

**ORGANIZACIJA DIJAGNOSTICIRANJA TEHNIČKIH SISTEMA U
FUNKCIJI POVIŠENJA KVALITETA SISTEMA ODRŽAVANJA**

**ORGANIZATIONAL DIAGNOSTICS OF THE TECHNICAL SYSTEM
IN FUNCTION TO INCREASE OF THE MAINTENANCE SYSTEM
QUALITY**

Hasan Kahrmanović, dipl.prof.fizike
RMU „Banovići“ d.d.
Banovići

Dr.sc. Džemo Tufekčić, emeritus
Univerzitet u Tuzli
Tuzla

Dr.sc. Mehmed Hasanović, dipl.inž.maš.
RMU „Banovići“ d.d.
Banovići

Mr.sc. Nihad Harbaš, dipl.inž.maš.
Centar za energiju, energijsku efikasnost i
okolinu „CEE0“
Tuzla

REZIME

Upotreba savremenih alata i dostignuća u funkciji dijagnosticiranja stanja tehničkih sistema predstavlja put ka povećanju radnih karakteristika u smislu uvođenja održavanja po stanju izabranih tehničkih sistema. Visokosofisticirani dijagnostički uređaji imaju visoku nabavnu cijenu kao i cijenu edukacije koje su često neophodne za ispravno korištenje. U složenim preduzećima kao što je RMU Banovići gdje se koristi značajan broj visokoproduktivne i skupe opreme čiji zastoj uzrokuje značajne direktne i indirektne troškove, sistem dijagnosticiranja neophodno je da bude racionalno organizovan. Uspostavljanje racionalno organizovanog pristupa dijagnosticiranja tehničkih sistema predstavlja značajanu pretpostavku za kvalitetnije planiranje zastoja a time i značajno smanjenje direktnih i indirektnih troškova što u konačnici povećava konkurentnost preduzeća.

Ključne riječi: Dijagnostika, termovizija, vibracije, kvalitet održavanja

ABSTRACT

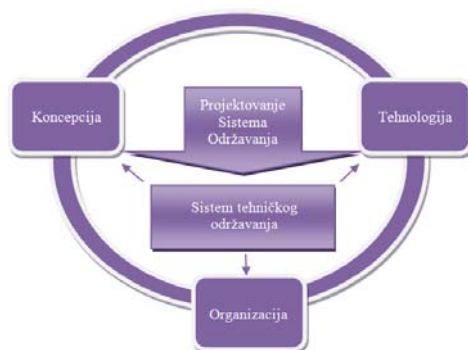
The use of modern tools and achievements in the function of diagnosing the condition of technical systems presents a path towards increasing the work properties with regard to introducing maintenance according to the condition of selected technical systems. Highly sophisticated diagnostic devices have a high purchase value as well as the trainings which are often required for their proper use. In complex companies like RMU Banovići where a large number of high productive and expensive equipment is used and whose downtime causes significant direct and indirect costs, the bare diagnosing system has to be rationally organized. Establishing a rationally organized approach and organizing a diagnosing system for technical systems is a significant prerequisite for a better scheduling of the downtime and presents thus a significant reduction of direct and indirect costs, which ultimately increases the competitiveness of the company.

Key words: Diagnostics, thermo vision, vibrations, quality of maintenance

1. TEORIJSKA ISTRAŽIVANJA

1.1. Sistem održavanja

Sistem održavanja tehničkog sistema (slika 1.) može da se realizuje na više načina, u više međusobno različitih varijanti. Pojedine varijante, odnosno pojedina rješenja sistema održavanja mogu da se razlikuju u nizu detalja, ali i u osnovnim, za sistem bitnim obilježjima. Pod koncepcijom sistema održavanja podrazumijeva se princip donošenja odluka o vremenu u kojem treba da se sprovedu postupci (skup aktivnosti) održavanja. U ovom pogledu postoje osnovne mogućnosti: preventivno, naknadno i kombinovano održavanje[1]. Kod preventivnog održavanja, potrebni postupci se sprovode prije nego što dođe do pojave otkaza, a kod naknadnog pošto se otkaz već pojavi. Tehnološki aspekt se odnosi na vrstu i način izvođenja postupaka održavanja, a organizacija sistema zavisi od odnosa pojedinih nivoa na kojima se sprovode postupci održavanja (pri ovome, postupci održavanja su one aktivnosti koje se sprovode na tehničkom sistemu da ne bi došlo do otkaza - pregled, zamjena dijelova i dr.). Koncepcija sistema održavanja predstavlja njegovo osnovno obilježje, koje utječe na opšti kvalitet sistema održavanja. Pod ovim pojmom podrazumijeva se obilježje sistema koje zavisi od principa na osnovu koga se donose odluke o sprovođenju postupaka održavanja.

