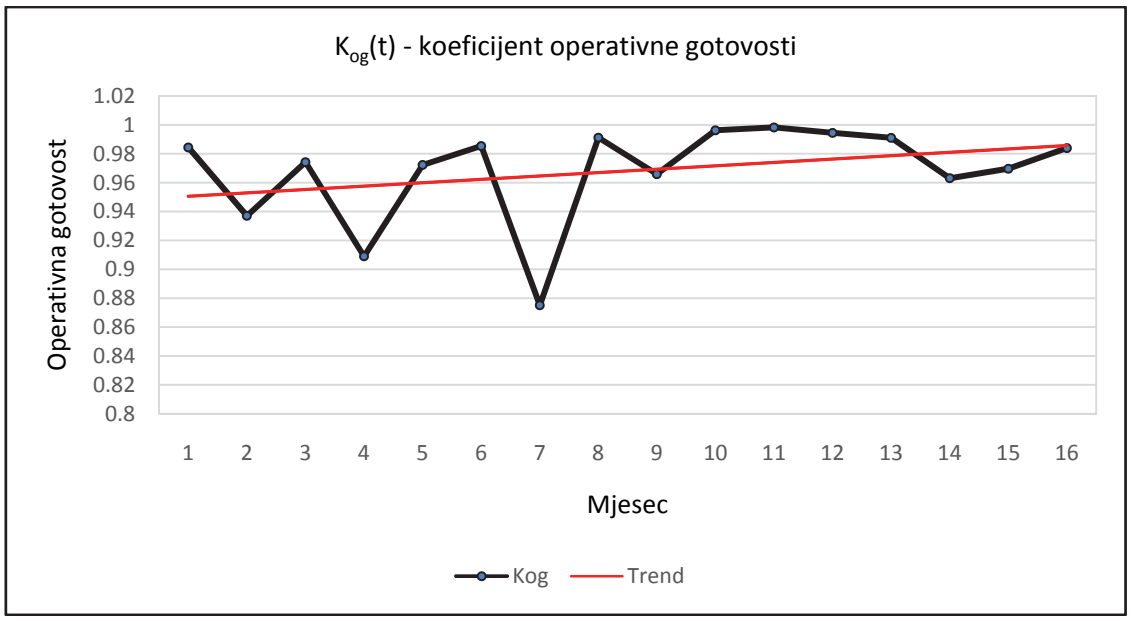
$\bar{t}_r$ – vrijeme sistema u radu,

$\bar{t}_o$ – vrijeme sistema u otkazu.

Presjek stanja realnog sistema analiziran je za period prije trenutka instalacije sistema tehničke dijagnostike i k_{OG} u tom trenutku kao i k_{OG} u periodu nakon realizacije pomenutih aktivnosti. Analiza k_{OG} prije realizacije aktivnosti data je u tabeli 5.8. i na grafički na slici 5.18.

Tabela 5.8. Koeficijent operativne gotovosti do trenutka instalacije tehničke dijagnostike

Mjesec		Ukupna raspoloživost (sati)	t_{ri} vrijeme sistema u radu (sati)	t_{oi} vrijeme sistema u otkazu (sati)	$t_{ri} + t_{oi}$	$k_{OG}(t)$ koeficijent operativne gotovosti	Broj otkaza
2014.	avgust	744	724,25	11,5	735,75	0,984369691	8
	septembar	720	643,25	43,25	686,5	0,936999272	12
	oktobar	744	698	18,5	716,5	0,974180042	9
	novembar	720	621,75	62,25	684	0,908991228	17
	decembar	744	700,25	20	720,25	0,972231864	11
2015.	januar	744	704,25	10,5	714,75	0,985309549	7
	februar	672	534	76,25	610,25	0,875051209	11
	mart	744	729,5	6,5	736	0,991168478	3
	april	720	664	23,5	687,5	0,965818182	3
	maj	744	717,75	2,75	720,5	0,996183206	2
	juni	720	696,5	1,25	697,75	0,998208527	2
	juli	744	718,25	4	722,25	0,994461751	3
	avgust	744	719	6,5	725,5	0,991040662	5
	septembar	720	664	25,5	689,5	0,963016679	8
	oktobar	744	694	21,75	715,75	0,969612295	8
	novembar	720	689	11,25	700,25	0,983934309	4
Ukupno:		11688	10917,75	345,25	11263		113

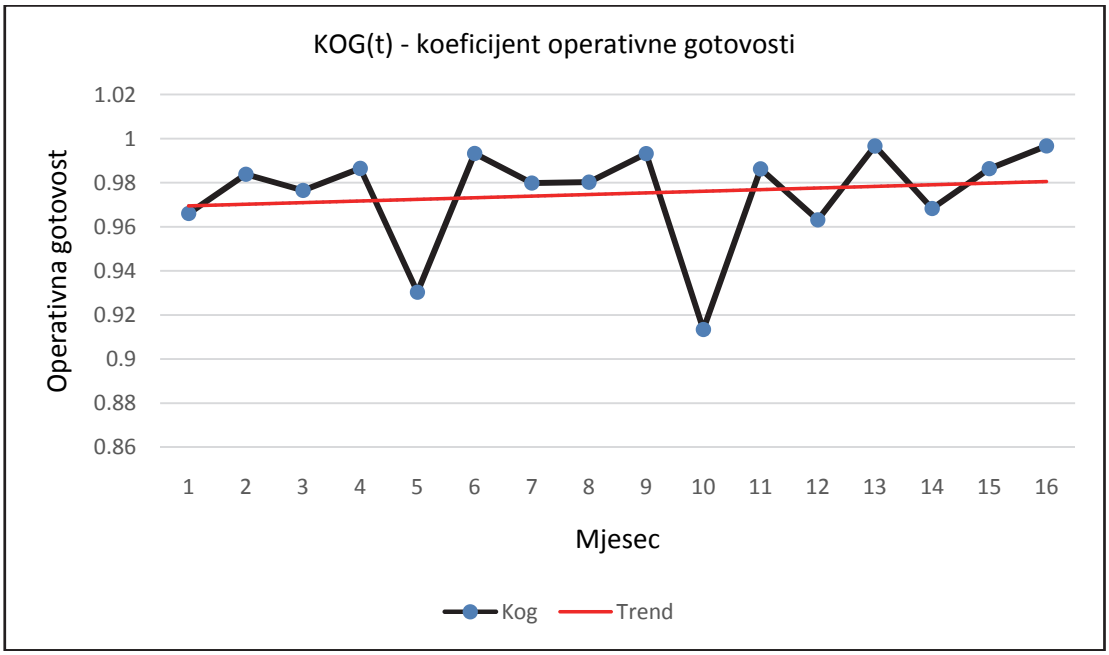


Slika 5.18. Grafikon koeficijenta operativne gotovosti do instalacije tehničke dijagnostike

Analiza k_{OG} nakon realizacije aktivnosti data je u tabeli 5.9. i na grafički na slici 5.19.

Tabela 5.9. Koeficijent operativne gotovosti nakon instalacije tehničke dijagnostike

Mjesec		Ukupna raspoloživost (sati)	t_{ri} vrijeme sistema u radu (sati)	t_{oi} vrijeme sistema u otkazu (sati)	$t_{ri} + t_{oi}$	$k_{OG}(t)$ koeficijent operativne gotovosti	Broj otkaza
2014.	avgust	744	724,25	11,5	735,75	0,984369691	8
	septembar	720	643,25	43,25	686,5	0,936999272	12
	oktobar	744	698	18,5	716,5	0,974180042	9
	novembar	720	621,75	62,25	684	0,908991228	17
	decembar	744	700,25	20	720,25	0,972231864	11
2015.	januar	744	704,25	10,5	714,75	0,985309549	7
	februar	672	534	76,25	610,25	0,875051209	11
	mart	744	729,5	6,5	736	0,991168478	3
	april	720	664	23,5	687,5	0,965818182	3
	maj	744	717,75	2,75	720,5	0,996183206	2
	juni	720	696,5	1,25	697,75	0,998208527	2
	juli	744	718,25	4	722,25	0,994461751	3
	avgust	744	719	6,5	725,5	0,991040662	5
	septembar	720	664	25,5	689,5	0,963016679	8
	oktobar	744	694	21,75	715,75	0,969612295	8
	novembar	720	689	11,25	700,25	0,983934309	4
Ukupno:		11688	10917,75	345,25	11263		113



Slika 5.19. Grafikon koeficijenta operativne gotovosti nakon instalacije tehničke dijagnostike

5.3.1.1. Operativna gotovost do trenutka instalacije tehničke dijagnostike

Operativna gotovost $OG(t)$:

$$OG(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda+\mu)\cdot t}, \tag{5.13}$$

$$\mu = \frac{1}{t_o} = \frac{1}{21{,}58} = 0{,}0463 \tag{5.14}$$

$$t_o = \frac{\Sigma t_{oi}}{n} = \frac{345{,}25}{16} = 21{,}58 \tag{5.15}$$

$$\lambda = \frac{1}{t_r} = \frac{1}{682{,}35} = 0{,}0014655 \tag{5.16}$$

$$t_r = \frac{\Sigma t_{ri}}{n} = \frac{10917{,}75}{16} = 682{,}35 \tag{5.17}$$

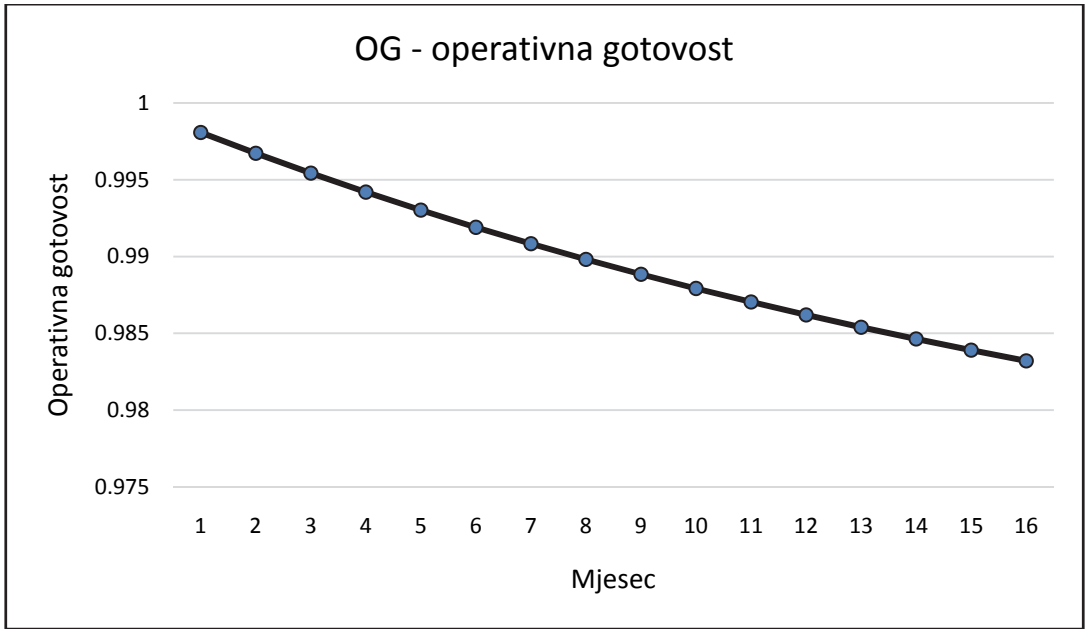
gdje je:

$n = 16$ – broj mjeseci.

$$OG(t) = \frac{0{,}0463}{0{,}0463 + 0{,}0014655} + \frac{0{,}0014655}{0{,}0014655 + 0{,}0463} \cdot e^{-(0{,}0014655+0{,}0463)t}$$

Tabela 5.10. Operativna gotovost do trenutka instalacije tehničke dijagnostike

Mjesec		Ukupna raspoloživost (sati)	t_{ri} vrijeme sistema u radu (sati)	t_{oi} vrijeme sistema u otkazu (sati)	$t_{ri} + t_{oi}$	$k_{OG}(t)$ koeficijent operativne gotovosti	Broj otkaza
2014.	avgust	744	724,25	11,5	735,75	0,984369691	8
	septembar	720	643,25	43,25	686,5	0,936999272	12
	oktobar	744	698	18,5	716,5	0,974180042	9
	novembar	720	621,75	62,25	684	0,908991228	17
	decembar	744	700,25	20	720,25	0,972231864	11
2015.	januar	744	704,25	10,5	714,75	0,985309549	7
	februar	672	534	76,25	610,25	0,875051209	11
	mart	744	729,5	6,5	736	0,991168478	3
	april	720	664	23,5	687,5	0,965818182	3
	maj	744	717,75	2,75	720,5	0,996183206	2
	juni	720	696,5	1,25	697,75	0,998208527	2
	juli	744	718,25	4	722,25	0,994461751	3
	avgust	744	719	6,5	725,5	0,991040662	5
	septembar	720	664	25,5	689,5	0,963016679	8
	oktobar	744	694	21,75	715,75	0,969612295	8
	novembar	720	689	11,25	700,25	0,983934309	4
Ukupno:		11688	10917,75	345,25	11263		113



Slika 5.20. Grafikon operativne gotovosti do trenutka instalacije tehničke dijagnostike

5.3.1.2. Operativna gotovost nakon trenutka instalacije tehničke dijagnostike

Prema (5.13):

$$\mu = \frac{1}{t_o} = \frac{1}{17{,}06} = 0{,}0586 \tag{5.18}$$

$$t_o = \frac{\Sigma t_{oi}}{n} = \frac{273}{16} = 17{,}06 \tag{5.19}$$

$$\lambda = \frac{1}{t_r} = \frac{1}{671{,}03} = 0{,}00149 \tag{5.20}$$

$$t_r = \frac{\Sigma t_{ri}}{n} = \frac{10736{,}5}{16} = 671{,}03 \tag{5.21}$$

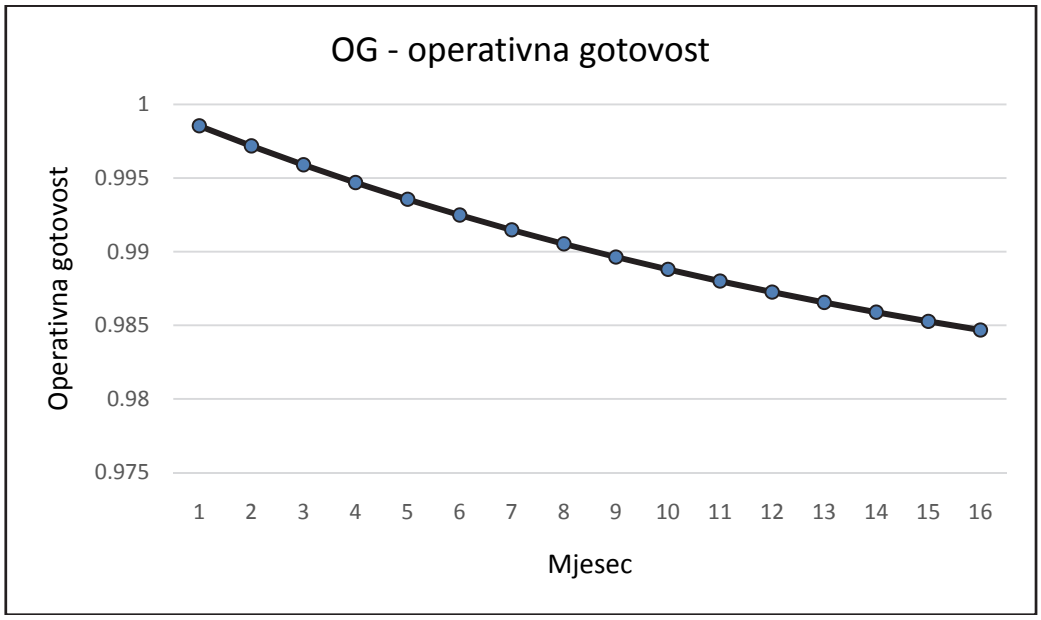
gdje je:

$n = 16$ – broj mjeseci.

$$OG(t) = \frac{0{,}0586}{0{,}0586 + 0{,}00149} + \frac{0{,}00149}{0{,}00149 + 0{,}0586} \cdot e^{-(0{,}00149+0{,}0586)t}$$

Tabela 5.11. Operativna gotovost nakon trenutka instalacije tehničke dijagnostike

Mjesec		t_{ri} vrijeme sistema u radu (sati)	t_{oi} vrijeme sistema u otkazu (sati)	$OG(t)$ Operativna gotovost	Broj otkaza
2015.	Decembar	590	20,75	0,998544242	16
2016.	Januar	622,25	10,25	0,9971828	9
	Februar	643	15,5	0,995900759	9
	Mart	710	9,75	0,994693486	9
	April	640,5	48	0,993556621	10
	Maj	699,75	4,75	0,992486059	8
	Juni	691,75	14,25	0,991477932	8
	Juli	705,75	14,25	0,9905286	4
	Avgust	724,75	5	0,989634632	1
	Septembar	630,25	59,75	0,988792801	11
	Oktobar	609	8,5	0,988000066	4
	Novembar	672,25	25,75	0,987253564	10
	Decembar	732,5	2,5	0,986550597	2
2017.	Januar	693,75	22,75	0,985888628	9
	Februar	631	8,75	0,985265265	7
	Mart	740	2,5	0,984678256	3
Ukupno:		10736,5	273		120



Slika 5.21. Grafikon operativne gotovosti nakon trenutka instalacije tehničke dijagnostike

5.3.2. Analiza pouzdanosti proizvodnog sistema

Definisanje ponašanja proizvodnog sistema uz održavanje radnih karakteristika pod uticajem mnogobrojnih faktora koji utiču na promjene stanja sistema (a koje su u vezi sa angažmanom službe održavanja), predmet su analize i istraživanja pouzdanosti. Prema naučnoj terminologiji, pouzdanost predstavlja vjerovatnoću da će sistem (element, komponenta ili proizvod) raditi bez otkaza, u određenom vremenskom intervalu, u tačno određenim uslovima i sa definisanim performansama. Kvantifikacija pouzdanosti je moguća tek nakon evidentiranja stanja otkaza. Cilj dobijanja podatka o stepenu pouzdanosti je predviđanje trenutka otkaza. Pouzdanost je analizirana sumarizacijom podataka za dva vremenska intervala praćenja – prije i nakon instalacije sistema tehničke dijagnostike.

