

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
ŠUMARSKI FAKULTET

**UTJECAJ ANTIVIBRACIJSKIH RUKAVICA NA SMANJENJE
VIBRACIJA KOJE SE PRENOSE NA RUKE OPERATERA
MOTORNIH PILA LANČANICA**

Disertacija

Mentor: Prof. dr. sc. dr. h. c. Vlado Goglia
Doktorand: mr. sc. Igor Đukić

Zagreb, ožujak 2010.

Podaci za bibliografsku karticu

- UDK:**
- Naslov rada:** Utjecaj antivibracijskih rukavica na smanjenje vibracija koje se prenose na ruke operatera motornih pila lančanica
- Autor:** mr. sc. Igor Đukić
- Adresa:** Jana Sibeliusa 6, 10000 Zagreb
dukic@sumfak.hr
- Mjesto istraživanja:** Sveučilište u Zagrebu, Šumarski fakultet
Zavod za procesne tehnike
Poligon mehanizacije Uprave šuma Koprivnica u Lepavini
- Mentor:** Prof. dr. sc. dr. h. c. Vlado Goglia
- Broj stranica:** (X) + 114
- Broj slika i grafikona:** 61
- Broj tablica:** 10
- Broj korištenih bibliografskih jed.:** 87
- Prilog disertaciji:** DVD disertacije u elektroničkom obliku s podacima mjerenja u .csv formatu
- Lektura:** Melita Golubić, prof.
- Znanstveno područje, polje, grana:** Biotehničke znanosti, Drvna tehnologija, Drvnotehnološki procesi
- Administrativni postupak:**
- Fakultetsko vijeće Šumarskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu na 4. redovnoj sjednici ak. god. 2005/2006. održanoj 9. veljače 2006. godine donosi odluku o stručnom povjerenstvu za ocjenu uvjeta stjecanja doktorata znanosti izvan doktorskoga studija mr. sc. Igora Đukića i odobrenje teme disertacije pod predloženim naslovom *Utjecaj antivibracijskih rukavica na smanjenje vibracija koje se prenose na ruke operatera motornih pila lančanica* imenuju se:
Prof. dr. sc. Vlado Goglia
Izv. prof. dr. sc. Dubravko Horvat
Izv. prof. dr. sc. Ružica Beljo Lučić
 - Fakultetsko vijeće Šumarskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu na 5. redovnoj sjednici ak. god. 2005/2006. održanoj 20. ožujka 2006. godine donosi odluku o odobrenju teme disertacije pod naslovom *Utjecaj antivibracijskih rukavica na smanjenje vibracija koje se prenose na ruke operatera motornih pila lančanica*. Za mentora je imenovan prof. dr. sc. Vlado Goglia.
 - Senat Sveučilišta u Zagrebu na svojoj 10. sjednici Senata održanoj 18. travnja 2006. u 337. ak. god. 2005/2006. donosi odluku o odobrenju postupka stjecanja doktorata znanosti izvan doktorskog studija predloženiku Igoru Đukiću i temu pod naslovom *Utjecaj antivibracijskih rukavica na smanjenje vibracija koje se prenose na ruke operatera motornih pila lančanica*.
 - Fakultetsko vijeće Šumarskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu na 6. redovnoj sjednici ak. god. 2009/2010. održanoj 29. ožujka 2010. godine donosi odluku o stručnom povjerenstvu za ocjenu izrađene disertacije mr. sc. Igora Đukića pod naslovom *Utjecaj antivibracijskih rukavica na smanjenje vibracija koje se prenose na ruke operatera motornih pila lančanica* imenuju se:
Prof. dr. sc. Ivica Grbac, predsjednik
Prof. dr. sc. dr. h. c. Vlado Goglia, mentor (član)
doc. Ing. Štefan Barcik, Csc., član
 - Fakultetsko vijeće Šumarskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu na 7. redovnoj sjednici ak. god. 2009/2010. održanoj 29. travnja 2010. godine donosi odluku o stručnom povjerenstvu za obranu disertacije mr. sc. Igora Đukića pod naslovom *Utjecaj antivibracijskih rukavica na smanjenje vibracija koje se prenose na ruke operatera motornih pila lančanica* u istom sastavu kao i za ocjenu rada.
- Mjesto i datum obrane:** Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 21. svibnja 2010.

PREDGOVOR

U mnogim je radovima i znanstvenim raspravama istican problem vibracija koje se s mehaniziranih sredstava rada prenose na rukovatelje. Nedvojbeno je činjenica da tako prenesene vibracije smanjuju udobnost rukovatelja i sveukupnu učinkovitost, a izlaganje vibracijama iznad određenih granica može izazvati trajne i nepovratne posljedice. Sve su to razlozi zbog kojih je potrebno što objektivnije mjeriti vibracije, vrednovati ih te odrediti stvarnu opasnost od takvih izvora vibracija. Osim određivanja opasnosti utjecaja vibracija na zdravlje čovjeka, potrebno je na temelju podataka mjerenja razvijati i zaštitne mehanizme kako bi se rukovatelji zaštitili od štetnog utjecaja vibracija, i to u obliku tehnoloških unapređenja kojima se smanjuju razine vibracija sredstava rada te unapređenja sredstava zaštite kojima se dodatno provodi prigušenje vibracija.

Ako znamo da u Hrvatskoj većina profesionalnih sjekača, operatera na motornim pilama lančanicama, i uz sva poboljšanja koja su tijekom godina napravljena u cilju smanjenja vibracija, pati nakon kraćeg ili dužeg vremena rada od nekog zdravstvenog problema vezanog uz vibracije, jasno je da je svako poboljšanje u smjeru smanjenja tih vibracija izuzetno bitno.

Kao zaštitno sredstvo pri radu u novije su se vrijeme pojavile antivibracijske rukavice, ali njihova korisnost pri radu s motornim pilama lančanicama zasad je slabo istražena.

Ovim radom se pokušalo barem djelomično razjasniti učinkovitost komercijalno dostupnih antivibracijskih rukavica pri radu s motornim pilama lančanicama.

Disertacija se temelji na eksperimentalnim mjerenjima provedenima uz pomoć proučavane literature, ali i na prethodnom mjeriteljskom iskustvu u sličnim problemima mjerenja vibracija. Osim eksperimenta, niz korisnih spoznaja dobiven je iz raspoložive literature i konzultacija.

U izvođenju mjerenja i čitave disertacije izuzetnu pomoć pružio mi je mentor prof. dr. sc. dr. h. c. Vlado Goglia te mu ovim putem iskreno zahvaljujem na svojoj pruženoj pomoći i savjetima. Zahvaljujem prof. dr. sc. Ivici Grbcu i doc. ing. Štefanu Barciku, Csc. na korisnim prijedlozima i primjedbama. Zahvalio bih i svim kolegicama

i kolegama sa Zavoda za procesne tehnike, kao i svim kolegicama i kolegama Drvnotehnološkog odsjeka na pomoći. Zahvaljujem i Upravi šuma Koprivnica i njihovom poligonu za mehanizaciju u Lepavini, gdje su i izvršena mjerenja i svim djelatnicima koji su pomogli u izvođenju istraživanja, a posebno mr. sc. Josipu Žgeli.

U Zagrebu, 15. ožujka 2010.

Igor Đukić

SAŽETAK

U radu se iznose rezultati mjerenja prigušnih svojstava reprezentativne grupe antivibracijskih rukavica na hrvatskom tržištu pri radu s motornom pilom lančanicom u stvarnim uvjetima rada.

Mjerene su vibracije koje se prenose sa stražnje ručke motorne pile lančanice na ruku operatera u tri karakteristična režima rada, i to pri najmanjem broju okretaja motora, pri najvećem broju okretaja motora i tijekom rezanja. Mjerenja su izvedena sukladno preporukama norme HRN EN ISO 5349-1:2001(E): *Mechanical vibration – Measurement and evaluation of human exposure to hand-transmitted vibration* i HRN EN ISO 7505-1986 (E): *Forestry machinery – Chain saws – Measurement of hand-transmitted vibration*. Istražena su prigušna svojstva antivibracijskih rukavica na četiri mjerne točke, i to na prstima, šaci, zglobu šake i laktu. Mjerenja su provedena s ciljem utvrđivanja prigušnih svojstava antivibracijskih rukavica na različite dijelove frekvencijskog spektra pri radu s motornim pilama lančanicama.

Rezultati mjerenja prigušnih sposobnosti odabranih antivibracijskih rukavica pri radu s motornom pilom lančanicom pokazali su prigušenje ukupne razine vibracija koje se prenose na prste. Prigušenje je bilo uočljivo kod nevrednovanih i kod vibracija vrednovanih prema HRN EN ISO 5349-1:2001(E). Kao najbolje u ispitivanjima pokazale su se rukavice s AntiVib™ prigušnim materijalom, ali ni te rukavice, prema dobivenim izračunima, ne mogu pružiti adekvatnu zaštitu od vibracija koje se prenose s ručke motorne pile lančanice za osmosatno dnevno izlaganje vibracijama. Ukoliko su ukupno vrijeme izlaganja i razina vibracija niži od korištenih u izračunima, tada je i zaštita od vibracija proporcionalno efikasnija.

Rezultati mjerenja prolaska vibracija kroz ruku pri radu sa i bez rukavica pokazali su da se veći dio vibracija apsorbira u prstima i šaci, i to uglavnom vibracije više frekvencije. Radi bolje ponovljivosti i usporedivosti mjerenja vibracija koje se prenose s ručke motorne pile lančanice, bilo bi preporučljivo istovremeno mjeriti pritisnu silu na ručku i vibracije u sve tri osi.

Ključne riječi: antivibracijske rukavice, vibracijski prijenosni faktor, prigušenje vibracija, vibracije motorne pile lančanice, vibracije koje se prenose na sustav šaka-ruka

ABSTRACT

This study presents the results of measuring damping characteristics of a representative group of anti-vibration gloves on the Croatian market, at work with a chainsaw. Vibrations transmitted from the rear handle of the chainsaw to the hand of the worker were measured during three characteristic regimes of work (minimum engine revolutions, maximum engine revolutions and cutting). Measurements were performed in accordance with the recommendations of the HRN EN ISO 5349-1:2001 (E) Mechanical vibration - Measurement and evaluation of human exposure to hand-transmitted vibration and ISO 7505-1986 (E): Forestry machinery - Chain saws - Measurement of hand-transmitted vibration.

Damping properties of anti-vibration gloves were investigated on measurement points located at the fingers, third metacarpal, wrist and elbow. Measurements were made to determine damping properties of anti-vibration gloves in different parts of the frequency spectrum when working with a chainsaw.

The results of vibration transmissibility to the fingers of selected anti-vibration gloves, when working with a chainsaw, showed attenuation of the overall level of weighted vibration. Attenuation was evident at vibration frequency-weighted according to EN ISO 5349-1:2001 (E) and at unweighted vibration levels.

The study showed that best gloves were the gloves with AntiVib™ damping material, but the calculations showed that none of the tested gloves can not provide adequate protection from the chainsaw vibration garlands for 8-hour daily exposure. If the total time of exposure and vibration levels is lower than those used in the calculations, then the vibration protection of anti-vibration gloves is proportionally more efficient.

The results of measurements of vibrations passing through the hands when working with or without anti-vibration gloves showed that most of the higher frequency vibration is absorbed in the fingers and hand.

For better repeatability and comparability of measurements of chainsaw vibrations transmitted to the hand-arm it would be advisable to simultaneously measure the grip force on the handle and vibration in all three axes.

