

# ANALIZA NEVIDNIH TRESLJAJEV S POMOČJO DIGITALNE KAMERE

Raziskovalna naloga

**Avtorja**

Garbas Luka  
Alexander Lenarčič

**Mentor**

Robert Jamnik

2023

Ljubljana, SSKŠ Ljubljana

## Vsebina

Hipoteza .....	3
Dinamične obremenitve.....	3
Trajna dinamična trdnost – Wohlejeva krivulja.....	3
Merjenje vibracij .....	6
$\lambda$ -vue.....	11
Video povečava gibanja.....	12
Delo na terenu in snemanje.....	13
Rezultat in zaključek.....	14
Viri.....	15

## Hipoteza

Tresljaji so lahko izredno škodljivi in lahko povzročijo veliko težav v delovanju strojev in naprav. Hipoteza je, da bi lahko s programom kateri obdela video posnetek lahko zaznala in prikazala nevidne vibracije in tresljaje.

## Dinamične obremenitve

### Tresljaji med delom na stroju

Dinamične obremenitve vedno ustvarjajo vrsto vibracij, kar lahko privede do zamika orodja ter obdelovanca med obdelavo. To pa poslabša kvaliteto rezanja kovine. Poslabšanje rezalnih pogojev pri obdelovalnem stroju lahko privede do nestabilnosti postopka. Tako med obdelovanjem prihaja do tako imenovanih "chatter vibracij", ki pa lahko privedejo do zmanjšanja natančnosti stroja in povečanja obrabe komponent stroja. Posledice segajo od napak na izdelku do izpadov proizvodnje. Ker je materiale vse težje obdelovati, hkrati pa trg zahteva vse večjo natančnost strojev, je uporaba komponent z nizkim oddajanjem vibracij pomembnejša bolj kot kdaj koli prej. Nemoteno delujoče energijske verige so torej nepogrešljive za omejevanje samogeneriranih vibracij stroja.

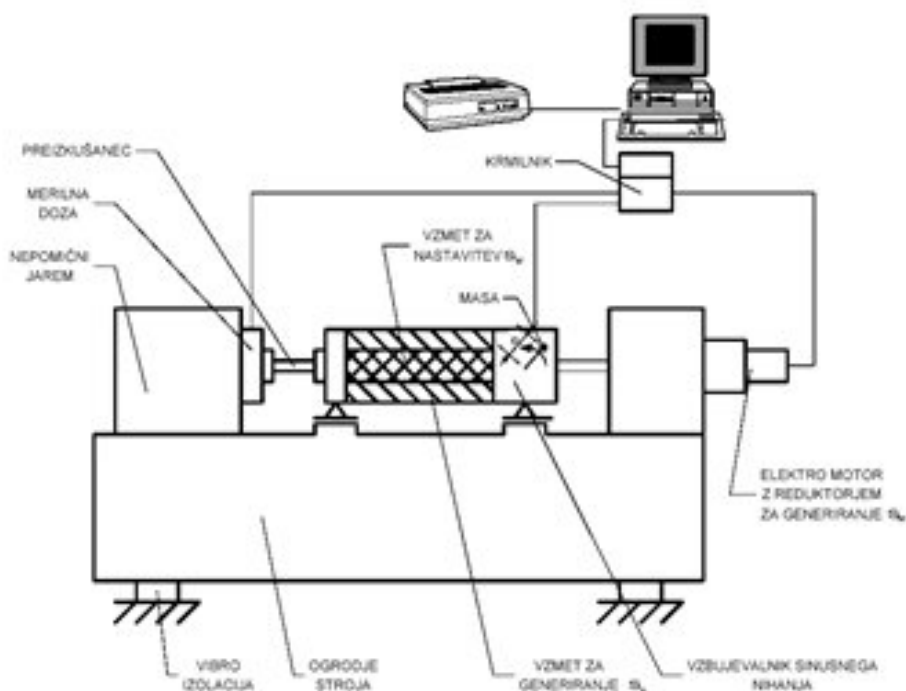
Naraščajoče zahteve po natančnosti obdelovalnih strojev zahtevajo tehnične inovacije na področju zmanjševanja vibracij. Doseganje bolj gladkega delovanja sistemov za oskrbo z energijo v dinamičnih aplikacijah je pomembna sestavina uspešne strategije. Z uporabo optimiziranih strojnih komponent lahko dosežemo še manjše tresljaje in posledično vibracije.