5.3.2.1. Analiza pouzdanosti proizvodnog sistema do trenutka instalacijetehničke dijagnostike

Za analizu elemenata pouzdanosti korišteni su podaci rada papir mašine: sati rada proizvodnog sistema, zastoji uzrokovani održavanjem i sati rada do pojave stanja u otkazu. Tabela 5.12. prikazuje rezultate analize pouzdanosti.

Tabela 5.12. Istraživanje pouzdanosti realnog sistema do termina instalacije tehničke dijagnostike

Mjesec		Ukupna raspoloživost (sati)	Planirani zastoji održavanja (sati)	Stepen iskorišćenja – ukupno radno vrijeme (sati)	Otkazi uzrokovani održavanjem (sati)	Sati rada do pojave stanja u otkazu
2014.	avgust	744	18	724,25	11,5	62,9
	septembar	720	19	643,25	43,25	14,8
	oktobar	744	14	698	18,5	37,7
	novembar	720	14	621,75	62,25	9,9
	decembar	744	21	700,25	20	35
2015	januar	744	42	704,25	10,5	67
	februar	672	18	534	76,25	7
	mart	744	18	729,5	6,5	112,2
	april	720	18	664	23,5	28,2
	maj	744	19	717,75	2,75	261
	juni	720	18	696,5	1,25	557,2
	juli	744	157	718,25	4	179,5
	avgust	744	18	719	6,5	110,6
	septembar	720	19	664	25,5	26
	oktobar	744	19	694	21,75	31,9
	novembar	720	18	689	11,25	61,2
Ukupno:		11688	450	10917,75	345,25	31,6

Analizu postavljene hipoteze predstavlja provjera zakona raspodjele, provjera ispravnosti postavljene hipoteze, definisanje parametara zakona raspodjele, prikaz dijagrama funkcije gustine vremena rada do pojave stanja u otkazu.

5.3.2.1.1. Pretpostavka broj 1. – provjera normalne raspodjele

Pretpostavimo da se vrijeme rada opreme do pojave stanja u otkazu pokorava normalnoj raspodjeli.

Iz tabele 5.12. srednja vrijednost sati rada do pojave stanja u otkazu (SV) iznosi 31,6 sati. Disperzija za posmatrani broj uzoraka:

$$\sigma_1^2 = \frac{1}{16}[\left(\bar{x}_1 - 11{,}5\right)^2 + \left(\bar{x}_1 - 43{,}25\right)^2 + \left(\bar{x}_1 - 18{,}5\right)^2 + \left(\bar{x}_1 - 62{,}25\right)^2 + \left(\bar{x}_1 - 20\right)^2 + \left(\bar{x}_1 - 10{,}5\right)^2 +$$
$$+\left(\bar{x}_1 - 76{,}25\right)^2 + \left(\bar{x}_1 - 6{,}5\right)^2 + \left(\bar{x}_1 - 23{,}5\right)^2 + \left(\bar{x}_1 - 2{,}75\right)^2 + \left(\bar{x}_1 - 1{,}25\right)^2 + \left(\bar{x}_1 - 4\right)^2 +$$
$$+\left(\bar{x}_1 - 6{,}5\right)^2 + \left(\bar{x}_1 - 25{,}5\right)^2 + \left(\bar{x}_1 - 21{,}75\right)^2 + \left(\bar{x}_1 - 11{,}25\right)^2], \tag{5.22}$$

$$\sigma_1^2 = \frac{1}{16}[404{,}01 + 135{,}7 + 171{,}6 + 939{,}4 + 134{,}5 + 445{,}2 + 1993{,}6 + 630 + 65{,}6 + 832{,}3 + 921{,}1 +$$
$$+ 761{,}7 + 630 + 37{,}2 + 97 + 414{,}1],$$

$$\sigma_1^2 = 538{,}31 .$$

Disperzija: $\sigma_1 = 23{,}2$.

5.3.2.1.1.1. Testiranje raspodjele: Kolmogorov – Smirnovtest (K-S test) za period do instalacije tehničke dijagnostike

Smisao provođenja ovog testa je u tome da se izvrši provjera da li podaci vezani za stanje parametara sistema pripadaju raspodjeli pretpostavljenoj u prethodno postavljenoj hipotezi. Ovaj test se primjenjuje samo za kontinualne raspodjele i oslanja se na ocjeni maksimalne razlike između vrijednosti kumulativne funkcije posmatranih podataka stanja realnog sistema ($Fo(t_i)$) i vrijednosti kumulativne funkcije naznačene u pretpostavljenoj raspodjeli ($F_E(t_i)$). Ukoliko je razlika kumulativnih funkcija:

$$D_i=|F_o(t_i) - F_E(t_i)|,\ i = 1,2,\ldots n, \tag{5.23}$$

tada maksimalna vrijednost razlike kumulativnih funkcija *Dmax* treba da bude manja od kritične vrijednosti D_{CR}[42]:

$$D_{\max} > D_{CR}$$

i u tom slučaju postavljena hipoteza se može prihvatiti. Vrijednosti D_{CR} date su tabelarno. Analiza sati rada realnog sistema do pojave stanja u otkazu (t_i) te računanjem $Fo(t_i)$ i $F_E(t_i)$ predstavljena je u tabeli 5.13.

Tabela 5.13. Numeričke vrijednosti pokazatelja pouzdanosti normalne raspodjele instalacije tehničke dijagnostike

Mjeseci n_i	t_i– sati rada do pojave stanja u otkazu	$F_o(t_i) = n_i / n$	$F_E(t_i) = (t_i - t)/\sigma_1$	$D_i = \lvert F_o - F_E \rvert$
1	62,9	0,0625	1,34	1,28
2	14,8	0,125	0,75	0,85
3	37,7	0,1875	0,26	0,07
4	9,9	0,25	0,93	1,18
5	35	0,3125	0,14	0,16
6	67	0,375	1,52	1,15
7	7	0,4375	1,06	1,49
8	112,2	0,5	3,47	2,97
9	28,2	0,5625	0,14	0,70
10	261	0,625	9,88	9,26
11	557,2	0,6875	22,65	21,96
12	179,5	0,75	6,37	5,62
13	110,6	0,8125	3,4	2,59
14	26	0,875	0,24	1,11
15	31,9	0,9375	0,01	0,92
16	61,2	1	1,27	0,27

Prema tabeli 5.13 maksimalna razlika *Dmax* = 21,96 dok je D_{CR} = 0,328 prema tabličnim vrijednostima za K-S test za 16 mjerenja i faktor značajnosti 0,05 (prilog 7. – Testiranje pouzdanosti Zeljković, Papić). Kako je:

$$D_{\max} > D_{CR}\ , \tag{5.24}$$

početnu hipotezu treba odbaciti odnosno analizirani parametri realnog sistema ne odgovaraju normalnoj raspodjeli.

5.3.2.1.2. Pretpostavka broj 2. – provjera eksponencijalne raspodjele

Pretpostavimo da se vrijeme rada opreme do pojave stanja u otkazu pokorava eksponencijalnoj raspodjeli. Intenzitet otkaza (λ):

$$\lambda = \frac{1}{SV} = \frac{1}{31,6} = 0,03164 . \tag{5.25}$$

Funkcija gustine vjerovatnoće pojavestanja u otkazu – $f(t)$:

$$F_E(t_i) = \lambda \cdot e^{-(\lambda)\cdot t_i} = 0,03164 \cdot e^{-(0,03164)\cdot t_i} . \tag{5.26}$$

Kumulativna funkcija gustine pojave stanja u radu – funkcija pouzdanosti:

$$R(t) = e^{-(\lambda)\cdot t} = e^{-(0,03164)\cdot t} . \tag{5.27}$$

Analiza sati rada realnog sistema do pojave stanja u otkazu (t_i) te proračun $F_o(t_i)$ i $F_E(t_i)$ predstavljen je u tabeli 5.14.

Tabela 5.14. Numeričke vrijednosti pokazatelja pouzdanosti eksponencijalne raspodjele do instalacije tehničke dijagnostike

Mjeseci n_i	t_i– zastoji	$F_o(t_i) = n_i / n$	$F_E(t_i) = \lambda \cdot e^{-(\lambda)n_i}$	$D_i = \lvert F_o - F_E \rvert$
1	62,9	0,0625	0,031	0,032
2	14,8	0,125	0,030	0,095
3	37,7	0,1875	0,029	0,159
4	9,9	0,25	0,028	0,222
5	35	0,3125	0,027	0,285
6	67	0,375	0,026	0,349
7	7	0,4375	0,025	0,412
8	112,2	0,5	0,025	0,475
9	28,2	0,5625	0,024	0,539
10	261	0,625	0,023	0,602
11	557,2	0,6875	0,022	0,665
12	179,5	0,75	0,022	0,728
13	110,6	0,8125	0,021	0,792
14	26	0,875	0,020	0,855
15	31,9	0,9375	0,020	0,918
16	61,2	1	0,019	0,981

Prema tabeli 5.14 maksimalna razlika *Dmax* = 0,981 dok je D_{CR} = 0,328 prema tabličnim vrijednostima za K-S test za 16 mjerenja i faktor značajnosti 0,05 (prilog 7. – Testiranje pouzdanosti Zeljković, Papić). Kako je:

$$D_{\max} > D_{CR} , \tag{5.28}$$

početnu pretpostavku treba odbaciti odnosno analizirani parametri realnog sistema se ne pokoravaju eksponencijalnoj raspodjeli.

5.2.2.1.3. Pretpostavka broj 3. – provjera Vejbulove raspodjele

Pretpostavimo da se vrijeme rada opreme do pojave stanja u otkazu pokorava premaVejbulovoj (*Weibull*) raspodjeli. Vejbulova funkcija gustine raspodjele je:

$$f(t)=\frac{\beta}{\eta}\cdot\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1}\cdot e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}}, \tag{5.29}$$

gdje je:

$f(t)\geq 0, t\geq\gamma$ – funkcija gustine raspodjele,
$\beta>0$ – parametar oblika,
$\eta>0$ – parametar razmjere,
$-\infty<\gamma<+\infty$ – parametar položaja troparametarske raspodjele.

Kako je:

$$f(t)=\lambda(t)\cdot R(t), \tag{5.30}$$

uočavamo sljedeće veličine:

$$\lambda(t)=\frac{\beta}{\eta}\cdot\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \text{ – intenzitet otkaza,} \tag{5.31}$$

$$R(t)=e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}} \text{ – pouzdanost.} \tag{5.32}$$

Vejbulova raspodjele za slučaj dvoparametarske raspodjele je:

$$F(t)=1-R(t)=1-e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}}. \tag{5.33}$$

Tabela 5.15. Koncept grafičkog određivanja parametara Vejbulovom (Weibull) raspodjele za interval do instalacije tehničke dijagnostike

Mjeseci n_i	Interval sati (h)	Sredina intervala sati (h)	t_i– broj stanja u radu	Kumulativni broj stanja u radu	Kumulativna vjerovatnoća $F(t)$
1	0 ÷ 744	372	62,9	62,9	0,039
2	744 ÷ 1464	1104	14,8	77,7	0,048
3	1464 ÷ 2208	1836	37,7	115,4	0,071
4	2208 ÷ 2928	2568	9,9	125,3	0,078
5	2928 ÷ 3672	3300	35	160,3	0,1
6	3672 ÷ 4416	4044	67	227,3	0,141
7	4416 ÷ 5088	4752	7	234,3	0,146
8	5088 ÷ 5832	5460	112,2	346,5	0,216
9	5832 ÷ 6552	6192	28,2	374,7	0,233
10	6552 ÷ 7296	6924	261	635,7	0,396
11	7296 ÷ 8016	7656	557,2	1192,9	0,744
12	8016 ÷ 8760	8388	179,5	1372,4	0,856
13	8760 ÷ 9504	9132	110,6	1483	0,925
14	9504 ÷ 10224	9864	26	1509	0,941
15	10224 ÷ 10968	10596	31,9	1540,9	0,961
16	10968 ÷ 11688	11328	61,2	1602,1	1

Tabela 5.16. Tabelarni koncept analitičkog određivanja parametara za interval do instalacije tehničke dijagnostike

Mjeseci n_i	$X_i = \ln(t)$	$Y_i = \ln\ln 1/(1-F(t))$	X_i^2	$Xi \cdot Yi$
1	5,92	-2,53776	35,0464	-15,0235
2	7,01	-2,03939	49,1401	-14,2961
3	7,52	-1,76733	56,5504	-13,2903
4	7,85	-1,13021	61,6225	-8,87219
5	8,10	-0,64257	65,61	-5,20481
6	8,30	-0,54504	68,89	-4,52383
7	8,47	-0,44838	71,7409	-3,79782
8	8,61	-0,35787	74,1321	-3,08124
9	8,73	-0,02751	76,2129	-0,2402
10	8,84	0,043178	78,1456	0,381697
11	8,94	0,49778	79,9236	4,450153
12	9,03	0,647387	81,5409	5,845909
13	9,12	0,732099	83,1744	6,676746
14	9,20	0,816852	84,64	7,515042
15	9,27	1,131755	85,9329	10,49136
16	9,34			

Parametri Vejbulovog modela su:

$$\beta = \frac{\sum X_i \cdot Y_i - 1/n \sum Y_i \cdot \sum X_i}{\sum X_i^2 - 1/n. \sum X_i \cdot \sum X_i} = \frac{-120{,}918 - 1/15 \cdot (-16{,}62 \cdot 124{,}9)}{1052{,}256 - 1/15 \cdot (124{,}9 \cdot 124{,}9)} = 1{,}42 \tag{5.34}$$

$$\eta = \exp\left[-\frac{1/n.\left(\sum Y_i - \beta \cdot \sum X_i\right)}{\beta}\right] = \exp\left[-\frac{1/15(-16{,}62 - 1{,}42 \cdot 124{,}9)}{1{,}42}\right] = 8955{,}293 \tag{5.35}$$

Tabela 5.17. Test Kolmogorov – Smirnova za period do instalacije tehničke dijagnostike

Mjeseci n_i	$F_e(t)$	$F_t(t) = 1 - e^{-(t/8955)^{1,42}}$	$\lvert F_e(t) - F_t(t) \rvert$
1	0,039	0,01086	0,02814
2	0,048	0,049888	0,00189
3	0,071	0,100015	0,02901
4	0,078	0,156079	0,07808
5	0,1	0,215172	0,11517
6	0,141	0,276304	0,1353
7	0,146	0,334117	0,18812
8	0,216	0,390606	0,17461
9	0,233	0,446874	0,21387
10	0,396	0,500422	0,10442
11	0,744	0,550869	0,193131
12	0,856	0,597982	0,258018
13	0,925	0,642327	0,282673
14	0,941	0,682444	0,258556
15	0,961	0,719123	0,241877

Maksimalna razlika *Dmax* = 0,282673 (tabela 5.17.). Prema tabličnim vrijednostima za K-S test za 16 mjerenja i faktor značajnosti 0,05 (prilog 7. – Testiranje pouzdanosti Zeljković, Papić [42]) D_{CR} = 0,328. Kako je:

$$Dmax < D_{CR} \tag{5.36}$$

analizirani parametri realnog sistema odgovaraju Vejbulovoj raspodjeli te početnu hipotezu treba prihvatiti

5.2.2.1.3 1. Grafička interpretacija Vejbulove raspodjele

Dijagram vjerovatnoće Vejbulove raspodjele za period do i nakon instalacije tehničke dijagnostike će se provjeriti grafičkom metodom.
Weibull dijagram se formira na sljedećinačin:

- podaci o vremenu rada do pojave otkaza se složе u rastućem nizu,
- iz tablica (V. Zeljković, Lj. Papić, Testiranje pouzdanosti Tabela P2.1.) (ili proračunom) se odredi središnji rang za svaki element;
- Na Vejbul papiru ucrtaju se tačke središnjeg ranga, koordinata *y* i koordinata *x* koja prikazuje podatke otkaza sa parametrom vremena.