Keywords: anti-vibration gloves, vibration transmissibility, vibration attenuation, chainsaw vibration, hand-arm vibration

SADRŽAJ

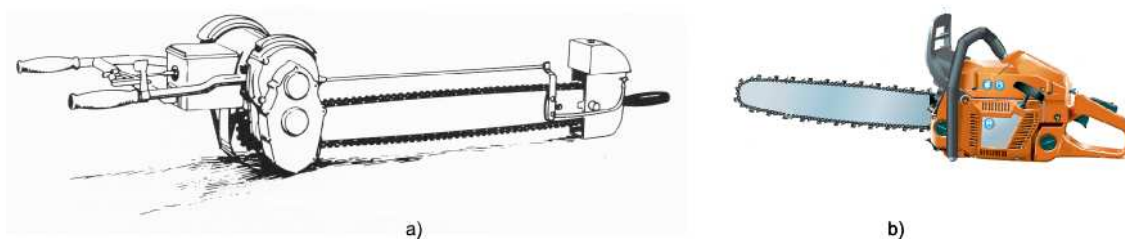
Podaci za bibliografsku karticu	
PREDGOVOR	IV
SAŽETAK	V
ABSTRACT	VI
1. UVOD.....	1
1.1. Problem istraživanja.....	3
1.1.1. Utjecaj vibracija koje se prenose na sustav šaka-ruka, čovjekovo zdravlje i njegovu udobnost.....	3
1.1.2. Predmet istraživanja.....	17
1.2. Ocjena dosadašnjih istraživanja.....	22
2. TEORIJSKO-MATEMATIČKA ANALIZA VIBRACIJA I NJIHOVOG PRENOŠENJA NA SUSTAV ŠAKA-RUKA KOD MOTORNE PILE LANČANICE.....	34
2.1. Analiza vibracija kod motorne pile lančanice.....	34
2.2. Definiranje simulacijskog modela sustava šaka-ruka.....	39
2.3. Definiranje simulacijskog modela sustava antivibracijska rukavica–ruka	44
3. ANALIZA PRIGUŠNIH MATERIJALA ZA ANTIVIBRACIJSKE RUKAVICE...	46
4. MATERIJAL I METODE.....	49
4.1. Izbor antivibracijskih rukavica za ispitivanja.....	51
4.2. Mjerni lanac i obrada rezultata mjerenja.....	56
4.2.1. Postupak izrade digitalnog filtra za vrednovanje vibracija koje se prenose s alata na ruke.....	57
5. REZULTATI ISTRAŽIVANJA I DISKUSIJA.....	63
5.1. Rezultati analize vremenskih signala.....	63
5.2. Rezultati frekvencijske analize.....	87
6. ZAKLJUČAK.....	96
7. LITERATURA.....	99
	IX

POPIS SLIKA I GRAFIKONA	107
POPIS TABLICA	112
Ključna dokumentacijska kartica	113
Keyword documentation	114
ŽIVOTOPIS	

1. UVOD

Uvođenjem motornih pila lančanica u sječu i izradbu drva došlo je do znatnog olakšanja posla sjekača u šumarstvu, a time i do smanjenja rada koji je potrebno uložiti za sječu jedinične količine drvene mase, što znači da je došlo i do povećanja proizvodnosti rada. Od početka uvođenja šezdesetih godina prošlog stoljeća do današnjih dana motorna pila lančanica je postala najčešće korišten stroj u šumarstvu, a kroz svoju evoluciju doživjela je niz promjena i poboljšanja.

Prve verzije motornih pila lančanica bile su namijenjene radu s dva radnika (slika 1.1.a) i imale su masu od 40 do 50 kg s duljinom reza od 90 do 125 cm i kao takve bile su korištene isključivo na poslovima sječe drva, dok su prvi modeli istih za jednog radnika imale masu oko 14 kg. Današnji modeli motornih pila lančanica (slika 1.1.b) imaju masu u rasponu od 4 do 10 kg, ovisno o njihovoj snazi, odnosno namjeni.



Slika 1.1. Motorne pile lančaničice: a) namijenjena radu s dva radnika i b) današnji tip moderne, lake pile

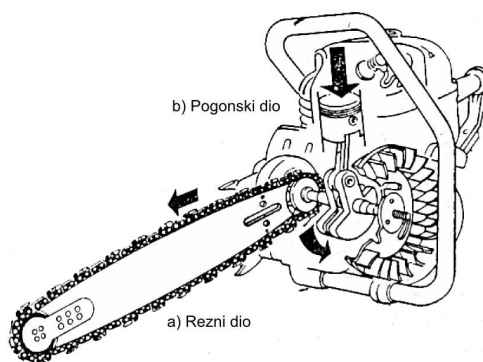
Osim smanjenja mase, koje je bitno utjecalo na mogućnosti lakšeg korištenja motornih pila lančanica i smanjilo fizičko opterećenje radnika, razvijen je i niz drugih poboljšanja koja su doprinijela povećanju njihove proizvodnosti i sigurnosti pri radu. Neka od tih poboljšanja su i uvođenje membranskog rasplinjača koji je omogućio rad s motorom pilom lančanicom u svim položajima, a ne samo u horizontalnom, zatim kočnica lanca, štitnik prednje i stražnje ručke, povećanje specifične snage motora, lanci s lopatičastim (srpastim) zubima za postizanje većih učinaka, antivibracijske ručke i dr. Sva ta poboljšanja omogućila su korištenje motornih pila lančanica u gotovo svim fazama iskorištavanja šuma, ali i njihovu uporabu u neprofesionalne svrhe koje nisu direktno povezane s profesionalnim iskorištavanjem šuma. Tako je,

prema dostupnim podacima (Sever, 1992.)^I, već krajem osamdesetih godina u svijetu upotrebljavano približno 5,5 milijuna motornih pila lančanica.

Motorna pila lančanica može se definirati kao stroj za piljenje drva u sječi i izradbi koji se sastoji od pogonskog i reznog dijela te spojke koja ih povezuje (slika 1.2.). S obzirom na pogonski dio, motorne pile lančanice se danas mogu podijeliti na motorne (pokretane dvotaktnim Otto motorom) i električne (pokretane elektromotorom). Danas se električne pile lančanice uglavnom koriste kao pile za kućnu uporabu u okolini gdje je lako dostupan izvor električne energije i za manje zahtjevne potrebe, za koje je potrebna manja snaga. U svim ostalim slučajevima, što znači u većini slučajeva, koriste se motorne pile lančanice.

Iako je tijekom svog razvoja do danas motorna pila lančanica doživjela niz sigurnosnih i ergonomskih poboljšanja te su unaprijeđeni i postupci zaštite pri radu s istima, rad s motornom pilom lančanicom još uvijek spada među najrizičnije radove u šumarstvu.

Osim povećanih rizika od fizičkog ozljeđivanja koji se javljaju pri radu s motornim pilama lančanicama, velik rizik za zdravlje rukovatelja, kao i kod velikog broja drugih ručnih strojeva, predstavljaju buka i vibracije koje još uvijek često prelaze međunarodnim normama propisane maksimalne razine kojima se ljudi smiju izlagati tijekom cijelog radnog dana.



Slika 1.2. Osnovni dijelovi motorne pile lančanice (Schulz, 1976.)^{II}

I Sever, S. 1992: Šumarski strojevi. Tehnička enciklopedija svezak 12, Leksikografski zavod "Miroslav Krleža", Zagreb.

II Schulz, R. 1976: Motorsägen arbeit. VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag, Berlin.

Općenito, buka i vibracije koje nastaju pri radu motornih pila lančanica uzrokovane su mehaničkim procesima u kojima dinamičke sile pobuđuju strukturu, odnosno stroj. Vibracije i buka su blisko povezane jer je buka zapravo dio vibracijske energije promatranog sustava (stroja) koji je pretvoren u promjenu zračnog tlaka (buku).

1.1. PROBLEM ISTRAŽIVANJA

1.1.1. Utjecaj vibracija koje se prenose na sustav šaka-ruka, čovjekovo zdravlje i njegovu udobnost

Kod radnika koji su redovito izloženi vibracijama koje se sa strojeva prenose na sustav šaka-ruka nakon nekog vremena, ovisno o nizu utjecajnih faktora, može doći do niza oštećenja, odnosno poremećaja u krvožilnom, živčanom ili mišićno-koštanom sustavu šake ili ruke. Te promjene, ovisno o svom intenzitetu i vremenu izloženosti vibracijama, mogu biti reverzibilne ili mogu preći u trajna oštećenja. Danas se za čitavu skupinu profesionalnih bolesti koje su posljedica dugotrajnog izlaganja povišenim razinama vibracija koristi naziv “vibracijski sindrom”, odnosno češće je u primjeni engleski izraz HAVS – *Hand Arm Vibration Syndrom*. Tako se sastavnice koje čine HAVS, prema preporukama (Griffin, 1982.^I i HRN EN ISO 5349-1: 2001(E) - Annex B^{II}), mogu grupirati u pet grupa (tablica 1.1.)

Osim navedenih izraza za tu skupinu profesionalnih oboljenja, koristi se i izraz VWF (*Vibration White Finger*) koji se odnosi na jedan od glavnih simptoma oboljelih od vibracijske bolesti, a čiji su osnovni parametri za prepoznavanje trnci ili gubitak osjeta u prstima te pojava bijeljenja jednog ili više prstiju. Uzrok tome je smanjenje cirkulacije u ekstremitetima (prstima ruku), ali može doći i do oštećenja živaca, mišića i zglobova. O VWF-u se često govori kao o jednom obliku Reynaudova sindroma jer ima slične simptome, ali je uzrok VWF-a drugačiji i povezan je s utjecajem dugotrajnog izlaganja vibracijama koje se prenose sa strojeva na ruke radnika.

I Griffin, M. J. 1982: The effects of vibration on health. Memorandum No. 632, Institute of Sound and Vibration Research, University of Southampton.

II HRN EN ISO 5349-1:2001(E): Mechanical vibration – Measurement and evaluation of human exposure to hand-transmitted vibration - Part 1: General requirements.

Tablica 1.1. Pet grupa poremećaja povezanih s utjecajem vibracija koje se prenose na sustav šaka-ruka (Griffin, 1982.^I i HRN EN ISO 5349-1:2001(E) - Annex B^{II}).

Grupa	Poremećaj
A	Poremećaj krvožilnog sustava
B	Poremećaji u koštanom sustavu
C	Poremećaji u perifernom živčanom sustavu
D	Poremećaji u mišićima
E	Ostali poremećaji (npr. vezani uz čitavo tijelo i centralni živčani sustav)

Kako bi se procijenio stadij napredovanja simptoma HAVS-a, danas se uglavnom koristi kriterij tzv. Stockholm Workshop skale koja je donesena još 1987. godine, a kao takvu odobrava ju i međunarodna norma HRN EN ISO 5349-1:2001(E): *Mechanical vibration – Measurement and evaluation of human exposure to hand-transmitted vibration – Part 1 – Annex B^{III}*. Prema toj su skali osnovni osjetilni znakovi i simptomi promjena u perifernom živčanom sustavu na rukama podijeljeni u četiri stupnja (tablica 1.2.).

Tablica 1.2. Stadiji živčano-osjetilnih promjena u perifernom živčanom sustavu kod HAVS-a (prema Stockholm Workshop skali, 1987.^{IV}).

Stadij	Znakovi i simptomi
0 _{SN}	Izloženost vibracijama, ali nema simptoma
1 _{SN}	Diskontinuirana pojava neosjetljivosti u prstima sa ili bez pojave trnaca
2 _{SN}	Diskontinuirana ili trajna pojava neosjetljivosti u prstima, smanjena osjetilna percepcija
3 _{SN}	Diskontinuirana ili trajna pojava neosjetljivosti u prstima, smanjen osjet dodira i/ili smanjena manipulativna sposobnost

I Prvi citat na strani 3.

II Prvi citat na strani 3.

III Prvi citat na strani 3.

IV Stockholm Workshop 86 (1987): Symptomatology and diagnostic methods in the hand-arm vibration syndrome. Scandinavian Journal of Work, Environment and Health, Vol. 4: 271-388.

Osim tih promjena, na Stockholm Workshopu definirani su i stupnjevi promjena u krvožilnom sustavu (kao dijela HAVS-a) čija je manifestacija ustvari pojava VWF-a, odnosno pojava bijeljenja jednog ili više prstiju (tablica 1.3.).

Da problem vibracija koje se prenose sa strojeva na ruke nije novijeg datuma, govore i podaci da su se nakon uvođenja prvih pneumatskih alata početkom 19. stoljeća u francuskom rudarstvu počeli javljati i prvi registrirani slučajevi HAVS-a, dok je u Americi to bilo početkom 20. stoljeća (Hamilton, 1918.)^I.