## Trajna dinamična trdnost – Wohlejeva krivulja

**Utrujenje materiala** (90 % vseh porušitev, ki nastanejo zaradi mehanskih vzrokov) povzročijo izmenične napetosti. Pri konstruiranju je poznavanje procesov med utrujanjem in uporaba tega znanja zelo pomembna. Že leta 1870, torej več kot pred sto leti, je Wöhler spoznal, da se materiali pri zaporednih, izmeničnih obremenitvah porušijo pri napetostih, mnogo manjših od natezne trdnosti.

Pri **utrujanju** obremenjujemo material s časovno spreminjajočo se napetostjo. Pri ugotavljanju trajne nihajne trdnosti obremenjujemo material s konstantno napetostno ali deformacijsko amplitudo. Pri obremenjevanju s konstantno napetostno amplitudo se napetost spreminja skladno s sinusno krivuljo. Srednja napetost in napetostna amplituda sta tipična parametra. Material se poruši pri manjši napetosti kot pri nateznem preizkusu. Čim manjša je amplitudna napetost, tem večje število nihajev zdrži material brez porušitve. Ta odvisnost se prikaže z Wöhlerjevo krivuljo, pri kateri je na abscisi število nihajev, na ordinati pa napetostna amplituda. Krivulja se pri jeklih asimptotično približuje

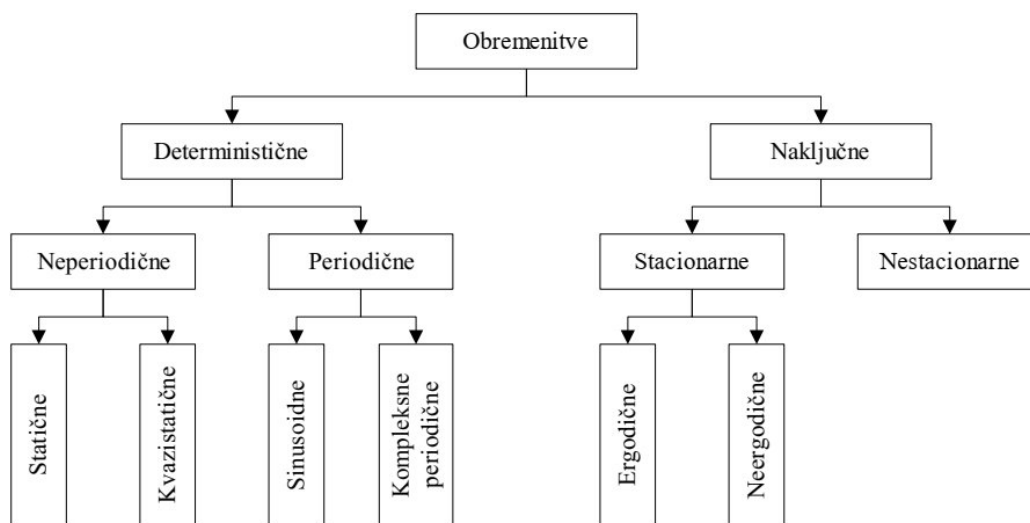
določeni vrednosti: trajni nihajni trdnosti materiala, ki je precej manjša od natezne trdnosti in napetosti tečenja. Mnogo bolj, kot Wöhlerjeva krivulja, je uporaben Smithov diagram, saj je vrednost od abcise do simetrale, ki poteka pod kotom  $45^\circ$  glede na koordinatni osi, srednja napetost. Razdalja od simetrale do krivulje je amplitudna napetost.