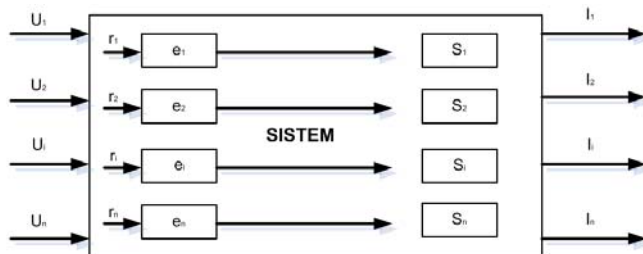


Slika 1. Komponente sistema održavanja

1.2. Tehnički sistemi

Tehnički sistemi predstavljaju skupove elemenata i relacija između njih i njihovih karakteristika povezanih međusobno u cjelinu, na način pogodan za vršenje korisnog rada. Poznato je da svaki tehnički sistem u trenutku preuzimanja od strane korisnika zadovoljava funkciju cilja prema datom kriterijumu. Međutim, nije poznato koliko dugo će sistem biti sposoban da ispunjava funkciju cilja prema datom kriterijumu. Izložen velikom broju spoljnih i unutrašnjih poremećaja, promjenjivih po sadržini, intenzitetu i vremenu, svaki sistem pojedinačno zadovoljavat će funkciju cilja tokom nekog vremena rada koje je rezultat svih pomenutih promjenljivih. [2]

Uopšteno govoreći, svaki tehnički sistem može da se predstavi šemom gdje su sa U_1, U_2, \dots, U_n obilježeni ulazni parametri sistema koji karakterišu uslove eksploatacije (materijal, energija, informacije itd.), a sa I_1, I_2, \dots, I_n , izlazni koji obuhvataju performanse sistema (proizvod, otpad, gubici, informacije itd.). Svaki tehnički sistem sadrži niz podsistema i elemenata (e_1, e_2, \dots, e_n), čiji su ulazni parametri označeni sa r_1, r_2, \dots, r_n , predstavljaju pokazatelje režima rada, a izlazni parametri S_1, S_2, \dots, S_n pokazatelje stanja. [2]



Slika 2. Tehnički sistem sa svojim podsistemima

Sa slike 2. se vidi da je izvršenje funkcije cilja prema datom kriterijumu, tj. obezbjeđenje željenih performansi sistema prema datom kriterijumu, uslovljeno utjecajem svih parametara iz grupe „U“ i „r“. Ako se pretpostavi da između njih postoji neka funkcionalna zavisnost koja je prikazana sljedećom jednačinom [2]:

$$S(S_1, S_2, \dots, S_n) = f(U_1, U_2, \dots, U_n, r_1, r_2, \dots, r_n)$$

Na osnovu ove jednačine može se zaključiti da je stanje elemenata sistema takođe u funkciji uslova eksploatacije i režima rada. [2]

Objedinjujući navedene dvije jednačine dobija se jednačina koja definiše funkcionalnu zavisnost između izlaznih parametara sistema i izlaznih parametara podsistema ili elemenata, koja se može prikazati na sljedeći način [2]:

$$I(I_1, I_2, \dots, I_n) = f(S_1, S_2, \dots, S_n)$$

Oznaku „f“, u datim jednačinama treba prije shvatiti kao pokazatelj koji definiše relaciju između pojedinih parametara nego kao neku određenu funkciju.