Tablica 1.3. Ljestvica znakova i simptoma pojave bijeljenja prstiju (VWF) kao jedne, odnosno najčešće komponente HAVS-a prema raširenosti, učestalosti i jačini simptoma, kao posljedice reverzibilnih ili ireverzibilnih promjena nastalih u krvožilnom sustavu šake i prstiju ruke

Stadij	Stupanj	Znakovi i simptomi
0	-	Nema nikakvih simptoma
1 _v	Blagi	Povremene pojave bijeljenja koje se javljaju samo na vršcima jednog ili više prstiju
2 _v	Umjereni	Povremene pojave bijeljenja koje se javljaju na većim površinama jednog ili više prstiju
3 _v	Teški	Učestala pojava bijeljenja na većini prstiju
4 _v	Vrlo teški	Kao i u fazi 3 _v , ali s pojavama trofije u prstima

Prema nekim podacima (NIOSH, 1983.^{II}; Pelmeur, P. L. i Wasserman, D. E., 1998.^{III}), procjenjuje se da danas samo u Sjedinjenim Američkim Državama ima oko 1,5 do 2 milijuna radnika te isto toliko u Velikoj Britaniji koji su svakodnevno izloženi vibracijama koje se sa strojeva prenose na sustav šaka-ruka, dok se za čitav svijet ta brojka penje na više milijuna.

I Hamilton, A. 1918: A Study of Spastic Anemia in the Hands of Stonecutters. U.S. Bureau of Labor Statistics, Publication #236, Industrial Accidents and Hygiene Series, No. 191, U.S. Government Printing Office, Washington D.C.

II National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) (1983): Vibration Syndrome. Current Intelligence Bulletin #38, NIOSH Publication #83-110, NIOSHTIC Number 20000268.

III Pelmeur, P. L.; Wasserman, D. E. 1998: Hand-Arm Vibration: A Comprehensive Guide for Occupational Health Professionals. 2nd Edition, OEM Medical Press, Beverly Farms, Mass.



Slika 1.3. Neke od posljedica dugotrajnog izlaganja visokim razinama vibracija koje se sa strojeva prenose na sustav šaka-ruka su: a) gubitak osjeta u prstima i bijeljenje vrhova prstiju, tzv. VWF - *Vibration white finger*, b) promjene na zglobovima prstiju.

Problem HAVS-a nije oduvijek bio prepoznat kao ozbiljan zdravstveni problem te su ga različite države različito tretirale. Danas je u svim uređenim državama HAVS priznat kao ozbiljna profesionalna bolest te se ulažu znatni naponi u smanjenje izloženosti radnika povećanim razinama vibracija koje se prenose na sustav šaka-ruka.

Tako Griffin (1996.)^I preporuča korištenje vrednovanih razina ubrzanja koje se prenose sa strojeva na sustav šaka-ruka radnika kao jednostavnog mjerila izloženosti čovjeka vibracijama te lakšeg povezivanja određenih razina ubrzanja i perioda izlaganja sa zdravstvenim posljedicama. Isto tako, Griffin preporučuje i bilježenje karakterističnih vremenskih zapisa vibracija, frekvencijskih analiza i drugih podataka koji bi u budućnosti mogli pomoći u boljem razumijevanju odnosa uzroka (vibracija) i posljedica na zdravlje čovjeka.

Pri određivanju utjecaja određenih razina vibracija na zdravlje radnika, osim odgovarajuće određenih i vrednovanih razina vibracija, od izuzetnog je značaja i što točnije određivanje vremena izloženosti vibracijama tijekom radnog dana. Niz istraživanja (Inaba i dr., 1993.^{II}; Matsumoto i dr., 1977.^{III};

I Griffin, M. J. 1996: Handbook of Human Vibration. Academic press, London.

II Inaba, R.; Mirbod, S.M.; Komura, Y.; Yoshida, H.; Nagata, C.; Miyashita, K.; Fujita, S.; Iwata, H. 1993: A vibration-dose limit for Japanese workers exposed to hand-arm vibration. Proceedings of the 6th International Conference on Hand-Arm Vibration. BIA, Sankt Augustin, 913-918.

III Matsumoto, T.; Yamada, S.; Hisanaga, N.; Harada, N.; Kaneda, K. 1977: On vibrational hazards in rock-drill operators of a metal mine. Japanese Journal of Industrial Health, 19: 256-265.

Miyashita i dr., 1983.^{I)} pokazao je jaku pozitivnu korelaciju između učestalosti pojavljivanja i jačine simptoma HAVS-a s povećanjem ukupnog vremena izloženosti vibracijama. Ova tvrdnja može biti izuzetno otežavajuća okolnost pri procjeni ukupne dnevne izloženosti vibracijama. Naime, radni se dan sastoji od niza različitih perioda izloženosti vibracijama koje se ne moraju prenositi od istog stroja. Stoga su moguće velike varijabilnosti rezultata ako se vremena izloženosti ne odrede precizno.

Pokazalo se da apsorpcija dijela energije vibracija u pojedinim podstrukturama sustava šaka-ruka dobro korelira sa zdravstvenim posljedicama uslijed vibracija (Lidström, 1977.)^{II)}. Količina apsorbirane energije ne ovisi samo o intenzitetu vibracija, već i o nizu drugih faktora kao što su: frekvencijski spektar vibracija, smjer prenošenja vibracija, pritisna i posmična sila, relativni položaj dijelova (zglobova) sustava šaka-ruka s obzirom na izvor vibracija i individualnim fizičkim karakteristikama radnika (ispitanika) na kojima se vrši mjerenje (Burström, 1994.)^{III)}. Da problem određivanja uzročno-posljedičnog odnosa raznih utjecajnih veličina kod vibracija koje se prenose sa strojeva na zdravlje čovjeka nije jednostavno odrediti, može se vidjeti i iz slike 1.4. koja pokazuje njihovu međuovisnost.

Na temelju svih dosadašnjih spoznaja definirane su i preporuke međunarodne norme HRN EN ISO 5349-1:2001(E): *Mechanical vibration – Measurement and evaluation of human exposure to hand-transmitted vibration*^{IV)} koja propisuje općenite zahtjeve vezane uz metode mjerenja i obrade vibracija koje se sa strojeva prenose na ruke. Tako se kao osnovna veličina koja se mjeri određuje ubrzanje (budući da se mjerenja provode uglavnom pomoću akcelerometara), i to efektivna vrijednost ubrzanja (a_{ef}) određena tijekom reprezentativnog perioda izlaganja vibracijama.

Prema istoj normi preporuča se istovremeno mjerenje u sve tri biodinamičke osi kako je to prikazano na slici 1.5. Na temelju vremenskih zapisa signala

I Miyashita, K.; Shiomi, S.; Itoh, N., Kasamatsu, T., Iwata, H. 1983: Epidemiological study of vibration syndrome in response to total hand-tool operating time. *British Journal of Industrial Medicine*, 40: 92-98.

II Lidström, I. M. 1977: Vibration injury in rock drillers, chislers and grinders – Some views on the relationship between the quantity of energy absorbed and the risk of occurrence of vibration injury. *Proceedings of the International Occupational Hand-Arm Vibration Conference*, NIOSH, Cincinnati, 77-83.

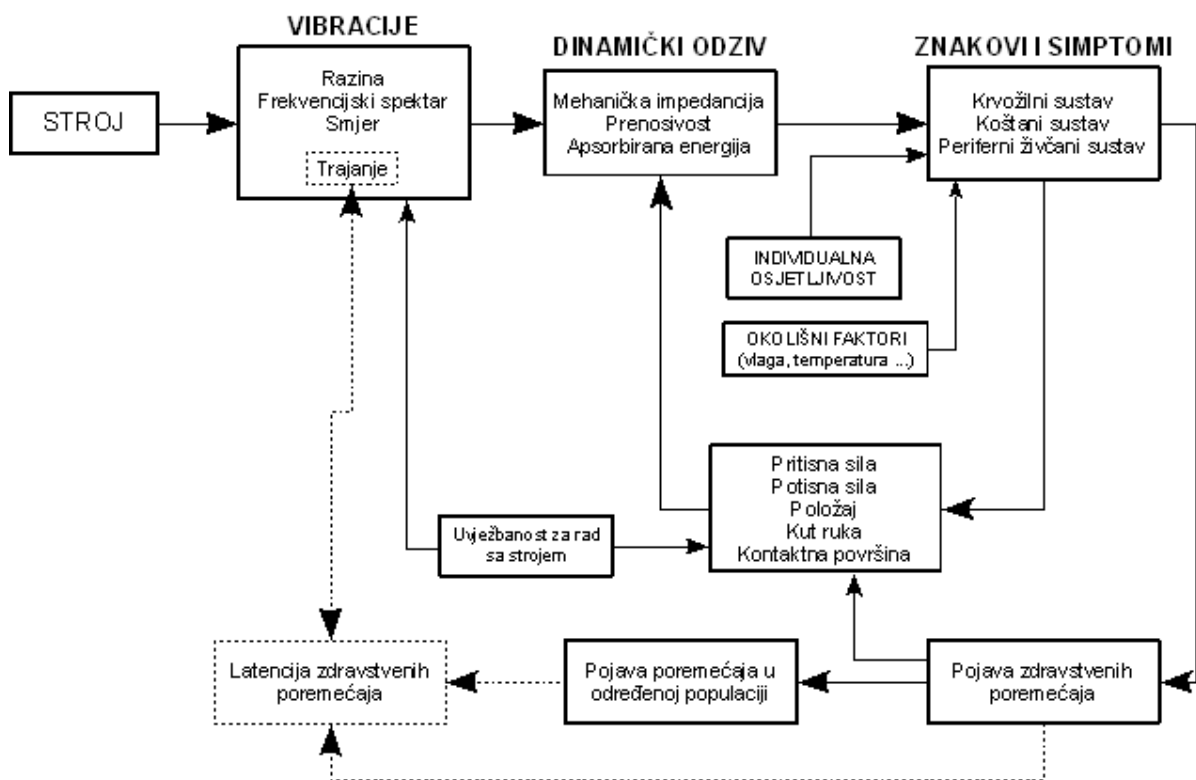
III Burström, L. 1994: The influence of individual factors on the absorption of vibration energy in the hand-arm. *Journal of the Low Frequency Noise and Vibration*, 14: 115-122.

IV Prvi citat na strani 3.

karakterističnih perioda izlaganja vibracijama provodi se daljnja analiza. Za svaku os vrednuje se vremenski signal vibracija pomoću filtera (analogne ili digitalne izvedbe) propisane prijenosne funkcije koji je za sve osi isti ili množenjem razina vibracija u pojedinim tercama s odgovarajućim faktorima prema relaciji:

$$a_{hw(x,y,z)} = \sqrt{\sum_{i=1}^h (W_{hi} \cdot a_{hi})^2} \quad (1.1)$$

gdje je: a_{hw} – vrednovana razina vibracija u pojedinoj osi u m/s^2 ; W_{hi} – faktor vrednovanja za pojedinu tercu u frekvencijskom rasponu od 6,3 do 1250 Hz; a_{hi} – odgovarajuća razina vibracija u pojedinoj terci dobivena tercnom analizom vremenskog signala vibracija u m/s^2 .



Slika 1.4. Shematski prikaz uzročno-posljedičnih veza između pojedinih faktora kod vibracija koje se sa stroja prenose na sustav šaka-ruka (Griffin, 1996.)^I

Na temelju dobivenih vrednovanih razina ubrzanja za pojedine osi proračunava se njihov vektorski zbroj koji predstavlja tzv. ukupnu vrednovanu razinu vibracija (a_{hv}), a određuje se prema relaciji:

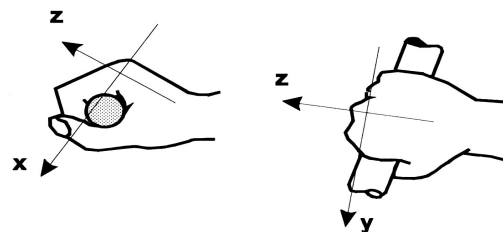
I Prvi citat na strani 6.

$$a_{hv} = \sqrt{a_{hwx}^2 + a_{hwy}^2 + a_{hwz}^2} \quad (1.2).$$

Pomoću ukupne vrednovane razine vibracija i vremena izloženosti tim vibracijama (kao izuzetno bitnog faktora u procjeni utjecaja određene razine vibracija na zdravlje radnika) određuje se dnevna izloženost vibracijama ($A(8)$) prema relaciji:

$$A(8) = a_{hv} \cdot \sqrt{\frac{T}{T_0}} \quad (1.3)$$

gdje je: T – ukupno vrijeme dnevnog izlaganja vibracijama intenziteta a_{hv} u s; T_0 – referentni vremenski period od 8 h, odnosno 28800 s.



