

PRAĆENJE STANJA I DIJAGNOSTIKA KVAROVA ZUPČANIKA

MONITORING AND DIAGNOSTIC OF GEAR FAILURES

Halep Amir

Tvornica cementa Kakanj
d.d. Kakanj,
HEIDELBERGCEMENT
GROUP, Selim ef.
Merdanovića 146, Kakanj

Ključne riječi:

zupčanik, praćenje stanja,
održavanje

Keywords:

gear, monitoring,
maintenance

Paper received:

30.03.2016.

Paper accepted:

20.05.2016.

Stručni rad

REZIME

Kvarovi zupčanika imaju veliki uticaj na pouzdanost rada mnogih mašina te je značaj praćenja stanja i dijagnostike kvarova zupčanika veoma veliki. Praćenjem stanja se dobiva uvid u stanje te se mogu poduzeti aktivnosti održavanja kojima se sprječavaju veće havarije na mašinama i postrojenjima. U ovom radu su analizirani mogući uzroci kvarova zupčanika, dat je prijedlog za metodologiju dijagnostike, kao i prijedlog za praćenje stanja imajući u vidu najbitnije uzroke kvarova.

Professional paper

SUMMARY

Gear failures have a major impact on the reliability of many machines and the importance of monitoring and fault diagnostic of gears is very large. By monitoring the condition gets an insight into the state and can take the maintenance activities that prevent greater damage on machines and plants. This paper analyzes the possible causes of gear failures, the proposal was given to the methodology of diagnostic, as well as a proposal for monitoring the state in view of the most important causes of failure.

1. UVOD

U savremenoj opremi veliku primjenu nalaze zupčasti prijenosnici. Od svih prijenosnika ova je grupa prijenosnika danas najčešće u primjeni. Izrađuju se s različitim položajem osi (paralelne, ukrštene itd.) od najmanjih do najvećih snaga, a upotrebljavaju se i za veoma visoke brojeve obrtaja te u širokom rasponu prijenosnih odnosa. Zbog prijenosa sile oblikom prijenosni odnos im je čvrst (ne zavisi o opterećenju) pa se upotrebljavaju i kao prijenosnici tačnog kretanja. Imaju veliku pogonsku sigurnost i dug vijek trajanja uz mogućnost kratkotrajnog preopterećenja. Održavanje je relativno jednostavno. U prednosti im se može još nabrojati velika mogućnost prijenosa snage po jedinici volumena te visok stepen iskorištenosti prenesene snage. Činjenica je također, da je ispravnost i pouzdanost rada mašina i uređaja funkcija ispravnosti pokretnih dijelova u koje spadaju i zupčanici. Zbog toga, oštećenja (defekti) i kvarovi ovih vitalnih elemenata mogu da prouzrokuju znatne materijalne gubitke, pa i zakonsku odgovornost. To je i razlog da se istraživanjima kvarova zupčanika poklanja veliki značaj. I ovaj rad razmatra problematiku kvarova zupčanika sa idejom da se predloži metodologija praćenja stanja i postupak dijagnostike oštećenja i kvarova [1, 2].

1. INTRODUCTION

Modern equipment has extensive application are toothed gears. Of all kinds rotary motion transmission, this a group is today the most often used. They are made with a different axis position (parallel, crossed, etc.) from the smallest to the largest power, but are also used for very high speeds and in a wide range of ratios. Because the transmission of force form gear ratio them sturdy (does not depend on the load) is used as carriers of precise movements. They have high operational reliability and a long service life with the possibility of short-term overload. Maintenance is relatively easy. The advantages they can still count a great ability to transfer power per unit volume and a high degree of utilization of transmitted power. The fact is also that the accuracy and reliability of the machines and devices function correctness of moving parts which include gears. Therefore, defects and failures of these vital elements can cause significant material losses, and even legal liability. This is why the research failures gear pays great importance. And this paper discusses the problems of failures gear with the idea to propose a methodology for monitoring and process diagnostics defects and failures [1, 2].

2. KVAROVI ZUPČANIKA, NJIHOVI UZROCI I MANIFESTACIJE

Detaljan opis habanja i oštećenje zuba zupčanika je dat standardom ISO 10825 Zupčanici - Habanje i oštećenje zuba zupčanika, te standardom AGMA 110-04 - Nomenklatura načina kvarova zubaca zupčanika, ali tehnička praksa je pokazala da se najčešće susreću slijedeći defekti na zupčanicima [3, 6]:

- habanje (trošenje),
- korozija (hrđanje),
- pregrijavanje,
- erozija,
- električna varničenja,
- površinski zamor materijala,
- lomljenje zuba,
- plastična deformacija,
- naboranost površine i
- pukotine.

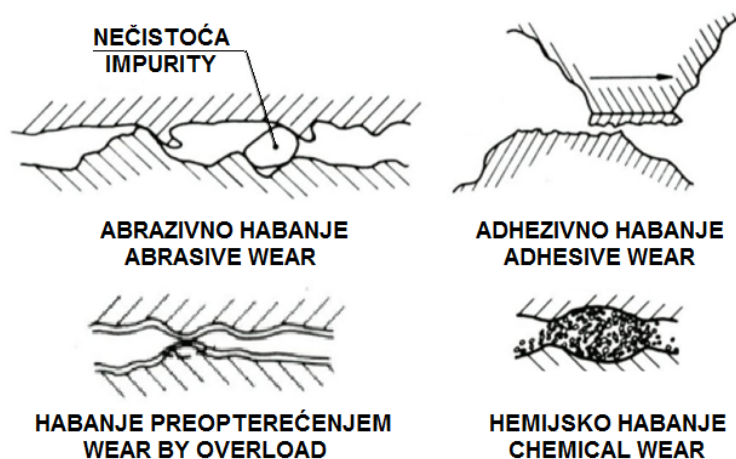
Habanje zubaca može biti: abrazivno, adhezivno, habanje preopterećenjem i hemijsko [6]. Na slici 1. se može uočiti da abrazivno habanje nastaje uslijed abrazivnih nečistoća (npr. pijesak) koje dospijevaju u međuzublje, a hemijsko habanje nastaje uslijed djelovanje agresivnih hemijskih jedinjenja kao što su npr. kiseline. Adhezivno habanje se dešava kada dvije čvrste površine klize jedna preko druge pod pritiskom pri čemu dolazi do lijepljenja jedne površine za drugu uslijed čega dolazi do „otkidanja“ dijela materijala.

2. GEAR FAILURES, THEIR CAUSES AND MANIFESTATIONS

A detailed description of wear and damage of the gears is given in standards ISO 10825 Gears - Wear and damage to the tooth and AGMA 110-04 - Nomenclature Of Gear Tooth Failure Modes but technical practice has shown that the most frequently defects in the gears are [3, 6]:

- wear,
- corrosion,
- overheating,
- erosion,
- electrical arcing,
- contact fatigue,
- breakages,
- deformation,
- rippling and
- cracks.

The wear of teeth can be: abrasive, adhesive, abrasion and chemical [6]. At Figure 1 it can be observed that abrasive wear resulting from abrasive impurities (eg. sand) due in gear mesh and chemical wear is due to the action of aggressive chemical compounds such as eg. acid. Adhesive wear occurs when two solid surfaces slide over one another under pressure to pass through the bonding surface of one another and causes the "tear-off" portion of the material.



