

# DETEKTOVANJE VIBRACIJA TEHNIKOM POJAČAVANJA POKRETA

*Milan Kuvekalović<sup>1</sup>, Svetislavi Marković<sup>1</sup>*

## **REZIME**

U ovom radu, čiji je glavni cilj detekcija vibracija, se pored uvodnog izlaganja teme vibracija, prezentuje jedna relativno nova tehnika, nazvana pojačavanje pokreta. Radi boljeg razumavanja iste, jedno poglavlje je posvećeno digitalnim kamerama, čiji se potencijal koristi u ovoj tehnici, i dobijaju se veoma korisni izlazni rezultati, jasno vidljivi na izlaznim fajlovima.

**Ključne reči:** vibracije, detekcija, digitalna kamera, pojačavanje pokreta

## DETECTION OF THE VIBRATIONS BY USING MOTION AMPLIFICATION TECHNIQUE

### **ABSTRACT**

In this paper, whose main goal is the detection of vibrations, in addition to the introductory presentation of the subject of vibrations, a relatively new technique is presented, called motion amplification. For a better understanding of the technique, a chapter is dedicated to digital cameras, whose potential is used in this technique, and very useful output results are obtained, clearly visible in the output files.

**Key words:** vibrations, detection, digital camera, motion amplification

## **1. UVOD**

Obzirom da se mnoge industrije u velikoj meri oslanjaju na pouzdan rad rotirajućih mašinskih elemenata, potrebno je istaći važnost kontrolisanja vibracija u mašinskim sistemima. Retko se osporava da su ograničenja nivoa vibracija tih elemenata presudna za izdržljivost mašine, njenu pouzdanost i životni vek.

Konvencionalne tehnike analize vibracija mogu proizvesti numeričke podatke i grafikone koji ukazuju na stepen vibracije i oštećenja, vizuelizacija pokreta je mnogo efikasniji metod detektovanja nedostataka. Sistem kamere i softvera koji se koriste u tehnici pojačavanja pokreta pruža moćnu, neinvazivnu, vizuelnu predstavu suptilnih pokreta i opširna, isplativa sredstva analize.

## **2. VIBRACIJE**

Otkako je čovek počeo da gradi mašine za industrijsku upotrebu, a naročito otkako su motori postali pokretači tih mašina, neminovni su problemi povezani sa pojavom

---

<sup>1</sup>Fakultet tehničkih nauka, Svetog Save 65, Čačak

vibracija, njihovom redukcijom i izolacijom, a zadatak inženjera je da nađu adekvatna rešenja tih problema.

Lord Rejli (1842-1919) je formulisao principe koji se odnose na teoriju vibracije, kakvi se primenjuju i uče u današnje vreme. U svom izdanju pod naslovom „Teorija zvuka” objavljenom 1877. uveo je fundamentalni koncept oscilovanja i pokazao postojanje sopstvenih modova vibracija i sopstvene frekvencije za diskretne kao i za kontinuirane sisteme.

Zbog svog stalnog cilja da umanje težinu letećih struktura, pioniri aeronautike su bili prvi dizajneri konstrukcija koji su morali da dovedu vibracije i strukturne dinamičke probleme pod kontrolu. Od dvadesetih godina dvadesetog veka pa nadalje, aeronautički inženjeri su morali priznati značaj mehanike vibracija za predviđanje aeroelastičnog ponašanja aviona.

Tehnike koje se primenjuju za smanjivanje uticaja vibracija i sama izolacija vibracija postali su sastavni deo procesa konstruisanja mašina, a potreba za tačnim merenjem i analizom mehaničkih vibracija je sve veća. U prošlosti, kada su industrijske mašine bile relativno spore i robusne, problem vibracija je uspešno rešavan zahvaljujući istančanim osećajima za sluh i dodir kod iskusnih inženjera, ili pomoću jednostavnih optičkih instrumenata pomoću kojih su se merili pomaci usled vibracija.