Slika 1.5. Shematski prikaz biodinamičkog koordinatnog sustava vezanog za ruku prema ISO 5349^I

Ukoliko se karakteristična dnevna izloženost vibracijama sastoji od više perioda čije je trajanje poznato (T_i) i pripadajućih ukupnih vrednovanih razina vibracija tijekom tih perioda izlaganja radnika (a_{hvi}), može se procijeniti dnevna izloženost radnika prema relaciji:

$$A(8) = \sqrt{\frac{1}{T_0} \sum_{i=1}^N a_{hvi}^2 \cdot T_i} \quad (1.4).$$

Iako norme detaljno propisuju načine mjerenja vibracija koje se prenose s ručki motornih pila lančanica i vrednovanje dobivenih rezultata, one nigdje ne daju detaljnije preporuke o mogućem utjecaju određenih razina na zdravlje radnika, odnosno preporuke o dopuštenoj dnevnoj izloženosti radnika.

Tako je Europska unija, odnosno njezina nadležna tijela, između niza direktiva vezanih uz zaštitu radnika od utjecaja štetnih okolnih faktora na radu 2002. godine donijela direktivu 2002/44/EC – *On the Minimum Health and Safety Requirements*

^I Prvi citat na strani 3.

Regarding the Exposure of Workers to the Risks Arising from Physical Agents: Vibration^I koja je od 2005. godine uključena u zakon EU-a te kao takva postala obvezujuća za sve zemlje članice Europske unije s određenim prijelaznim razdobljima za prilagođavanje novim standardima. Ta direktiva propisuje odgovornosti i obveze poslodavaca i radnika u cilju zaštite od štetnog djelovanja vibracija.

Prema toj direktivi, opasnost od štetnog utjecaja vibracija na zdravlje čovjeka temelji se na vrijednosti dnevne izloženosti vibracijama ($A(8)$) koja predstavlja osmosatni ekvivalent dnevne izloženosti radnika vibracijama na nekom radnom mjestu. Tako se kao “akcijska razina”, odnosno razina dnevne izloženosti vibracijama iznad koje treba upotrijebiti neku od metoda smanjenja dnevne izloženosti vibracijama (npr. izbor stroja, organizacija rada, upotreba zaštitnih sredstava i dr.) navodi vrijednost od $A(8) = 2,5 \text{ m/s}^2$. Kao gornja granična vrijednost ekvivalentne dnevne izloženosti vibracijama navodi se vrijednost od $A(8) = 5,0 \text{ m/s}^2$ te se tu vrijednost ni u kojem slučaju na pojedinom radnom mjestu ne bi smjelo prelaziti.

Budući da HRN EN ISO 5349-1:2001(E)^{II} daje općenite preporuke za mjerenja, na svim strojevima često postoje i dodatne norme koje detaljnije opisuju postupke mjerenja vibracija na pojedinim grupama strojeva pa se tako za mjerenja na motornim pilama lančanicama koristi i norma HRN EN ISO 7505-1986 (E): *Forestry machinery – Chain saws – Measurement of hand-transmitted vibration*^{III} koja daje detaljnije preporuke za mjerenje vibracija u “laboratorijskim uvjetima” radi bolje usporedivosti i ponovljivosti tih mjerenja. Međutim, ista ima neke nedorečenosti koje mogu značajno utjecati na procjenu utjecaja vibracija koje se prenose s ručki motornih pila lančanica pri stvarnim uvjetima rada. Tako je Goglia (1994.)^{IV} u svojim istraživanjima utvrdio znatne nedorečenosti u normi HRN EN ISO 7505 -1986 (E) vezane uz određivanje pritisne sile i utjecaja rukovatelja na mjernu ponovljivost. U

I European Union Directive 2002/44/EC of the European Parliament and the Council 2002: On the Minimum Health and Safety Requirements Regarding the Exposure of Workers to the Risks Arising from Physical Agents: Vibration. 16th Individual Directive Within the Meaning of Article 16(1) of Directive 89/391/EEC, Brussels, Belgium.

II Prvi citat na strani 3.

III HRN EN ISO 7505-1986 (E): Forestry machinery – Chain saws – Measurement of hand-transmitted vibration.

IV Goglia, V. 1994: Osigurava li ISO 7505 mjernu ponovljivost. Mehanizacija šumarstva, 19: 39-45.

istraživanjima je utvrđen značajan utjecaj iskustva rukovatelja u radu s motornim pilama lančanicama na izmjerene razine vrednovanih ubrzanja. Uzrok takvim odstupanjima od mjernih rezultata najvjerojatnije je u različitim pritisnim silama koje znatno utječu na mehaničku impedanciju ruke, a samim time i na količinu vibracijske energije koja se prenosi na ruke. Nigdje u normi nije točno definiran način određivanja (mjerenja) pritisne sile.

Daljnijim istraživanjima (Goglia, 1995.^I; Goglia, 1996.^{II}) utvrđen je značajan utjecaj rukovatelja, duljine vodilice lanca, količine goriva i maziva u spremnicima te načina prihvata pile na razinu vibracija na ručkama motornih pila lančanica.

Istraživanjima McDowella i dr. (2007.)^{III} pokazalo se da je, umjesto mjerenja sile na ručki motorne pile lančanice, za potrebe mjerenja u stvarnim uvjetima rada moguće koristiti iskusnog radnika koji može relativno dobro reproducirati pritisne sile na ručku i tijekom mjerenja vibracija.

Prema istraživanjima Deseureaulta i dr. (1988.)^{IV} pokazalo se da povećanje zatupljenosti zubi lanca ima značajan utjecaj na povećanje razine vibracija. Takve se informacije često mogu čuti i od profesionalnih sjekača. Istraživanje utjecaja različitih načina oštrenja lanaca motornih pila lančanica i povećanja zatupljenosti lanaca u kontroliranim laboratorijskim uvjetima pokazalo je da se razine vibracija mogu povećati čak dva puta.

Osim problema izravno vezanih uz zdravlje i udobnost radnika koji su redovito izloženi povećanim razinama vibracija kao značajnih činitelja proizvodnosti rada, za društvo se javljaju i problemi gubitaka proizvodnosti, velikih troškova vezanih uz saniranje zdravstvenih problema vezanih uz HAVS, ali i velikih odšteta na temelju dobivenih parnica. Za ilustraciju može poslužiti primjer iz Velike Britanije gdje su u proteklih nekoliko godina poslodavci u sudskim parnicama vezanim uz HAVS izgubili oko 3,000,000,000 £ koje su morali isplatiti oko 140 000 bivših rudarskih radnika, a

I Goglia, V. 1995: Parameters Influencing the Vibration Level of the Motor Chain Saws, Invited Paper, IUFRD XX. World Congress, Tampere.

II Goglia V. 1996: Neki utjecajni parametri na razinu vibracija motornih pila lančanica. Šumarski list, 3-4: 187-194.

III McDowell, T. W.; Wiker, S. F.; Dong, R. G.; Welcome, D. E. 2007: Effects of vibration on grip and push force-recall performance. International Journal of Industrial Ergonomics, 37: 257-266.

IV Dessureault, P. C.; Laperrière, A.; Vincent, J. Y. 1988: The control of chain-saw vibration. Sound and Vibration, 22: 32-34.

isto se bilježi i u području šumarstva, gdje je na temelju sudske presude Stockton-on-Tees Borough Council morao platiti oko 350,000 £ nekolicini svojih zaposlenika jer im je dijagnosticirana pojava uznapredovale faze VWF-a.

Prve pojave HAVS-a vezane uz rad s motornim pilama lančanicama počele su se javljati šezdesetih godina prošlog stoljeća s početkom uvođenja prvih lakših motornih pila lančanica s kojima je mogao raditi samo jedan čovjek. Prije toga korištene su teške motorne pile lančanice za dva radnika, i to isključivo na radovima sječe. Iako su takve pile imale znatne vibracije, nije bilo više slučajeva HAVS-a budući da su radnici bili izloženi vibracijama relativno kratko vrijeme. Uvođenjem novih pila došlo je i do proširenja obima njihova korištenja i na radove izrade drva. Tako se u studijama rađenima šezdesetih godina prošlog stoljeća može uočiti velik udio sjekača s pojavom VWF-a (Huzl i dr., 1961.^I; Miura i dr., 1966.^{II}; Takamatsu, 1966.^{III}; Takagi, 1968.^{IV}; Barnes i dr., 1969.^V). Kako bi se smanjile te negativne posljedice povećanog izlaganja radnika visokim razinama vibracija, krajem šezdesetih godina prošlog stoljeća krenulo se u intenzivno istraživanje i razvoj čiji je cilj bio izolacija ručki motorne pile lančanice od pogonskog i reznog dijela kao izvora vibracija. Rezultat tih napora je pojava tzv. "antivibracijskih" motornih pila lančanica koje su od 1970. godine postale prisutne u gotovo svim dijelovima svijeta i polako počele zamjenjivati stare modele bez prigušnih elemenata.

Izolacija dijela vibracija kod motornih pila lančanica postignuta je tako da su prigušni elementi odgovarajućih prigušnih svojstava (uglavnom gumeni prigušni elementi) zamijenili nekadašnje krute veze između ručki i tijela pile. Na taj način postignuto je smanjenje razina vibracija koje se prenose na ručke motorne pile lančanice, a samim time i na ruke radnika. Međutim, nije osigurana potpuna izolacija

I Huzl, F.; Stolarik, R.; Mainerova, J.; Jankova, J.; Sykora, J. 1961: Noxious action of vibrations and noise on work with hand motor saws. *Pracovni Lekarstvi*, 13: 505-510.

II Miura, T.; Kimura, K.; Tominaga, Y.; Kimotsuki, K. 1966: On the Raynaud's phenomenon of occupational origin due to vibrating tools – its incidence in Japan. *Report of the Institute for the Science of Labour*, No. 65, Japan.

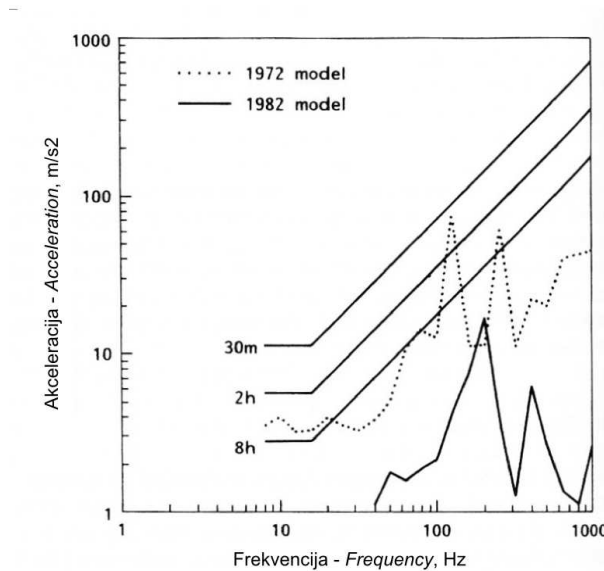
III Takamatsu, M. 1966: Raynaud's phenomenon among workers using vibratory tools. 15th International Congress: *Medicine du Travail*, A IV-58: 213-216.

IV Takagi, S. 1968: Raynaud's phenomenon due to chain saw and chipping machine. *Japanese Circulation Journal* 32: 32-33, 99-110.

V Barnes, R.; Longley, E. O.; Smith, A. R. B.; Allen, J. G. 1969: Vibration disease. *The Medical Journal of Australia*, 5: 901-905.

vibracija koje se prenose s pile na ruke.

Uporaba antivibracijskih motornih pila lančanica od sedamdesetih godina pa nadalje, prema nekim podacima (Stewart i Goda, 1970.^I; Pyykkö i dr., 1986.^{II}), znatno je smanjila pojavu VWF-a kod sjekača koji su ih redovito koristili.



Slika 1.6. Prikaz frekvencijske analize napravljene na signalima vibracija izmjerenih na ručkama motornih pila lančanica iz 1972. godine i na ručkama antivibracijskih motornih pila lančanica iz 1982. godine (Pyykkö i dr., 1986.)^{III}

Usporedba vibracija na ručkama starih i novijih antivibracijskih tipova motornih pila lančanica može se vidjeti na slici 1.6. gdje je jasno vidljiv značajan napredak u zaštiti radnika postignut konstrukcijskim prigušenjem vibracija. Ovdje treba naglasiti da se podaci iz tog doba odnose uglavnom na uređene sredine koje su ulagale znatne napore u istraživanja zaštite na radu kao što su Japan, Velika Britanija i skandinavske zemlje. Prema podacima nekih starijih istraživanja (Brubaker i dr., 1987.)^{IV}, ali i novijih studija potaknutih pojavom VWF-a, kod radnika koji su se čitav

I Stewart, A. M.; Goda, D. F. 1970: Vibration syndrome. *British Journal of Industr. Med.*, 27: 19-27.