Slika 1. Habanje zubaca
Figure 1. Wear of teeth

Korozija nastaje pod hemijskim i biološkim djelovanjem okoline i najčešće je uzrokovana neadekvatnim podmazivanjem.

Corrosion occurs under chemical and biological action of the environment and is usually caused by inadequate lubrication.

Usljed korozije dolazi do oštećenja površine kako zubaca tako i ostalih površina zupčanika što može dovesti da nastanka pukotina i drugih oštećenja. Pregrijavanje zupčanika može biti uzrokovano lošim podmazivanjem, lošom geometrijom kako zupčanika tako i uzubljenja, a može biti uzrokovano i spoljnim zagrijavanjem npr. uslijed rada okolnih mašina. Pregrijavanje može dovesti do ubrzanog habanja, promjene karakteristika materijala pa čak i do deformacije zupčanika.

Erozija nastaje uzrokovana kavitacijom pri podmazivanju uljem. Usljed nagle promjene brzine ulja u međuzublju tokom rotacije zupčanika dolazi do kavitacije te nastaje erozija površine zubaca u vidu sitne hrapavosti. Električna varničenja nastaju uslijed lutajućih električnih struja koje teku kroz zupčanike, te uslijed stranih elektromagnetnih polja koja dovode do indukovanja električne struje. Varničenja se javljaju tokom dodira površina dva zupčanika koje uslijed spomenutih struja nemaju isti električni potencijal. Ovo je veoma česta pojava kod reduktora koji se nalaze u blizini električnih generatora i elektromotora velike snage. Pojava se sprječava ugradnjom ležaja sa električnom izolacijom ili uzemljivanjem vratila zupčanika preko grafitnih četkica. Površinski zamor materijala se manifestuje u vidu jamica (kratera) na površini zubaca i ljuštenja površine zubaca što je ilustrovano na slici 2.

As a result of corrosion damage occurs to the surface of teeth and other surface gear which can lead to the formation of cracks and other damage. Overheating of the gears may be caused due to poor lubrication, poor geometry as gears and gear-and may be caused by external heating eg. due to the surrounding work machine. Overheating can lead to accelerated wear, to change the properties of materials and even to deformation gear.

Erosion occurs due to cavitation in the lubricating oil. Due to the sudden change in the speed of oil in gear mesh during the rotation of the gear comes to cavitation erosion occurs and the surface of teeth in the form of small roughness. Electrical arcing resulting from stray electrical currents flowing through the gears, and as a result of foreign electromagnetic fields that lead to the induction of electric current. Sparks occur during the contact surface two gears that due to the aforementioned current have the same electrical potential. This is very common in gear, which are located near the electric generator and the electric motor of great power. The appearance is prevented by installing bearings with electrical insulation or grounding shaft gear via carbon brushes. Contact fatigue is manifested in the form of pitting on the surface of teeth and spalling surfaces of teeth as illustrated in Figure 2.



**JAMICE (KRATERI)
PITTING**

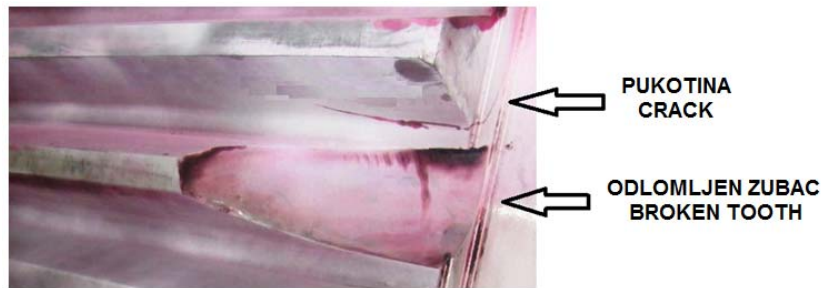


**LJUŠTENJE
SPALLING**

*Slika 2. Površinski zamor materijala
Figure 2. Contact fatigue*

Kada je u pitanju pojava jamica na površini zubaca potrebno je naglasiti da se pri uhodavanju novih zupčanika javljaju manje jamice koje veoma brzo iščeznu uslijed poliranja površine u radu i ovakve inicijalne jamice treba razlikovati od destruktivnih jamica koje ne iščezavaju već se progresivno uvećavaju. Do lomljenja zubaca zupčanika dolazi uglavnom uslijed zamora materijala ili uslijed preopterećenja. Primjer loma zupca je dat na slici 3.

Concerning to the phenomenon of pitting on the surface of teeth should be noted that when running in new gear appear less pits that quickly vanished as a result of polishing the surface of the work and these initial pits to be distinguished from destructive pits course that does not disappear but progressively increased. Breaking the gear teeth come mainly due to fatigue or due to overloading. Example breakage is given in Figure 3.



Slika 3. Odlomljen zubac i pukotina zupčanika
Figure 3. Broken tooth and gear cracks

Plastična deformacija (savijanje) zupčanika nastaje uslijed preopterećenja zupčanika, a uzrok može biti i pregrijavanje. Na slici 4. je dat primjer savijenih zubaca.

Deformation (bending) gear tooth is due to overloading of gears, and the cause may be overheating. At Figure 4 is an example of bended teeth.



Slika 4. Deformacija (savijanje) zubaca zupčanika
Figure 4. Deformation (bending) gear tooth

Naboranost površine je uzrokovana abnormalno visokim kontaktnim pritiskom, a pregrijavanje također pogoduje nastanku ovog oštećenja. Na slici 5. Je dat primjer naborane površine zubaca.

Rippling is caused by abnormally high contact pressure and overheating also favors the development of this damage. At Figure 5 is provided an example rippled surface of teeth.



Slika 5. Naborana površina zupca
Figure 5. Rippled surface of teeth

Pukotine nastaju uslijed uslijed zamora materijala ili uslijed preopterećenja. Jako je bitno da se najmanje pukotine odmah nakon otkrivanja saniraju, jer i najmanja pukotina u vrlo kratkom periodu se razvija u veću i dovodi do loma cijelog zupčanika.

3. DIJAGNOSTIKA KVAROVA ZUPČANIKA

Metode dijagnosticiranja stanja zupčanika se dijele na statičke metode i dinamičke metode. Statičke metode su metode ispitivanja koje se primjenjuju nad zupčanicima dok isti miruje, a dinamičke metode su metode koje se primjenjuju nad zupčanicom koji je u radu. Prednost statičkih metoda je njihova visoka pouzdanost, a nedostatak statičkih metoda je što zahtijevaju zaustavljanje i ponekada rastavljanje mašine kako bi se obavilo dijagnosticiranje. U tabeli 1. je dat pregled statičkih metoda [1, 2].