Međutim, kako su svi prikazani parametri promjenjivi tokom vremena rada, skladištenja i transporta, i kao rezultat svih nepovratnih procesa koji se dešavaju u materijalima, sistem će u jednom trenutku doći u stanje u kome njegove performanse ne zadovoljavaju postavljene kriterijume, tj. Izgubit će sposobnost vršenja funkcije cilja prema zahtjevima kriterijuma. [2]

Kako je za korisnike tehničkih sistema itekako važno da znaju ne samo kolike su njegove performanse u trenutku početka eksploatacije već i kolika je sposobnost sistema da ih održava u zahtjevanim granicama i kako se ona mijenja tokom vremena rada, pristupilo se traženju odgovora na ovo pitanje.

1.3. Analiza stanja tehničkih sistema

1.3.1 Analiza vibracija

Analiza vibracija u jednostavnom obliku predstavlja slušanje kako mašina radi. Svaka komponenta mašine vibrira drugačije i generiše karakterističnu buku koja ostavlja tipičan otisak spektra u obliku linearnog uzorka. Ukoliko je prisutno oštećenje, uzorak se izdvaja od poda buke. Ovo omogućava da vibrodijagnostičar prepozna da li problem povišenih vibracija potiče od debalansa, necentričnosti vratala, oštećenja ležaja ili nekog drugog oblika oštećenja. Pored detekcije uzroka povišenih vibracija, mjerenjem i analizom vibracija je moguće utvrditi i koliko je nivo vibracija alarmantan, da li je potrebno odmah zautaviti mašininu ili se može čekati do narednog planiranog zastoja.

Poenta je da analiza vibracija rotirajućih mašina koristi kako operaterima tako i održavaocima:

- omogućava identifikaciju oštećenja elemenata mašina
- pruža informaciju o uzroku povišenih vibracija mašine
- lokalizuje ugrožene elemente mašine
- optimizira nabavu rezervnih dijelova
- pruža rano planiranje mjera održavanja. [3]

Metode i oblici signala prilikom analize vibracija:

- *FFT analiza*: često korištena metoda za detekciju najčešćih oštećenja rotirajućih mašina, kao što su necentričnost vratila ili debalansa.
- *Order analiza*: varijanta FFT analize korištena kod mašina sa promjenljivim brojem obrtaja; umjesto frekvencije u spektru se analiziraju umnošci osnovne frekvencije rotacije mašine.
- *Analiza envelope*: koristi se za detekciju oštećenja kako zubi zupčanika tako i oštećenja kotrljajnih ležajeva.
- *Cepstrum analiza*: koristi se za detekciju oštećenja zupčanika i kotrljajnih ležajeva.
- *Vremenski zapis*: metoda pogodna za analizu izmjenjenog signala vibracija kao i za analizu kratkotrajnih udara i stohastičkih tranzijenata.
- *Analiza orbite*: koristi se za analizu relativnog kretanja vratila a naročito kod vratila oslonjenih na klizne ležajeve.
- *Mjerenje faze*: koristi se zajedno sa FFT analizom kako bi se potvrdila oštećenja kao što su debalans, necentričnost ili prisutnost zazora.
- *Analiza rezonanse*: koristi se za identifikaciju prirodnih i vlastitih frekvencija mašina i konstrukcija. Metoda uključuje udarne testove, snimanje zalijetanja ili zaustavljanja i utvrđivanje ugiba vratila. [3]

1.3.2 Termovizijska mjerenja

Termovizijsko ispitivanje je metoda bez kontaktnog mjerenja površinskih temperatura. Ispitivanje se temelji na činjenici da svako tijelo s temperaturom iznad apsolutne nule (0K ili -273°C) emitira elektromagnetska zračenja (toplinska zračenja) infracrvenog spektralnog pojasa koja leže na granici vidljivog crvenog spektra u valnom području $>0,7 \mu\text{m}$. Zračenje je posljedica vibracija uzrokovanih haotičnim termičkim kretanjem molekula u tijelu materije. Navedena zračenja postaju vidljiva za ljudsko oko ukoliko temperatura tijela postigne temperaturu 500–550°C. Vrijednost radijacije ovisi o temperaturi objekta, odnosno porastom temperature. Zadatak termovizijskog ispitivanja jest utvrditi temperaturnu raspodjelu vidljivog dijela površine ispitivanog elementa. [4]