Slika 1

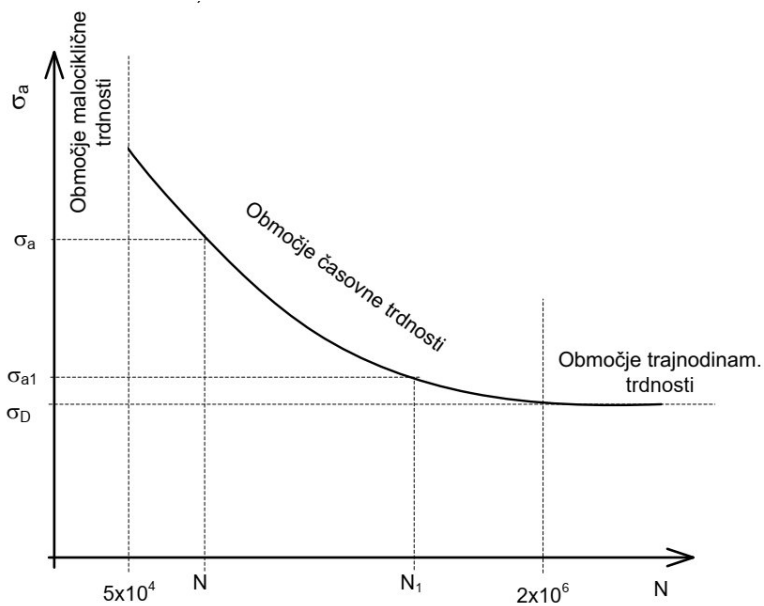
Za statične obremenitve določamo natezno trdnosti z nateznim preizkusom. Če material obremenjujemo dinamično, se obnaša drugače kot pri statični obremenitvi. Zato ne moremo pri dimenzioniranju ravnati tako kot pri statični obremenitvi, temveč moramo uporabiti nove metode. Definiramo časovno dinamično trdnost in trajno dinamično trdnost materiala (glej slika??). Časovna dinamična trdnost je tista napetost v materialu, ki jo material zdrži pri določenem številu nihajev obremenitve. Trajna dinamična trdnost materiala je tista napetost v materialu, ki jo material zdrži pri neskončno veliko nihajih obremenitve. Število nihajev seveda nikoli ne doseže neskončnosti, zato definiramo tehnično mejo neskončnega števila nihajev, ki je med  $10^6$  in  $10^7$  nihajev. Torej je trajna

dinamična trdnost materiala tista napetost, ki jo material zdrži pri  $10^7$  nihajih obremenitve. Trajna dinamična trdnost je odvisna od vrste dinamične obremenitve.



Slika 2

Za deterministične dinamične obremenitve določamo časovne ali trajno dinamične trdnosti z Wöhlerjevimi preizkusi. V primeru naključnih dinamičnih obremenitev določamo obratovalne trdnosti z blokovnimi preizkusi ali s preizkusi z naključnim zaporedjem obremenjevanja. Pri določevanju Wöhlerjeve krivulje sloni težišče problema na določitvi krivulje časovne trdnosti. V ta namen se izvaja serija preizkusov na dveh ali več napetostnih nivojih  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ... Iz raztrosa rezultatov dobe trajanja preizkušanca na določenem napetostnem nivoju, se določi točke, skozi katere potekajo Wöhlerjeve krivulje za različne verjetnosti porušitve. Raztrose rezultatov se popiše z različnimi statističnimi metodami (Gauss, Weibull, ...).



Sl. 1-2: Primer Wöhlerjeve krivulje

Slika 3

## Merjenje vibracij

Merjenje vibracij je mogoče doseči z različnimi napravami za analizo in spremljanje vibracij. Za merjenje obstaja velik različnih platform in programov. V raziskovalni nalogi bova navedla in razložila celotno paleto sistemov za merjenje vibracij, ki so na voljo preizkuševalcu ali vsem, ki potrebujejo merjenje vibracij



Slika 4

SensorTag podjetja Texas Instrument je izdelek, ki prikazuje nizkoenergijski sistem Bluetooth podjetja TI in 10 različnih senzorjev. Na voljo je po ceni, manj kot 30 USD. Prek Bluetootha napravo povežete s telefonom in v realnem času lahko spremljate meritve vseh desetih senzorjev, vključno s triosnim merilnikom pospeška. Težko bi ga imenoval senzor vibracij, ker vzorči samo do 10 Hz (vzorcev na sekundo); vendar je to zagotovo odličen izdelek za številne aplikacije. Obstaja tudi veliko razvojnih orodij, tako da lahko v svoj končni sistem vključite različne senzorje in čipe.