Središnji rang za uzorak od 16 elemenata iznosi:
Za rang 1:

$$1 = \frac{i - 0{,}3}{N + 0{,}4} = \frac{1 - 0{,}3}{16 + 0{,}4} = 0{,}04268$$

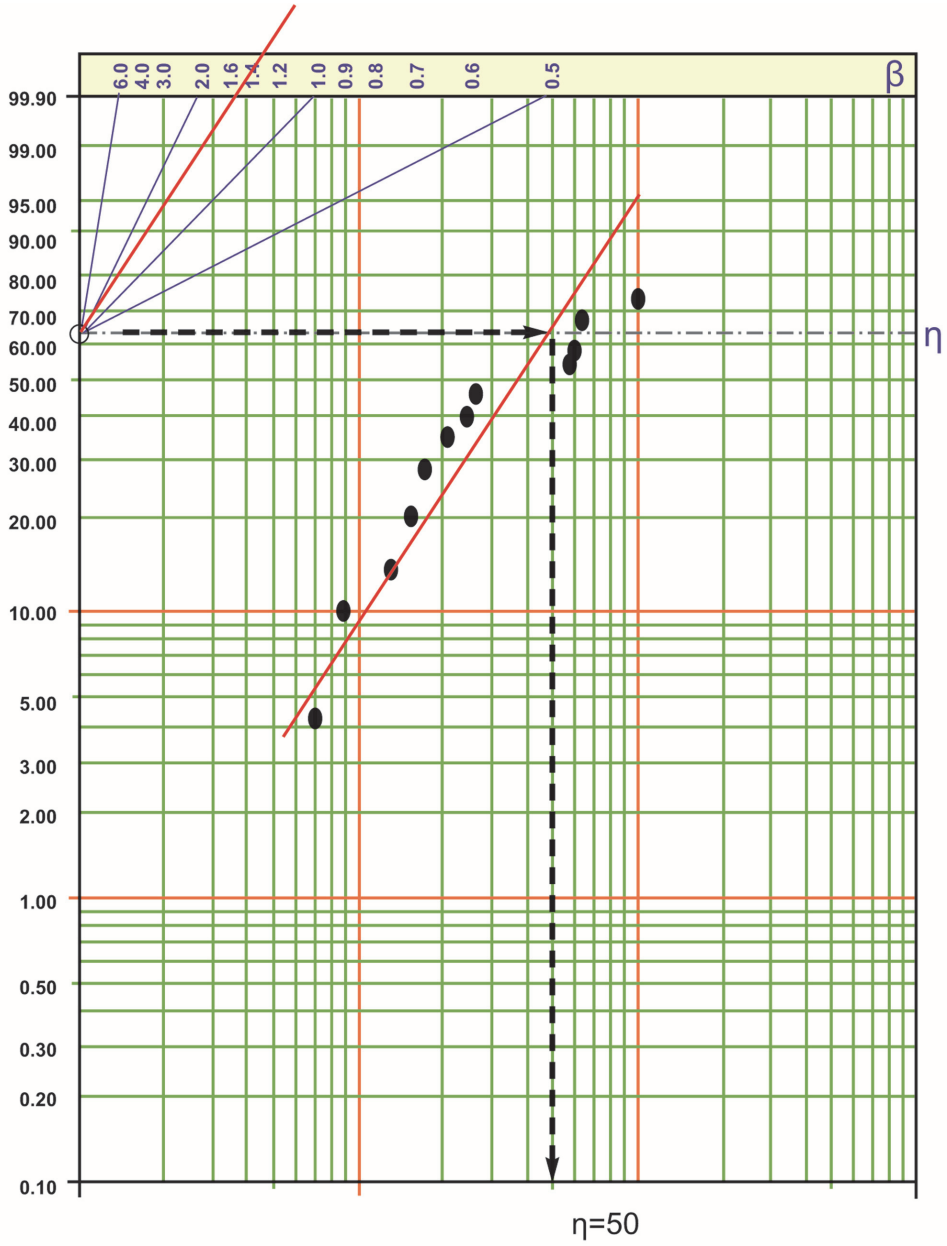
Vrijednost središnjeg ranga za podatak 1 uzet iz statističkih tablica[42] i iznosi 4,27 (Tabela P2.1.).
Na osnovu prethodnog postupka podaci vezani zaVejbul dijagram za period do instalacije tehničke dijagnostike prikazani su u tabeli 5.18.

Tabela 5.18 Vejbul podaci za period do termina instalacije tehničke dijagnostike

Rang	X = t vrijeme do pojave otkaza	Sredisnji Rang Median Ranks	Median Ranks %	1/(1-Median Rank)	ln(ln(1/(1Median Rank)))	Y = ln(t)
1	7	0,0427	4,27	1,044605	-3,13182	1,94591
2	9,9	0,1037	10,37	1,115698	-2,21201	2,292535
3	14,8	0,1646	16,46	1,197031	-1,71566	2,694627
4	26	0,2256	22,56	1,291322	-1,36388	3,258097
5	28,2	0,2866	28,66	1,401738	-1,08556	3,339322
6	31,9	0,3476	34,76	1,532802	-0,85074	3,462606
7	35	0,4085	40,85	1,690617	-0,64418	3,555348
8	37,7	0,4695	46,95	1,885014	-0,45581	3,62966
9	61,2	0,5305	53,05	2,129925	-0,2796	4,114147
10	62,9	0,5915	59,15	2,44798	-0,11064	4,141546
11	67	0,6524	65,24	2,87687	0,055154	4,204693
12	110,6	0,7134	71,34	3,489184	0,222878	4,70592
13	112,2	0,7744	77,44	4,432624	0,398099	4,720283
14	179,5	0,8354	83,54	6,075334	0,590138	5,190175
15	261	0,8963	89,63	9,643202	0,818128	5,56452
16	557,2	0,9573	95,73	23,4192	1,148531	6,322924

Na osnovu dobijenih podataka definišu se koordinate tačaka koje aproksimiraju pravac u dijagramu vjerovatnoće Vejbulove raspodjele (slika 5.22).

Grafička procjena koeficijenta pravca tj. parametra oblika $\beta \approx 1{,}4$ što u odnosu na analitički izračunatu vrijednost od $\beta \approx 1{,}42$ predstavlja zadovoljavajuće preklapanje. Grafička procjena parametra razmjere se određuje kao vrijednost t = η za koje je vrijednost kumulativne funkcije $F(t) = 0{,}632$ i on u slučaju perioda do termina instalacije tehničke dijagnostike iznosi $\eta \approx 50$. Dobijena vrijednost parametra razmjere govori da će 50% elemenata doživjeti otkaz nakon 50 sati rada, što ujedno predstavlja i srednje vrijeme do pojave otkaza.



Slika 5.22. Dijagram vjerovatnoće Vejbulove raspodjele za period do termina instalacije tehničke dijagnostike

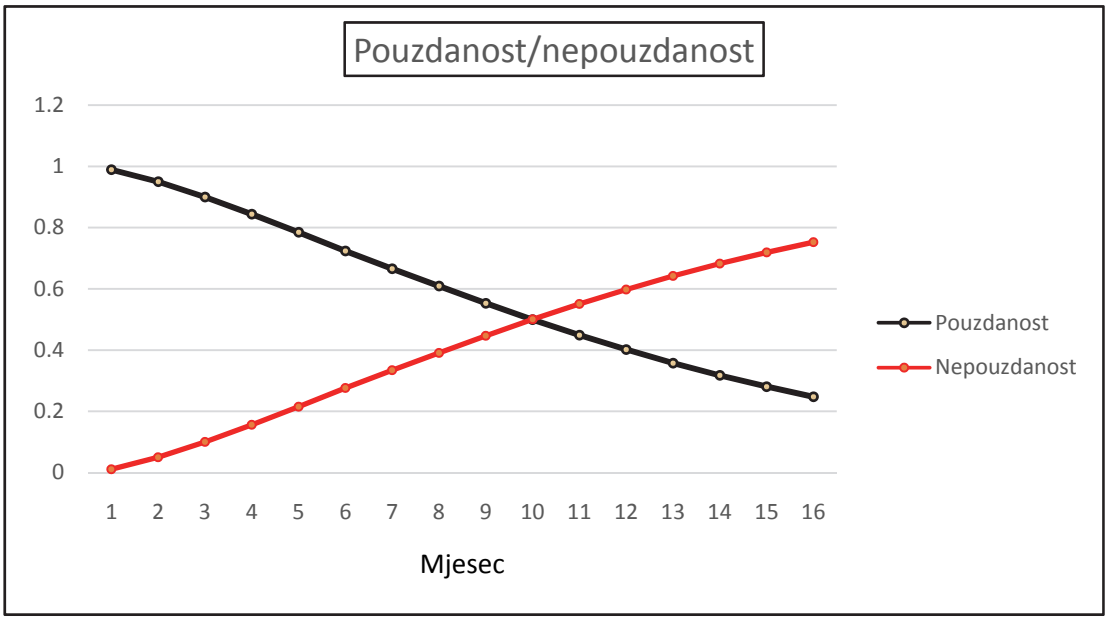
Analiza prethodnih podataka predstavljena je u tabelama 5.19. i 5.20. i slikama 5.23. i 5.24.

Tabela 5.19. Statističke vrijednosti pouzdanosti za period do instalacije tehničke dijagnostike

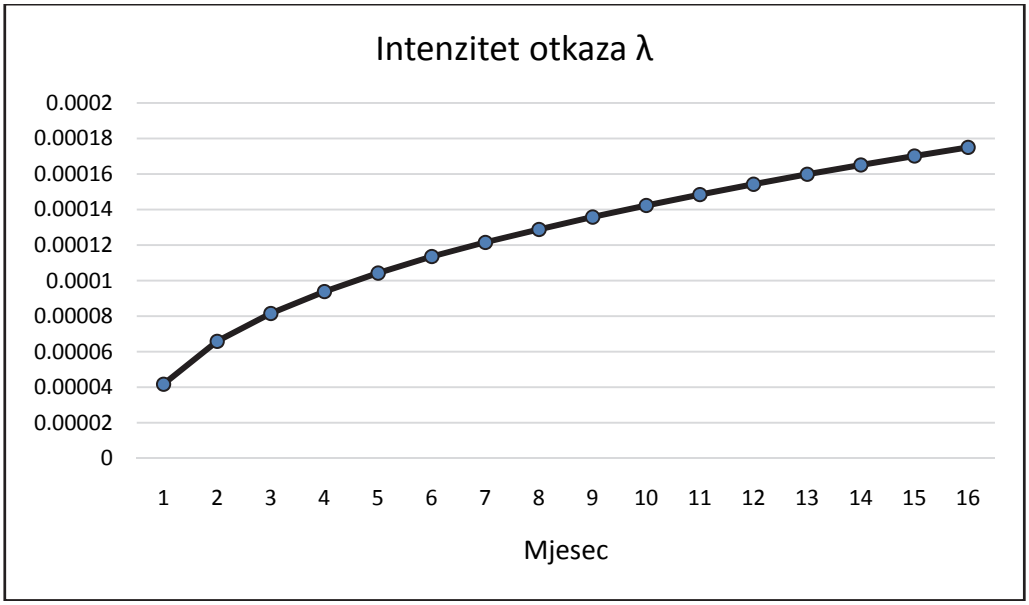
	Raspodjela	Parametri raspodjele	Komogorov-Smirnovljev test D_{max}	Napomena
Do instalacije tehničke dijagnostike	Normalna	$SV = 31,6$ $SD = 23,2$	21,96	Ne prihvata se
	Exponencijalna	$SV = 31,6$ $\lambda = 0,03164$	0,981	Ne prihvata se
	Vejbulova	$B = 1,42$ $\eta = 8955,293$	0,282673	Može se prihvatiti

Tabela 5.20. Grafička interpretacija Vejbulove raspodjele do instalacije tehničke dijagnostike

Mjeseci n_i	Sredina intervala sati (h)	Pouzdanost $R(t)$	Nepouzdanost $F(t)$	Intenzitet otkaza $\lambda(t)$
1	372	0,768836	0,231164	0,0000416833
2	1104	0,660261	0,339739	0,0000658235
3	1836	0,598106	0,401894	0,0000815005
4	2568	0,553344	0,446656	0,0000938348
5	3300	0,51814	0,48186	0,000104258
6	4044	0,488643	0,511357	0,000113552
7	4752	0,464716	0,535284	0,000121513
8	5460	0,44381	0,55619	0,000128812
9	6192	0,424672	0,575328	0,000135801
10	6924	0,407552	0,592448	0,000142326
11	7656	0,392082	0,607918	0,000148462
12	8388	0,37799	0,62201	0,000154266
13	9132	0,36486	0,63514	0,000159872
14	9864	0,352951	0,647049	0,000165134
15	10596	0,341908	0,658092	0,000170174
16	11328	0,331625	0,668375	0,000175016



Slika 5.23. Grafički prikaz funkcije pouzdanosti i nepouzdanosti do instalacije tehničke dijagnostike



Slika 5.24. Grafički prikaz funkcije intenziteta otkaza do instalacije tehničke dijagnostike

5.3.2.2. Analiza pouzdanosti proizvodnog sistema nakon trenutka instalacije tehničke dijagnostike

Za analizu elemenata pouzdanosti nakon trenutka instalacije tehničke dijagnostike korišteni su podaci rada papir mašine: sati rada proizvodnog sistema, zastoji uzrokovani održavanjem i sati rada do pojave stanja u otkazu. U tabeli 5.21. predstavljeni su rezultati analize pouzdanosti.

Tabela 5.21. Istraživanje pouzdanosti sistema nakon termina instalacije tehničke dijagnostike

Mjesec		Ukupna raspoloživost (sati)	Planirani zastoji održavanja (sati)	Stepen iskorišćenja – ukupno radno vrijeme (sati)	Otkazi uzrokovani održavanjem (sati)	Sati rada do pojave stanja u otkazu
2015.	Decembar	744	19	590,5	20,75	28,46
2016.	Januar	744	18	622,25	10,25	60,71
	Februar	696	17	679	15,5	43,81
	Mart	744	21	710	9,75	72,82
	April	720	16	640,5	48	13,34
	Maj	744	19	699,75	4,75	147,32
	Juni	720	15	691,75	14,25	48,54
	Juli	744	16	705,75	14,25	49,53
	Avgust	744	18	724,75	5	144,95
	Septembar	720	19	630,25	59,75	10,55
	Oktobar	744	233	609	8,5	71,65
	Novembar	720	18	672,25	25,75	26,11
	Decembar	744	19	732,5	2,5	293,00
2017.	Januar	744	18	693,75	22,75	30,49
	Februar	672	18	631	8,75	72,11
	Mart	744	19	740	2,5	296,00
Ukupno:		11688	503	10712,5	273	39,46

Analizu predstavlja postavljanje hipoteze o zakonu raspodjele, provjera ispravnosti postavljene hipoteze, određivanje parametara zakona raspodjele, prikaz dijagrama – funkcije gustine vremena rada do pojave stanja u otkazu.

5.3.2.2.1. Pretpostavka broj 1. – Provjera normalne raspodjele

Pretpostavimo da se vrijeme radao preme do pojave stanja u otkazu pokorava normalnoj raspodjeli.

Iz tabele 5.21. srednja vrijednost sati rada do pojave stanja u otkazu (SV) iznosi 39,46 sati. Disperzija za posmatrani broj uzoraka:

$$\sigma_2^{\,2} = \frac{1}{16}\,[\left(\bar{x}_1 - 20{,}75\right)^2 + \left(\bar{x}_1 - 10{,}25\right)^2 + \left(\bar{x}_1 - 15{,}5\right)^2 + \left(\bar{x}_1 - 9{,}75\right)^2 + \left(\bar{x}_1 - 48\right)^2 + \left(\bar{x}_1 - 4{,}75\right)^2 +$$

$$+\left(\bar{x}_1 - 14{,}25\right)^2 + \left(\bar{x}_1 - 14{,}25\right)^2 + \left(\bar{x}_1 - 5\right)^2 + \left(\bar{x}_1 - 59{,}75\right)^2 + \left(\bar{x}_1 - 8{,}5\right)^2 + \left(\bar{x}_1 - 25{,}75\right)^2 +$$

$$+\left(\bar{x}_1 - 2{,}5\right)^2 + \left(\bar{x}_1 - 22{,}75\right)^2 + \left(\bar{x}_1 - 8{,}75\right)^2 + \left(\bar{x}_1 - 2{,}5\right)^2\,], \qquad (5.37)$$

$$\sigma_2^{\,2} = \frac{1}{16}\,[\,350{,}06 + 853{,}22 + 574{,}08 + 882{,}68 + 72{,}93 + 1204{,}78 + 635{,}54 + 635{,}54 + 1187{,}49 +$$

$$+ 411{,}68 + 958{,}52 + 187{,}96 + 1366{,}04 + 279{,}22 + 943{,}1 + 1366{,}04\,],$$

$$\sigma_2^{\,2} = 11908{,}93\,.$$

Disperzija: $\sigma_1 = 109{,}12$.

5.3.2.2.1.1. Testiranje raspodjele: Kolmogorov – Smirnov test (K-S test) za period do instalacije tehničke dijagnostike

Smisao provođenja ovog testa je u tome da se izvrši provjera da li podaci vezani za stanje parametara sistema pripadaju raspodjeli pretpostavljenoj u prethodno postavljenoj hipotezi. Ovaj test se primjenjuje samo za kontinualne raspodjele i oslanja se na ocjenu maksimalne razlike između vrijednosti kumulativne funkcije posmatranih podataka stanja realnog sistema ($Fo(t_i)$) i vrijednosti kumulativne funkcije naznačene u pretpostavljenoj raspodjeli ($F_E(t_i)$). Ukoliko je razlika kumulativnih funkcija:

$$D_i = |F_o(t_i) - F_E(t_i)|,\ i = 1,2,\ldots n, \qquad (5.38)$$

tada maksimalna vrijednost razlike kumulativnih funkcija *Dmax* treba da bude manja od kritične vrijednosti D_{CR}:

$$D_{\max} > D_{CR}$$

i u tom slučaju postavljena hipoteza se može prihvatiti. Vrijednosti D_{CR} date su tabelarno.

Analiza sati rada realnog sistema do pojave stanja u otkazu (t_i) te računanjem $Fo(t_i)$ i $F_E(t_i)$ predstavljena je u tabeli 5.22.

Tabela 5.22. Numeričke vrijednosti pokazatelja pouzdanosti normalne raspodjele nakon instalacije tehničke dijagnostike

Mjeseci n_i	t_i– sati rada do pojave stanja u otkazu	$F_o(t_i) = n_i / n$	$F_E(t_i) = (t_i - t)/\sigma_1$	$D_i = \lvert F_o - F_E \rvert$
1	28,46	0,0625	-0,10	0,163
2	60,71	0,125	0,19	0,070
3	43,81	0,1875	0,04	0,148
4	72,82	0,25	0,31	0,056
5	13,34	0,3125	-0,24	0,552
6	147,32	0,375	0,99	0,613
7	48,54	0,4375	0,08	0,354
8	49,53	0,5	0,09	0,408
9	144,95	0,5625	0,97	0,404
10	10,55	0,625	-0,26	0,890
11	71,65	0,6875	0,29	0,393
12	26,11	0,75	-0,12	0,872
13	293,00	0,8125	2,32	1,511
14	30,49	0,875	-0,08	0,957
15	72,11	0,9375	0,30	0,638
16	296,00	1	2,35	1,351

Prema tabeli 5.22 maksimalna razlika *Dmax* = 1,511 dok je D_{CR} = 0,328 prema tabličnim vrijednostima za K-S test za 16 mjerenja i faktor značajnosti 0,05 (prilog 7. – Testiranje pouzdanosti Zeljković, Papić[42]). Kako je:

$$D_{\max} > D_{CR}\,, \tag{5.39}$$

početnu hipotezu treba odbaciti odnosno analizirani parametri realnog sistema ne odgovaraju normalnoj raspodjeli.