Pojava i progresivna popularizacija računarskog hardvera od 1960. godine dovela je do preispitivanja čitavog polja metoda analize za strukturnu dinamiku; tradicionalne metode su zamenjene matičnim metodama koje proističu iz diskretizacije varijacionih izraza. Konkretno, ogroman napredak u metodi konačnih elemenata za postavljanje strukturnih modela dao je povoda za razvoj novih računskih metoda, da omogućavaju dizajnerima da se nose sa problemima koji se stalno povećavaju.

Tokom poslednjih dvadeset godina razvijene su potpuno nove tehnologije za merenje vibracija, pogodne za primenu na savremenim visokobzinskim mašinama koje su izložene visokim naprezanjima tokom rada. Korišćenje piezoelektričnih akcelerometara pomoću kojih se vibracijsko pomeranje konvertuje u električni signal, kao i raznih elektronskih mernih i akvizicijskih uređaja, merenje i analiza vibracija su postali pouzdani i široko korišćeni inženjerski alati.

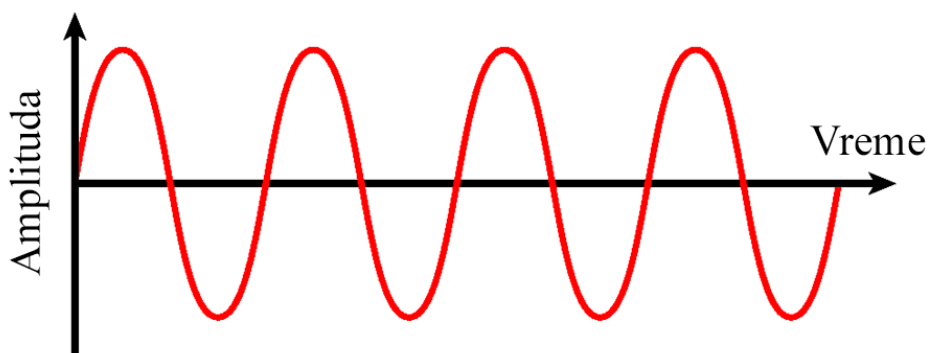
U praksi je vrlo teško izbeći pojavu vibracija. Vibracija je svakodnevni fenomen i susrećemo je u našim kućama, tokom transporta, pri radu. Vibracije su rezultat dinamičkih sila u mašinama koje imaju pokretne delove, kao i u strukturama koje su vezane za mašine. Vibracije obično nastaju kao dinamički efekti postojećih proizvodnih tolerancija, zazora, kotrljajućih i kliznih kontakata između elemenata mašina, kao i zbog postojanja disbalansa kod mašina sa rotirajućim kretanjem. Često vrlo male i u početku beznačajne vibracije mogu pobuditi rezonanciju nekih drugih delova strukture i mogu se pojačati do te mere da postanu glavni i vrlo ozbiljan izvor naraslih vibracija i buke. Različiti delovi mašine vibriraju sa različitim amplitudama i frekvencijama. Vibracije izazivaju zamor i habanje. Često su odgovorne za otkaz koji se može desiti nekoj mašini.

Ponekad vibracije mogu biti i korisne. Postoji dosta mašina i uređaja koji svoju osnovnu funkciju zasnivaju upravo na vibracijama, kao na primer siva, pokretne trake za transport sitnih komada, betonski kompaktori, ultrazvučne kade za čišćenje, razbijači kamena, maljevi, nabijači, itd. Pobuđivači vibracija, tzv. šejkeri, su uređaji koji generišu vibraciono kretanje i služe za ispitivanje mašina, uređaja i proizvoda koji moraju zadovoljiti svoje fizičke i radne performanse čak i kada su podvrgnuti delovanju vibracija (npr. elektronski uređaji na raznim voznim sredstvima).