Slika 5

#### Extechov snemalnik vibracij VB300

VB300 je zelo stroškovno učinkovit instrument za merjenje vibracij in zapisovalnik vibracij začetnega razreda. Z manj kot 300 USD je lahko odlična prva možnost pri določanju vibracijskega okolja. Vsekakor je omejen glede hitrosti vzorčenja (do 200 Hz) in celotnega pomnilnika (4Mbit ali 112K vzorcev na os), vendar je to za nekatere aplikacije primerno. Ta izdelek trdi tudi, da zagotavlja povratne informacije v realnem času v frekvenčni in časovni domeni, kar je vsekakor koristno. Je manj kakovostev (ocene uporabnikov). Zdi se tudi, da je ta izdelek le prenovljena različica še cenejše (120 USD) alternative, ki jo je izdelalo kitajsko podjetje, CEM-ov zapisovalnik podatkov DT-178. Izdelek je popoln, če želite dobiti grobo predstavbo o frekvenčni vsebini (če je nižja od 60 Hz) v vašem vibracijskem okolju.





Slika 6

#### Merilnik vibracij Fluke 805

Merilnik vibracij Fluke 805 ponuja analizo vibracij v realnem času tako, da je mogoče odločitve o vzdrževanju sprejemati hitro in relativno natančno. Je precej drugačen od drugih izdelkov, obravnavanih v tej objavi, ker v resnici ne beleži nobenih podatkov (ohranil bo zadnjih 3500 vzorcev). Ko ga pritisnete ob kos stroja (torje je namestitev zelo enostavna), odčita RMS raven vibracij in uporabi tudi določen algoritem za oceno skupnih vibracij vašega ležaja ali stroja. Je nekoliko drag, nekaj manj kot 2000 \$ in ne ponuja dovolj informacij za pravilno analizo vibracij. Toda za hitro določanje stopenj tresljajev vaše opreme, je merilnik tresljajev, kot je ta izdelek, odlična izbira.



Slika 7

#### MSR165 zapisovalnik podatkov o vibracijah

MSR165 je odlično prenosno orodje za merjenje in analizo vibracij. Ima dve možnosti merilnika pospeška ( $\pm 15g$  ali  $\pm 200g$ ), da zadosti potrebam testiranja vibracij ali udarcev. Z opazno višjo možnostjo frekvence vzorčenja (1.600 Hz) kot mnogi drugi zapisovalniki podatkov o vibracijah na trgu ter razširljivimi možnostmi shranjevanja in baterij ponuja ta izdelek odlično rešitev v primerjavi z bolj "tradicionalnimi" sistemi za zajemanje podatkov. Ponuja tudi množico prilagodljivih možnosti, ki vključujejo dodane senzorje temperature, tlaka, vlažnosti ali svetlobe in zunanje analogne vhode.

Težava z izdelkom izvira iz dejstva, da je možnosti skoraj preveč, zato je treba vsako enoto izdelati po naročilu. Kot mnogi izmed nas vemo v skupnosti za testiranje vibracij, ko potrebujemo opremo za testiranje vibracij, smo jo potrebovali včeraj! Ker je vse izdelano po naročilu, je dobavni rok običajno skoraj mesec dni. Ker gredo samo prek distributerjev (od katerih nekateri zahtevajo znižanje za 40 %), se njihove cene zdijo nekoliko višje, kot bi pričakoval. Vse različne nastavitvene možnosti lahko povzročijo kar nekaj stroškov in preden se zaveš, cena instrumenta preseže 2000 USD. Izdelek vsekakor še vedno zagotavlja veliko vrednost in je dobra rešitev, zlasti za daljše snemanje.