5.3.2.2.2. Pretpostavka broj 2. – provjera eksponencijalne raspodjele

Pretpostavimo da se vrijeme rada opreme do pojave stanja u otkazu pokorava eksponencijalnoj raspodjeli. Intenzitet otkaza(λ):

$$\lambda = \frac{1}{SV} = \frac{1}{109{,}12} = 0{,}00916\,. \tag{5.40}$$

Funkcija gustine vjerovatnoće pojave stanja u otkazu – $f(t)$:

$$F_E(t_i) = \lambda \cdot e^{-(\lambda)\cdot t_i} = 0{,}00916 \cdot e^{-(0{,}00916)\cdot t_i}\,. \tag{5.41}$$

Kumulativna funkcija gustine pojave stanja u radu – funkcija pouzdanosti:

$$R(t) = e^{-(\lambda)\cdot t} = e^{-(0{,}00916)\cdot t}\,. \tag{5.42}$$

Analiza sati rada realnog sistema do pojave stanja u otkazu (t_i) te proračun $F_o(t_i)$ i $F_E(t_i)$ predstavljen je u tabeli 5.23.

Tabela 5.23. Numeričke vrijednosti pokazatelja pouzdanosti eksponencijalne raspodjele nakon instalacije tehničke dijagnostike

Mjeseci n_i	t_i– zastoji	$F_o(t_i) = n_i / n$	$F_E(t_i) = \lambda \cdot e^{-(\lambda) n_i}$	$D_i = \lvert F_o - F_E \rvert$
1	28,46	0,0625	0,00908	0,05342
2	60,71	0,125	0,00899	0,11601
3	43,81	0,1875	0,00891	0,17859
4	72,82	0,25	0,00883	0,24117
5	13,34	0,3125	0,00875	0,30375
6	147,32	0,375	0,00867	0,36633
7	48,54	0,4375	0,00859	0,42891
8	49,53	0,5	0,00851	0,49149
9	144,95	0,5625	0,00844	0,55406
10	10,55	0,625	0,00836	0,61664
11	71,65	0,6875	0,00828	0,67922
12	26,11	0,75	0,00821	0,74179
13	293,00	0,8125	0,00813	0,80437
14	30,49	0,875	0,00806	0,86694
15	72,11	0,9375	0,00798	0,92952
16	296,00	1	0,00791	0,99209

Prema tabeli 5.23 maksimalna razlika *Dmax* = 0,992 dok je D_{CR} = 0,328 prema tabličnim vrijednostima za K-S test za 16 mjerenja i faktor značajnosti 0,05 (prilog 7.[42]). Kako je:

$$D_{\max} > D_{CR}, \tag{5.43}$$

početnu pretpostavku treba odbaciti odnosno analizirani parametri realnog sistema se ne pokoravaju eksponencijalnoj raspodjeli.

5.3.2.2.3. Pretpostavka broj 3. – ProvjeraVejbulove raspodjele

Pretpostavimo da se vrijeme rada opreme do pojave stanja u otkazu pokorava premaVejbulovoj (*Weibull*) raspodjeli. Vejbulova funkcija gustine raspodjele je:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}}, \tag{5.44}$$

gdje je:

$f(t) \geq 0, t \geq \gamma$ – gustina raspodjele,

$\beta > 0$ – parametar oblika,

$\eta > 0$ – parametarskale (razmjere),

$-\infty < \gamma < +\infty$ – parametar lokacije (položaja) za troparametarske raspodjele.

Kako je:

$$f(t) = \lambda(t) \cdot R(t), \tag{5.45}$$

mogu se uočit isljedeće veličine:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \text{ – intenzite totkaza,} \tag{5.46}$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}} \text{ – pouzdanost.} \tag{5.47}$$

Za slučaj dvoparametarske raspodjele kumulativna funkcija Vejbulove raspodjele je:

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}} . \tag{5.48}$$

Tabela 5.24. Koncept grafičkog određivanja parametara Vejbulovom (Weibull) raspodjelom za interval nakon instalacije tehničke dijagnostike

Mjeseci n_i	Interval sati (h)	Sredina intervala sati (h)	t_i– broj stanja u radu	Kumulativni broj stanja u radu	Kumulativna vjerovatnoća $F(t)$
1	$0 \div 744$	372	28,46	28,46	0,0201
2	$744 \div 1488$	1116	60,71	89,17	0,0632
3	$1488 \div 2184$	1836	43,81	132,98	0,0943
4	$2184 \div 2928$	2556	72,82	205,8	0,146
5	$2928 \div 3648$	3288	13,34	219,14	0,1554
6	$3648 \div 4392$	4020	147,32	366,46	0,26
7	$4392 \div 5112$	4752	48,54	415	0,2944
8	$5112 \div 5856$	5484	49,53	464,53	0,3295
9	$5856 \div 6600$	6228	144,95	609,48	0,4324
10	$6600 \div 7320$	6960	10,55	620,03	0,4399
11	$7320 \div 8064$	7692	71,65	691,68	0,4907
12	$8064 \div 8784$	8424	26,11	717,79	0,5092
13	$8784 \div 9528$	9156	293,00	1010,79	0,7171
14	$9528 \div 10272$	9900	30,49	1041,28	0,7388
15	$10272 \div 10944$	10608	72,11	1113,39	0,7899
16	$10944 \div 11688$	11316	296	1409,39	1

Tabela 5.25. Tabelarni koncept analitičkog određivanja parametara za interval nakon instalacije tehničke dijagnostike

Mjeseci n_i	$X_i = \ln(t)$	$Y_i = \ln\ln 1/(1-F(t))$	X_i^2	$Xi \cdot Yi$
1	5,918894	-3,8969	35,0333	-23,065339
2	7,017506	-2,72899	49,24539	-19,1506748
3	7,515345	-2,31216	56,4804	-17,3766734
4	7,846199	-1,84627	61,56284	-14,4862348
5	8,098035	-1,7785	65,57817	-14,4023144
6	8,299037	-1,2003	68,87402	-9,96130055
7	8,466321	-1,05352	71,67859	-8,91947136
8	8,60959	-0,91696	74,12504	-7,89466704
9	8,736811	-0,56856	76,33186	-4,96743259
10	8,847935	-0,54535	78,28595	-4,82520495
11	8,947936	-0,39346	80,06556	-3,5206584
12	9,03884	-0,34007	81,70063	-3,0738629
13	9,122165	0,233222	83,21389	2,127489791
14	9,20029	0,29451	84,64534	2,709580801
15	9,269364	0,444796	85,9211	4,122974612
16				

Parametri Vejbulovog modela su:

$$\beta = \frac{\sum X_i \cdot Y_i - 1/n \sum Y_i \cdot \sum X_i}{\sum X_i^2 - 1/n. \sum X_i \cdot \sum X_i} = \frac{-122{,}683 - 1/15 \cdot (-16{,}609 \cdot 124{,}934)}{1052{,}274 - 1/15 \cdot (124{,}934 \cdot 124{,}934)} = 1{,}28 \tag{5.49}$$

$$\eta = \exp\left[-\frac{1/n.\left(\sum Y_i - \beta \cdot \sum X_i\right)}{\beta}\right] = \exp\left[-\frac{1/15(-16{,}609 - 1{,}28 \cdot 124{,}934)}{1{,}28}\right] = 9798{,}65{,}293 \tag{5.50}$$

Tabela 5.26. Test Kolmogorov – Smirnova za period nakon instalacije tehničke dijagnostike

Mjeseci n_i	$F_e(t)$	$F_t(t) = 1 - e^{-(t/9798{,}65)^{1{,}28}}$	$\lvert F_e(t) - F_t(t) \rvert$
1	0,0201	0,015077	0,005023
2	0,0632	0,060107	0,003093
3	0,0943	0,110625	0,01633
4	0,146	0,16394	0,01794
5	0,1554	0,218985	0,06358
6	0,26	0,273619	0,01362
7	0,2944	0,327002	0,0326
8	0,3295	0,378563	0,04906
9	0,4324	0,428706	0,003694
10	0,4399	0,475561	0,03566
11	0,4907	0,519805	0,0291
12	0,5092	0,561363	0,05216
13	0,7171	0,600217	0,116883
14	0,7388	0,636966	0,101834
15	0,7899	0,669426	0,120474

Prema tabeli 5.26. maksimalna razlika *Dmax* = 0,1204 dok je D_{CR} = 0,328 prema tabličnim vrijednostima za K-S test za 16 mjerenja i faktor značajnosti 0,05 (prilog 7. [42]). Kako je:

$$Dmax < D_{CR} \tag{5.51}$$

početnu hipotezu treba prihvatiti odnosno analizirani parametri realnog sistema odgovaraju Vejbulovoj raspodjeli.

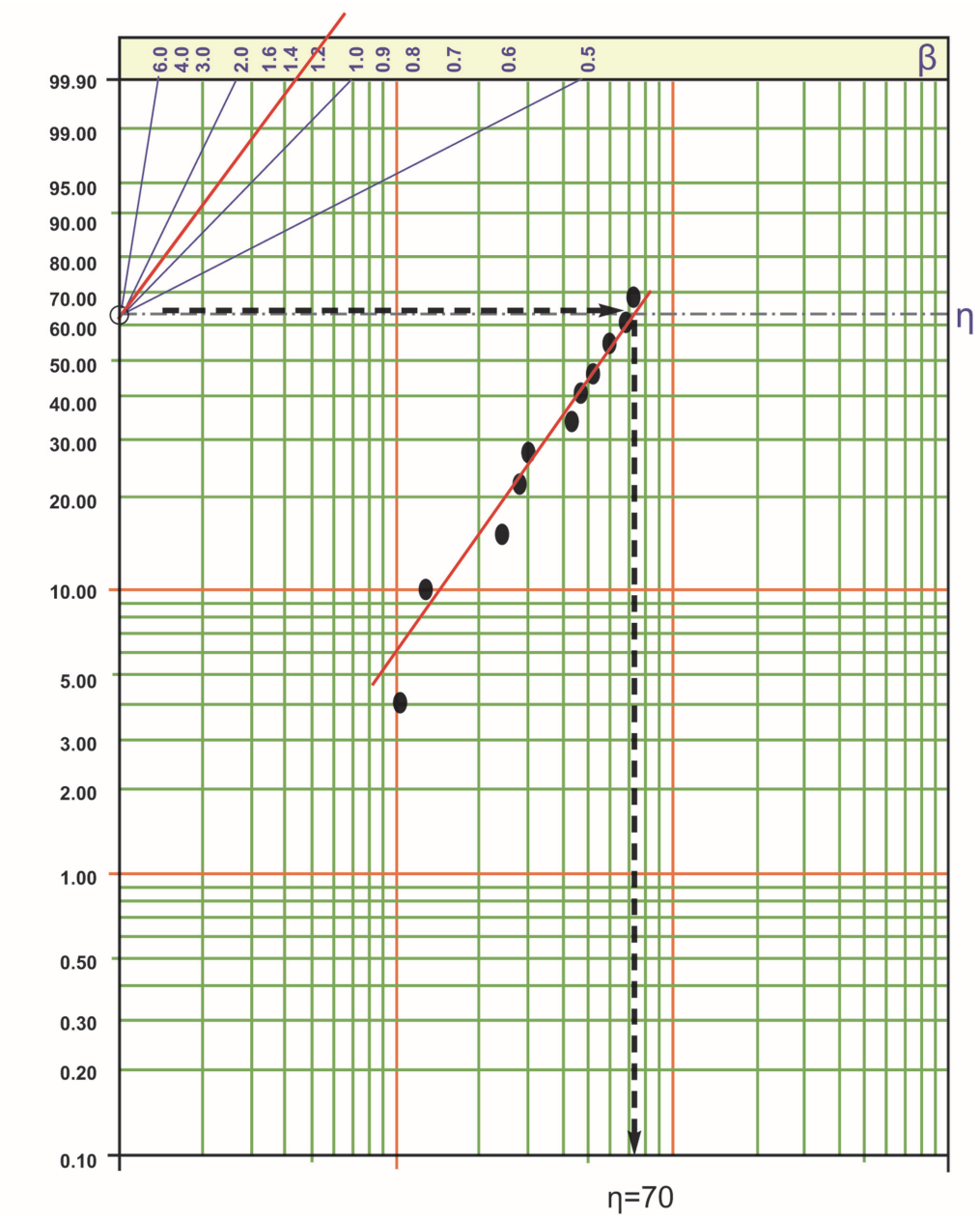
5.3.2.2.3.1. Grafička interpretacija Vejbulove raspodjele nakon termina instalacije tehničke dijagnostike

Prema metodologiji opisanoj u paragrafu 5.2.2.4. podaci vezani za Vejbul dijagram za period nakon instalacije tehničke dijagnostike prikazani su u tabeli 5.27.

Tabela 5.27. Vejbul podaci za period nakon termina instalacije tehničke dijagnostike

Rang	t vrijeme do pojave otkaza	Sredisnji Rang Median Ranks	Median Ranks %	1/(1-Median Rank)	ln(ln(1/(1Median Rank)))	ln(t)
1	10,55	0,0427	4,27	1,044605	-3,13182	2,356126
2	13,34	0,1037	10,37	1,115698	-2,21201	2,590767
3	26,11	0,1646	16,46	1,197031	-1,71566	3,262318
4	28,46	0,2256	22,56	1,291322	-1,36388	3,3485
5	30,49	0,2866	28,66	1,401738	-1,08556	3,417399
6	43,81	0,3476	34,76	1,532802	-0,85074	3,779862
7	48,54	0,4085	40,85	1,690617	-0,64418	3,882388
8	49,53	0,4695	46,95	1,885014	-0,45581	3,902579
9	60,71	0,5305	53,05	2,129925	-0,2796	4,106108
10	71,65	0,5915	59,15	2,44798	-0,11064	4,271793
11	72,11	0,6524	65,24	2,87687	0,055154	4,278193
12	72,82	0,7134	71,34	3,489184	0,222878	4,287991
13	144,95	0,7744	77,44	4,432624	0,398099	4,976389
14	147,32	0,8354	83,54	6,075334	0,590138	4,992607
15	293	0,8963	89,63	9,643202	0,818128	5,680173
16	296	0,9573	95,73	23,4192	1,148531	5,690359

Na osnovu dobijenih podataka definišu se koordinate tačaka koje aproksimiraju pravac u dijagramu vjerovatnoće Vejbulove raspodjele za period nakon termina instalacije tehničke dijagnostike, slika 5.25. Grafička procjena koeficijenta pravca tj. parametra oblika $\beta \approx 1{,}3$ što u odnosu na analitički izračunatu vrijednost od $\beta \approx 1{,}28$ predstavlja zadovoljavajuće preklapanje. Grafička procjena parametra razmjere se određuje kao vrijednost t = η za koje je vrijednost kumulativne funkcije $F(t) = 0{,}632$ i on u slučaju perioda do termina instalacije tehničke dijagnostike iznosi $\eta \approx 70$. Dobijena vrijednost parametra razmjere govori da će 50% elemenata doživjeti otkaz nakon 70 sati rada što ujedno predstavlja i srednje vrijeme do pojave otkaza. Ukoliko ovaj podatak od 70 sati uporedimo sa podatkom dobijenim za period do instalacije tehničke dijagnostike (50 sati) možemo uočiti povećanje sati rada do pojave u otkazu nakon instalacije tehničke dijagnostike za prosječno 20 sati rada.



Slika 5.25. Dijagram vjerovatnoće Vejbulove raspodjele nakon termina instalacije tehničke dijagnostike

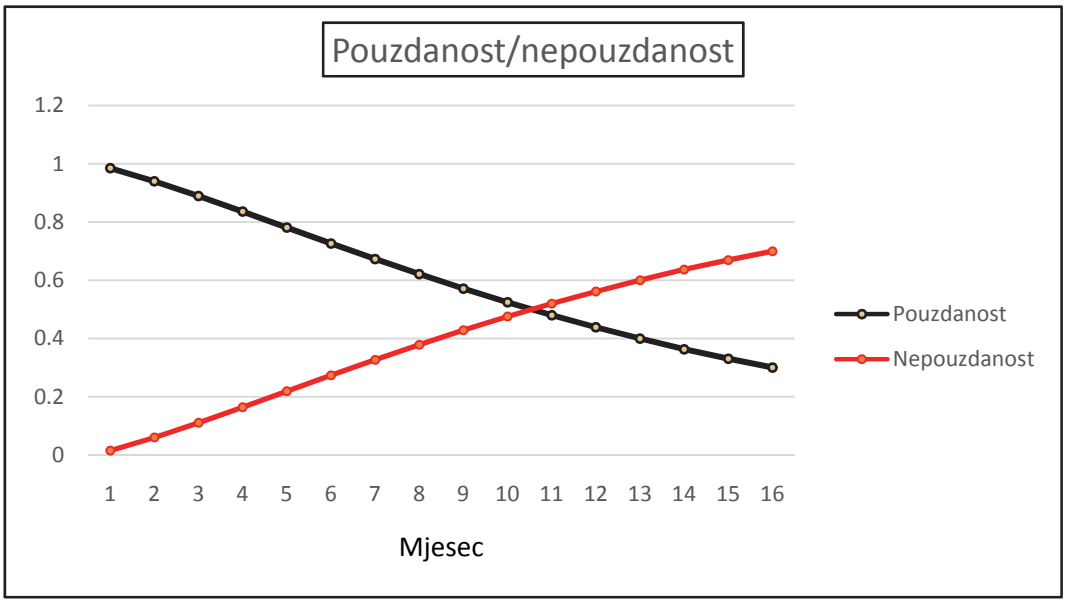
Analiza prethodnih podataka predstavljena je u tabelama 5.28. i 5.29. i slikama 5.26. i 5.27.