Da bi rezultati ispitivanja bili kvalitetni opterećenje postrojenja mora biti u nominalnom radu. Snimanja termovizijskom kamerom preporučuju se izvoditi po oblačnom vremenu jer ukoliko je vrijeme sunčano može doći do odbljesaka zbog kojih mjerenje nije upotrebljivo, ne smije se zanemariti ni utjecaj vjetra koji hladi mjesta potencijalnog kvara, utjecaj zagađenja i vlage u zraku koji apsorbiraju dio infracrvenog spektra i smanjuju prozirnost, a ispitivani objekat potrebno je snimiti iz više ulova jer često odsjaj elementa može pogrešno navesti na mjesto zagrijavanja. [4]

Termovizijsko ispitivanje izvodi se mjernom metodom koja se naziva metoda uspoređivanja. Metoda uspoređivanja temelji se na temperaturnom uspoređivanju elemenata pod istim opterećenjem. Odstupanje od normalne radne temperature ukazuje na neispravnost objekta ispitivanja. Prekoračenje temperature određuje se razlikom radne temperature i temperature mjesta temperaturnog povišenja. Treba obratiti pažnju na činjenicu da li je mjesto radne temperature od istog materijala kao i mjesto temperaturnog povišenja kako bi faktor emisije bio približno jednak. Termovizijska ispitivanja izvode se na vidljivim dijelovima ispitivanih elementa. Postoji više prednosti korištenja termovizijskih ispitivanja:

- ispitivanje se obavlja tijekom normalnog pogona,
- neispravnost opreme se precizno locira u ranoj fazi,
- izbjegnuta su nepotrebna servisiranja,
- skraćuje se vrijeme remonta,
- unapređuje se održavanje te ekonomizira vođenje zaliha,
- pravilnim određivanjem rokova kontrole smanjuje se broj većih kvarova [4]

1.3.3. Analiza materijala bez razaranja

Ispitivanje materijala bez razaranja (*eng.* Non-Destructive Testing - NDT) je široka skupina metoda tehničke analize koja se upotrebljava u industriji i nauci za procjenjivanje osobina materijala, komponenta ili sistema bez uzrokovanja oštećenja na ispitivanom dijelu. Upravo zbog te činjenice te su metode visoko cijenjene i mogu uštedjeti i vrijeme i novac pri evaluaciji proizvoda, otklanjanju problema i istraživanju. Metode se koriste prvenstveno u mašinstvu, elektrotehnici, građevinarstvu, aeronautici, medicini i ostalim djelatnostima. Najčešće korištene metode ispitivanja materijala bez razaranja su sljedeće: Ispitivanje penetrantskim tekućinama, Ispitivanje vrtložnim strujama, Radiografsko ispitivanje, Ultrazvučno ispitivanje

1.3.3.1. Ultrazvučna metoda

Ultrazvučno ispitivanje materijala temelji se na upotrebi ultrazvuka, odnosno zvuka čija je frekvencija iznad gornje granice čujnosti normalnog ljudskog uha. Metoda funkcionira na principu odbijanja ultrazvučnog vala od defekta u materijalu i prikazivanju te reflektirane energije u odnosu na vrijeme. Na temelju toga, određuje se dubina na kojoj se zvučni talas reflektira, odnosno položaj defekta u materijalu. Pri ispitivanju materijala koriste se veoma kratki ultrazvučni impulsi frekvencije od 0,1 do 15 MHz (pa čak i do 50 MHz). Zbog velike preciznosti u odnosu na ostale metode ispitivanja bez razaranja, velike moći penetracije u ispitivani materijal i mogućnosti otkrivanja vrlo dubokih defekata, zbog velike osjetljivosti na otkrivanje i najmanjih diskontinuiteta, primjenjuje se u mnogim djelatnostima poput aeronautike, automobilske industrije, željezničkom transportu,... Koristi se za ispitivanje raznih materijala počevši od čelika, raznih legura, kompozita, pa sve do drva i betona. [5]

2. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

2.1. Organizacija sistema dijagnostike u RMU Banovići

Organizacija dijagnosticiranja tehničkih sistema u RMU Banovići postavljena je na način da je osnovna oprema jednostavna za korištenje poput Vibropen uređaja, uređaja za mjerenje temperature, protoka, pritiska itd, distribuirana po pogonima tako da svaki inženjer, poslovođa ili neposredni rukovodilac imaju osnovne mjerne uređaje. Sofisticirani dijagnostički uređaji i tehnički sistemi za specijalizovane analize koje podrazumjevaju najviša saznanja i certificiran kadar, distribuirani su u okviru Tehničke pripreme koja je u procesu transformacije i formiranja buduće organizacije "Slizba za inženjering i dijagnostiku".

2.2. Definisane objekta ispitivanja

Za tehničke sisteme ispitivanja koji će se analizirati u ovom radu odabrani su:

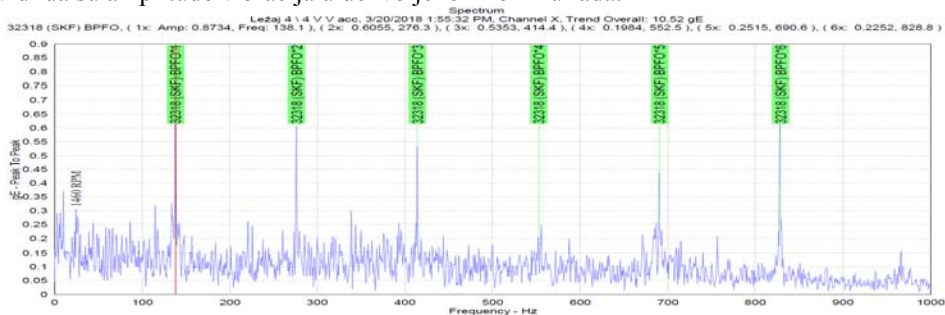
- Gumeni transporter na pogonu Separacija interne oznake GT136 sastavljen od elektro motora, reduktora gumene trake, i valjaka,
- Vagonske osovine za uskotračnu prugu 140mm na pogonu „Željeznički transport“ i

- Upravljačka ploča Bagera M201 na površinskoj eksploataciji.

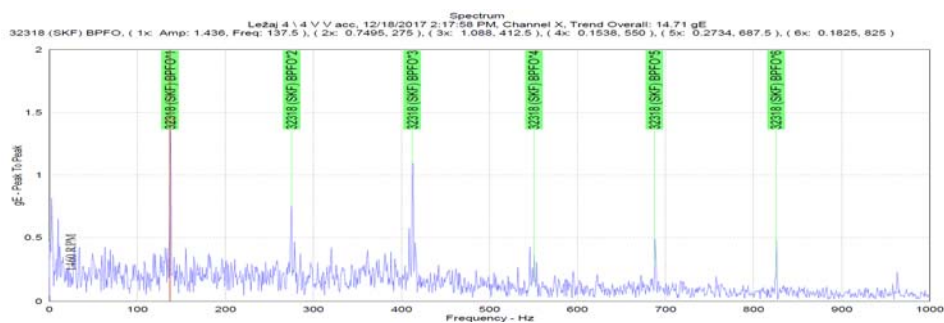
Zastoji ovih i sličnih tehničkih sistema uzrokuju potpun ili djelimični zastoj cijelog proizvodnog sistema i rezultiraju visokim direktnim i indirektnim troškovima. Pouzdanost analiziranih sistema predstavlja bitan faktor u procesu proizvodnje i održanja. Na bazi rezultata analiziranih sistema evidentno je da ispravna organizacija i pozicioniranje tehničke dijagnostike i odabir metoda tehničke dijagnostike direktno utiče i na eksploatacionu pouzdanost tehničkih sistema.