Tabela 1. Statičke metode dijagnosticiranja stanja zupčanika

| METODA | KOMENTAR METODE |
|---------------------------------|---|
| Vizuelni pregled | Vizuelnim pregledom zupčanika se može uočiti korozija i veća oštećenja (lomovi, jamice, ljuštenje itd.). Kao pomagala se koristi lupa i endoskop. Vizuelnim pregledom se može uočiti curenje ulja iz kućišta reduktora, provjeriti nivo ulja u reduktoru te stanje limenih zaštita kojima su zupčanicima zaštićeni od prašine i drugih uticaja. |
| Mjerenje dimenzija | Mjerenjem dimenzija na zupčanicima i uzubljenju se uočava: stepen istrošenosti zubaca, ekscentričnost zupčanika i nesaosnost uzubljenih zupčanika. Stepennost istrošenosti zubaca je tehnički indikator neispravnosti zupčanika, a također i određene veličine koje ukazuju na nesaosnost. |
| Mjerenje tvrdoće zuba | Mjerenjem tvrdoće zuba se provjerava da li je ista u zadanim granicama. Tvrdoća zubaca je tehnički indikator ispravnosti. |
| Ispitivanje penetrantima | Ispitivanjima penetrantima se otkrivaju pukotine na zupčanicima. |
| Ispitivanje magnetnim česticama | Ispitivanjima magnetnim česticama se otkrivaju pukotine na zupčanicima. |

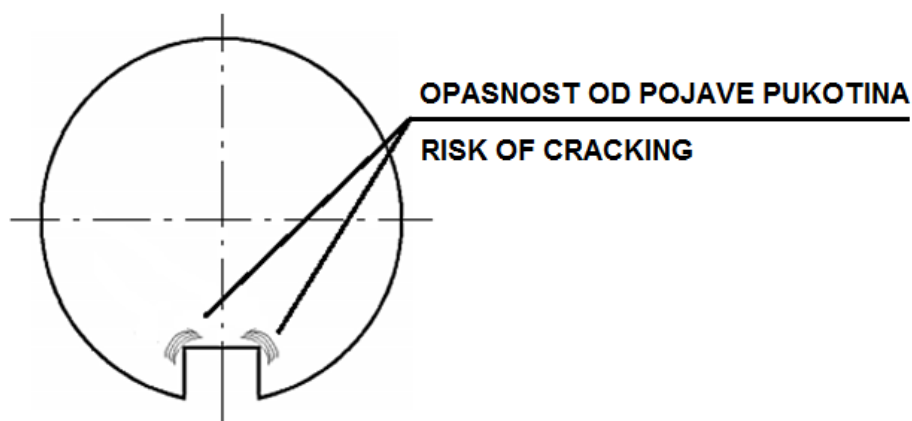
Cracks resulting from due to fatigue or due to overloading. It is very important that immediately after the discovery of cracks be repaired, because the slightest flaw in a very short period of time develops into a larger and leads to failure of the entire gear.

3. DIAGNOSTIC OF GEAR FAILURES

Methods of diagnostic of the gears can be divided into static methods and dynamic methods. Static methods are test methods to be applied on the gears while it is stationary and dynamic methods are methods that are applied over the gear in operation. The advantage of static methods is their high reliability, a lack of static methods is that require stopping and sometimes dismantle the machines in order to accomplish the diagnosis. Table 1 gives an overview of static methods [1, 2].

Tabela 1. Static methods diagnostic of the gears

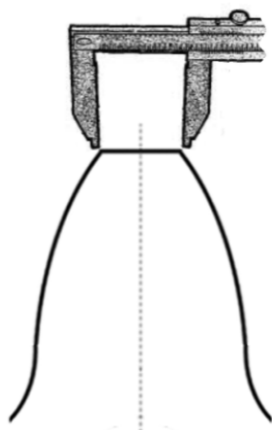
| METHOD | METHOD'S COMMENT |
|----------------------------|---|
| Visual inspection | By visual inspection of the gear can be observed corrosion and heavy damage (fractures, cavities, peeling etc.). As tool can be used magnifier and endoscope. By visual inspection can be seen leaking oil from the gear unit housing, check the oil level in the gear unit and the state of sheet piles which the gears are protected from dust and other impacts. |
| Dimension measurement | By measuring the dimensions of the gears and gear mesh is observed: the wear of teeth, gear eccentricity and gear misalignment. The wear of teeth is a performance indicator, and also a dimensions are indicating the misalignment. |
| Tooth hardness measurement | By measuring the hardness of the tooth is checked whether it is the same in the set limits. Hardness of teeth is a performance indicator. |
| Dye penetrant inspection | Dye penetrant inspection reveal cracks in gears. |
| Magnetic particle testing | Magnetic particle testing reveal cracks in gears. |



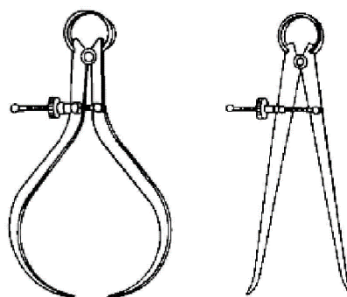
Slika 6. Na utorima za klinove se često javljaju pukotine
Figure 6. On the keyway often occur cracks

Vizuelnim pregledom se npr. mogu uočiti pukotine koje javljaju na utorima za klinove pri čemu endoskop može biti veoma korisno pomagalo. Još bolje je izvršiti ispitivanje penetrantima. Mjerenjem dimenzija na zupčanicima i uzubljenju se uočava: stepen istrošenosti zubaca, ekscentričnost zupčanika i nesaosnost uzubljenih zupčanika. Stepenn istrošenosti zubaca se provjerava mjerenjem dimenzija zubaca i poređenjem sa dimenzijama novih zubaca prema projektnoj dokumentaciji. Mjerenje se može obaviti pomičnim mjerilom i mjernim šestarom što je ilustrovano na slikama 7. i 8. Stepenn istrošenosti zubaca se također može provjeriti šablonima i mjernim listićima što je ilustrovano na slici 9.

By visual inspection, for example, can spot the cracks that occur in the keyway in which the endoscope can be a very useful tool. Even better is to perform dye penetrant inspection. By measuring the dimensions of the gears and the gear mesh is observed: the wear of teeth, gear eccentricity and gear misalignment. The degree of wear of teeth is checked by measuring the dimensions of teeth and a comparison with the dimensions of new teeth according design documentation. The measurement can be done by Vernier caliper and dial caliper gauge as illustrated in Figures 7 and 8. The degree of wear of teeth can also be checked by patterns and feeler gauge as illustrated in Figure 9.