Tabela 5.28. Pouzdanosti za period nakon instalacije tehničke dijagnostike – statističke vrijednosti

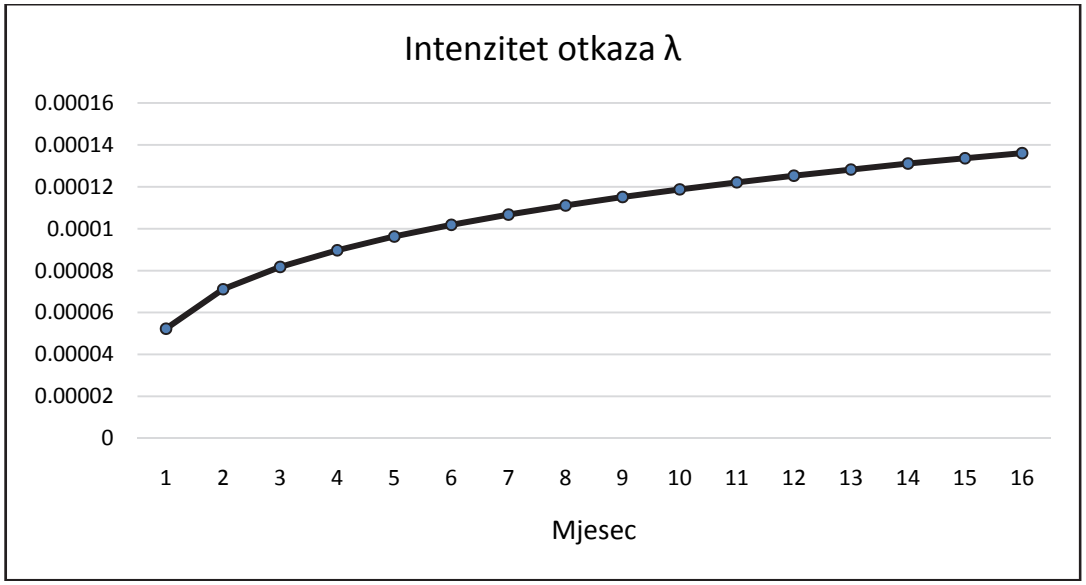
	Raspodjela	Parametri raspodjele	Komogorov-Smirnovljev test D_{max}	Napomena
Nakon instalacije tehničke dijagnostike	Normalna	$SV = 39{,}46$ $SD = 109{,}12$	1,511	Ne prihvata se
	Exponencijalna	$SV = 31{,}6$ $\lambda = 0{,}00916$	0,992	Ne prihvata se
	Vejbulova	$B = 1{,}28$ $\eta = 9798{,}65$	0,1204	Može se prihvatiti

Tabela 5.29. Grafička interpretacija Vejbulove raspodjele nakon instalacije tehničke dijagnostike

Mjeseci n_i	Sredina intervala sati (h)	Pouzdanost $R(t)$	Nepouzdanost $F(t)$	Intenzitet otkaza $\lambda(t)$
1	372	0,984923	0,015077	0,0000522719
2	1116	0,939893	0,060107	0,0000710988
3	1836	0,889374	0,110626	0,0000817336
4	2556	0,83606	0,16394	0,0000896672
5	3288	0,781015	0,218985	0,0000962182
6	4020	0,726381	0,273619	0,000101789
7	4752	0,672998	0,327002	0,00010667
8	5484	0,621437	0,378563	0,000111036
9	6228	0,571293	0,428707	0,000115063
10	6960	0,524439	0,475561	0,000118699
11	7692	0,480195	0,519805	0,00012207
12	8424	0,438637	0,561363	0,000125216
13	9156	0,399783	0,600217	0,000128172
14	9900	0,363034	0,636966	0,000131007
15	10608	0,330574	0,669426	0,000133565
16	11316	0,300485	0,699515	0,000136004



Slika 5.26. Presjek funkcija pouzdanosti i nepouzdanosti za period nakon instalacije tehničke dijagnostike



Slika 5.27. Grafički prikaz funkcije intenziteta otkaza nakon instalacije tehničke dijagnostike

5.4. Testiranje hipoteze o uticaju uvođenja tehničke dijagnostike na rad realnog proizvodnog sistema

5.4.1. Testiranje hipoteze o jednakosti sredina otkaza proizvodnog sistema

Osnovna ideja koja se želi provjeriti je da li postoji međusobna zavisnost stanja rada realnog sistema prije i poslije implementacije tehničke dijagnostike. Karakteristike stanja realnog sistema mogu se realno prikazati uticajem poremećaja - otkaza u proizvodnom procesu koji uzrokuju direktno gubitak proizvodnje. Treba napomenuti da se za analizu koriste isključivo podaci o otkazima koji dovode realan sistem u potpuno stanje otkaza, a koji su uzrokovani otkazom pojedinačnog uređaja - sklopa za čije ponovno stavljanje u rad je neophodno angažovanje službe održavanja. Preciznije, svi zastoji tehnološke prirode kao što su čišćenja, prelazak sa jednog na drugi proizvodni asortiman, priprema za proizvodnju bojenog ili starog papira… te zastoji usljed nedostatka medija (voda, vazduh, električna energija), a koji su izazvani spoljnim faktorima, neće ući u razmatranje. Ovim se dobijaju pokazatelji uticaja konkretnih uređaja na rad sistema.

5.4.1.1. Realni sistem prije instalacije tehničke dijagnostike

Analiza se izvodi sumiranjem otkaza papir mašine u periodu prije termina instalacije tehničke dijagnostike. Pregled posmatranog perioda se odnosi na ukupno 16 mjeseci i to od avgusta 2014. godine do novembra 2015. godine i prikazan je u tabeli 5.30.

Tabela 5.30. Otkazi 2014/2015. godine

OTKAZI (X_{i1})	2014.					2015.										
	AVG.	SEP.	OKT.	NOV.	DEC.	JAN.	FEB.	MA.R	APR.	MAJ	JUN	JUL	AVG.	SEP.	OKT.	NOV.
SATI	11,5	43,25	18,5	62,25	20	10,5	76,25	6,5	23,5	2,75	1,25	4	6,5	25,5	21,75	11,25
UKUPNO (SATI): $\sum X_{i1} = 345{,}25$																

Da bismo izvršili analizu polazimo od pretpostavke – hipoteze da se sredine dva skupa uzoraka uzetih iz osnovnog skupa značajno ne razlikuju:

$$Ho : \mu_1 = \mu_2, \tag{5.52}$$

gdje su:

μ_1 – očekivana vrijednost slučajne promjenjive ili srednja vrijednost broja otkaza prije instalacije tehničke dijagnostike (X_{i1}),
μ_2 – očekivana vrijednost slučajne promjenjive ili srednja vrijednost broja otkaza nakon tehničke dijagnostike (X_{i2}).

Srednja vrijednost otkaza prije termina instalacije tehničke dijagnostike:

$$\bar{x}_{i1} = \frac{\sum x_{i1}}{n_1} = \frac{345,25}{16} = 21,57, \tag{5.53}$$

gdje su:

$\sum x_{i1} = 345,25$ sati (ukupan brojo tkaza za posmatrani period do termina instalacije tehničke dijagnostike),
$n_1 = 16$ mjeseci (posmatrani period do termina instalacije tehničke dijagnostike).

U tom slučaju, disperzija za posmatrani broj uzoraka se računa kao:

$$\sigma_1^2 = \frac{1}{16}[\left(\bar{x}_1 - 11,5\right)^2 + \left(\bar{x}_1 - 43,25\right)^2 + \left(\bar{x}_1 - 18,5\right)^2 + \left(\bar{x}_1 - 62,25\right)^2 + \left(\bar{x}_1 - 20\right)^2 + \left(\bar{x}_1 - 10,5\right)^2 +$$
$$+ \left(\bar{x}_1 - 76,25\right)^2 + \left(\bar{x}_1 - 6,5\right)^2 + \left(\bar{x}_1 - 23,5\right)^2 + \left(\bar{x}_1 - 2,75\right)^2 + \left(\bar{x}_1 - 1,25\right)^2 + \left(\bar{x}_1 - 4\right)^2 +$$
$$+ \left(\bar{x}_1 - 6,5\right)^2 + \left(\bar{x}_1 - 25,5\right)^2 + \left(\bar{x}_1 - 21,75\right)^2 + \left(\bar{x}_1 - 11,25\right)^2, \tag{5.54}$$

odnosno, nakon uvrštavanja slijedi,

$$\sigma_1^2 = \frac{1}{16}[101,4 + 470 + 9,4 + 1654,8 + 2,4 + 122,5 + 2989,9 + 227,1 + 3,7 + 354,1 + 412,9 +$$
$$+ 308,7 + 227,1 + 15,4 + 0 + 106,5],$$
$$\sigma_1^2 = 437,89$$

Disperzija: σ_1=20,925

5.4.1.2. Realni sistem nakon instalacije tehničke dijagnostike

Analiza se izvodi sumiranjem otkaza papir mašine u periodu nakon termina instalacije tehničke dijagnostike. Pregled posmatranog perioda se odnosi na ukupno 16 mjeseci i to od decembra 2015. godine do aprila 2017. godine i prikazan je u tabeli 5.31.

Tabela 5.31. Otkazi 2015/2017. godine

OTKAZI (X_{i1})	2015.	2016.												2017.		
	DEC	JAN	FEB	MAR	APR	MAJ	JUN	JUL	AVG	SEP	OKT	NOV	DEC	JAN	FEB	MAR
SATI	20,75	10,25	15,5	9,75	48	4,75	14,25	14,25	5	59,75	8,5	25,75	2,5	22,75	8,75	2,5
UKUPNO (SATI): $\sum X_{i1} = 273$																

Srednja vrijednost otkaza nakon instalacije tehničke dijagnostike:

$$\bar{x}_{i2} = \frac{\sum x_{i2}}{n_2} = \frac{273}{16} = 17{,}06 \tag{5.55}$$

gdje je:

$\sum X_{i2} = 273$ sati (ukupan broj otkaza za posmatrani period nakon instalacije tehničke dijagnostike);

$n_1 = 16$ mjeseci (posmatrani period nakon instalacije tehničke dijagnostike).

U tom slučaju, disperzija za posmatrani broj uzoraka se računa kao:

$$\sigma_2^2 = \frac{1}{16}[\left(\bar{x}_1 - 20{,}75\right)^2 + \left(\bar{x}_1 - 10{,}25\right)^2 + \left(\bar{x}_1 - 15{,}5\right)^2 + \left(\bar{x}_1 - 9{,}75\right)^2 + \left(\bar{x}_1 - 48\right)^2 + \left(\bar{x}_1 - 4{,}75\right)^2 +$$
$$+\left(\bar{x}_1 - 14{,}25\right)^2 + \left(\bar{x}_1 - 14{,}25\right)^2 + \left(\bar{x}_1 - 5\right)^2 + \left(\bar{x}_1 - 59{,}75\right)^2 + \left(\bar{x}_1 - 8{,}5\right)^2 + \left(\bar{x}_1 - 25{,}75\right)^2 +$$
$$+\left(\bar{x}_1 - 2{,}5\right)^2 + \left(\bar{x}_1 - 2{,}75\right)^2 + \left(\bar{x}_1 - 8{,}75\right)^2 + \left(\bar{x}_1 - 2{,}5\right)^2, \tag{5.56}$$

odnosno, nakon uvrštavanja slijedi,

$$\sigma_2^2 = \frac{1}{16}[13{,}61 + 46{,}37 + 2{,}43 + 53{,}43 + 957{,}28 + 151{,}53 + 7{,}89 + 7{,}89 + 145{,}44 + 1822{,}43 + 73{,}27 +$$
$$+ 75{,}51 + 211{,}99 + 32{,}37 + 69{,}05 + 211{,}99],$$
$$\sigma_2^2 = 242{,}66$$

Disperzija: $\sigma_2 = 15{,}57$.

5.4.1.3. Testiranje hipoteze i analiza rezultata

Istraživanjem prethodno navedenog perioda dobijeni su sljedeći pokazatelji:

- srednje vrijednosti zastoja $\bar{x}_{i,1} = 21{,}57$ i $\bar{x}_{i,2} = 17{,}06$,
- disperzije $\sigma_1^2 = 437{,}89$ i $\sigma_2^2 = 242{,}66$.

Ukoliko formiramo pretpostavku da je:

$$H_o : \mu_1 = \mu_2, \tag{5.57}$$

odnosno da se sredine uzoraka dva dijela osnovnog skupa značajno ne razlikuju to znači da ne postoje značajne razlike srednje vrijednosti otkaza papir mašine u periodima prije instalacije tehničke dijagnostike odnosno uvođenja sistema održavanja prema stanju i perioda nakon toga.

Hipoteza se testira preko primjene Z testa i pretpostavke da osnovni skup ima normalnu raspodjelu prema sljedećem matematičkom modelu:

$$|\overline{x_1} - \overline{\overline{x_2}}| < z_{1-\alpha_{1/2}} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}} \tag{5.58}$$

Statistika:

$$z_{rač} = \frac{|\overline{x_1} - \overline{\overline{x_2}}|}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}} = \frac{|21{,}57 - 17{,}06|}{\sqrt{\frac{437{,}89}{16} + \frac{242{,}66}{16}}} = 0{,}69 \tag{5.59}$$

Ukoliko uvažimo pretpostavku da je vjerovatnoća odbacivanja hipoteze H_o odnosno greška prve vrste tj. nivo značajnosti za posmatrani broj uzoraka od n=16, α = 0,5, tablična vrijednost statistike *Z* iznosi:

$$Ztab = Z_{1-\alpha/2} = Z_{1-0,5\cdot 1/2} = 0,675 \text{ (tab. I Prilog A, [43]).} \quad (5.60)$$

Poredeći dobijene vrijednosti dobijamo:

$$Zrač = 0,69 > Z_{1-\alpha/2} = 0,675, \quad (5.61)$$

iz čega se izvlači zaključak da hipotezu H_o : $\mu_1 = \mu_2$ treba odbaciti jer u tom slučaju na posmatranom broju uzoraka n=16 postoji značajna razlika između sredina uzoraka broja otkaza prije i poslije instalacije tehničke dijagnostike. Ovaj rezultat govori o pozitivnom uticaju smanjenja broja zastoja u poređenju s istim vremenskim intervalima prije i nakon implementacije tehničke dijagnostike.

6.0 DISKUSIJA O REZULTATIMA

6.1. Analiza rezultata istraživanja

Eksperimentalna istraživanja obuhvatala su prikupljanje realnih podataka proizvodnog sistema, formiranje baze podataka, analizu, obradu i poređenje rezultata istraživanja i verifikaciju istraživanja uz izvođenje zaključaka. Kao najznačajniji rezultati eksperimentalnih istraživanjamogu se izdvojiti:

6.1.1. Istraživanje efektivnosti proizvodnog sistema

Istraživanje se usmjerilo na analizu parametara prije i nakon implementacije tehničke dijagnostike kao osnovnog preduslova uvođenja koncepcije održavanja prema stanju. Osnovni posmatrani parametri proizvodnog sistema, ali i sistema održavanja su: realizovana proizvodnja, otkazi/stepen iskorišćenja i troškovi/investiciono ulaganje.
Rezultat analize:

Prema rezultatima izraza 5.2, 5.3 i 5.5 kao i 5.6, 5.7 i 5.9 ukupna efektivnost prije i nakon realizacije mjera tehničke dijagnostike iznosi:

$$OEE_1 = EA \cdot PE \cdot RQ = 96{,}83 \cdot 98{,}63 \cdot 99{,}25 = 94{,}78\%$$

$$OEE_2 = EA \cdot PE \cdot RQ = 97{,}46 \cdot 98{,}70 \cdot 99{,}49 = 95{,}70\%$$

Razlika *ΔOEE*:

$$\Delta OEE = OEE_2 - OEE_1 = 95{,}70 - 94{,}78 = 0{,}92\% \text{ ,}$$

predstavlja povećanje ukupne efektivnosti proizvodnog sistema za 0,92%. Preračunato na proizvodnju (*T*/godina) to iznosi:

T = 0,92× 21,71 sati× 4,8 tona produkcije/satu× 12 mjeseci = 1150,4 t/godišnje,

gdje je:

- 21,71 sati – mjesečni prosjek broja ukupnih radnih sati za posmatrani period od 16 mjeseci rada sa monitoringom (instaliranom tehničkom dijagnostikom),
- 4,8 tona – prosječna proizvodnja papir mašine za sat vremena rada.

Ukoliko se računa sa prosječnom grubom maržom (GM) od 290 €/toni proizvedenog papira dobija se godišnja ušteda (*U*):

$$U = GM * T = 290\frac{€}{t} * 1150{,}4t = 333.616\frac{€}{god} \text{ ,}$$

što predstavlja zavidan stepen povećanja efektivnosti u odnosu na uložena sredstva za instalaciju tehničke dijagnostike kritičnog mjesta u proizvodnom sistemu.