Slika 8

Sistem za merjenje vibracij na osnovi National Instruments

Veliko ljudi potrebuje ali želi podatke o vibracijah v realnem času za izvedbo analize. National Instruments ima zbirko izdelkov za splošno pridobivanje podatkov, njihova programska oprema LabVIEW (uporablja se v vseh vejah industrije in tudi na fakultetah) pa omogoča interakcijo s podatki, ki se ustvarjajo v realnem času. V National Instruments je na voljo veliko različnih sistemov programske in strojne opreme, ki bi zahtevali popolnoma ločene objave v spletnem dnevniku. Za namen te primerjave različnih načinov merjenja vibracij izberemo sistem za merjenje vibracij z vrsto specifikacij. Večina inženirjev si tako predstavlja "tradicionalni" pristop merjenja te vrste vibracijskega sistema.

Za osnovni DAQ (zajem podatkov) lahko izberemo vhodni modul NI 9234, ki ima 4 kanale za 24-bitni zajem podatkov pri do 51.200 vzorcih na sekundo na kanal. Ta modul je posebej zasnovan za povezovanje z integriranimi elektronskimi piezoelektričnimi (IEPE) merilniki pospeška; na ta sistem je mogoče priključiti vsak tak merilnik pospeška z izhodom +/- 5 voltov in vzbujanjem do 2 mA. To bo zagotovilo napajanje merilniku pospeška, medtem ko ta istočasno vzorči izhod. Cena tega modula je 1.823 USD.

Kot del tega "idealnega" sistema za merjenje vibracij z izhodom podatkov v realnem času lahko izberemo modul Wi-Fi, NI cDAQ-9191 za brezžično pretakanje izhodnih podatkov. To stane le 400 USD in ponuja veliko funkcionalnosti za nekoga, ki poskuša spremljati

GARBAS, LENARRČIČ, ANALIZA NEVIDNIH TRESLJAJEV S POMOČJO DIGITALNE KAMERE raziskovalna naloga, ŠC Ljubljana, 2023

podatke o vibracijah v realnem času, a nekoliko oddaljeno. Če ne želite napeljati kablov (razen napajanja) do vašega sistema za merjenje vibracij, je to ohišje vredno 400 USD.

Za programski paket sem vzel LabVIEW Full Development System za 2999 \$. LabVIEW je zelo razširjen program tako v merilni tehniki kot tudi v krmilni tehniki, vendar je ta programski paket grafični programski jezik za prikaz in analizo merilnih podatkov v realnem času. Ta sistem vključuje obsežno obdelavo signalov in funkcionalnost analize. Osnovne nastavitve so na začetku uporabe zelo zahtevne še posebej nastavitve VI (virtualnih instrumentov). National Instruments ponuja tudi programski paket posebej za merjenje zvoka in vibracij po ceni 1999 USD. To vam lahko prihrani nekaj časa in denarja za nastavitve, ker trdi, da programiranje ni potrebno. Ni pa nujno, da boste vmesnika lahko prilagodili svojim potrebam in mislim, da tega ne bi mogli uporabiti za zagon drugih sistemov, kot bi lahko z razvojnim sistemom LabVIEW.

λ·vue

λ·vue temelji na metodah in algoritmih, ki so jih prvotno razvili raziskovalci na MIT CSAIL in Quanta Research Institute. Za podrobnosti o algoritmu obiščite spletno mesto projekta MIT.

Povezava: <https://people.csail.mit.edu/mrub/vidmag/>

Veliko na videz statičnih prizorov vsebuje majhne spremembe, ki so nevidne s prostim človeškim očesom. Vendar je mogoče te majhne spremembe odstraniti iz videoposnetkov z uporabo algoritmov, ki so jih razvili. Omogočajo vizualizacijo teh majhnih sprememb tako, da jih ojačamo, in predstavljamo algoritme za pridobivanje zanimivih signalov iz teh videoposnetkov, kot so človeški utrip, zvok vibrirajočih predmetov in gibanje vročega zraka.

Sposobnost zaznavanja majhnih gibov omogoča pomembne aplikacije, kot je razumevanje strukturnega zdravja zgradbe [3] in merjenje človekovega vitalnega SLIKA??. Video tehnike povečave gibanja nam omogočajo zaznavanje takih gibanj. To je težka naloga, saj so gibi tako majhni, da jih je nemogoče ločiti od šuma prisotnega na sliki. Kot rezultat, trenutne tehnike povečave videa lahko pride do zameglitve videoposnetka zaradi tako imenovanega prisotnega šuma okolice.