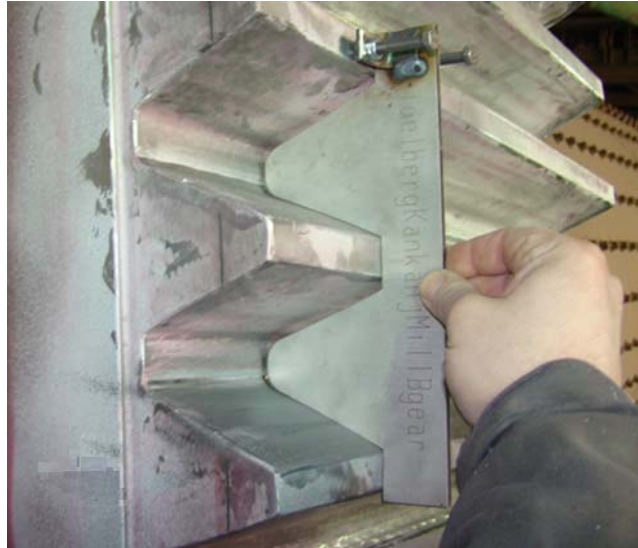


Slika 7. Mjerenje dimenzija zubaca
Figure 7. Tooth dimension measurement



Slika 8. Mjerni šestari
Figure 8. Dial caliper gauge



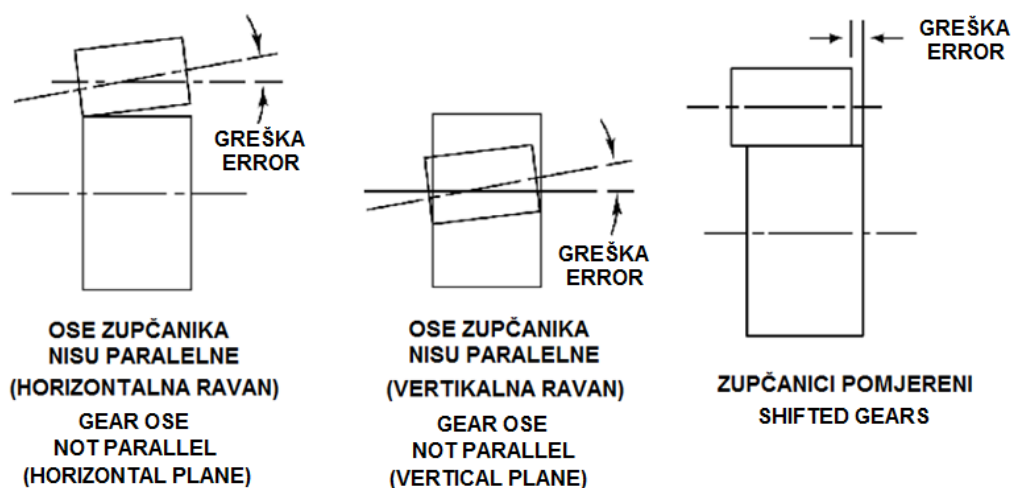


Slika 9. *Provjera istrošenosti zubaca šablonima*
Figure 9. *Check wear of teeth by patterns*

Izuzetno je opasna situacija ako je prisutan ekscentricitet na nekom zupčaniku, jer može doći do jakih udara jednog zupčanika o drugi. Ekscentričnost zupčanika se može izmjeriti pomoću komparatera koji se učvrsti npr. pomoću magneta na nepomični dio mašine, a zatim se zupčanik rotira, a komparaterom se mjeri tjemena udaljenost svakog zupca. Rezultati mjerenja se unose na crtež zupčanika ili u tabelu u kojoj svakom zupcu odgovara jedna kolona. Jedna relativno jednostavna metoda za mjerenje distance osi zupčanika jeste upotreba metalne šipke od nekog mekog materijala, kao što su npr. kalaj ili olovo. Ta šipka ubacuje se u međuzublje zupčanika, pa se nakon nagnječenja šipke izazvanog zahvatom zupčanika mjeri njezina debljina i izračunava distanca osa na osnovu debljine otiska i poznatih dimenzija zupčanika. Nesaosnost ozubljenja može izazvati ozbiljne probleme, pogotovo ako su u pitanju veliki zupčnici kada je potrebno obavljati mjerenja metodama i alatima mašinske geodezije. Nesaosnost ozubljenja je ilustrovana na slici 10. Nesaosnost ozubljenja se može uočiti vizuelnim pregledom (očito je neravnomjerno habanje površine zupčanika pri izraženoj nesaosnosti), spomenutom metodom otiska šipke od nekog mekog materijala (uzdužna neravnomjernost otiska ukazuje na nesaosnost), mjerenjima pomičnim mjerilom ili mjernim šestarom, metodima mašinske geodezije, snimanjem frekventnog spektra vibracija te mjerenjima temperature zubaca u zahvatu (neravnomjerno zagrijavanje površine zubaca ukazuje na nesaosnost ili greške evolvente).

It is a very dangerous situation if is the present eccentricity in a gear, as there may be strong kick a gear on the other. The eccentricity of the gear can be measured using a dial gauge, which is fixed eg. by magnets on the fixed part of the machine, and then the gear is rotated, the dial gauge to measure the distance to the vertex of each teeth. Measurement results are entered in the drawing of a gear or in a table in which each teeth corresponds to one column. One relatively simple method to measure the distance the axis of the gear is the use of metal rods from a soft material, such as eg. tin or lead. This rod is inserted in gear mesh, and after crushing rods caused gearmeshes measure its thickness and calculates the distance axis on the basis of the rod thickness and the known dimensions of gear. Misaligned gears can cause serious problems, especially when it comes to large gears when is necessary to perform the measurement by methods and tools of mechanical geodesy. Misalignment of gears is illustrated in Figure 10.

Misaligned gears can be observed by visual inspection (obviously uneven wear surface gear at expressed misaligned), the said method is fingerprint bars of a soft material (longitudinal unevenness fingerprint indicates misalignment), measuring by Vernier caliper or by dial calipers gauge, methods of mechanical geodesy, recording frequency spectrum of vibration and temperature measurements of teeth in mesh (uneven heating of the surface of the teeth indicates a misalignment or evolvente errors).



Slika 10. Nesaosnost uzubljenja
Figure 10. Misalignment of gears

Mjerenjem tvrdoće zuba se provjerava da li je ista u zadanim granicama. Primjenjuju se dvije metode za mjerenje tvrdoće zuba zupčanika i to metoda koju su izumili dr. Dietmar Leeb i dr. Marco Brandestini 1975. godine i tradicionalna metoda koju je 1900. godine izumio Johan Brinell. Tradicionalna Brinellova metoda je pouzdanija, ali u ispitivanom zupcu nastaje otisak u obliku kuglične kalote koja je svojevrsno oštećenje površine zupca. Naprotiv primjenom metode Leeba ne ostaje nikakvo oštećenje i samo mjerenje se provodi brže i jednostavnije.

Ispitivanjima penetrantima i magnetnim česticama se otkrivaju pukotine na zupčanicima što je ilustrovano na slici 3. Ispitivanje magnetnim česticama je brže i jednostavnije, ali znatno manje pouzdano od ispitivanja penetrantima. Naime za ispitivanje penetrantima je neophodno detaljno čišćenje površine, a ako je izražen proces kondenzacije vlage na površini zupčanika ne može se provesti. U tome smislu najbolje je planirati ispitivanje penetrantima u ljetnjem periodu.

Pukotine i druga oštećenja uočena vizuelnim pregledom ili penetrantima se fotografiraju radi dokumentovanja. Osim fotografisanja se primjenjuje i metoda indigo otiska kojom se dokumentuje stanje površine zupčanika tako što se na zubac postavi indigo papir odgovarajućih dimenzija, a preko njega obični bijeli papir. Pažljivim utrljavanjem pomoću čiste pamučne krpe se na papiru formira indigo otisak površine zupca.

U tabeli 2. je dat pregled dinamičkih metoda provjere stanja zupčanika [1, 2].

By measuring the hardness of the tooth is checked whether it is the same in the set limits. Two methods were used to measure the hardness of tooth, method invented by Dietmar Leeb and Marco Brandestini 1975 and the traditional method which was invented in 1900 by Johan Brinell. Traditional Brinell method is more reliable, but in the test the tooth resulting print in the form of spherical calotte which is sort of damage to the surface of teeth. Rather method Leeb does not remain any damage, only measurement is carried out quickly and easily.

Dye penetrant inspection and magnetic particle to reveal cracks in gears as illustrated in Figure 3. Magnetic particle testing is faster and simpler, but far less reliable than dye penetrant inspection. Specifically for dye penetrant inspection is necessary to thoroughly clean the surface, and if it is expressed in the process of condensation of moisture on the surface of the gear can not be implemented. In this sense, it is best to plan the dye penetrant testing in the summer period.