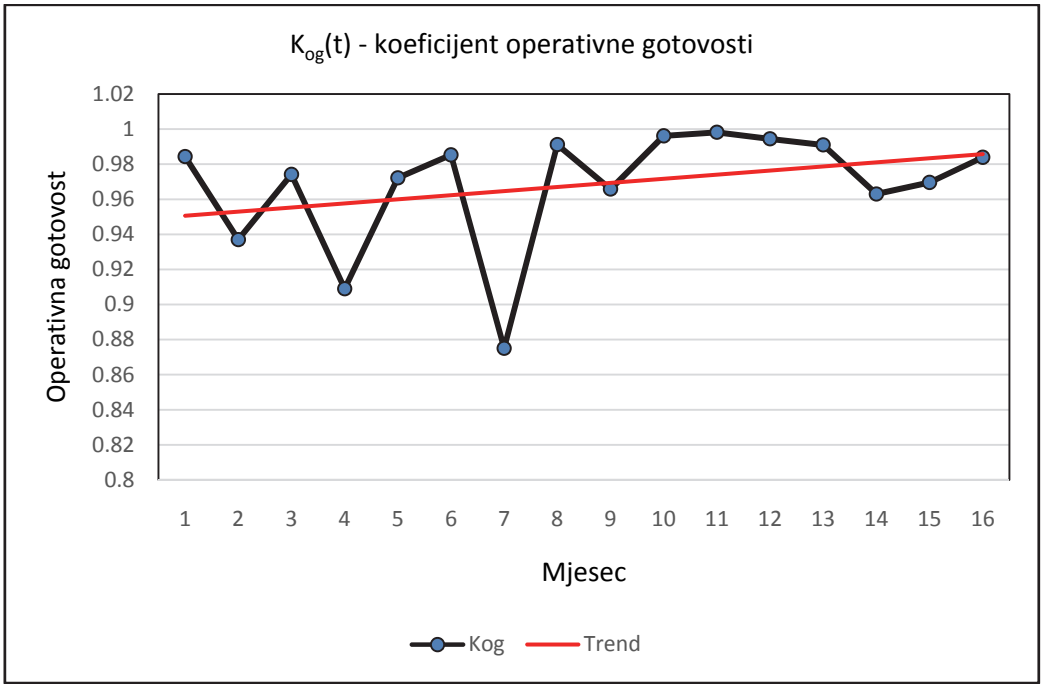
Treba istaknuti činjenicu da je i pored većeg obima proizvodnje u periodu do realizacije tehničke dijagnostike (49.421 tona) u odnosu na obim proizvodnje nakon realizacije tehničke dijagnostike (48.718 tona) za isti vremenski period ostvaren porast stepena efektivnosti proizvodnog sistema od 0,92%. U konkretnom slučaju se radi o velikoj količini proizvoda na godišnjem nivou što uz trenutne cijene proizvoda na tržištu i prosječnu zaradu (GM od 290 €/t) daje zavidan finansijski rezultat posebno ako se uporedi sa inicijalnom visinom ulaganja za najkritičnije pozicije od cca 10.000 €.

6.1.2. Istraživanje pouzdanosti proizvodnog sistema

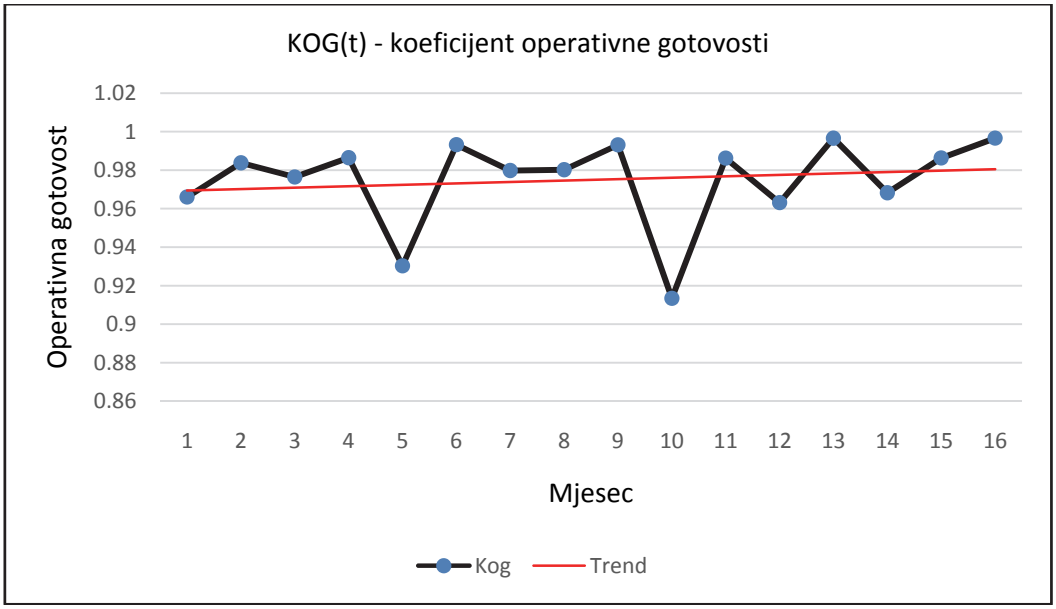
6.1.2.1. Rezultati analize operativne gotovosti

Najznačajniji rezultati analize operativne gotovosti su:

- Blaži trend porasta koeficijenta operativne gotovosti nakon realizacije tehničke dijagnostike (posljedica uticaja većeg obima proizvodnje u odnosu na smanjenje broja zastoja), slike 6.1. i 6.2.:

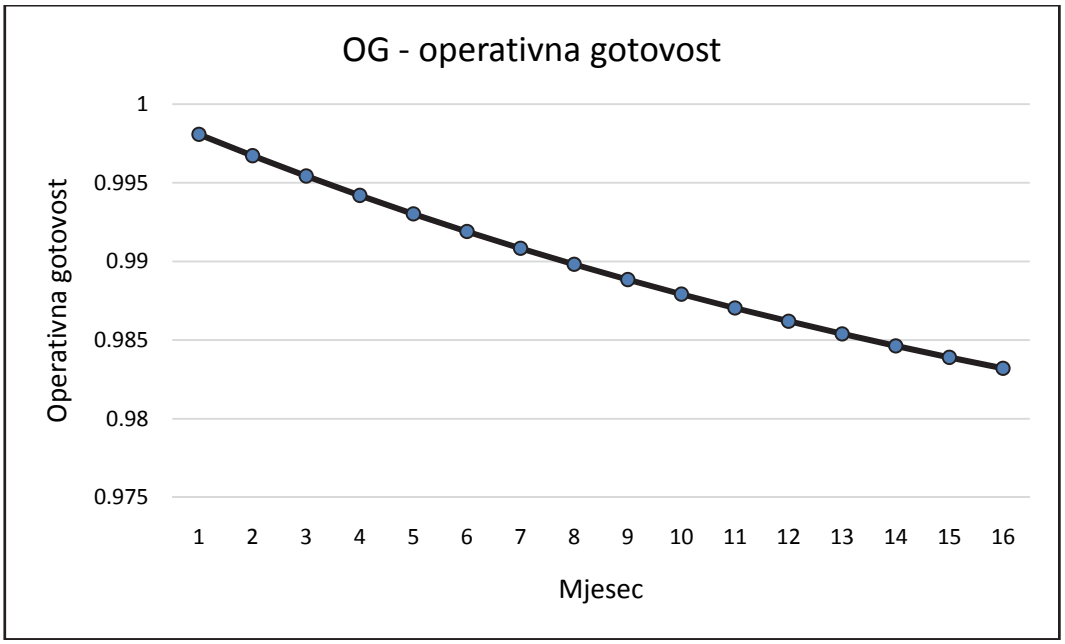


Slika 6.1. Koeficijent operativne gotovosti prije instalacije tehničke dijagnostike

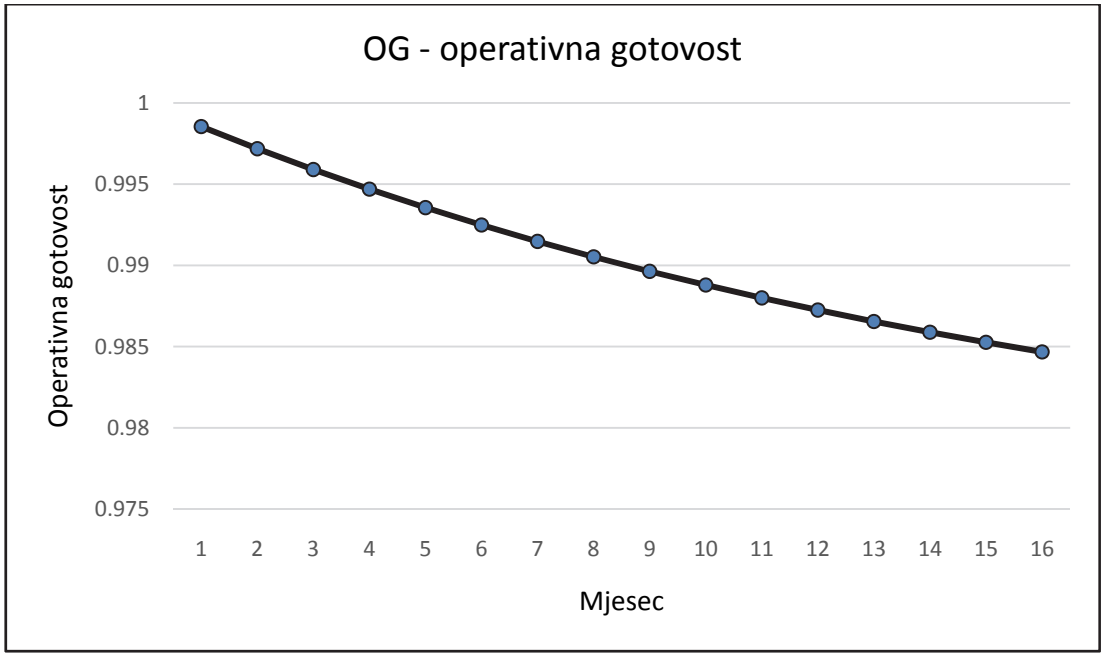


Slika 6.2. Koeficijent operativne gotovosti nakon instalacije tehničke dijagnostike

- nešto blaži trend pada operativne gotovosti nakon realizacije tehničke dijagnostike, slike 6.3. i 6.4.



Slika 6.3. Operativna gotovost prije instalacije tehničke dijagnostike

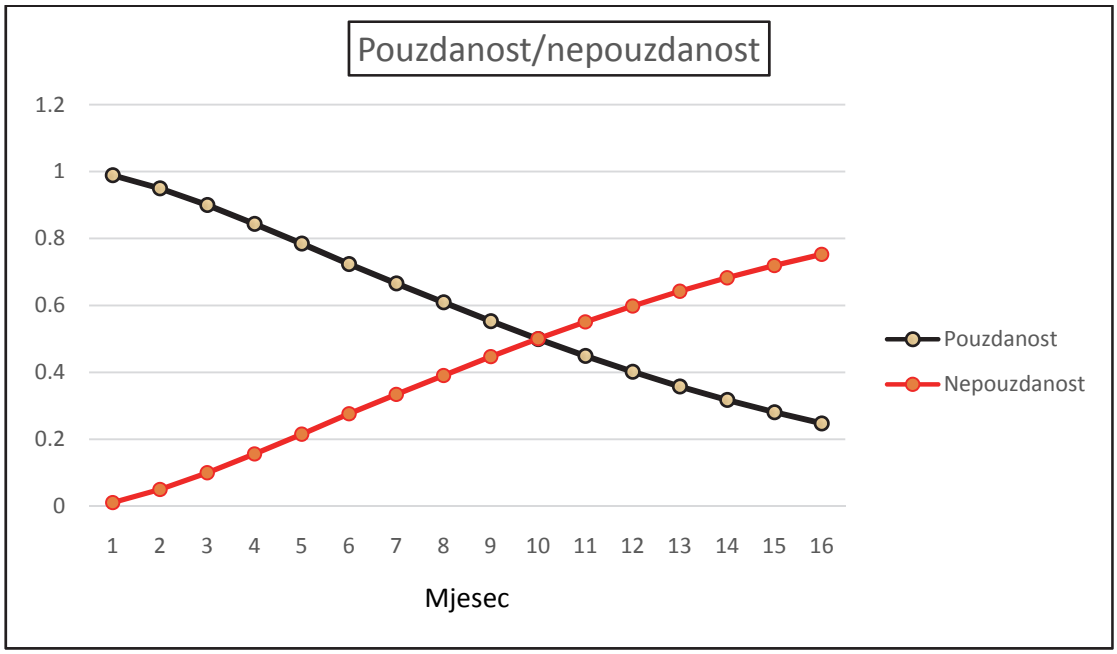


Slika 6.4. Pouzdanost nakon instalacije tehničke dijagnostike

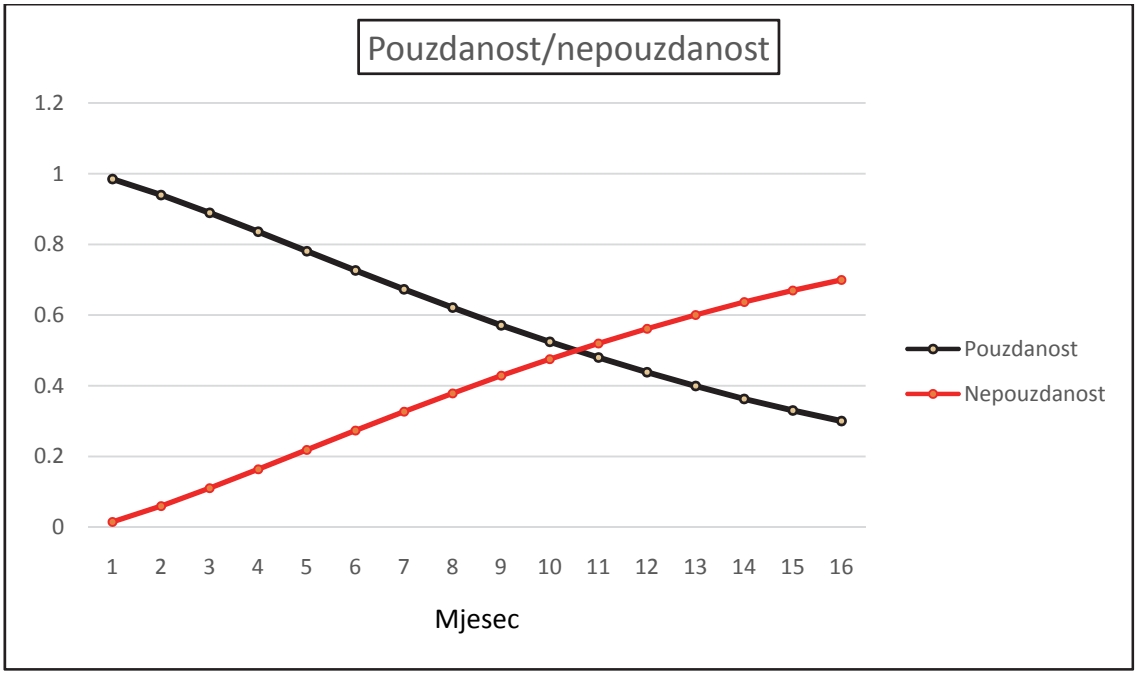
6.1.2.2. Rezultati analize pouzdanosti

Najznačajniji rezultati analize pouzdanosti su:

- tačka presjeka pouzdanosti i nepouzdanosti za cca jedan mjesec povoljnija za slučaj perioda nakon instalacije tehničke dijagnostike, slike 6.5. i 6.6.

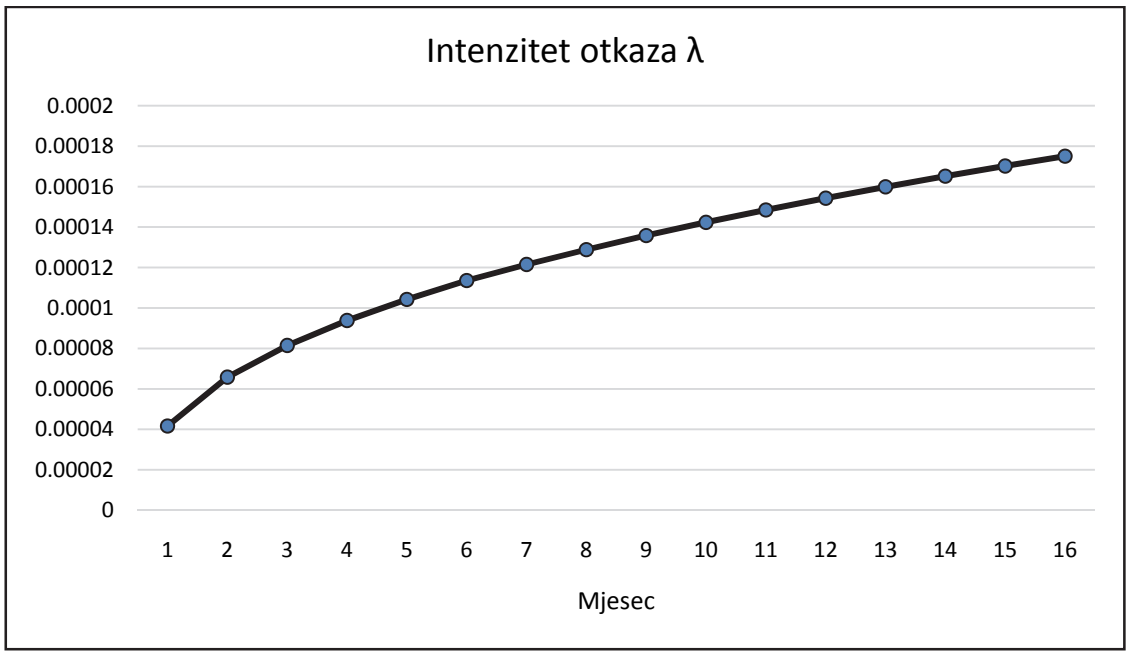


Slika 6.5. Pouzdanost prije instalacije tehničke dijagnostike

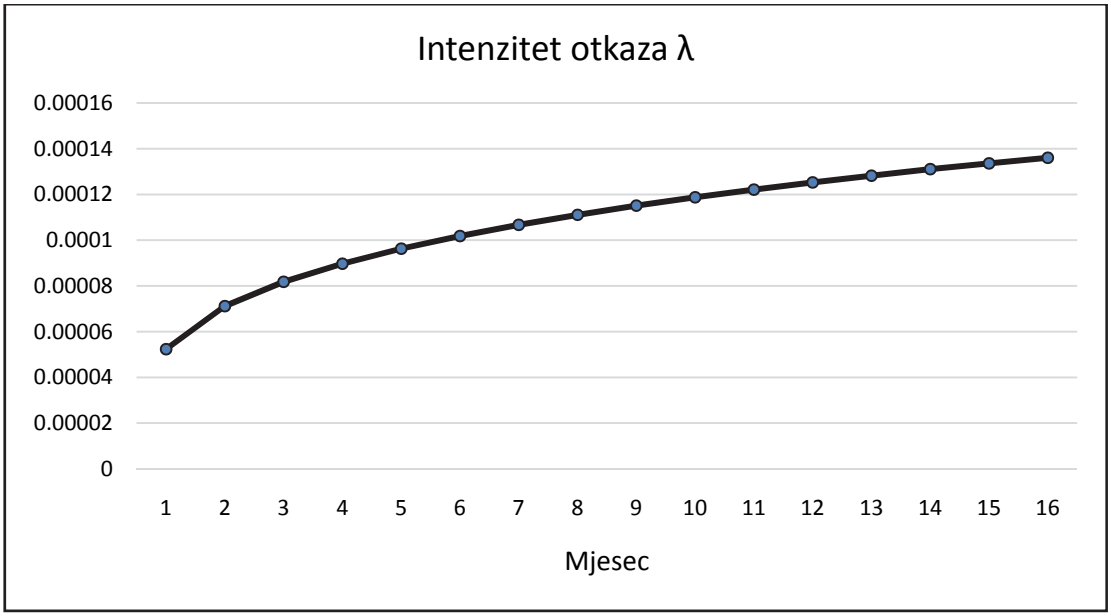


Slika 6.6. Pouzdanost nakon instalacije tehničke dijagnostike

- dominantnije vrijednosti intenziteta otkaza za period do instalacije tehničke dijagnostike, slike 6.7. i 6.8.