Kod svakog rotirajućeg elementa karakteristična je pojava vibracija, i to najmanje jednom po obrtaju istog, iz razloga što je nemoguće napraviti neki rotor sa perfektnim masenim balansom. Iz iskustva su nastale smernice koje upućuju na procenu bezbednih

dozvoljenih ograničenja nivoa vibracija, za sve vrste rotirajućih mašinskih elemenata. Retko se osporava da su ta ograničenja presudna za izdržljivost mašine, njenu pouzdanost i životni vek. Međutim, često se polemiše o dozvoljenom nivou vibracija, gde proizvođači mašina dozvoljavaju veće nivoe vibracija, u odnosu na poželjne nivoe zadate od potrošača. Česti su slučajevi gde se isplata kupljene mašine odlaže, dok se ne ustanovi da li su nivoui vibracija u granicama definisanih vrednosti.

Najjednostavniji oblik vibracije je harmonijska vibracija. Kada kretanje tela koje tako vibrira pretvorimo u grafik kroz funkciju vremena, dobijamo oblik sinusoidne funkcije, kao što je prikazano na slici br. 1.



*Slika br. 1: Grafik jednostavne harmonijske vibracije*

### **3. DIGITALNE KAMERE**

Digitalne kamere su vitalna tehnologija u digitalizaciji slike, rade kao interfejs između svetlosti i digitalne slike. Postoji nekoliko koraka koji su uključeni u pretvaranje signala fotona sa uzorka u sliku koju vidimo na monitoru računara, svaki korak ima promenljive i faktore koji mogu promeniti načine na koje se slike generišu. One danas dolaze u velikom broju oblika i veličina koje odgovaraju svim vrstama različitih situacija. Kreću se od jedinica koje staju u džep do kamere koje su toliko teške da mogu zahtevati nekoliko ljudi da ih podignu. Istorijski su postojale potrošačke, industrijske i profesionalne kamere. Mnogi ovi nadimci su se spojili sa malim, koje su se ranije smatrale „potrošačkim” kamerama, koje se sada koriste na profesionalnom nivou, obzirom da se veoma kvalitetni senzori i optika mogu proizvesti u kompaktnim veličinama. Odabir prave kamere zavisi od toga kako će se ona koristiti. Bitni faktori na koje obraćamo pažnju u primeni tehnike pojačavanja pokreta su: osetljivost senzora, brzina osvežavanja, rezolucija slike, dubina bita.

U svrsi detektovanja vibracija, konvencionalne tehnike analize mogu proizvesti numeričke podatke i grafikone koji ukazuju na stepen vibracije i oštećenja. Međutim, korišćenjem potencijala digitalnih kamera, došlo se do vizuelizacije pokreta, što je mnogo efikasniji metod detektovanja nedostataka.

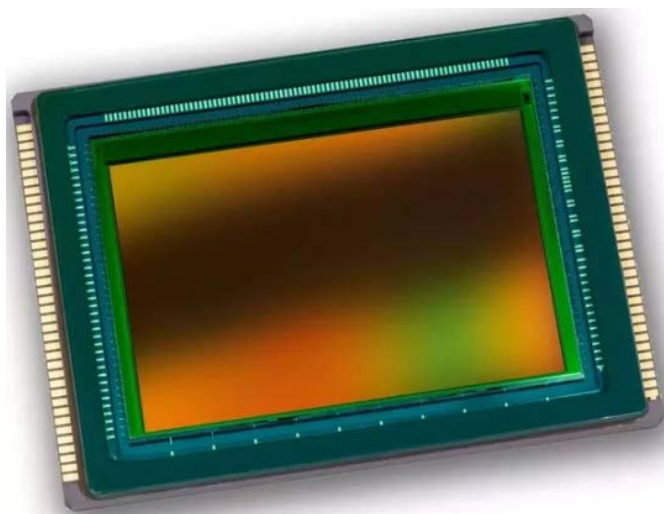
#### **3.1. Senzor**

Najvažniji aspekt kamere je sposobnost da bude kvantitativna, mereći određene količine nečega. U ovom slučaju, kamera meri svetlost, a najosnovnija merljiva jedinica svetlosti je foton. Senzor za kameru mora biti u stanju da detektuje i broji fotone, a zatim ih