Cracks and other damage was observed by visual inspection or dye penetrant are photographed for documentation. In addition to photography applies the method indigo prints that document the state of the surface of the gear so as to prong set carbon paper of the same dimensions, and through it plain white paper. By careful rubbing with a clean cotton cloth to paper form carbon footprint surface teeth.

Table 2 provides an overview of the dynamic method of checking the state of gears [1, 2].

Tabela 2. Dinamičke metode dijagnosticiranja stanja zupčanika

| METODA | KOMENTAR METODE |
|----------------------------------|--|
| Pregled stroboskopom | Pomoću stroboskopa se može obaviti vizuelni pregled zupčanika koji rotira. |
| Analiza maziva | Analizom maziva se mogu otkriti nečistoće u mazivu i intenzivno habanje. |
| Mjerenje temperature zubaca | Mjerenjem temperature se otkriva neravnomjernost opterećenja zubaca. |
| Mjerenje vibracija | Svako uvećanje vibracija je simptom problema i potrebno je ustanoviti uzrok. |
| Preslušavanje zvuka i ultrazvuka | Svako uvećanje kako akustične tako i ultrazvučne emisije je simptom problema i potrebno je ustanoviti uzrok. |

Kada zupčanik rotira tj. dok je u radu njegov vizuelni pregled se može obaviti pomoću stroboskopa kada je zupčanik vidljiv ako je predviđen revizioni otvor. Bitno je napomenuti da pojedini ljudi mogu doživjeti pritom i epilepsiju provociranu bljeskovima svjetla stroboskopa. Uslijed stroboskopskog efekta rotirajući zupci prividno miruju te se režimom faznog pomaka, koji omogućava pomak statične slike u željeni položaj, vrši pregled jednog po jednog zupca. Analiza maziva spada ne samo u dinamičke već i u statičke metode. Analizom maziva se mogu otkriti nečistoće u mazivu i intenzivno habanje. Naime ako su u mazivu prisutne nečistoće kao što je pijesak, voda, kiseline i slično to se može otkriti hemijskom analizom maziva. Voda u ulju se može otkriti i pomoću kapacitivnog senzora koji kontinualno prati stanje mašinskog ulja. Ukoliko se u mazivu uoče čestice metala to je siguran znak ubrzanog habanja površine zubaca.

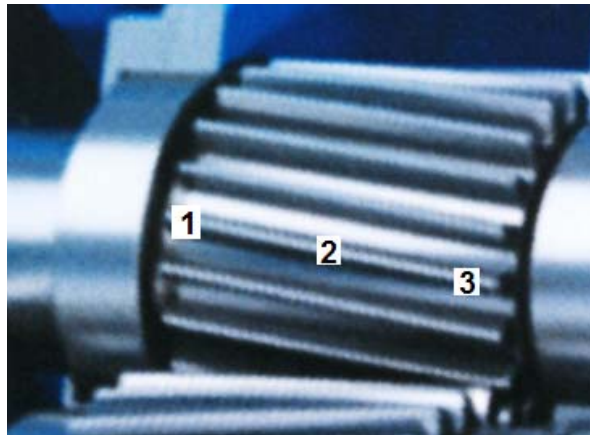
Mjerenjem temperature zubaca se otkriva neravnomjernost opterećenja zubaca čiji je uzrok nesaosnost, greške evolvente i slično. Mjerenje se obavlja pomoću beskontaktnog termometra ili termovizijske kamere. Temperatura se mjeri na oba kraja i u sredini, uzduž zubaca, kao što je prikazano na slici 11. nakon što je zupčanik u pogonu barem pola sata. Temperature u navedene tri točke trebaju biti približno iste.

Table 2. Dynamic method of checking the state of gears

| METHOD | COMMENT OF METHOD |
|------------------------------------|--|
| Stroboscope inspection | With the stroboscope can be done visual inspection of gear that rotates. |
| Analysis of lubricants | The analysis of lubricants can detect contaminants in the lubricant and intensive wear. |
| Temperature measurement of teeth | By measuring the temperature reveals unevenness load of teeth. |
| Measurement of vibrations | Any increase in vibration is a symptom of the problem and it is necessary to find the cause. |
| Listen to the sound and ultrasound | Any increase to the acoustic and ultrasound emissions is the symptom of the problem and it is necessary to find the cause. |

When the gear rotates, ie. while the work of his visual inspection can be done using a stroboscope when the gear is visible if the inspection opening exist. It is important to note that some people may experience epilepsy provoked by flashing strobe lights. Due to the stroboscopic effect rotating tines seemingly dormant and regime phase shift, which allows a shift from the static image in the desired position, inspects one by one tooth. Analysis lubricant is not only dynamic but also the static method. The analysis of lubricants can detect contaminants in the lubricant and intensive wear. Namely, if the impurities present in the lubricant such as sand, water, acid and the like that can be detected by chemical analysis of lubricant. Water in oil can be detected by using capacitive sensors that continuously monitor the state of machine oil. If the lubricant detect particles of metal that is a sure sign of the wearing surface of teeth.

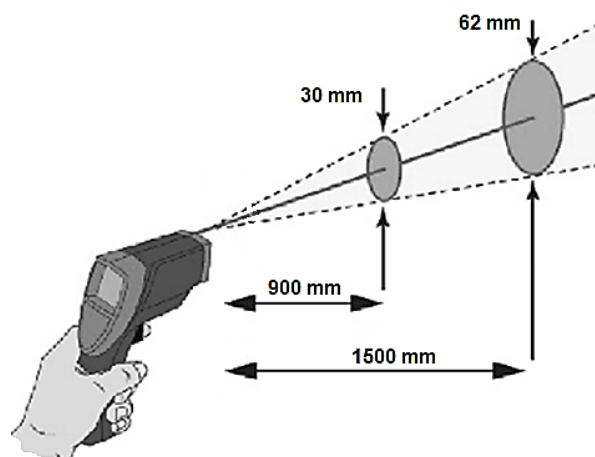
By measuring the temperature of teeth reveals unevenness loads of teeth caused by misalignment, evolvente errors and the like. The measurement is done using a non-contact thermometer or thermal imager. The temperature is measured at both ends and in the middle, along the teeth, as shown in Figure 11 after the drive gear at least half hour. Temperatures in these three points should be about the same.



Slika 11. Mjerenje temperature zupčanika
Figure 11. Gear temperature measurement

Veoma je bitno da se na beskontaktnom termometru pravilno podesi emisivnost. Za svrhe pravilnog podešavanja emisivnosti se može iskoristiti i visokotačni kontaktni termometar kojim se izmjeri temperatura zupca dok zupčanik miruje, a zatim se podešava emisivnost beskontaktnog termometra dok isti ne počne da indicira istu vrijednost temperature zupca kao i kontaktni termometar. Također je bitno pravilno odabrati udaljenost (distanca) sa koje se mjeri sukladno optici beskontaktnog termometra. Kada se termometrom sa odnosom distance i prečnika spota (mjernog polja) $D:S = 30:1$, u tački fokusa, mjeri sa udaljenosti 900 mm tada je prečnik spota (mjernog polja) u tački fokusa 30 mm. Međutim na udaljenosti od 1500 mm (1,5 m) prečnik spota je 62 mm. Ovo je ilustrovano na slici 12. Beskontaktni termometar mjeri srednju temperaturu unutar spota tako da se pri mjerenjima mora termometar približiti dovoljno blizu mjernoj tački. Potrebno je imati podatke o optici beskontaktnog termometra i poznavati veličinu zubaca te sukladno ovome odabrati udaljenost sa koje se mjeri temperatura. Vibracije zupčanika se mjere na kućištu ležaja na koje je oslonjeno vratilo zupčanika ili na kućištu reduktora. Potrebno je redovno mjeriti vibracije i evidentirati trend promjene vibracija. Svako uvećanje vibracija je simptom problema i potrebno je ustanoviti uzrok. Ako dođe do povećanja vibracija prvo treba provjeriti stanje ležaja, jer je veća mogućnost da je došlo do oštećenja ležaja nego zupčanika.