II Pyykkö, I.; Korhonen, O.; Färkkilä, M.; Starck, J.; Aatola, S.; Jäntti, V. 1986: Vibration syndrome among Finnish forest workers, a follow-up from 1972 to 1983. *Scandinavian Journal of Work, Environment and Health*, 12: 395-399.

III Prvi citat na strani 13.

IV Brubaker, R. L.; Mackenzie, C. J. G.; Hertzman, C.; Hutton, S. G.; Slakov, J. 1987: Longitudinal study of vibration-induced white finger among coastal fallers in British Columbia. *Scandinavian Journal of Work, Environment and Health*, 13: 305-308.

svoj radni vijek koristili samo antivibracijskim motornim pilama lančanicama (HSE – *Health and Safety Executive*, 2005.)^I pokazalo se da su vibracije koje se prenose na ruke radnika i kod novih antivibracijskih motornih pila lančanica još uvijek dovoljno visoke te ako se koriste za cjelodnevni rad, mogu predstavljati opasnost za zdravlje radnika (slika 1.7.). Ovdje treba navesti i činjenicu da su prethodna istraživanja provedena u radnim sredinama gdje su se alati i strojevi redovito održavali te gdje postoje visoki standardi zaštite na radu.



Slika 1.7. Karakteristične vrijednosti ukupnih vrednovanih razina ubrzanja (a_{hv}) prema HRN EN ISO 5349:2001(E) koje se prenose s motornih pila lančanica na ruke radnika (podaci skupljeni mjerenjima na radnim mjestima u razdoblju od 1997. do 2005. godine od strane udruženja HSL - *Health and Safety Laboratory* i INRS - *Institut national de recherche et de sécurité*)^{II}

U Republici Hrvatskoj je poznato da većina profesionalnih sjekača u šumarstvu ima problema s nekom od posljedica HAVS-a.

Iz podataka Hrvatskog zavoda za medicinu rada za posljednjih pet godina (tablica 1.4.) može se vidjeti da je broj priznatih slučajeva vibracijskog sindroma s obzirom na ukupni broj radnika s profesionalnim bolestima u stalnom porastu od 2003. do 2008. godine, kako u postotnom omjeru, tako i u apsolutnom broju registriranih slučajeva (ovdje se podaci odnose na sve zabilježene slučajeve vibracijskog sindroma u djelatnostima poljoprivrede, lova i šumarstva, ali poznato je da su skoro svi registrirani slučajevi vezani uz posljedice HAVS-a kod djelatnosti u šumarstvu).

Tako je istraživanjima i u primarnoj preradi drva pri radu na pilama jarmačama utvrđena znatna izloženost radnika vibracijama koje se prenose sa strojeva tijekom

I Chain Saw Vibration, Health and Safety Executive (HSE), <http://www.hse.gov.uk/lau/lacs/36-1.htm>, 2005.

II Prvi citat na strani 14.

radnog dana (Goglia i Grbac, 2005.^I; Goglia i dr., 2005.^{II}).

Tablica 1.4. Udio radnika iz grupe djelatnosti poljoprivrede, lova i šumarstva (grupa A prema NKD) s dijagnosticiranim slučajevima vibracijskog sindroma s obzirom na ukupni broj radnika s dijagnosticiranom profesionalnom bolešću u djelatnosti poljoprivrede, lova i šumarstva te s obzirom na sveukupni broj radnika s dijagnosticiranim profesionalnim bolestima u Republici Hrvatskoj za razdoblje od 2003. do 2007. godine prema podacima Hrvatskog zavoda za medicinu rada

Godina	Broj radnika s profesionalnom bolešću u Republici Hrvatskoj	Broj radnika s profesionalnom bolešću u djelatnosti poljoprivrede, lova i šumarstva (grupa A prema NKD*)	Broj slučajeva vibracijskog sindroma u djelatnosti poljoprivrede, lova i šumarstva (grupa A prema NKD*)
2003.	122	36 (29,50%)	25 (20,50%)
2004.	103	30 (29,13%)	25 (24,27%)
2005.	116	45 (38,80%)	34 (29,31%)
2006.	98	30 (30,60%)	19 (19,39%)
2007.	103	36 (34,95%)	31 (30,10%)

* Nacionalna klasifikacija djelatnosti 2007. (NKD 2007.) koja se primjenjuje u statističkom sustavu Republike Hrvatske od 1. 1. 2008. godine, a objavljena je u Narodnim novinama NN br. 58/07.^{III}

Iz podataka o dnevnoj izloženosti vibracijama za neke od profesionalnih modela motornih pila lančanica dvaju najzastupljenijih proizvođača na hrvatskom tržištu proizlazi zaključak da te vrijednosti za gotovo sve modele prelaze razinu od $2,5 \text{ m/s}^2$, a neki modeli prelaze čak i gornju graničnu vrijednost od 5 m/s^2 (slike 1.8. i 1.9.). Podaci su dobiveni na temelju javno dostupnih vrijednosti ukupno vrednovanih razina ubrzanja (a_{nv}) određenih prema HRN EN ISO 7505^{IV} i procjena vremena izloženosti određenim razinama ubrzanja prema *CEN-Technical report: Guideline for the assessment of exposure to hand-transmitted vibration based on information from*

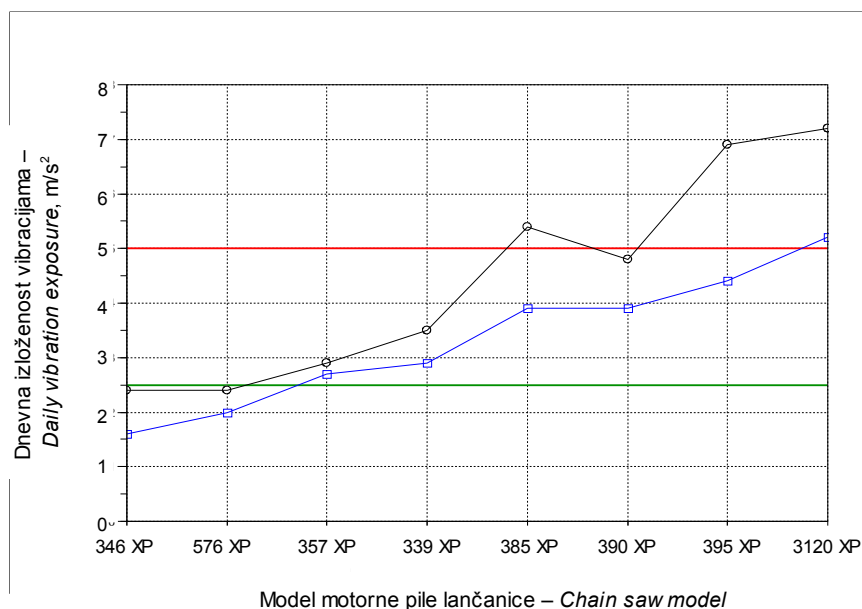
I Goglia, V.; Grbac, I. 2005: Whole-body vibration transmitted to the framesaw operator. *Applied Ergonomics*, 36: 43-48.

II Goglia, V.; Grbac, I.; Đukić, I. 2005: Human Vibration Transmitted to the Framesaw Operator. IUFRO XXIIth World Congress, Brisbane, Australia.

III Odluka o Nacionalnoj klasifikaciji djelatnosti 2007. - NKD 2007. Narodne novine, 58.

IV Prvi citat na strani 10.

manufacturers of machinery^I. Ovdje treba upozoriti da razine vibracija koje se mogu sresti pri stvarnom radu s motornim pilama lančanicama mogu znatno odstupati od navedenih vrijednosti.



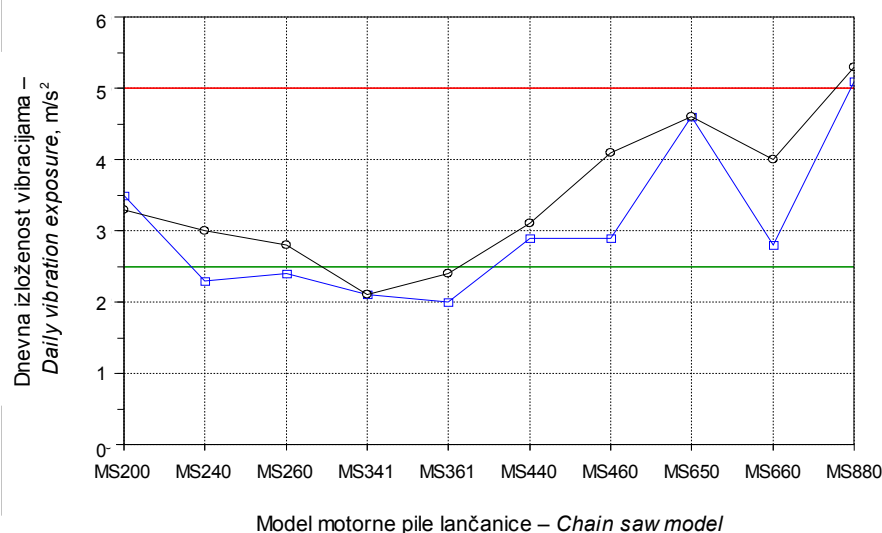
Slika 1.8. Dnevna izloženost vibracijama na prednjoj i stražnjoj ručki pri radu s reprezentativnim modelima motornih pila lančanica proizvođača *Husqvarna*^{II}

Takvo stanje u stvarnim uvjetima rada potvrđeno je i istraživanjima (Pitts, 2004.)^{III} u kojima je ispitivan veći broj motornih pila lančanica gore navedenih proizvođača pri svim karakterističnim radovima u šumarstvu te je za većinu radova dnevna izloženost vibracijama prelazila akcijsku razinu, a pri nekim radovima i gornju graničnu razinu.

I Technical Report CEN/TR 231064: Guideline for the assessment of exposure to hand-transmitted vibration based on information provided by manufacturers of machinery.

II Husqvarna – Vibration calculator; <http://www.husqvarna.co.uk/node2528.aspx>, 2008.

III Pitts, P. 2004: Hand-arm vibration emission of chainsaws – comparison with vibration exposure. Health and Safety Laboratory, Derbyshire, UK.



Slika 1.9. Dnevna izloženost vibracijama na prednjoj i stražnjoj ručki pri radu s reprezentativnim modelima motornih pila lančanic proizvođača *STIHL* ^I

1.1.2. Predmet istraživanja

S obzirom na sve dosad navedene podatke, može se utvrditi da je radnicima koji se profesionalno bave radom na motornim pilama lančanicama potrebna dodatna zaštita od vibracija koje se prenose na sustav šaka-ruka. Između niza mjera koje se koriste te se preporučuju u sklopu Directive 2002/44/EC^{II} u cilju smanjenja vibracija koje se prenose na ruke je i uporaba antivibracijskih rukavica. To se u nekim slučajevima pokazalo kao dobar način smanjenja štetnih utjecaja vibracija koje se prenose na sustav šaka-ruka (Jetzer i dr., 2003.)^{III}. Da bi se rukavice svrstale u skupinu antivibracijskih, moraju proći testiranja propisana normom HRN EN ISO 10819: 2000(E)^{IV}. No i na taj način ispitane rukavice mogu imati upitna prigušna svojstva pri rukovanju određenim strojem, ovisno o njihovim prigušnim karakteristikama u danom frekvencijskom spektru.