pretvara u električne signale. Ovo uključuje više koraka, od kojih prvi uključuje otkrivanje fotona. Naučne kamere koriste fotodetektore, gde se fotoni koji udare u fotodetektor pretvaraju u ekvivalentnu količinu elektrona. Ovi fotodetektori su obično napravljeni od veoma tankog sloja silicijuma. Kada fotoni iz izvora svetlosti udare u ovaj sloj, oni se pretvaraju u elektrone. Međutim, posedovanje samo jednog bloka silicijuma značilo bi da je detekcija moguća, ali ne i lokalizacija. Odvajanjem silicijumskog sloja u mrežu od mnogo sićušnih kvadrata, fotoni se mogu detektovati i lokalizovati. Ovi sićušni kvadrati se nazivaju pikseli, a tehnologija se razvila do tačke u kojoj možemo staviti milione njih na senzor.

Kada je izložen svetlosti, svaki piksel senzora detektuje koliko fotona dolazi u kontakt sa njim. Ovo daje mapu vrednosti, gde je svaki piksel detektovao određeni broj fotona. Ovaj niz merenja je poznat kao bitmapa i predstavlja osnovu svih naučnih slika snimljenih kamerama, u zavisnosti od nivoa signala eksperimenta i primene. Bitmapu prate metapodaci, koji sadrže sve ostale informacije o slici, kao što su vreme snimanja, podešavanja kamere, podešavanja softvera za obradu slike i informacije o hardveru uređaja.

Moderni senzori poseduju i više desetina miliona piksela na svojoj površini, zahvaljujući naprednoj tehnologiji precizne izrade. Jedan od takvih senzora prikazan je na slici br. 2.



*Slika br. 2: Senzor digitalne kamere*

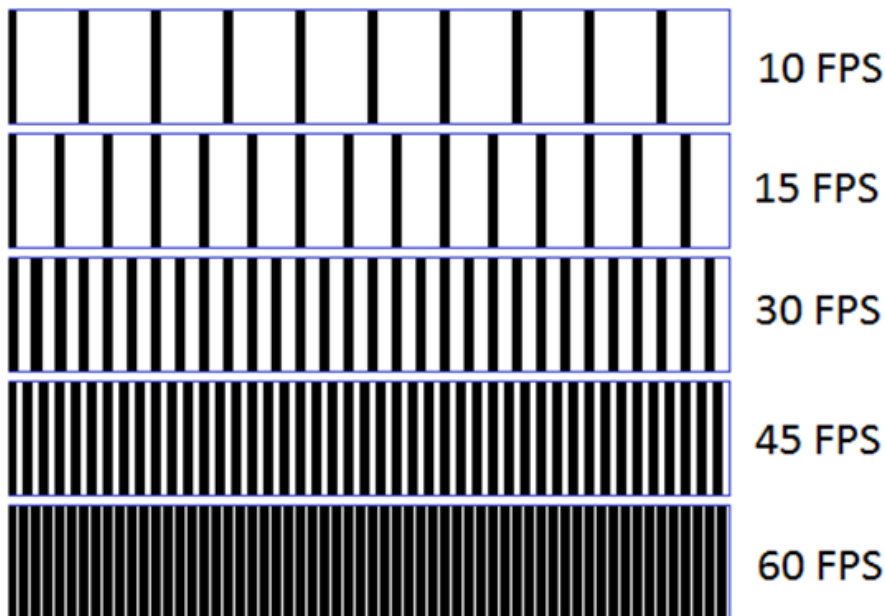
### **3.2. Brzina osvežavanja slike**

Brzina kamere može imati mnogo imena (brzina akvizicije, frekvencija, brzina, itd.), ali to je u suštini broj slika koje kamera može da zabeleži u sekundi. Ove slike se nazivaju frejmovi, pa većina digitalnih uređaja (kao što su oni u telefonima, DSLR-ima, televizorima i PC monitorima) meri brzinu u frejmovima u sekundi ili FPS. FPS se takođe može nazvati frekvencijom u hercima (Hz).