It is very important that the non-contact thermometer has properly adjusted emissivity. For the purposes of proper setting of the emissivity can also be used high accurate contact thermometer which measured the temperature of the tooth while the idle gear, and then sets the emissivity of the non-contact thermometer until it starts to indicate the same value as the temperature of the tooth and the contact thermometer. It is also important to choose the correct distance (distance) to that extent in line with the optics of a non-contact thermometer. When the thermometer with a ratio of distance and diameter spot (measurement field) $D: S = 30: 1$, at the focal point, measured from a distance of 900 mm then the diameter of the spot (measurement field) at the focal point 30 mm. But at a distance of 1500 mm (1.5 m) diameter spot is 62 mm. This is illustrated in Figure 12. Non-contact thermometer measures the average temperature within the spot so that when the thermometer measurements must approach close enough to the measuring point. It is necessary to have information about the optics of a non-contact thermometer and know the size of the teeth and in accordance with this select a distance with which to measure the temperature. Gear vibration are measured on the bearing housing that is supported shaft gear or the gear unit housing. It is necessary to regularly measure the vibrations and record trend changes vibration. Any increase vibration is a symptom of the problem and it is necessary to establish the cause. If there is an increase in vibration should first check the condition of the bearing, because the greater the possibility that there has been damage to the bearings than gears.



Slika 12. Odnos distance i prečnika spota (mjernog polja)

Figure 12. The attitude of distance and diameter spot (measurement field)

Posmatranjem vremenskog dijagrama signala vibracija i vibracijskog spektra se mogu dijagnosticirati najčešći defekti na zupčanicima. U te svrhe je potrebno podesiti dijagnostički instrument za mjerenje vibracija da snima kako dobar vibracijski spektar tako i dobar vremenski dijagram. Za određivanje parametara podešenja dijagnostičkog instrumenta su najbitnije frekvencija vrtnje (rotacije) f_v izražene u jedinici Hz (Hertz) koja odgovara broju obrtaja zupčanika n izraženom u o/min, a računa se po formuli:

$$f_v = \frac{n}{60}$$

Npr. ukoliko je broj obrtaja $n = 80$ o/min tada je frekvencija vrtnje $f_v = 1,33$ Hz. Ova frekvencija se često označava kao 1X frekvencija. Zbog činjenice da uvijek dva zupčanika u zahvatu frekvencija vrtnje se računa za oba zupčanika. Vezano za frekvenciju vrtnje se računa i period vrtnje ΔT izražen u sekundama kao recipročna vrijednost frekvencije vrtnje:

$$\Delta T = \frac{60}{n}$$

U navedenom primjeru gdje je $n = 80$ o/min je $\Delta T = 0,75$ sekundi tj. jedan obrtaj zupčanika traje 0,75 sekundi. Druga bitna frekvencija je frekvencija ozubljenja GMF koja se (izražena u Hz) računa po formuli:

$$GMF = \frac{z \cdot n}{60} = z \cdot f_v$$

gdje je z broj zubaca zupčanika. Frekvencija ozubljenja je ista za oba spregnuta zupčanika. Na slici 13. je dat tipičan frekventni spektar jednog zupčastog para.

By observing the signal timing diagram of vibration and the vibration spectrum can diagnose the most common defects in the gears. For this purpose it is necessary to set up a diagnostic instrument for measuring vibration that captures how good vibration spectrum and good timing diagram. To determine the parameters of the diagnostic instrument settings are the most important frequency of rotation (rotation) f_v expressed in Hz (Hertz), which corresponds to speed gear n expressed in RPM, and is calculated using the formula:

$$f_v = \frac{n}{60}$$

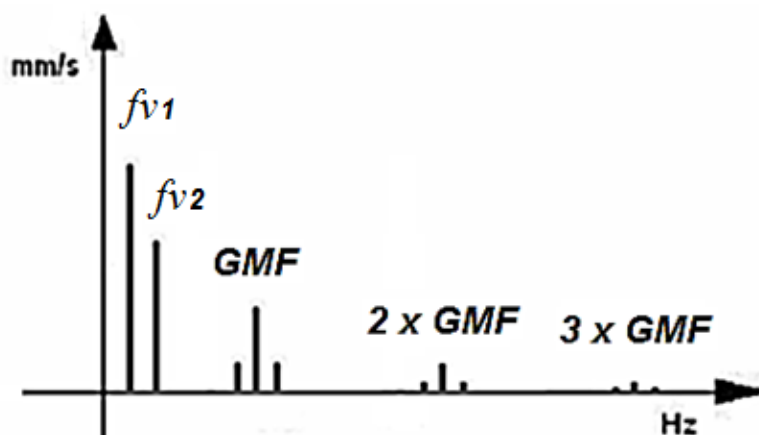
For example, if the number of revolutions is $n = 80$ o/min then the frequency of rotation is $f_v = 1,33$ Hz. This frequency is often referred to as 1X frequency. Due to the fact that always two gears in mesh frequency of rotation is calculated for both gears. With regard to the frequency of rotation is calculated and the period of rotation ΔT expressed in seconds as the reciprocal of the frequency of rotation:

$$\Delta T = \frac{60}{n}$$

In the given example is $n = 80$ o/min and $\Delta T = 0,75$ seconds ie. one revolution gear lasts 0,75 seconds. Another important frequency is the frequency which is gearing GMF (expressed in Hertz) is calculated according to the formula:

$$GMF = \frac{z \cdot n}{60} = z \cdot f_v$$

where z is number of teeth. The frequency of teeth is the same for both coupled gear. In Figure 13 gives a typical frequency range of one gear pair.



Slika 13. Tipičan frekventni spektar jednog zupčastog para
Figure 13. Typical frequency spectrum of one gear pair

Na spektru se mogu uočiti frekvencije vrtnje (rotacije) f_{v1} i f_{v2} oba zupčanika te frekvencija ozubljenja GMF i njezini viši harmonici. Lijevo i desno od GMF se mogu uočiti bočne komponente. Frekventni spektar sa slike 13. je uobičajen i ne ukazuje na oštećenja, ako su ukupne vibracije unutar dozvoljenih granica za dati pogon koje se određuju bilo primjenom ISO 10816 standarda bilo na osnovu preporuka proizvođača opreme ili vlastitog iskustva za dati pogon. Frekvencije vrtnje (rotacije) f_{v1} i f_{v2} oba zupčanika su uzrokovane neravnotežom rotora, ekscentricitetom zupčanika, savijenim vratilom, lošom geometrijom ozubljenja i mekom stopom mašine, te ukoliko dođe do uvećanja ovih komponenti spektra potrebno je ispitati sve ove uzroke. Frekvencija ozubljenja GMF je izražena uslijed nesaosnosti zupčanika, a uzrok joj može biti i istrošenost zubaca. Bočne komponente su najčešće uzrokovane ekscentricitetom zupčanika ili nesaosnosti zupčanika.