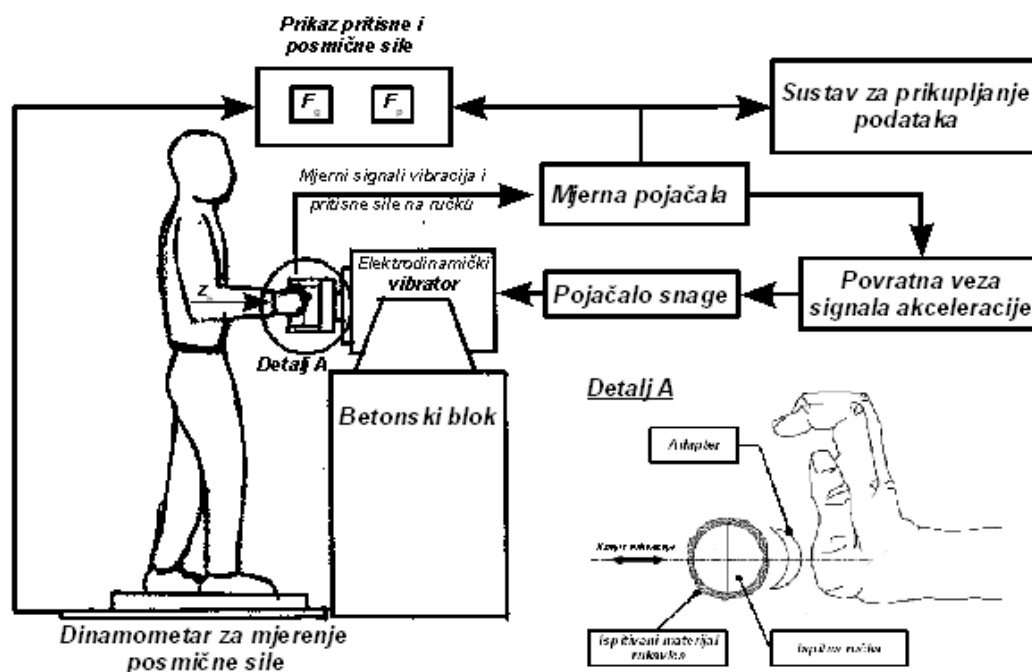
I http://www.stihl.com/vib/english/documents/GB_MS.pdf, 2008.

II Prvi citat na strani 10.

III Jetzer, T.; Haydon, P.; Reynolds, D. 2003: Effective intervention with ergonomics, antivibration gloves and medical surveillance to minimize hand-arm vibration hazards in the workplace. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 45 (12):1312-1317.

IV HRN EN ISO 10819:2000(E): Mehaničke vibracije i udari – Vibracije ruke – Metoda mjerenja i ocjenjivanja vibracijskoga prijenosnog faktora rukavica na dlanu ruke.

Norma propisuje mjerenja vibracijskog prijenosnog faktora (TR) koji je definiran kao omjer ubrzanja mjerenog na površini ruke i na referentnoj mjernoj točki u laboratorijskim uvjetima na način da se mjerenja provode na tri ispitanika koji se neovisno postavljaju na platformu prema slici 1.10. Tijekom mjerenja ispitanici moraju održavati konstantan položaj ruke (lakat mora zatvarati kut od $90^\circ \pm 10^\circ$) koja tijekom mjerenja ne smije dodirivati tijelo. Pritisna sila na mjernu ručku, koja ujedno služi kao dinamometar, mora biti 30 ± 5 N i mora se konstantno prikazivati kako bi ispitanik imao povratnu informaciju o pritisknoj sili. Posmična sila mora biti 50 ± 8 N i također se mora konstantno prikazivati. Najkraće vrijeme svakog pojedinog mjerenja je 30 s, a tijekom mjerenja bilježe se prisna sila (pomoću mjerne ručke), posmična sila, vibracije na ručki i vibracije na ruci prema shematskom prikazu prikazanom na slici 1.10.

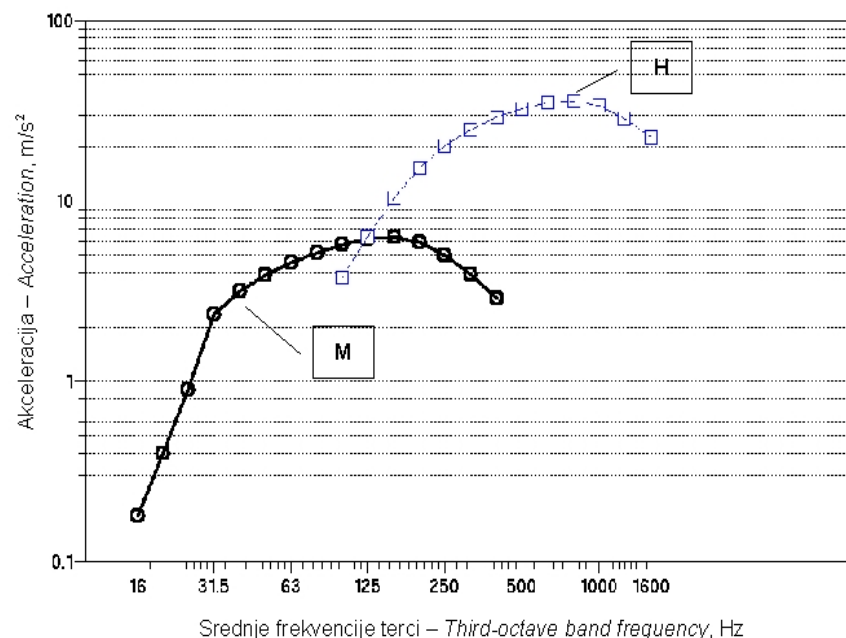


Slika 1.10. Shematski prikaz mjernog lanca, položaja ispitanika i položaja adaptera za mjerenje vibracija koje se prenose na dlan za ocjenjivanje antivibracijskih rukavica ispitivanjem vibracijskog prijenosnog faktora na dlan ruke prema HRN EN ISO 10819¹

Za mjerenje vibracija na ruci koristi se adapter čiji je izgled dan u normi i u koji se smješta akcelerometar za mjerenje akceleracije u jednoj osi. Kao ispitni signali koji se s vibratora i ispitne ručke prenose na ruku ispitanika koriste se dva

¹ Prvi citat na strani 17.

frekvencijska spektra, M i H spektar, čije su karakteristike prikazane na slici 1.11. i koje ispitni sustav mora pobuđivati unutar propisanih tolerancija. Razine generiranih ispitnih efektivnih vrijednosti ubrzanja za spektar M iznose $16,7 \text{ m/s}^2$, a za spektar H iznose $92,2 \text{ m/s}^2$. Da bi se mogao izračunati vibracijski prijenosni faktor, prvo se provode po dva mjerenja vrednovanih razina vibracija (prema ISO 5349^I) na svakom od triju ispitanika, i to bez rukavica na ručki (a_{wsRb}) i na dlanu (a_{wsPb}) za oba zadana spektra.



Slika 1.11. Frekvencijski spektri po srednjim frekvencijama pojedinih terci ispitnih signala M i H za ispitivanje vibracijskog prijenosnog faktora rukavica na dlan ruke prema HRN EN ISO 10819: 2000(E)^{II}

Mjerenja ispitnih razina ubrzanja na ručki i dlanu provode se istovremeno. Na temelju tako određenih razina ubrzanja određuje se vrednovani vibracijski prijenosni faktor bez rukavica (TR_{sb}) prema izrazu

$$TR_{sb} = \frac{a_{wsPb}}{a_{wsRb}} \quad (1.5)$$

I Prvi citat na strani 3.

II Prvi citat na strani 17.

gdje je a_{wsPb} – vrednovana razina ubrzanja izmjerenih na dlanu bez rukavica (m/s^2) i a_{wsRb} – vrednovana razina ubrzanja izmjerenih na ispitnoj ručki bez rukavica (m/s^2).

Isti postupak se ponavlja i s ispitnim rukavicama i na temelju tih mjerenja dobije se po šest vrijednosti (po dvije za svakog ispitanika) vrednovanih vibracijskih prijenosnih faktora s rukavicama (TR_{sg}) prema izrazu

$$TR_{sg} = \frac{a_{wsPg}}{a_{wsRg}} \quad (1.6)$$

gdje je a_{wsPg} – vrednovana razina ubrzanja izmjerenih na dlanu s rukavicama (m/s^2) i a_{wsRg} – vrednovana razina ubrzanja izmjerenih na ispitnoj ručki s rukavicama (m/s^2).

Na temelju izračunatih vrijednosti za TR_{sb} i TR_{sg} potrebno je izračunati korigiranu vrijednost vibracijskog prijenosnog faktora rukavica (TR_s) za oba ispitna spektra prema izrazu

$$TR_s = \frac{TR_{sg}}{TR_{sb}} \quad (1.7)$$

Srednja korigirana vrijednost $\overline{TR}_s$ za svaki spektar ($\overline{TR}_M$ i $\overline{TR}_H$) jednaka je aritmetičkoj sredini šest dobivenih pojedinačnih vrijednosti za TR_s .

Prema zahtjevima norme, rukavice se ne bi smjele deklarirati kao antivibracijske ako ne zadovoljavaju kriterij da je $\overline{TR}_M < 1,0$ i $\overline{TR}_H < 0,6$. Međutim, ispunjavanje tih kriterija ne znači da se uklonio rizik od štetnog djelovanja vibracija na ruke. To je i normalno za očekivati ako je dnevno izlaganje vibracijama s rukavicama veće od dopuštenog. U tom slučaju rješenje treba tražiti i u kombinaciji s drugim faktorima koji utječu na smanjenje ukupnog izlaganja radnika vibracijama tijekom radnog dana i njegova radnog vijeka.

Na probleme vezane uz navedenu normu već je upozoravano (Griffin, 1998.^I; Hewitt, 1998.^{II};

I Griffin, M. J. 1998: Evaluating the effectiveness of gloves in reducing the hazards of hand-transmitted vibration. *Occup. Environ. Med.*, 55:340-348.

II Hewitt, S. 1998: Assessing the Performance of Anti-vibration Gloves: A Possible Alternative to ISO 10819:1996, *Ann. iiceup. Wry.*, 42 (4): 245-252.

Pinto i dr., 2001.^{I)} jer se pokazalo da neke rukavice koje su prošle ispitivanja prema HRN EN ISO 10819:2000(E)^{II)} nemaju odgovarajuća prigušna svojstva. Neke su čak pojačavale vibracije u pojedinim dijelovima frekvencijskog spektra, dok su neke, koje nisu zadovoljile na ispitivanjima, pokazale dobra prigušna svojstva pri radu s određenim skupinama strojeva.

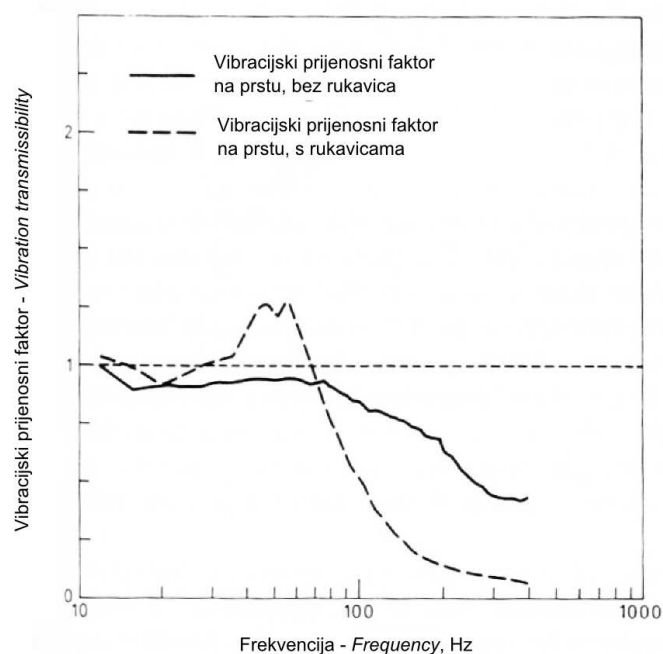
Problem uporabe rukavica s prigušnim materijalima u cilju smanjenja vibracija koje se prenose na sustav šaka-ruka još su prije isticali neki autori (Griffin i dr., 1982.)^{III)}. Mjerenjima se pokazalo da je s tadašnjim prigušnim materijalima bilo moguće prigušiti tek frekventni spektar iznad 75 Hz. Poznata je činjenica da najveći utjecaj na razvoj HAVS-a imaju vibracije s frekvencijskim sadržajem ispod tih frekvencija. Mjerenja su provođena na dlanu te se smatralo da mogu pružiti još manju zaštitu u području prstiju zbog male mehaničke impedancije prstiju. Osim toga, za neke odabrane prigušne materijale utvrđeno je i pojačanje vibracija u jednom dijelu frekvencijskog spektra. Čak i za takvo prigušenje bio je potreban materijal debljine 12 mm, što je sa stajališta ergonomske zahtjeva za rukavice neprihvatljivo (slika 1.12.).