FPS ili broj kadrova kamera se vremenom povećavao jer istraživači žele da snime brže i dinamičnije procese. Dok se rani senzorski čipovi možda bore da postignu 10 fps, moderna CMOS kamera može lako postići i više hiljada fps preko celog senzora. Ovo povećanje brzine omogućava istraživačima da snime niz različitih uzoraka koji ranije nisu

moгли biti snimljeni. Ova želja za brzim slikanjem u nekim aplikacijama dovodi do različitih metoda za povećanje brzine kamere.

U slici br. 3. prikazan je dijagram koji pokriva jednu sekundu snimanja, pri čemu svaka vertikalna linija predstavlja frejm ili sliku. Pri 60 fps dobija se mnogo više podataka nego pri 10 fps, što omogućava preciznije snimanje bržih objekata.



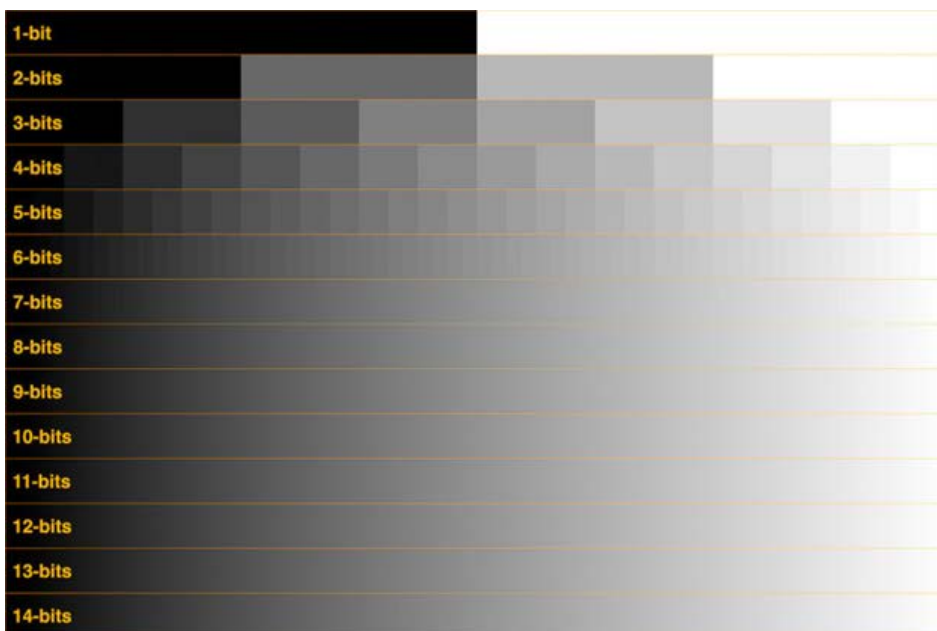
*Slika br. 3: Dijagram jedne sekunde snimka*

Neki biološki procesi se dešavaju na tako malom vremenskom okviru da samo najbrže kamere mogu da snime ove događaje, zbog čega su brzina snimanja i broj kadrova veoma poželjni kvaliteti naučnih kamera, sa brzinama koje se stalno povećavaju. Brzo snimanje omogućava snimanje dinamičke aktivnosti koja se nikada ranije nije videla, a izborom prave kamere, kablova, ekspozicije i oblasti za snimanje, i vi možete maksimalno povećati brzinu snimanja i snimiti više nego ranije.