Trenutne tehnike povečave videa običajno razčlenijo video okvirje v predstavitve, ki jim omogočajo, da povečajo gibanje oziroma majhne premike [24, 27, 25, 28]. Njihova razčlenitev je običajno odvisna od ročno izdelanih programskih filtrov, kot so tako imenovani kompleksni vodljivi filtri [6], ki morda niso optimalni.

## Video povečava gibanja

Tehnike povečave gibanja lahko razdelimo v dve kategoriji: Lagrangian in Eulerian pristop. Lagrangian pristop eksplicitno izloči polje gibanja (optični tok) in ga uporabi za premikanje slikovne pike neposredno [13].

Eulerjev pristop [27, 24, 25] pa na drugi strani razčleni video okvirje v predstavitve, ki olajšajo manipulacijo gibov, ne da bi zahtevali natančno sledenje. Te tehnike so običajno sestavljene iz treh stopenj: delitev slikovnih okvirjev v alternativno reprezentacijo, manipulacija reprezentacije in rekonstrukcija manipulirane reprezentacije s povečani okvirji.

Raziskava, (Wu, H.Y., Rubinstein, M., Shih, E., Guttag, J., Durand, F., Freeman, W.: Eulerian video magnification for revealing subtle changes in the world. ACM SIGGRAPH 31(4), 65–8 (2012)) uporabljajo prostorsko dekompozicijo, ki jo ustvari Taylorjeva ekspanzija prvega reda medtem, ko Wadhwa ( LITERATURA, Wadhwa, N., Rubinstein, M., Durand, F., Freeman, W.T.: Riesz pyramids for fastphase-based video magnification. In: IEEE Int. Conf. on Comput. Photogr. (2014)) uporabljajo kompleksno vodljivo piramido [6] za izločanje predstavitve, ki temelji na fazah. Sedanje Eulerjeve tehnike so dobre pri razkrivanju subtilnih gibov, vendar so ročno oblikovane [27, 24, 25] in ne upoštevajo številnih vprašanj, kot je okluzija. Zaradi tega, so nagnjeni k hrupu/šumu in pogosto trpijo zaradi pretirane zamegljenosti. Tehnika LAMBDA VUE uporablja Eulerjev pristop, vendar se naša razčlenitev neposredno uči iz primerov, zato ima manj robnih kosov in boljše lastnosti šuma oziroma motenj. Ena ključnih komponent prejšnjih tehnik je povečava gibanja in časovno filtriranje z več slikovnimi okvirji nad predstavitvami le to pomaga izolirati gibanja, ki nas zanimajo, in preprečiti povečanje šuma. Uporabljajo standardne frekvenčne pasovne filtre. Njihove metode dosegajo visokokakovostne rezultate, vendar imajo pri tem poslabšano kakovost ker lahko v vhodnem videu pride do velikih premikov ali odmikov.

Primerjave metode s stanjem tehnike so povzete v tabeli.

Method	Liu <i>et al.</i> [13]	Wu <i>et al.</i> [27]	Wadhwa <i>et al.</i> [24]	Wadhwa <i>et al.</i> [25]	Zhang <i>et al.</i> [28]	Ours
Spatial decomposition	Tracking, optical flow	Laplacian pyramid	Steerable filters	Riesz pyramid	Steerable filters	Deep convolution layers
Motion isolation	-	Temporal bandpass filter	Temporal bandpass filter	Temporal bandpass filter	Temporal bandpass filter (2nd-order derivative)	Subtraction or temporal bandpass filter
Representation denoising	Expectation-Maximization	-	Amplitude weighted Gaussian filtering	Amplitude weighted Gaussian filtering	Amplitude weighted Gaussian filtering	Trainable convolution