Isto je tako istaknuto da sama mjerenja, pogotovo u radnim uvjetima, mogu biti znatno otežana činjenicom da se mehanička impedancija sustava šaka-ruka, kao i prigušnog materijala rukavica, može znatno mijenjati, ovisno o pritisknoj i posmičnoj sili na ručku alata, te ona uvelike mogu ovisiti o načinu mjerenja vibracija u tim slučajevima.

I Pinto, I.; Stacchini, N.; Bovenzi, M.; Paddan, G.S.; Griffin, M.J. 2001: Protection effectiveness of anti-vibration gloves: field evaluation and laboratory performance assessment. Appendix H4C to Final Report, Biomed 2 project no. BMH4-CT98-3251, Vibration Injury Network.

II Prvi citat na strani 17.

III Griffin, M. J.; Macfarlane, C. R.; Norman, C. D. 1982: The transmission of vibration to the hand and the influence of gloves. *Vibration Effects on the Hand and Arm in Industry*, Wiley, New York.



Slika 1.12. Usporedba vibracijskih prijenosnih faktora pri radu s "antivibracijskim rukavicama" i bez njih. Mjerenja obavljena na rukavicama s 12 mm debelim prigušnim materijalom na šest ispitanika i s prosječnom pritiskom silom od 46 N (Griffin i dr., 1982.)^I

1.2. OCJENA DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

Već su Griffin (1998.)^{II} i Hewitt (1998.)^{III} utvrdili niz nedostataka norme ISO 10819^{IV}, kao i to da je ispitivanje koje propisuje norma nepotrebno teško za izvođenje i da rezultati koji se dobivaju nakon ispitivanja nisu od prevelike koristi krajnjem korisniku zbog nedostatka informacija. Tako je ustanovljeno i da je mjerenjima i vrednovanjem vibracijskog prijenosnog faktora prema ISO 10819 moguće dobiti vrijednosti samo za prigušenje vibracija koje se prenose na dlan, a ne i na prste. To znači da rukavice, koje su po svim zahtjevima svrstane u antivibracijske, ne moraju pružiti odgovarajuću zaštitu i za područje prstiju gdje su posljedice vibracija najčešće

I Prvi citat na strani 21.

II Prvi citat na strani 20.

III Prvi citat na strani 20.

IV Prvi citat na strani 17.

i najizraženije.

Prema rezultatima istraživanja, rasipanja rezultata između različitih ispitanika (prema normi, ispitivanja je potrebno provesti na tri ispitanika) mogu biti čak veća od rasipanja između različitih tipova rukavica. To može znatno utjecati na ocjenu rukavica. Tako Reynolds i Wolf (2005.)^I preporučuju da se ispitanici prije ispitivanja uvježbaju kako bi postigli zadovoljavajuću ponovljivost rezultata ispitivanja, odnosno da bi se priviknuli na adapter između dlana i rukavice (kako tijekom mjerenja ne bi značajno mijenjali njegov položaj) te na održavanje konstantnih pritisnih i posmičnih sila.

Nadalje, nigdje nije definirana mjerna nesigurnost laboratorijskog mjernog postupka tako da nije moguće s određenom sigurnošću odrediti granice prihvatanja ili odbijanja rukavica kao antivibracijskih.

Bitan je i problem orijentacije i oblika adaptera s akcelerometrom koji se postavlja između dlana i rukavice, a čije pomicanje tijekom mjerenja može uzrokovati značajne greške u mjernim rezultatima. Prema istraživanjima Reynoldsa i Wolfa (2005.)^{II}, kod ispitivanja rukavica prema ISO 10819^{III} izuzetno je bitno da gornja strana adaptera, koja je u kontaktu s dlanom, ima odgovarajuću zakrivljenost zbog boljeg prihvata u dlan, a donja strana mora odgovarati radijusu ispitne ručke. Adapter bi također morao zadovoljiti uvjet da mu je širina 70-80% širine dlana ispitanika. Svojim istraživanjima utvrdili su neke od prihvatljivih oblika adaptera koji zadovoljavaju uvjete postavljene od strane norme. Osim toga, važna je i pretpostavka da adapter ne mijenja prienosnu karakteristiku između dlana i prigušnog materijala rukavice.

Kod laboratorijskih mjerenja mjernu pogrešku može unijeti i mjerna ručka napravljena prema preporuci u normi zbog svojih dinamičkih karakteristika. Uslijed svoje konstrukcije pri višim frekvencija dolazi do rezonancija koje utječu na rezultate mjerenja pa je tako istraživanjima (Dong i dr., 2006.)^{IV} ustanovljeno da ispitna ručka

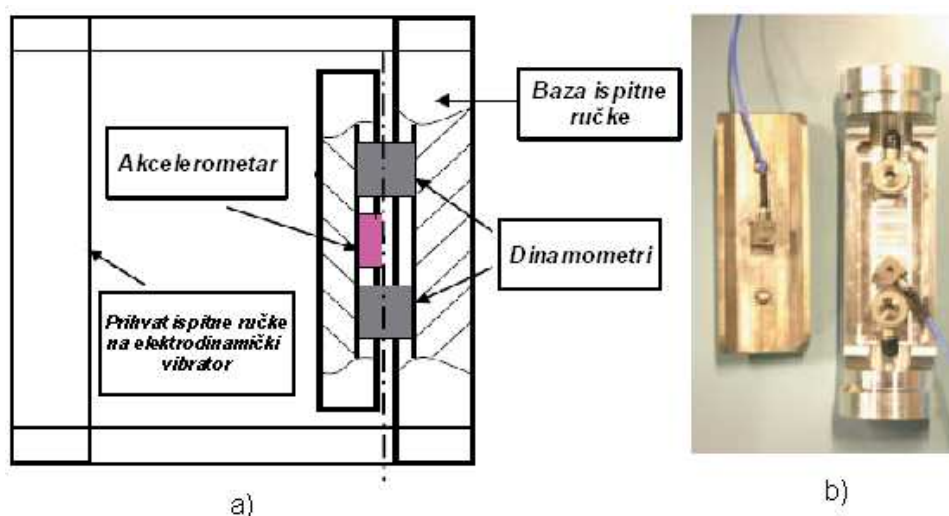
I Reynolds, D. D.; Wolf, E. 2005: Evaluation of Antivibration Glove Test Protocols Associated with the Revision of ISO 10819. *Industrial Health*, 43: 556-565.

II Prvi citat na strani 23.

III Prvi citat na strani 17.

IV Dong, R. G.; Welcome, D. E.; McDowell, T. W.; Wu, J. Z. 2006: Measurement of biodynamic response of human hand-arm system. *Journal of Sound and Vibration*, 294: 807-827.

kakva se preporuča u ISO 10819^I ima znatne razlike u dinamičkim karakteristikama kada je opterećena (kada se pritišće rukom) i kada je neopterećena, stoga je potrebno provesti zahvate u cilju smanjenja tih efekata. Uočeno je da joj je prva rezonantna frekvencija već oko 150 Hz, što može stvarati probleme. Prema normi, to možda i nije problem zato što je to područje frekvencija koje je zbog vrednovanja vibracijskog signala prema ISO 5349^{II} već znatno prigušeno, ali može biti problem kod linearnog vrednovanja i uspoređivanja izmjerenih podataka. Iz tih istraživanja ustanovljeno je i da ako se želi mjeriti mehanička impedancija sustava šaka-ruka, to nije moguće s preporučenom ručkom. Za mjerenje mehaničke impedancije potrebno je i dinamičko mjerenje sile, što konstrukcija s tenzometarskim trakama nije u stanju zadovoljiti u zahtijevanom frekvencijskom opsegu. Prema njihovim ispitivanjima, bolja konstrukcija ispitne ručke, koja bi znatno smanjila rasipanja podataka, prikazana je na slici 1.13.



Slika 1.13. Shematski prikaz (a) i fotografija (b) izvedbe i dijelova ispitne mjerne ručke koja ima bolje dinamičke karakteristike od one predložene u HRN EN ISO 10819 (Dong i dr., 2006.)^{III}

Osim toga, mjerenja se provode pri samo jednom položaju ruke (koji nije karakterističan za rad s motornom pilom) te se time pretpostavlja da promjena položaja ruke nema utjecaja na promjene prigušnih svojstava rukavica iako je

I Prvi citat na strani 17.

II Prvi citat na strani 3.

III Prvi citat na strani 23.

istraživanjima Burströma i Lundströma (1994.)^I te Aldiena i dr. (2005.)^{II} dokazana velika ovisnost mehaničke impedancije, ali i apsorbirane vibracijske snage u ruci s promjenama položaja ruke s obzirom na rame i smjer izvora vibracija. Njihovim je radovima pokazano da pri ispruženom položaju ruke pri raznim veličinama mjernih ručki i vrijednostima pritisnih sila na ručku prosječna apsorbirana snaga, koja se povezuje i s povećanim rizikom od HAVS-a, dostiže vrijednosti i do 98% veće od onih kada je ruka bila u okomitom položaju (koji je propisan i u ISO 10819^{III}). Istraživanjima Reynoldsa i Jetzera (1998.)^{IV} pokazano je da položaj ruke i tijela ispitanika ima značajan utjecaj i na rezultate mjerenja prema ISO 10819^V i da je ispitanike i u tome potrebno uvježbati kako bi se smanjila rasipanja rezultata. Ako se uzme u obzir da pri radu s motornim pilama lančanicama radnici konstantno mijenjaju položaj ruke te veličinu i smjer pritisne sile na ručku (slike 1.14. i 1.15.), može se uvidjeti da prema podacima i zaključcima dobivenima laboratorijskim mjerenjima treba ipak pristupiti s oprezom.

Istraživači predlažu i povećanje broja ispitanika na barem četiri ili pet zbog smanjenja njihova utjecaja. Osim toga, isti istraživači preporučuju određivanje linearno vrednovanog vibracijskog prijenosnog faktora ($TR_{S(Lin)}$) naspram vrednovanja vibracijskih signala prema ISO 5349^{VI} za oba ispitna spektra jer, prema njihovom istraživanju i mišljenju, takav način ocjenjivanja bolje odražava prigušnu sposobnost pojedinih rukavica, pogotovo u višim područjima frekvencijskog spektra.

I Burström, L.; Lundström, R., 1994: Absorption of vibration energy in the human hand and arm. *Ergonomics*, 37: 879-890.

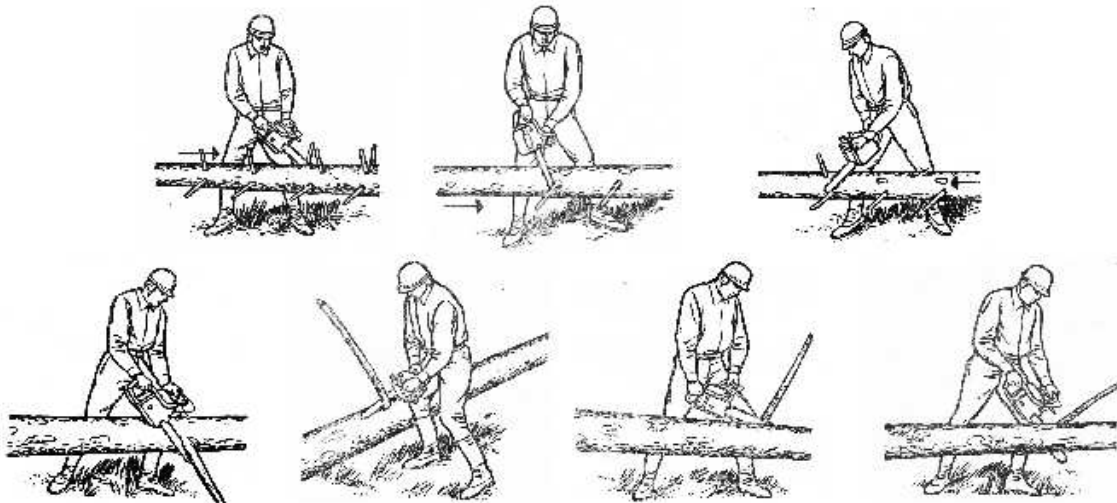
II Aldien, Y.; Marcotte, P.; Rakheja, S.; Boileau, P. E. 2005: Influence of hand-arm posture on biodynamic response of the human hand-arm exposed to zh-axis vibration. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 36: 45-59.

III Prvi citat na strani 17.

IV Reynolds, D. D.; Jetzer, T. 1998: Use of Air Bladder Technology to Solve Hand Tool Vibration Problems. *Proceedings of the 8th International Conference on Hand-Arm Vibration*, Umea, Sweden.