### **3.3. Dubina bita**

Većina naučnih kamera je jednobojna, što znači da digitalni signal, koji je generisan u senzoru, dolazi u obliku sivih nivoa, u rasponu od čisto crne do čisto bele. Što je analogni signal intenzivniji, to je belji nivo sive, što znači da se fluorescentne slike obično prikazuju kao sivo-beli signal na tamnoj crnoj pozadini. Signal se širi po dostupnom opsegu nivoa sive, što je veća količina signala, potrebno je više nivoa sive da bi se slika u potpunosti prikazala. Ako bi signal imao maksimum od 5000 elektrona, ali bi kamera mogla da prikaže samo 100 različitih nivoa sive, signal bi bio komprimovan i svakih 50 elektrona bi se konvertovao u jedan sivi nivo, što znači da bi signal morao da se poveća za preko 50 elektrona pre nego što se promena mogla videti na slici. Ovo bi učinilo kameru neosetljivom na male promene u uzorku. Da bi proizvele tačan broj nivoa sive za prikaz opsega signala, kamere mogu da rade na različitim dubinama bita. Računari čuvaju informacije kao 'bitove', pri čemu bit može biti 1 ili 0. Da je piksel kamere 1 bit, bio bi ili

čisto crn ili čisto beli i ne bi bio koristan za kvantitativno snimanje. Broj bitova u ovoj terminologiji predstavlja broj stepena, kojim stepenujemo broj 2, i kao aritmetički rezultat dobijamo konačan broj, koji u stvari predstavlja broj nijansi sive koje senzor može da razlikuje, uključujući čisto crnu, i čisto belu nijansu. Na slici br. 4. vidimo kako se povećava broj nijansi sive koje senzor može da razlikuje, u zavisnosti od dubine bita.



*Slika br. 4: Prikaz mogućih nijansi sive u zavistosti od dubine bita*

Profesionalne naučne kamere obično koriste bitne dubine od 8 bita i više, pošto ispod ovog nivoa obično nema dovoljno nivoa sive za prikaz osnovnih detalja na slici. Uzevši u obzir da uređaji koji reprodukuju sliku iznad, uglavnom imaju dubinu 8 bita, svi primeri iznad tog broja, na takvim uređajima (monitorima), prikazani su bez razlike.

#### **4. TEHNIKA POJAČAVANJA POKRETA**

Čak i sa najboljim dizajnerskim praksama i najefikasnijim metodama izbegavanja, mnogi uzroci vibracija rotora su toliko suptilni i sveprisutni, pa se incidenti prekomerne vibracije, za koje su potrebna rešenja, i dalje dešavaju. Dakle, glavni zadaci za inženjera vibracija su dijagnostika i korekcija.

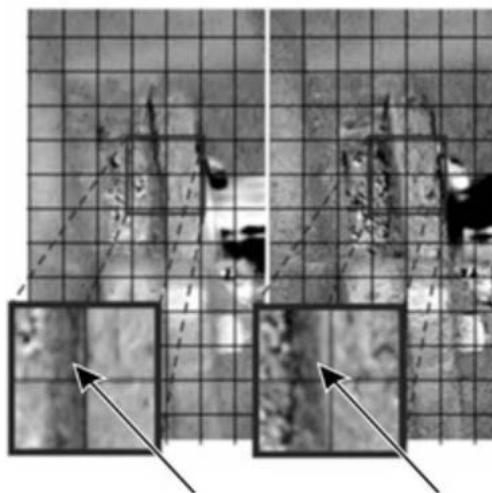
Pojačavanje pokreta je tehnika koja koristi video i obradu slike da detektuje suptilno kretanje i učini ga vidljivim golim okom kako bi se razumele međusobne veze i uzroci stvaranja pokreta. Kako industrijska oprema, mašine i druge komponente rade, često proizvode veoma male vibracije i pokrete. Ove vibracije su toliko male da se ne mogu detektovati ljudskim okom. Međutim, kako delovi mašine vibriraju, komponente mogu postati neusklađene, neuravnotežene, labave, napuknute ili još gore. Takvo kretanje smanjuje efikasnost, šteti opremi i može dovesti do katastrofalne štete. Korišćenjem odgovarajuće kamere i softvera, moguće je otkriti tako male pokrete i razumeti njihove efekte. Tehnike digitalne obrade videa i slike za merenje vibracije i kretanja piksel po

piksel, daju rezultate izdvajajući i povećavajući podatke da bi se dobio vizuelni prikaz pokreta.