2.3. Analiza vibracija

Predmet istraživanja trenda vibracija je gumeni transporter GT 136 na pogonu Separacija. Zastoj ovog transportera direktno utiče na proizvodnju te je iz tog razloga naglašena analiza stanja ovog sistema. U RMU „Banovići“ d.d. kontrola vibracija ovog tehničkog sistema se vrši po vremenskom ciklusu i na bazi izrađenih sati čime se stiče prava slika stanja sistema. Funcionisanje tehničke dijagnostike svodi se na prikupljanje podataka, analizu podataka, dijagnozu sistema i prognozu sistema. Važno je navesti da su neplanski zastoji prije organizovane primjene kontrole vibracija koja je implementirana od 2017. godine bili dosta česti. Na bazi rezultata analize vibracija izmjerene uređajem SKF Microlog GX za analizu vibracija i datog softvera, neplanski zastoji su znatno smanjeni iz razloga što monitoringom vibracija značajan broj neplanskih zastoja na bazi dobivenih mjerenja i analiza planiran kao planski remont. Kao kvalitetan primjer primjene tehničke dijagnostike izabran je GT 136 pogon jer na njemu postoji kombinacija primjenjene redovne analize vibracija i termovizijskih mjerenja. Redovnom kontrolom vibracija utvrđeno je da se radi o blagom povećanju amplitude vibracija što u konačnici predstavlja pojavu problema za normalan rad reduktora a samim tim i tehničkog sistema (elektro motor, hidrodinamička spojnica, kočioni doboš, reduktor i gumena traka). Na slici 3. prikazan je dijagram vibracija, a na kojoj se jasno vidi da su amplitude vibracija u dozvoljenom režimu rada.



Slika 3. Analiza vibracija za GT136, 12 mjeseci prije



Slika 4. Analiza vibracija za GT136 –stanje pred otkaz

Posljednja kontrola vibracija na sistemu sa slike 4. pokazuje jedno drugačije stanje koje prelazi u opasno i nedopušteno stanje. Detaljnom analizom pikova na dijagramu za dati ležaj na ulazu u reduktor jasno se vidi da se radi o oštećenju vanjskog prstena ležaja što predstavlja labavost ležaja i evidentan rizik od otkaza. Prednost analize vibracija je u tome što se na bazi sistemskog praćenja tehničkih sistema može predvidjeti otkaz koji se preventivno rješava i uključuje u planski remont. Primjenjeni sistem analize vibracija u RMU Banovići rezultirao je značajnim smanjenjem neplanskih otkaza, a samim time i doprinio znatnim uštedama za RMU „Banovići“.

2.4. Termovizijska ispitivanja

Kontrola temperaturnih probijanja posebno je interesantna u ljetnim mjesecima gdje analizirajući temperaturna propuštanja na opterećenim strujnim krugovima lako uočavaju kritična područja. Pored elektro razvodnih ormara, trafo stanica, pumpnih postrojenja, sistema transporta i ostalih sistema u RMU Banovići za ovaj rad izabrano je mjerenje na elektro kontrolnoj ploči bagera Marion 201 slika 5.



Slika 5. Otpornik na bageru M201

Na slici se vidi skup elektronskih komponenti slične temperature međutim jedan elektronski segment (električni otpornik) pokazuje da se na njemu dešava povećano temperaturno propuštanje. Bager se trenutno zaustavio i izvršena je zamjena električnog otpornika u jako kratkom vremenskom intervalu. U ovom slučaju radi se o neplanskom zastoju ali dosta kratkom zastoju. Ono što je posebno interesantno jeste da se nije izvršila termalna kontrola elektronskih komponenti Bager bi normalno radio veoma kratko vrijeme i desio bi se neplanski zastoj koji bi uzrokovao značajne direktne i indirektne troškove. Pošto se radi o specifičnom otkazu navedeno oštećenje bi se bez termalne kamere otklonilo nakon otkaza i otkaz bi koštao značajno više, minimalno 7 do 10 puta duže bi trajalo otklanjanje otkaza kod bagera M201.