Slika 6.7. Intenzitet otkaza prije instalacije tehničke dijagnostike



Slika 6.8. Intenzitet otkaza nakon instalacije tehničke dijagnostike

6.1.2.3. Rezultati analize srednjeg vremena rada do pojave otkaza

- Dobijena vrijednost parametra razmjere (η≈50) za period do instalacije tehničke dijagnostike govori da će 50% elemenata doživjeti otkaz nakon 50 sati rada, što ujedno predstavlja i srednje vrijeme do pojave otkaza.
- Dobijena vrijednost parametra razmjere govori da će 50% elemenata doživjeti otkaz nakon 70 sati rada nakon instalacije tehničke dijagnostike, što ujedno predstavlja i srednje vrijeme do pojave otkaza.
- Poređenje srednjih vremena do pojave stanja u otkazu može se uočiti povećanje sati rada do pojave u otkazu nakon instalacije tehničke dijagnostike za prosječno 20 sati rada.

6.1.3. Testiranje hipoteze o jednakosti sredina otkaza proizvodnog sistema

Na osnovu rezultata primjene Z testa i pretpostavke da osnovni skup ima normalnu raspodjelu prema matematičkom modelu (5.41) može se zaključiti da za posmatrani period od 16 mjeseci praćenja (n=16 intervala) prije i nakon realizacije tehničke dijagnostike postoji značajna razlika sredine uzoraka dva posmatrana skupa (sa usvojenim intervalom povjerenja od $1-\alpha_{½}$ = 0,75). Ovaj rezultat govori o pozitivnom uticaju smanjenja broja zastoja u poređenju s istim vremenskim intervalima prije i nakon implementacije tehničke dijagnostike i pored nižeg obima proizvodnje u periodu nakon realizacije tehničke dijagnostike.

Niži obim proizvodnje u periodu nakon realizacije tehničke dijagnostike vezan je isključivo za dva veća planska zastoja postrojenja koja nisu predmet uticaja održavanja već se odnose na realizaciju investicionih aktivnosti (modifikacija tehnologije i kapitalno ulaganje u oblogu sušionog cilindra).

7.0 ZAKLJUČCI

Kao rezultat kompletnog istraživanja u okviru disertacije, izvlače se sljedeći zaključci:

1. Doktorska disertacija je dokazala glavnu hipotezu: „Primjena koncepcija održavanja prema stanju na papir mašinama može doprinijeti povećanju ukupnog nivoa pouzdanosti tim mašina.“ Rezultati analize pouzdanosti pokazuju pozitivan trend u prethodno definisanom periodu praćenja.

2. Analiza efektivnosti realnog proizvodnog sistema ukazuje na evidentno povećanje nivoa pouzdanosti i operativne gotovosti te smanjenje intenziteta otkaza uz blaži porast koeficijenta operativne gotovosti, što se može objasniti realizacijom glavnih investicionih aktivnosti tokom generalnog remonta postrojenja papir mašine u periodu nakon realizacije mjera tehničke dijagnostike.

3. Rezultati rada proizvodnog industrijskog sistema se mogu značajno poboljšati primjenom koncepcije održavanja prema stanju. Primjena konvencionalnih postupaka otklanjanja otkaza u trenutku kada su već nastupili ustupa mjesto metodama planiranja popravki i preventivnih aktivnosti održavanja sa ciljem eliminacije uslova potpunog zastoja proizvodnog pogona, a time i nastanka velikih gubitaka u poslovanju kompletnog sistema. Nepostojanje plana popravki proizvodnog sistema znači „planiranje gubitaka“ poslovnog sistema, što svakako treba izbjegavati.

4. Metode tehničke dijagnostike, primijenjene u odgovarajućim uslovima rada elemenata sistema – mašina, omogućavaju praćenje radnih parametara i rano otkrivanje svih odstupanja optimalnih radnih vrijednosti procesa. Ukoliko se pravovremeno dobije kvalitetna i upotrebljiva informacija o stanju parametara sistema i ukoliko su unaprijed poznate optimalne vrijednosti, može se pravovremeno korektivno djelovati i spriječiti nastanak uslova za otkaz i uzrokovanje visokih troškova proizvodnog procesa i održavanja.

5. Analiza perioda rada realnog industrijskog sistema primjenom sistema tehničke dijagnostike u poređenju s periodom rada koji se oslanja na tradicionalne i iskustvene metode (metode subjektivne ocjene stanja i radnih karakteristika elemenata tehničkog sistema), pokazuje značajno smanjenje ukupnog broja otkaza elemenata proizvodnog sistema. Ovo može biti veoma korisna informacija prilikom projektovanja i nabavke novih pod/sistema koji se integrišu u postojeći proizvodni sistem. Ukoliko je moguće, svaki novi element sistema treba da ima mogućnost instalacije sistema praćenja radnih karakteristika koji tokom eksploatacije može opravdati svoje ulaganje udjelom smanjenja ukupnog broja otkaza sistema.

6. Primjena statističkih metoda dokazuje postojanje značajnog uticaja između ukupnog broja otkaza proizvodnog postrojenja prije i nakon primjene metoda tehničke dijagnostike. Analiza je obuhvatila otkaze koji su po prirodi nastanka vezani za djelovanje službe održavanja. Optimizacija proizvodnog procesa se odnosi na pokazatelje koji su u direktnoj vezi s unapređenjima stanja pouzdanosti kritičnih pozicija proizvodnog sistema.

7. Saznanja dobijena egzaktnim proračunom raspoloživosti opreme daju uvid u stvarne procese i događaje vezane za uslove rada i tehničko stanje opreme za rad, što predstavlja ulazne parametre za planiranje budućih procesa održavanja. Razvoj i primjena novih

koncepcija u okviru organizacije sistema održavanja treba da podrži pozitivne procese optimizacije tehnoloških procesa. Krajnji rezultat primjene nekog novog, naučno priznatog sistema organizacije sistema održavanja, treba da ima širi značaj za poslovni sistem, a ne da služi samo kao mjerilo ispunjenja funkcije održavanja.

8. Definisanjem realnog trenutnog stanja opreme primjenom metoda tehničke dijagnostike stvaraju se uslovi za kvalitetno planiranje popravki. Dobro planiran zastoj postrojenja u cilju prevencije otkaza ne znači samo uštedu u vremenu, povećanje satnog učinka i veću proizvodnju već i niže troškove rezervnih dijelova, optimizaciju skladišta i radnog kapitala, dobru koordinaciju s eksternim firmama, optimalno korišćenje opreme za rad, racionalno korišćenje ljudskih resursa i povećanje stepena sigurnosti na radu. Planiranje aktivnosti održavanja obezbjeđuje kvalitetnije ispunjenje osnovne funkcije održavanja proizvodne opreme koja je usmjerena osnovnom cilju: postizanje maksimalne raspoloživosti i pouzdanosti instalirane opreme uz minimalne troškove, a sve u cilju ostvarivanja maksimalne dobiti poslovnog sistema.

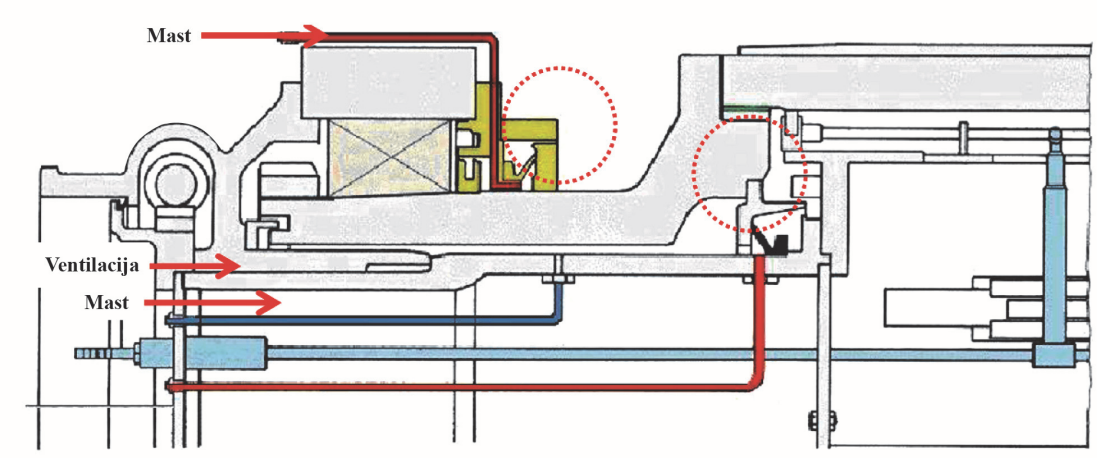
9. Tehnička dijagnostika realnog industrijskog sistema može dati veoma dobar rezultat u smislu optimizacije proizvodnih procesa i povećanjem ukupne efektivnosti proizvodnog sistema. Posmatrajući proizvodni sistem kao dio poslovnog sistema, a poslovni sistem kao dio šire društvene zajednice može se uspostaviti jasna veza primjene modernih tehničkih dostignuća sa sveukupnim napretkom okruženja u kojem poslovni sistem „živi“ i u kom se isti razvija. Druga dimenzija uticaja modernih tehničkih rješenja na životnu sredinu je poštovanje ekoloških normi i očuvanje zaštite životne sredine kojoj se poklanja velika pažnja prilikom izbora i primjene dijagnostičkih sistema.

10. Mogućnost praćenja savremenih dijagnostičkih sistema uslovljena je adekvatnom stepenu obrazovanja, obučenosti, ali i iskustva osoblja službe održavanja, koje je zaduženo za obezbjeđenje spremnosti postrojenja. Stalna i neodvojiva veza s tehnološkim osobljem, koje treba da aktivno učestvuje u programu praćenja svih događaja u toku eksploatacije opreme za rad, predstavlja osnovu modernih koncepcija održavanja, kao što je TPM u okviru kojeg tehnička dijagnostika i principi održavanja prema stanju čine sastavni i neodvojivi dio.

8.0 PREGLED BUDUĆIH ISTRAŽIVANJA

Pregled i analiza rezultata postojećeg stanja sistema daju osnovu za razmišljanje u kom pravcu se mogu usmjeriti buduća istraživanja. Glavni pravci budućih istraživanja su:

1. Kao najznačajniji pravac budućih istraživanja može se istaknuti analiza i konstruktivno rješenje kritične pozicije uležištenja usisne prese papir mašine. Definisanje kritičnih pozicija realnog proizvodnog sistema papir mašine i analiza troškova zamjene ležajeva usisne prese pokazuje i potrebu za definisanjem i optimizacijom tehničkog rješenja uležištenja usisne prese, koje bi eliminisalo problem učestalih zamjena skupih velikih ležaja sa dužim rokovima isporuke u procesu njihove nabavke. Realizacija mjera tehničke dijagnostike dala je za rezultat određeni stepen optimizacije pouzdanosti proizvodnog procesa, ali nije u potpunosti eliminisala tehnički problem. Dalje istraživanje bi se moglo provesti u smislu definisanja rješenja i simulacije rada sistema usisne prese sa novim, standardnijim radijalnim tipom ležaja umjesto dosadašnjeg sfernog. Trenutno konstruktivno rješenje (iz 1982. godine) podrazumijeva mogućnost podnošenja velikih radnih opterećenja u toku samog rada, a posebno u slučajevima nejednakog linijskog pritiska i neravnomjernog postupka zapresavanja (veza presa – sušioni cilindar). Ovaj tehnički zahtjev riješen je korištenjem sfernog tipa ležaja na obje strane uležištenja usisne prese dok se aksijalne vibracije podnose konstruktivnom izvedbom dodatnog aksijalnog ležaja smještenog u unutrašnjosti pogonske strane usisne prese. Novo rješenje svakako treba da usvoji pomenuti tehnički zahtjev, ali sa standardnom izvedbom radijalnog, na tržištu lako dostupnog ležaja.

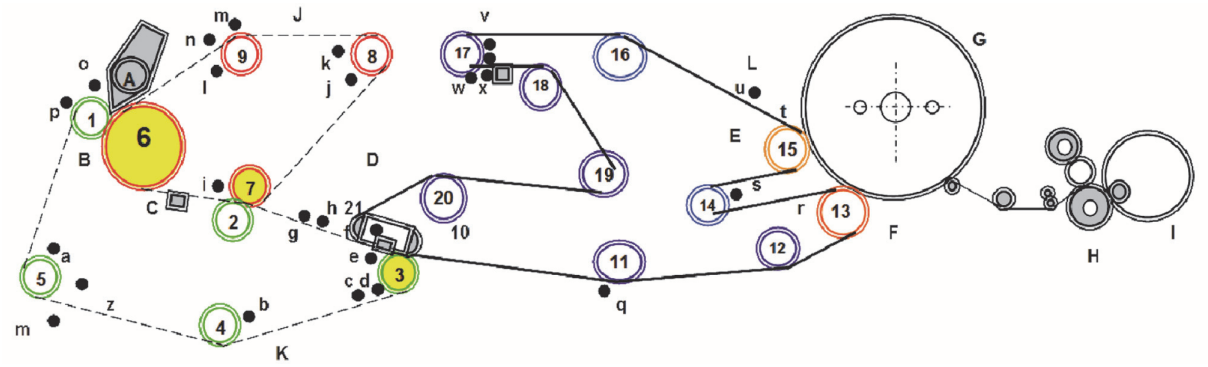


Slika 8.1. Varijanta idejnog rješenja novog sistema uležištenja usisne prese PM2

Novi tip ležaja svakako može da ima i zahtjeve vezane za konstruktivnu izmjenu ležajnih mjesta.

2. U slučaju konkretnog realnog proizvodnog sistema papir mašine, postoji mogućnost i potreba za proširenjem postojećeg dijagnostičkog sistema (valjci 13 i 15, slika 8.2.) na kontrolu ostalih ključnih pozicija kao što su:

- sistem valjaka filčeve grupe (valjci broj 11 do 20, slika 8.2.);
- sistem valjaka sitove grupe (valjci 1 do 9, slika 8.2.);
- kontrola protoka ulja u centralnom sistemu podmazivanja.



Slika 8.2. Šematski prikaz valjaka PM2

Instalacijom savremenih sistema mjerenja i kontrole vibracija i protoka ključnih pozicija bili bi stvoreni preduslovi za kvalitetno praćenje glavnih veličina stanja i tehničkih karakteristika opreme.

3. Osim kontrole tehničkog stanja opreme i podizanja nivoa pouzdanosti na viši nivo, mjere tehničke dijagnostike se u konkretnom slučaju proizvodnog sistema papir mašine mogu primijeniti za praćenje i analizu tehničkog i tehnološkog stanja proizvodnog procesa. Moderni dijagnostički sistemi kao što je Vigilance, dijagnostički sistem za ranu detekciju *chattermarks*, imaju mogućnost optimizacije tehnološkog procesa u smislu monitoringa i kontrole načina doziranja sredstava za zaštitu sušionog cilindra (coating). Adekvatnom zaštitom sistema se uslovi rada papir mašine kontrolišu i usmjeravaju u stabilan režim, koji omogućava maksimalno vremensko iskorišćenje i ispunjenje plana proizvodnje.

4. Praćenje i analizu rezultata pokazatelja pouzdanosti proizvodnog sistema moguće je objediniti u jedinstven softverski program, koji bi ukazivao na trenutne vrijednosti vremenskog iskorišćenja i raspoloživosti, a samim tim i pouzdanosti sistema papir mašine. Svakako da ovakav sistem podrazumijeva veliku bazu podataka o trenutnom stanju radnih veličina sistema te unaprijed definisanje dozvoljenih vrijednosti odstupanja. Ovakav sistem zahtijeva značajna investiciona ulaganja s obzirom na to da se radi o instalaciji većeg broja složenih tehničkih uređaja za praćenje fizičkih veličina koje karakterišu rad prethodno definisanih komponenti sistema koje se prate i čiji se rad vrjednuje.