Video obrada uživo obrađuje piksele u realnom vremenu kako bi se pokazao uticaj vibracija i pokreta na ceo sistem i potporne strukture, a mogu se snimiti i naknadno obraditi video snimci radi napredne analize. Dok konvencionalne tehnike analize vibracija mogu proizvesti numeričke podatke i grafikone koji ukazuju na stepen vibracije i oštećenja, ova tehnika pruža moćnu, neinvazivnu vizuelnu predstavu suptilnih pokreta i opširna, isplativa sredstva analize.

Prednosti ove tehnike su u širokom spektru primena u istraživanju, testiranju proizvoda i osiguranja kvaliteta, kao i u sektoru preventivnog održavanja. Pojačavanje pokreta je prva beskontaktna tehnologija zasnovana na kameri koja omogućava korisnicima da vide, u realnom vremenu, pokrete koji su nevidljivi ljudskom oku ili koje je teško meriti tradicionalnim sensorima. Servisni inženjeri koriste ovu tehnologiju da vide i mere kretanje, što im zauzvrat pomaže da donose odluke o kritičnim aplikacijama i sistemima na osnovu stvarnih podataka. Oni su u stanju da brzo izmere i vizuelizuju vibracije, i iskomuniciraju sa tehničkim i netehničkim korisnicima.

U samom softveru koji se koristi za pojačavanje pokreta, prvenstveno se obrađuje nivo detalja učitane slike (videa), sa ciljem da se omogući što lakše detektovanje pokreta na susednim frejmovima (pojedinačnim slikama) u video fajlu, što je vidljivo na slici br. 5.

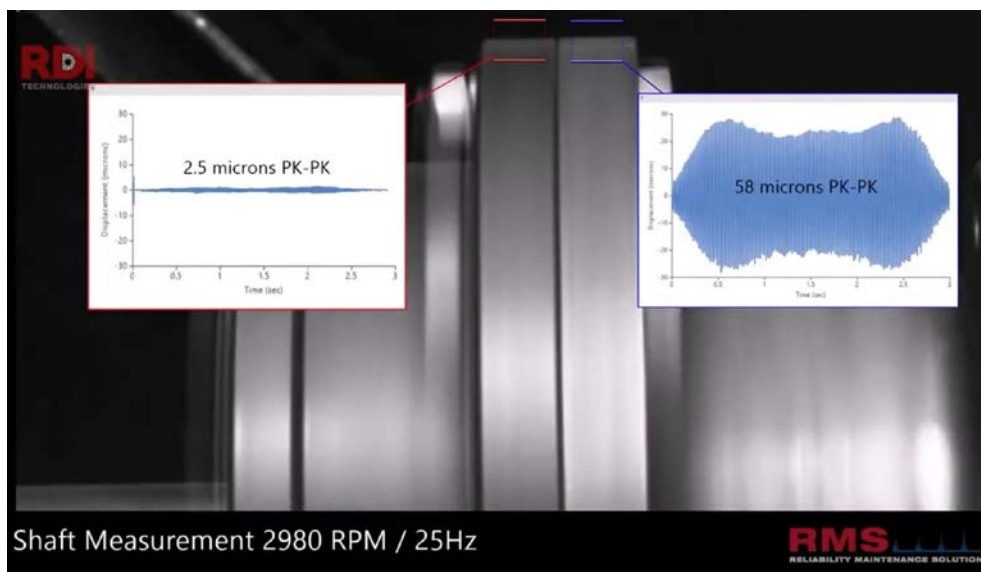


*Slika br. 5: Nivo detalja slike pre (levo) i posle (desno) obrade*

Koristeći patentiranu kameru i softversku tehnologiju, softver uključuje pretvaranje svakog piksela unutar kamere u senzor za merenje i snimanje video analize vibracija i pokreta sa neverovatnom tačnošću. Odatle, algoritam za obradu video zapisa detektuje suptilno kretanje i povećava ga da bude vidljivo golim okom.