Istrošenost zubaca zupčanika se u spektru vibracija manifestuje pojavljivanjem sopstvene frekvencije zupčanika f_n . Sopstvena frekvencija f_n je frekvencija na kojoj zupčanik vibrira, ako ga se npr. udari čekićem. Lomovi na zupcima se najlakše otkrivaju na vremenskom dijagramu vibracija zupčanika na kome se mogu uočiti udari koji se periodično javljaju svaki puta kada oštećeni zubac naiđe što je ilustrirano na slici 14.

On the spectrum can be observed frequency of rotation f_{v1} and f_{v2} both gears and gearing GMF frequency and its higher harmonics. Left and right of the GMF can be seen sideband components. Frequency spectrum at Figure 13 is customary and does not indicate damage, if the total vibration within allowable limits for a given operation which was determined using the ISO 10816 standard was based on the recommendations of the equipment manufacturer or your own experience to give the drive. Frequency of rotation f_{v1} and f_{v2} both gears are caused by an imbalance of the rotor, eccentricity gear, bent shaft, bad geometry and soft foot of machines and if there is a magnification range of these components is necessary to examine all of these causes. Gear mesh frequency GMF is expressed as a result of misaligned gear, and cause can be worn teeth. The sideband components are usually caused by the eccentricity of a gear or misaligned gear.

Wear the gear teeth in the spectrum of vibration frequencies is manifested by the appearance of gear natural frequency f_n . Gear natural frequency f_n is frequency at which gear vibrate, if it is such, hit with a hammer. Fractures of the teeth are the easiest to reveal the time diagram of vibration gear on which can be seen strikes that occur periodically whenever it encounters a damaged tooth as illustrated in Figure 14.



Slika 14. Vremenski dijagram vibracija pri slomljenom zupcu

Figure 14. Timing diagram of vibration with broken tooth

Uobičajeno je da se za snimanje vibracijskog spektra uz mjerenje apsolutnih vibracija na kućištu ležaja i bez mjerenja faznog ugla signala vibracija odabere podešenje dijagnostičkog instrumenta tako da najviša frekvencija u spektru bude $3,5 \cdot GMF$, a broj FFT linija 2 do 3 puta veći od najviše frekvencije. Podešava se 5 usrednjavanja, a minimalna frekvencija u spektru se uzima približno $1/3$ od najniže frekvencije vrtnje. Na ovaj način se dobiva frekventni spektar kojim se mogu dobro uočiti defekti na zupčanicima, a može se snimiti i vremenski dijagram sa slike 14. Međutim, ako se želi snimiti odista dobar vremenski dijagram vibracija sa koga se može uočiti stanje svakog zupca tada se vrši mjerenje sa snimanjem faznog ugla vibracija, a podešava minimalna frekvencija u spektru približno tri puta viša od najviše frekvencije vrtnje. Najviša frekvencija u spektru se bira $2,5 \cdot GMF$, a broj FFT linija $\#FFT$ se računa po formuli:

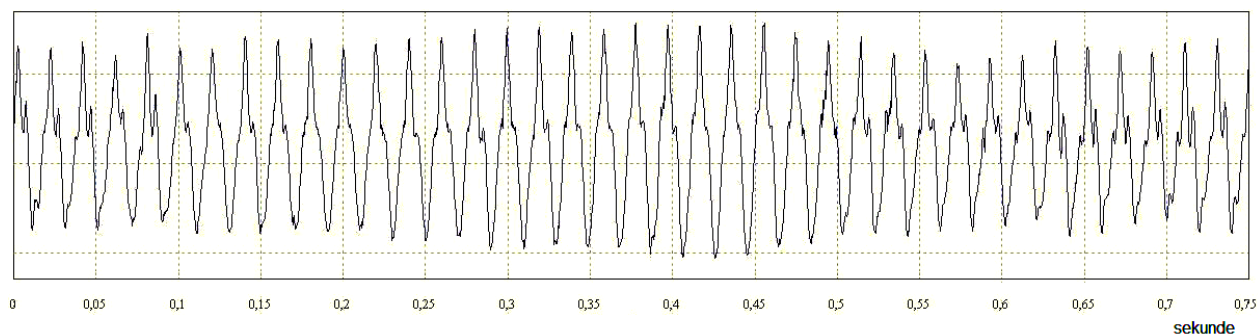
$$\#FFT \approx 250 \cdot z$$

Dakle, ako je broj zuba $z = 38$ tada se dobiva potreban broj FFT linija 9500 te se na dijagnostičkom uređaju podešava prvi veći broj linija tj. 12800. Broj usrednjavanja se bira 50. Ovakvim podešenjem se iz spektra eliminišu komponente koje odgovaraju frekvenciji vrtnje, uzima se dovoljan broj uzoraka sa svakog zuba i velikim brojem usrednjavanja utemljenog na faznoj referenci se eliminišu smetnje. Na slici 15. je dat primjer vremenskog dijagrama na kome se mogu uočiti svih 38 zubaca zupčanika i njihovo stanje. Na ovom dijagramu se također može uočiti da je vrijeme jednog obrtaja $\Delta T = 0,75$ sekundi odnosno da je broj obrtaja zupčanika $n = 80$ o/min. Dalje na dijagramu se može uočiti i modulacija amplitude vibracija koja se u frekventnom spektru manifestuje prisustvom bočnih komponenti. Pojedini dijagnostički instrumenti omogućavaju prikaz ovakvog dijagrama u polarnom obliku.

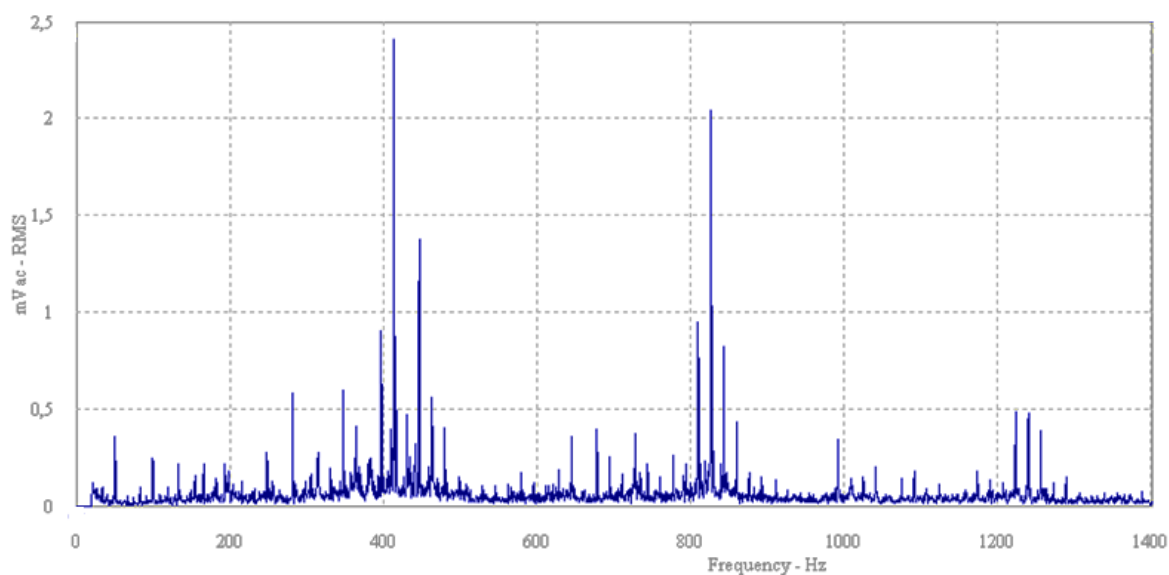
It is common to recording vibrational spectrum with the measurement of the absolute vibration of the bearing housing and without measuring the phase angle of the vibration signal selected by setting a diagnostic instrument so that the highest frequency in the spectrum to be $3.5 \cdot GMF$, and the number of FFT lines 2 to 3 times higher than the maximum frequency. Adjusts to 5 averaging a minimum frequency in the spectrum is taken approximately $1/3$ of the lowest frequency of rotation. This results in a frequency spectrum which can be well observed defects on gears, and can be recorded with the time diagram of Figure 14. However, if it is desired to record a really good timing diagram from which the vibration can be observed state of each latch then to measure the recording phase angle of vibration and adjusts the minimum frequency in the range of about three times higher than the highest frequency of rotation. The highest frequency in spectrum adjusted as $2,5 \cdot GMF$, and number of FFT lines $\#FFT$ is calculated according to the formula:

$$\#FFT \approx 250 \cdot z$$

So if number of teeth is $z = 38$ then necessary number of FFT lines 9500 and the diagnostic device adjusts the first number of lines ie. 12800. Number of averaging is chosen 50. With this setting to eliminate from the spectrum component corresponding to the frequency of rotation, taking a sufficient number of samples of each tooth and a large number of averaging founded on phase references are eliminated interference. Figure 15 is an example of the timing diagram on which can be seen all 38 gear teeth and their condition. In this diagram may also be seen that during one revolution $\Delta T = 0,75$ seconds so gear speed is $n = 80$ o/min. Next on the diagram can be observed modulation amplitude vibration that the frequency spectrum is manifested by the presence of sideband components. Some diagnostic tools allow the display of such a diagram in polar form.



Slika 15. *Primjer vremenskog dijagrama apsolutnih vibracija zupčanika*
Figure 15. *Example of time diagram absolute gear vibrations*



Slika 16. *Frekventni spektar akustične emisije zupčastog para*
Figure 16. *Frequency spectrum of acoustic emission from gear pair*

Svako uvećanje kako akustične tako i ultrazvučne emisije zupčastog para u radu je simptom problema i potrebno je ustanoviti uzrok. Ultrazvuk se teže prenosi na veće udaljenosti od zvuka te su smetnje manje izražene pri mjerenju ultrazvučne emisije. Na slici 16. je dat frekventni spektar akustične emisije jednog zupčastog para snimljen kondenzatorskim mikrofonom i analizatorom spektra. Na spektru se jasno mogu uočiti frekvencija ozubljenja *GMF* i njezini viši harmonici.

Any increase to the acoustic and ultrasonic emissions gear pair in the work of the symptom of the problem and it is necessary to establish the cause. Ultrasound is harder to transmit over long distances from the sound and the noise less pronounced in the measurement of ultrasonic emissions. In Figure 16 gives a frequency spectrum of acoustic emission one gear pair recorded condenser microphone and spectrum analyzer. On the spectrum can be clearly observed frequency gearing *GMF* and its higher harmonics.

4. PROAKTIVNI PRISTUP PRAĆENJU STANJA ZUPČANIKA

Da bi se oštećenja i kvarovi zupčanika sveli na najmanju moguću mjeru i time postigla visoka pouzdanost rada opreme, praćenje stanja zupčanika je od izuzetnog značaja. Obim aktivnosti ovisi o značaju date opreme te o radnim uvjetima iste, ali se generalno gledajući može reći da je jednom do dva puta godišnje potrebno penetrantima provjeriti da li su prisutne pukotine na zupčaniku i izmjeriti stepen istrošenosti zubaca, te mjerenjima ispitati geometriju ozubljenja. Ispitivanje maziva se vrši barem jednom godišnje. Vibracijski spektar je također dovoljno snimiti jednom godišnje, a ukupni nivo vibracija se mjeri kontinualno ili barem jednom dnevno. Također jednom dnevno je potrebno izvršiti vizuelni pregled i obaviti preslušavanje akustične emisije i ultrazvučne emisije. Tokom vizuelnog pregleda se obavezno provjerava i nivo ulja odnosno efikasnost podmazivanja.

5. ZAKLJUČAK

Metodologija dijagnostike kvarova prikazana u ovom radu omogućuje saznanja koja mogu da doprinesu smanjenju i štaviše izbjegavanju oštećenja i kvarova kod zupčanika. Poznavanje i primjena proaktivnih metoda praćenja stanja zupčanika, također, ima svoju tehnoeкономsku opravdanost, koja se ogleda u manjem broju zastoja i većoj raspoloživosti opreme.

5. LITERATURA - REFERENCES

- [1] Novinc, Željko; Halep, Amir: *Tehnička dijagnostika i monitoring u industriji*, Kigen, Zagreb, 2010.
- [2] Antunović Ranko: *Nadzor i dijagnostika tehničkih sistema*, Naučna knjiga, Grafokomerc-Trebinje, 2009.
- [3] Grothus, Horst: *The Grothus Preventive Maintenance Program*, Executive Enterprises, New York 1974.
- [4] Holmberg, Kenneth: *Tribological Bases for Accelerated Testing*, Technical Research Centre of Finland, Oslo, 1990.
- [5] Czech, Piotr: *Diagnosis of Industrial Gearboxes Condition by Vibration and Time-Frequency, Scale-Frequency, Frequency-Frequency Analysis*, Metalurgija (Časopis Hrvatskog metalurškog društva - HMD), Zagreb, 2012.
- [6] Standard ISO 10825: *Zupčanici - Habanje i oštećenje zuba zupčanika*

4. PROACTIVE APPROACH TO GEAR MONITORING

In order to gear damage and breakdowns reduced to a minimum and thereby achieve high reliability of the equipment, gear monitoring is crucial. The scope of activities depends on the importance of date equipment and the working conditions of the same, but in general can be said that once or twice a year dye penetrant inspection is necessary to check whether cracks are present in the gear and measure the wear of teeth and measurements to examine the geometry of the tooth. Testing of lubricants is carried out at least once a year. The vibrational spectrum is also enough to capture once a year, and the overall level of vibration is measured continuously or at least once a day. Also once a day is necessary to make a visual inspection and do listen to the acoustic emission and ultrasound emissions. During visual inspection of the required checks and oil level or efficiency of lubrication.

5. CONCLUSION

The methodology of fault diagnosis presented in this paper provides information that can help reduce and furthermore avoiding damage and failures in gear. Knowledge and application of proactive methods of monitoring gear, too, has its own techno-economic justification, which is reflected in less downtime and greater availability of equipment.

Corresponding author:

Dr. Sc. Amir Halep
Tvornica cementa Kakanj d.d. Kakanj,
HEIDELBERGCEMENT GROUP, Selim ef.
Merdanovića 146, Kakanj
Email: Amir.Halep@heidelberg.com
Phone: +387 61 478 761