9.0 LITERATURA

[1] Rajec, E.: *Terotehnologija*, Zavod za produktivnost dela, Ljubljana, 1974.

[2] Papić, Lj., Milovanović, Z.: *Održavanje i pouzdanost tehničkih sistema, Systems Maintainability and Reliability*, Prijevor, 2007.

[3] Majdandžić, N: *Strategije održavanja i informacijski sustavi održavanja*, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osjeku – Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 1999.

[4] EN 13306:2001 *Terminologie maintenance*, 2001.

[5] Bengtsson, M.: *Condition based maintenance systems – an investigation of technical constituents and organizational aspects*, Malardalen University Licentiate Thesis, No.36, 2004.

[6] Sebastijanović, S.: *Osnove održavanja strojarskih konstrukcija*, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osjeku – Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 2002., str. 30-35.

[7] Zelenović, D.: *Efektivnost sistema u mašinstvu*, Beograd, 1990.

[8] Popović, P.: *Tehnička dijagnostika i tehnologije održavanja*.

[9] S. Jeff: PDM, "*Secrets revealed: How to improve your PDM program or start one from scratch*," 1st Edition, Allied Reliability, Inc., Tulsa, Oklohoma,[Online] Available: http://www.alliedreliability.com, pp. 4–35, June 6, 2006.

[10] A. Veltkamp: "*Vibration introduction course: SKF condition monitoring, in computerized maintenance management system and enterprise resource planning*," Nigerian Society of Engineers, Lagos, Nigeria, pp. 1.1–4.5, 2001.

[11] J. M.Moubray: "*Maintenance management: A new paradigm, strategic technologies*," Inc., Aladon Ltd, UK, pp. 7 –11, 2000. [Online] Available: http://www.maintenanceresources.com/RCM/Maintparadigm, July 29, 2006.

[12] Kondić, V., Horvat, M., Maroević, F.: *Primjena dijagnostike kao osnove održavanja po stanju na primjeru motora osobnog automobila*, Tehnički glasnik 7, 2013.

[13] Adamović, Lj., Nestrović, G., Radojević, M., Paunović, Lj.: *Menadžment industrijskog održavanja*, Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin", Zrenjanin, 2008.

[14] Aleksić, M., Stanojević, P., Mitrović, S.: *Izbor koncepcije održavanja kompleksnih brodskih sistema*, 51. Konferencija ETRAN, Herceg Novi, 2007.

[15] Kutin, M.: *Optimizacija primjene dijagnostičkih tehnika i njihov uticaj na pouzdanost tehničkih sistema*, doktorska disertacija,Fakultet "Mihajlo Pupin", Zrenjanin, Univerzitet u Novom Sadu, 2010.

[16] Popović, P., Ivanović, G.: *Projektovanje pouzdanosti mašinskih sistema*, monografija, Institut za nuklearne nauke Vinča, 2005.

[17] Bulatović, M.: *Održavanje i efektivnost tehničkih sistema*, Univerzitet Crne Gore – Mašinski fakultet u Podgorici, 2008.

[18] Šćepanović, S., Vujović, L., Vujović J.: *Razvojno održavanje jedinke*, OMO Beograd, 2014.

[19] Adamović, Ž., Radovanović, Lj.: *Modeli održavanja na bazi tehničke dijagnostik*e, Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin", Zrenjanin, 2008.

[20] Phuc, D., Phil, S., Benoit, I.: *Condition-based maintenance for a two-component system with dependencies, Conference Paper IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety of Technical Processes), Paris,* Septembar 2015.

[21] Rosmaini, A., Shahrul, K.:*An overview of time-based and condition-based maintenance in industrial application, Journal Computers and Industrial Engineering archive, Volume 63 Issue 1,* August, 2012.

[22] Jong-Ho, S., Hong-Bae, J.: *On condition based maintenance policy, Journal of Computational Design and Engineering, Volume 2*, April 2015.

[23] Sondalini, M.: *How to use Condition Based Maintenance Strategy for Equipment Failure Prevention*, Lifetime Reliability Solutions HQ, 2009.

[24] Prajapati, A., Bechtel, J., Ganesan, S.: *Condition based maintenance: a survey*, Journal of Quality in Maintenance Engineering Volume 18, 2012.

[25] Prajapati, A., Ganesan, S.: *Application of Statistical Techniques andNeural Networks in Condition-Based Maintenance*,Journal of Quality and Reliability Engineering, 2013.

[26] Jardine, A., Joseph, T., Banjević, D.: *Optimizing condition-based maintenance decisions for equipment subject to vibration monitoring*, Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol.5, 2006.

[27] Rastegari, A., Marcus, B.: *Implementation of Condition Based Maintenance in manufacturing industry - A pilot case study*, Conference on Prognostics and Health Management, PHM 2014, At Cheney, USA, 2014.

[28] Bansal, D., Evans, D., Jones, B.: *A Real-Time Predictive Maintenance System for Machine Systems - An Alternative to Expensive Motion Sensing Technology,* Sensors for Industry Conference, 2005.

[29] Lin, C., Makis.: *Optimal Bayesian maintenance policy and early fault detection for a gearbox operating under varying load,* Journal of Vibration and control, 2014.

[30] Grujić,N.: *Upravljanje rizikom korišćenjem metoda tehničke dijagnostike i pouzdanosti*, Naučno stručni časopis Tehnička dijagnostika Vol.12, 2013.

[31] Krunić, V., Krunić, M., Četić, N.: *Informacioni sistemi u industrijskoj proizvodnji sa podrškom za preventivno održavanje i tehničku dijagnostiku*, Naučno stručni časopis Tehnička dijagnostika Vol.12, 2013.

[32] Radionov, A., Evdokimov, A., Petukhova, O., Shokhina, G., Yabbarova, L.: *Vibrodiagnostic surveying of industrial electrical equipment*, 2016 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, 2016.

[33] Funk, P., Jackson, M.: *Experience based diagnostic and condition based maintenance within production systems,* The 18th International Congress and Exhibition on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management, 2005.

[34] Ugechi, C., Ogbonnaya, E., Lilly, M., Ogaji, S., Probert, S.:*Condition-Based Diagnostic Approach for Predicting the Maintenance Requirements of Machinery*, Engineering 2009, Scientific Research, 2009.

[35] Brown, D., Jensen, T.: *Machine-Condition Monitoring using Vibration Analysis The use of Spectrum Comparison for Bearing Fault Detection - A Case Study from Alma Paper Mill, Quebec, Canada*, Bruel and Kjaer application notes, 2011.

[36] Semjon, J., Balaž, V., Varga, J.: *Methodology for the vibration measurement and evaluation on the industrial robot Kuka,* The 23rd International Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region (RAAD), 2014.

[37] MaintWorld, Condition Based Maintenance in the Paper Industry, April 2014.

[38] http://voith.com/en/twogether-article-31-en-63-roll_maintenance.pdf, 2010.

[39] http://www.shiresystems.co.uk/downloads/whitepapers/papermill.pdf

[40] http://www.lifetime-reliability.com/free-articles/maintenance-management/Dont_Waste_Your_Time_and_Money_With_Condition_Monitoring.pdf

[41] Francesco, F., Andrea G., Sauro L., Nicola B.: *Multi-scale PCA based fault diagnosis on a paper mill plant*, IEEE Conference Publication http://ieeexplore.ieee.org/document/6059069/media

[42] *SKF Global Pulp & Paper Segment*, A compilation of issues 1-15 of thetehnical newsletter for the Pulp and Palper industry, Volume 1, No.1, January 2011.

[43] http://www.bretech.com/reference/Case%20Studies%20on%20Paper%20Machine%20Vibration%20Problems.pdf Andrew K. Costain, *Case Studies on Paper Machine Vibration Problems*

[44] Zeljković, V., Papić, LJ.: *Testiranje pouzdanosti*, Lola institut Beograd, 2001.

[45] Skakić, N.: *Teorija vjerovatnoće i matematička statistika*, Beograd 2001.

10. BIOGRAFSKI PRIKAZ

Mr Dejan (Ljubomira) Branković rođen je 6.3.1972. godine u Banjoj Luci. Srednju metalsku školu u Banjoj Luci, smjer mašinski tehničar, završio je s odličnim uspjehom kao učenik generacije1990/1991. Mašinski fakultet Univerziteta u Banjoj Luci, smjer proizvodno mašinstvo, upisao je školske 1991/1992.godine, a diplomirao školske 1997/1998.godine. Diplomski rad na temu „Injekciono livenje duroplasta pod pritiskom" je odbranjen na Mašinskom fakultetu u Banjoj Luci s ocjenom deset (10) uz praktičnu primjenu rada u industrijskom sistemu ČajavecHolding. Postdiplomske studije upisao je školske 2006/2007. godine na Mašinskom fakultetu u Banjoj Luci, Odsjek industrijski inženjering, smjer upravljanje kvalitetom i efektivni menadžment. Postdiplomske studije završava po starom planu i programu u 2010. godini. Magistrirao je u novembru 2010. godine na temi „Razvoj modela uticaja provođenja investicionih aktivnosti na efektivnost industrijskog sistema".
Cjelokupan radni angažman je vezan za fabriku za proizvodnju papira SHP Celex a.d. Banja Luka, koji je sastavni dio internacionalne kompanije Slovak Hygiene Paper Group u okviru ECO INVEST Slovačka, većinskog akcionara iz Slovačke. Od 2003. godine radi na organizaciji aktivnosti službe održavanja i to kao šef održavanja, zatim šef inženjeringa i održavanja i trenutno menadžer službe održavanja i kotlovnice. Posjeduje sljedeće sertifikate:

- *Project manager,* dodijeljen od strane internacionalne edukatorske kuće KOPEX spol.s.r.o. Slovačka;
- *SKF Reiliability System training WI 201 Fundamentals of machine Condition*, 2016;
- Interni revizor sprovođenja standarda ISO 9001:2015 *Quality Management System – Requirements* i ISO 19011:2011 *Guidelined sor auditing management systems*.

Završio je i srednju muzičku školu u Banjoj Luci, i to za zvanje nastavnik harmonike.
Oženjen, otac dva dječaka od 6 i 19 godina.

Objavljeni radovi u časopisima međunarodnog značaja:

1. Branković, D., Milovanović, Z.: Optimizacija pouzdanosti sistema papir mašine primjenom metoda tehničke dijagnostike, Tehnika ISSN 0040-2176, UDC 62(062.2) (497.1), 2017,
2. Branković, D., Milovanović, Z.: *Analysis of application of technical diagnostic measures to optimize the operational readiness of paper machine production system*, ENGINEERING & AUTOMATION PROBLEMS, 2018.
3. Branković, D., Milovanović, Z., Borojević, S.: *Analysis of Operational Readiness and Reliability of the Paper Machine System after the Implementation of Model of Influence*, Tehnički vjesnik, ISSN 1330-3651, Online: ISSN 1848-6339, Vol. 25/Suppl. 1, 2018.

Objavljeni radovi na međunarodnim konferencijama:

1. Branković, D., Milovanović, Z., Borojević, S.: *The performance of implementation of investment activities by applying the model of influence, International Working Conference „Total Quality Management – Advanced and Intelligent Approaches*", Beograd 2015.

2. Branković, D., Latinović, B., Milovanović, Z.: *Dewatering process optimalization of paper machine by the new suction press roll polyurethane cover implementation,* 12. međunarodna konferencija o dostignućima elektrotehnike, mašinstva i informatike DEMI 2015, Banja Luka 2015.
3. Branković, D., Milovanović, Z.: *Prevention of the failure of production system for the hygiene paper by using the condition based maintenance,* Conference: XLI OMO 2016, At Budva Montenegro, 2016.
4. Branković, D., Milovanović, Z., Katan, A.: *Saving of energy by optimizing the work of boiler plant of the factory for production of hygiene paper*, Conference: Power Plants 2016, At Zlatibor, Serbia, Volume: Thermal/hydro/wind and other Power Plants exploitation problems IV, 2016.
5. Milovanović, Z., Dumonjić-Milovanović, S., Brankovic, D.: *Models fo achieving cost-effective and sustainability during exploataion and mainaining of thermal energetic facility*, Maintenance Forum 2017, ISBN 978-84231-42-2, 2017.
6. Branković, D., Milovanović, Z.: *Application of the method of technical diagnostics to optimize the operation of the doctor blade holder on paper machine of the factory for production of hygiene paper*, Conference: Mintenance Forum 2017, ISBN 978-84231-42-2, At Budva, Montenegro, Volume: II, 2017.

Učešće u projektima u okviru poslovnog sistema internacionalne korporacije:

1. Uvođenje Sistema upravljanja kvalitetom SKQS prema međunarodnom standardu ISO 9001 i ISO 14 001 u SHP Celex, a.d. Banja luka;
2. Član projekt tima investicionih aktivnosti „Toaletna linija 6“ i „Toaletna linija 7“ (2005/2006)
3. Projekt menadžer investicione aktivnosti „Trafostanica Banja Luka 7“ i povezivanje industrijskog postrojenja sa novim izvorom napajanja električnom energijom (2007);
4. Projekt menadžer investicionih aktivnosti „Zamjena analognog sistema regulacije niskonaponskog postrojenja papir mašine“ i „Visokonaponsko postrojenje u SHP Celex“ (2007);
5. Član projekt tima investicione aktivnosti „Rekonstrukcija linija mljevenja celuloze“ (2007);
6. Član projekt tima investicione aktivnosti „Novi sistem rekuperacije toplote papir mašine u SHP Celex“ (2009);
7. Projekt menadžer investicione aktivnosti „Linija za pakovanje u vrećice“ (2010);
8. Projekt menadžer investicione aktivnosti „Linija za proizvodnju maramica HL5“ (2010);
9. Član projekt tima investicione aktivnosti „Sistem regulacije spaljivanja u kotlovima SHP Celex“ (2010);
10. Član projekt tima investicione aktivnosti „Zamjena uložaka ekonomajzera na kotlovima SHP Celex“ (2011);
11. Član projekt tima investicione aktivnosti „Rekonstrukcija sistema pregovanja toaletne linije 6 u SHP Celex“ (2011);
12. Projekt menadžer investicione aktivnosti „Adaptacija krovne konstrukcije hale papir mašine br. 1“ (2012);

13. Član projekt tima investicione aktivnosti „Fabrika za prečišćavanje otpadnih voda“ (2013);
14. Projekt menadžer investicione aktivnosti „Nosač krep šabera“ (2014);
15. Projekt menadžer investicione aktivnosti „Dupli šaber na usisnoj presi“ (2014);
16. Projekt menadžer investicione aktivnosti „Nova obloga usisne prese“ (2014);
17. Projekt menadžer investicione aktivnosti „Uvođenje proizvoda Away From Home“ (2014);
18. Projekt menadžer investicione aktivnosti „Instalacija salvetne linije NL12 u SHP Celex“ (2014);
19. Projekt menadžer investicione aktivnosti „Reduktor sušionog cilindra papir mašine“ (2015);
20. Član projekt tima investicione aktivnosti „Pakerica za solo rolne industrijskog proizvoda Away From Home“ (2015);
21. Član projekt tima investicione aktivnosti „Hilzn mašina za toaletnu liniju broj 6“ (2016);
22. Član projekt tima investicione aktivnosti „Gasifikacija SHP Celex“ (2016);
23. Projekt menadžer investicione aktivnosti „Kondenzator parokondenznog sistema papir mašine“ (2017);
24. Član projekt tima investicione aktivnosti „Transformator 2.5 MW“ (2017);
25. Član projekt tima strateške investicione aktivnosti „Rekonstrukcija sistema namotača i provođenja papirne trake papir mašine“ (2017);
26. Član grupacijskog tima i koordinator za SHP Celex za uvođenje sistema TPM u okviru sistema održavanja, (2017).

Прилог 3.

Изјава 1

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Изјављујем
да је докторска дисертација

Наслов рада Оптимизација поузданости рада производног система за производњу хигијенског папира коришћењем концепција одржавања према стању

Наслов рада на енглеском језику Reliability optimization of the production system for hygiene paper manufacturing by using the concept of condition based maintenance

- ☒ резултат сопственог истраживачког рада,
- ☒ да докторска дисертација, у цјелини или у дијеловима, није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- ☒ да су резултати коректно наведени и
- ☒ да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанта

У Бањој Луци, дана 25.06.2018. године

Драгољуб Зејак

Изјава 2

Изјава којом се овлашћује Универзитет у Бањој Луци да докторску дисертацију учини јавно доступном

Овлашћујем Универзитет у Бањој Луци да моју докторску дисертацију под насловом Оптимизација поузданости рада производног система за производњу хигијенског папира коришћењем концепција одржавања према стању

која је моје ауторско дјело, учини јавно доступном.

Докторску дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у дигитални репозиторијум Универзитета у Бањој Луци могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (*Creative Commons*) за коју сам се одлучио/ла.

- (●) Ауторство
- ( ) Ауторство – некомерцијално
- ( ) Ауторство – некомерцијално – без прераде
- ( ) Ауторство – некомерцијално – дијелити под истим условима
- ( ) Ауторство – без прераде
- ( ) Ауторство – дијелити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанта

У Бањој Луци, дана 25.06.2018. године

Франковић Дејан

Изјава 3

Изјава о идентичности штампане и електронске верзије докторске дисертације

Име и презиме аутора Дејан Бранковић

Наслов рада Оптимизација поузданости рада производног система за производњу хигијенског папира коришћењем концепција одржавања према стању

Ментор Здравко Н.Миловановић

Изјављујем да је штампана верзија моје докторске дисертације идентична електронској верзији коју сам предао/ла за дигитални репозиторијум Универзитета у Бањој Луци.

Потпис докторанта

У Бањој Луци, дана 25.06.2018. године

Бранковић Дејан