Iz ovoga se vidi opravdanost primjene termalnog ispitivanja, jer ispravnim odabirom objekata za snimanje dolazi se do znatno efikasnijeg i bržeg detektovanja kvara, i uočavanje problema je dosta brzo. Stoga se dolazi do smanjenja broja sati provedenih na određenim problemima koji direktno utiču na smanjenje troškova.

2.5. Ultrazvučno ispitivanje

U RMU „Banovići“ je uspješno implementirana ideja da se krene sa vlastitim ultrazvučnim uređajem i certificiranim kadrovima koji će raditi sva ultrazvučna ispitivanja. Pošto Rudnik raspolaže sa velikim brojem tehničkih sistema čiji rad i održavanje zahtjeva ultrazvučna mjerenja poput kontrole zavarenih spojeva na mašinama i slično a što je od velikog značaja za snimanje stanja sistema i elemenata koji se koriste. Dijelovi koji su izloženi velikim opterećenjima obavezno se ispituju (otkivci, odlivci, sudovi pod pritiskom, osovine vagona i

sl). Budući da su osovine željeznice izložene stalnim i promjenjivim opterećenjima izabrani su kao primjer za analizu predstavljenu u ovom radu. Važeći standard nalaže da se predmetne osovine moraju ispitati svake godine jer su starosti preko 40 godina, kako bi se preventivno otkrila oštećenja i kako ne bi došlo do pucanja osovina u toku transporta čime bi tehnički sistem obustavio transport uglja. Samim otkazom gubici bi se znatno povećali budući da oni direktno transportuju uglj na separisanje i da nemaju zamjenski sistem. Značajna ušteda u direktnim troškovima je evidentna jer se za te usluge više ne plaćaju treća lica, već to obavljaju zaposlenici Rudnika u sklopu svojih normalnih radnih aktivnosti.

3. ZAKLJUČAK

Realne mogućnosti implementacije sistema dijagnostike su veoma potrebne i korisne kao što je to i predstavljeno na primjeru primjenjenog sistema dijagnostike koju RMU „Banovići“ uspješno primjenjuje i razvija. Organizovan pristup razvoju tehničke dijagnostike od analize vibracija do ultrazvučnog ispitivanja u predstavljanim primjerima uveliko doprinosi povišenju kvaliteta implementiranog sistema održavanja, smanjenju broja i dužine trajanja zastoja, te u konačnici omogućeno je predviđanje ponašanja stanje tehničkih sistema kroz adekvatne analize što će neplanirane otkaze svesti na najmanji nivo vjerovatnoće.

Na osnovu izvršenih eksperimentalnih istraživanja koja su rađena na realnim tehničkim sistemima a za čiju izradu su korišteni stvarni izvorni podaci može se zaključiti da kod donošenja značajnijih odluka nije dovoljno koristiti rezultate analize samo po jednom kriteriju bez obzira koji kriterij se koristi. Sveobuhvatan i inovativan pristup analizi tehničkih sistema uveliko može smanjiti troškove životnog ciklusa tehničkih sistema, odrediti optimalna rješenja u vidu preventivnih popravki planiranja proizvodnje, optimizirane zalihe i da u konačnici postane generator značajnih uštede, povišenja raspoloživih sati, eksploatacione pouzdanosti i generator konkurentnosti preduzeća.

4. LITERATURA

- [1] Hasanović M., „Povišenje eksploatacione pouzdanosti u funkciji rizika“ doktorska disertacija, Univerzitet u Tuzli, Tuzla, 2017
- [2] Avdić H., Tufekčić Dž., „Terotehnologija I“, Univerzitet u Tuzli, Tuzla, 2007.
- [3] Michael W. Kehoe; Lawrence C. Freudinger: Aircraft Ground Vibration Testing at the NASA Dryden Flight Research Facility –1993, National Aeronautics and Space Administration, 1994.
- [4] Kuzle I., “Održavanje elektroenergetskog sustava”, “Termovizijska ispitivanja“, Zagreb, 2013.
- [5] Sebastijanović S., Tufekčić Dž., “Univerzitet u Tuzli”, Tuzla, 1998.
- [6] Ultrasonic Testing of Materials at Level 2, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria (1988.)