Slika 9

## Delo na terenu in snemanje

Ker so tresljaji zelo škodljivi kot za človeka kakor tudi za stroj, sva posnela tresljaje 1,6 literskega avtomobilskega bencinskega motorja in 3 literskega traktorskega dizelskega motorja. Posnetke pri avtomobilskem sva posnela pri 1000; 3000 in 4000 vrt/min. Traktorski motor sva snemala pri 750 in 1500 vrt/min. Vse posnetke sva opravila z visoko ločljivo kamero na stojalu, da nebi prišlo do lažnih tresljajev, ki bi se zgodili, če bi imel kamero med snemanjem v rokah. Pri vsakem od vozi sva dvignila oz. odstranila pokrov motorja, da je le ta postal viden in nato sva začela s snemanjem 10 sekundnih posnetkov. Posnetke sva nato s kamere prenesla na računalnik in s programom Lambda Vue tresljaje ojačala, da so postali vidni.



Slika 10

1.6litrski 4valjni bencinski motor (avto)





Slika 11

3 litrski 3 valjni dizelski motor (traktor)

## Rezultat in zaključek

Program Lambda Vue je tresljaje na posnetkih vidno ojačal, še bolj do izraza pa so prišli tresljaji na posnetkih motorjev pri višjih obratih, saj so se pri dvo oziroma tro kratni povečavi obratov motorja tresljaji postali tudi več kot trikrat bolj intenzivni, kar slabo vpliva na zdravje voznika oziroma operaterja stroja. Poleg tega ima tudi slab upliv na strojne dele in vezne elemente, ki lahko na dolgi rok popustijo in privedejo do strojeloma. S tem sva dokazala, da lahko s tem programom prikazal nevidne ali nepredstavljljive tresljaje, s čimer bi lahko ocenil tudi učinkovitost dušilcev tresljajev ali amortizerjev in s tem povečal učinkovitost in kakovost v proizvodnji, brez dragih naprav za merjenje.

Med izdelavo raziskovalne naloge sva prišla do ideje, da bi stroji ki s tresljaji med delovanjem nelagodno vplivajo na človeka in njegovo zdravje, morali imeti podano tudi frekvenco in moč tresljajev, kot imajo stroji podano glasnost, ki prav tako vpliva na zdravje operaterja, da bi se lahko kupec stroja oz. naprave lažje in boljše odločil za pravilen nakup, saj je to ponajnem mnenju pomemben karakter pri odločanju. Za primer lahko vzamemo poklicnega gozdarja, ki kupuje novo motorno žago, ki jo bo držal v rokah po več ur zapored. Motorna žaga pri svojem delovanju proizvaja tresljaje, ki na gozdarjevo zdravje in pripravljenost na delo nelagodno vplivajo. Če bi dve žagi imeli enake ali podobne karakteristike, bi se potem ob želji, da njegovo delo čim manj vpliva na njegovo zdravje odločil za nakup žage z nižjo frekvenco in manjšo močjo tresljajev, prav zato bi bilo smoterno na takšnih strojih podati kupcu tudi podatke o treslajih.

GARBAS, LENARRČIČ, ANALIZA NEVIDNIH TRESLJAJEV S POMOČJO DIGITALNE KAMERE raziskovalna naloga, ŠC Ljubljana, 2023

S snemanjem in prikazovanjem ojačanih tresljajev v živo pa bi lahko izboljšali tudi obdelavo na različnih obdelovalnih strojih kot so cnc stružnica, rezkar,... tako bi treslaje in posledično odstopanja zaznali takoj, saj so vse večje zahteve po visoki natančnosti.

## Viri

e-knjiga: Steve Hanly, Shock and Vibration overview (13. 2. 2023)

Merjenje vibracij in slike merilnikov <https://blog.endaq.com/6-ways-to-measure-vibrations#ti> (17. 2. 2023)

Program za obdelavo video posnetkov <https://lambda.qrilab.com/site/> (15. 2. 2023)

Dinamična trdnost <https://www.zwickroell.com/sl/industrije/preskusanje-materialov/preskusanje-z-utrujanjem/krivulja-s-n-woehlerjeva-krivulja/> (19. 2. 2023)

Obremenitve, Bojan Kraut, Krautov strojniški priročnik