Vizuelizacija pruža ključnu razliku u određivanju i razumevanju grešaka u mašinama, infrastrukturi, pa čak i procesima u ljudskim telima. Dok alati poput akcelerometara, merača napreznja i softvera za modeliranje mogu otkriti i preneti tradicionalne podatke o vibracijama, mogućnost da se vide problemi sa vibracijama i njihova potencijalna rešenja putem videa čini dublji uticaj od gledanja samo podataka i grafikona.

Vizuelizacijom, kvantifikovanjem i prenosom kretanja strukturalnih sredstava, softver pruža prozor u to koliko štetne vibracije i nepravilno kretanje mašina mogu postati. Tehnologija može da proceni greške u mašinama i drugim komponentama merenjem fizičkih osobina pokreta i vibracija, otklona i pomeranja. Nepokretni objekat miruje u stanju ravnoteže, ali kada prinudna vibracija pokrene objekat koji miruje, on počinje da se kreće napred-nazad ili da vibrira. Vibracije mogu izgledati bezopasne, ali šteta se povećava. Procenjujući vibracije i gde se one javljaju, analiza vibracija vizuelizuje greške u mašinama i nudi mogućnosti za preventivno održavanje. Otklon se odnosi na rastojanje ili ugao na koji se strukturalna komponenta savija ili uvija od svog prvobitnog položaja kada je pomerena silom. Kada objekat vibrira, otklon je obično premali da bi se mogao videti golim okom, i tu dolazi na scenu pojačavanje pokreta. Pomeranje označava rastojanje za koje se element ili objekat pomerio od svoje prvobitne lokacije i može se meriti u smislu udaljenosti i rotacije. Obzirom da se unutar ovog rade ne može reprodukovati video, prikazaćemo izgled aplikacije na slici br. 6., gde se u ovom slučaju meri pomeranje dva susedna dela jedne spojnice, pri određenom broju obrtaja.



Slika br. 6: Prikaz pomeraja odabranih delova spojnice

## 5. ZAKLJUČAK

Proizvodna industrija je srce privrede, motor koji pokreće proizvodnju robe za izvoz, trgovinu i stvaranje prihoda. Toliko pokretnih delova, i bukvalno i figurativno, čine proizvodnu industriju. Svi ti pokretni delovi, moraju se pažljivo pratiti kako bi se obezbedilo njihovo dalje pravilno funkcionisanje. Stručnom implementacijom digitalnih kamera u svrsi detektovanja vibracija, došlo se do ove neinvazivne tehnike, kojom se štede i vreme i sredstva, obzirom na brzinu postavljanja opreme, i beskontaktno funkcionisanje iste u blizini mašina u radu. Ovim načinom unapređena je prevencija kvarova ili loma kako manjih tako i velikih mašinskih sistema i konstrukcija.



## **6. LITERATURA**

1. J. P. Den Hartog: Mechanical vibrations, McGRAW-HILL BOOK COMPANY, Toronto 1956.
2. Mira Petronijević: Vibracije od saobraćaja: nastanak, merenje, predviđanje i procena dejstva na objekte i ljude, Akademska misao, Beograd 2017.
3. Maurice L. Adams, JR.: Rotating machinery vibration, Case Western Reserve University, Cleveland
4. Rastislav Lukac: Single sensor imaging, Taylor and Francis Group, Toronto.
5. Takao K.: Essential principles of image sensors, Taylor and Francis Group, Toronto.
6. Motion Amplification User's Manual, RDI Technologies, Tennessee 2019.