V Prvi citat na strani 17.

VI Prvi citat na strani 3.



Slika 1.14. Prikaz nekkih od karakterističnih položaja radnika s motornom pilom lančanicom pri radovima izrade drva gdje se može uočiti stalna promjena položaja ruke, a samim time i pritise sile na ručku s obzirom na glavne smjerove vibracija koje se prenose s ručke motorne pile lančanice (prema Schulzu, 1976.)^I



Slika 1.15. Prikaz karakterističnih položaja radnika s motornom pilom lančanicom pri sječi drva

Između dvaju različitih načina određivanja vibracijskog prijenosnog faktora za oba spektra ustanovljene su sljedeće veze s vrlo visokim stupnjem korelacije.

Tako je za M spektar

$$\overline{TR}_{M(Lin)} = 0,2176 + 0,8265 \cdot \overline{TR}_{M(ISO)} \quad (1.8),$$

dok je za H spektar taj izraz

$$\overline{TR}_{H(Lin)} = -716,7 + 639,3 \cdot \overline{TR}_{H(ISO)} - 406,2 \cdot \overline{TR}_{H(ISO)}^{2,5} + 216,4 \cdot \overline{TR}_{H(ISO)}^3 + 728,9 \cdot e^{-\overline{TR}_{H(ISO)}} \quad (1.9),$$

iz čega proizlazi da je za prihvaćanje rukavica kao antivibracijskih, ukoliko se koristi linearno vrednovanje izmjerenih vibracijskih signala, potrebno zadovoljiti uvjete da je

$$\overline{TR}_{M(Lin)} < 1,0 \text{ i } \overline{TR}_{H(Lin)} < 0,37.$$

^I Prvi citat na strani 2.

Prema istraživanjima (Hewitt, 1998.)^I, kvantitativni utjecaj nekih od utjecajnih faktora na odstupanja vrijednosti vibracijskog prijenosnog faktora je prikazan u tablici 1.5.

Tablica 1.5. Približni utjecaj pojedinih istraživanih utjecajnih varijabli na vrijednost vibracijskog prijenosnog faktora na dlan ruke određenog prema ISO 10819 (prema Hewitt, 1998.)^{II}

Varijabla	Približni utjecaj na odstupanje vrijednosti vibracijskog prijenosnog faktora
Pomak adaptera za mjerenje vibracija	$\pm 20\%$
Varijabilnost kod jednog ispitanika	$\pm 5\%$
Varijabilnost između ispitanika	$\pm 10\%$
Praćenje samo posmične sile	$\pm 4\%$
Razina vibracija	$\pm 3\%$
Temperatura	$\pm 4\%$

Prema Griffinu (1998.)^{III}, svaka klasifikacija antivibracijskih rukavica morala bi biti povezana s njihovom uporabom s određenom skupinom strojeva, odnosno strojeva sa sličnim razinama ubrzanja i frekvencijskim karakteristikama te navodi da prigušna sposobnost rukavica ovisi o sljedećim parametrima:

- frekvencijskom spektru vibracija na ručki s koje se vibracije prenose na ruku,
- frekvencijskom prijenosnom faktoru rukavica (izraženom u ovisnosti o frekvenciji) i
- frekvencijskom vrednovanju signala vibracija.

Mjerenja vibracija na površini ruke laserskim vibrometrom su pokazala da značajan utjecaj na vibracijski prijenosni faktor ruke imaju sadržaj masnog tkiva i mišića šake i ruke (Smutz i dr.)^{IV}. Taj utjecaj je posebno izražen u području nižih

I Prvi citat na strani 20.

II Prvi citat na strani 20.

III Prvi citat na strani 20.

IV Smutz, W. P.; Dong, R. G.; Schopper, A. W. : A Study of Tissue Vibration Transmissibility Using a Scanning Laser Vibrometer. NIOSH, Morgantown, USA.

frekvencija. Povećanjem debljine sloja mišića dolazi i do prigušenja vibracija u ruci.

Tako Griffin (1998.)^I na temelju laboratorijski izmjerenih podataka za vibracijski prijenosni faktor pojedinih rukavica, odnosno za vrijednosti dobivene tercnom analizom preporuča procjenu prigušne sposobnosti rukavica (PSR) pri radu na stvarnim strojevima odnosom vrijednosti razina ubrzanja po pojedinim tercama izmjerenih u laboratorijskom ispitivanju i razina ubrzanja po pojedinim tercama izmjerenih na ručki danog stroja prema izrazu

$$PSR = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=32} a_i^2 \cdot H_i^2 \cdot W_i^2}{\sum_{i=1}^{i=32} a_i^2 \cdot W_i^2}} \cdot 100 \quad (1.10)$$

gdje je PSR – prigušna sposobnost rukavica (%); a_i – efektivna razina ubrzanja u pojedinoj terci izmjerena na ručki stroja (m/s^2); H_i – prosječna vibracijska prenosivost za pojedinu tercu; W_i – faktor vrednovanja pojedine terce prema HRN EN ISO 5349:2001(E)^{II}.

Pinto i dr. (2001.)^{III} uspoređuju laboratorijski dobivene prigušne sposobnosti više tipova antivibracijskih rukavica (PSR) i vrijednosti dobivene terenskim ispitivanjima (PSR_f) pri radu s motornim pilama lančanicama i kutnim brusilicama. Na temelju vrijednosti razina ubrzanja izmjerenih na terenu izračunata je prigušna sposobnost rukavica za vrednovane razine i nevrednovane razine ubrzanja prema izrazu

$$PSR_f = \frac{a_{pg}}{a_{pwg}} \quad (1.11)$$

gdje je PSR_f – prigušna sposobnost rukavica određena na temelju terenskih mjerenja, a_{pg} – razina vibracija na dlanu s rukavicama (m/s^2); a_{pwg} – razina vibracija na dlanu bez rukavica (m/s^2).

Osim prigušne sposobnosti rukavica, određivana je i prijenosna funkcija ($H_{io}/\omega/$) samih rukavica na temelju laboratorijskih ispitivanja

I Prvi citat na strani 20.

II Prvi citat na strani 3.

III Prvi citat na strani 21.

$$H_{io}(\omega) = \frac{G_{io}(\omega)}{G_{ii}(\omega)} \quad (1.12)$$

gdje je $G_{io}(\omega)$ – korelacija spektralne gustoće (eng. *cross-spectral density*) između signala vibracija na ručki stroja i na dlanu (dB); $G_{ii}(\omega)$ – spektralna gustoća snage (eng. *power spectral density*) signala vibracija na ručki stroja (dB).

Određivanje prijenosne funkcije ($H_{io}(\omega)$) može biti izuzetno korisno jer se na temelju poznavanja prijenosne funkcije rukavica i karakterističnog ulaznog signala vibracija izmjenjenog na stroju u stvarnim uvjetima rada može procijeniti prigušna sposobnost rukavica pri radu s tim strojem. To bi značilo da je mjerenja prigušnih svojstava potrebno provesti samo u laboratoriju. Međutim, tako dobivena prijenosna funkcija mora biti pridružena i karakteristikama rukavica pri laboratorijskim mjerenjima i pri terenskim mjerenjima. Pokazalo se da metoda pomoću prijenosne funkcije u stvarnim uvjetima rada za neke tipove rukavica daje rezultate usporedive s laboratorijskom metodom. Za neke tipove rukavica su rasipanja rezultata prevelika tako da je za sada upotrebljivost te metode upitna. Nju treba dodatno provjeriti i unaprijediti, ako je moguće (Dong i dr., 2003.)^I.

Rezultati mjerenja koja su proveli Pinto i dr. (2001.)^{II} su pokazali da ipak postoje razlike između prigušnih sposobnosti rukavica izmjerenih u laboratoriju i u stvarnim uvjetima rada. Rezultatima se pokazalo da laboratorijska mjerenja nisu dala korektnu ocjenu, odnosno da su rukavice pokazale bolja prigušna svojstva u stvarnim uvjetima rada, pogotovo pri radu s kutnim brusilicama. Slični rezultati su dobiveni i prethodnim istraživanjima obavljenima na motornim pilama lančanicama (Goglia i Đukić, 2006.^{III}; Goglia i dr., 2008.^{IV}). Može se zaključiti da vrijednosti dobivene prema ISO 10819 mogu biti od veće koristi samo ako su posmične sile i frekvencijski spektri vibracija koji se prenose sa strojeva usporedivi s onima koji se koriste pri ispitivanjima u

I Dong, R. G.; McDowell, T.W.; Welcome, D. E.; Smutz, W. P.; Schopper, A. W.; Warren, C.; Wu, J. Z.; Rakheja, S. 2003: On-the-hand measurement method for assessing effectiveness of anti-vibration gloves. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 22: 283-298.

II Prvi citat na strani 21.

III Goglia, V.; Đukić, I. 2006: Measurement and evaluation of the vibration transmissibility of gloves. V. Medzinárodná vedecká konferencia – Trieskové a beztrieskové obrábanie dreva. Tatry, Slovakia: 135-143.

IV Goglia, V.; Žgela, J.; Đukić, I. 2008: Učinkovitost antivibracijskih rukavica – II dio. *Šumarski list*, 5-6: 239-244.

normi. Isto tako se može vidjeti da se ni prijenosna funkcija dobivena na temelju laboratorijskih podataka, koja pretpostavlja da je sustav za koji se određuje linearan, s koncentriranim parametrima i nepromjenjiv u vremenu, ne može pouzdano koristiti za određivanje prigušnih svojstava rukavica. Slična istraživanja su proveli Rakheja i dr. (2002.)^I, s time da su oni određivali vibracijski prijenosni faktor dvaju tipova antivibracijskih rukavica prema ISO 10819 i određivali prijenosnu funkciju rukavica (H_{io}/ω) prema 1.8. Osim toga, pomoću vibratora su u laboratorijskim uvjetima generirali vibracijske signale na ispitnim ručkama koji odgovaraju karakterističnim frekvencijskim spektrima pojedinih skupina strojeva i za njih su određivali vibracijski prijenosni faktor. Usporedbom izmjerenih i procijenjenih vrijednosti na temelju prijenosne funkcije rukavica dobili su slaganje većine rezultata unutar 9%. Međutim, uočavaju utjecaj promjene viskoelastičnih svojstava rukavica te promjena prihvatne i posmične sile na rezultate. Temeljem svojih istraživanja oni predlažu način ocjenjivanja rukavica gdje se umjesto M i H spektara koriste karakteristični spektri pojedinih strojeva.

Dong i dr. (2002.)^{II} s ciljem smanjenja utjecaja pogrešne orijentacije adaptera za mjerenje vibracija na dlanu predlažu određivanje vibracijskog prijenosnog faktora na temelju vektorskog zbroja efektivnih razina vibracija u tri ortogonalne osi (X, Y i Z) na sljedeći način:

$$TEAT = \sqrt{\frac{a_{gx}^2 + a_{gy}^2 + a_{gz}^2}{a_{hx}^2 + a_{hy}^2 + a_{hz}^2}} \quad (1.13)$$

gdje je TEAT – ukupan efektivni vibracijski prijenosni faktor na dlan ruke; a_{gi} – efektivna razina (vrednovanih i nevrednovanih) vibracija u pojedinim osima na dlanu (m/s^2); a_{hi} – efektivna razina (vrednovanih i nevrednovanih) vibracija u pojedinim osima na ručki (m/s^2).

Provedenim su mjerenjima ustanovljena znatno manja rasipanja i pouzdaniji rezultati korištenjem ove metode (TEAT) naspram one propisane u ISO 10819. Uzrok

I Rakheja, S.; Dong, R.; Welcome, D.; Schopper, A. W. 2002: Estimation of tool-specific isolation performance of antivibration gloves. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 30: 71-87.

II Dong, R. G.; Rakheja, S.; Smutz, W. P.; Schopper, A. W.; Welcome, D. E.; Wu, J. Z. 2002: Effectiveness of a new method (TEAT) to assess vibration transmissibility of gloves. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 30: 33-48.

je u tome što se znatno smanjuje utjecaj odstupanja položaja adaptera od idealnog te je potrebno manje uvježbavanja i obučavanje ispitanika. To ovu metodu čini znatno pristupačnijom i za terenska mjerenja.

Općenito se metode za određivanje prigušnih svojstava rukavica (vibracijskog prijenosnog faktora) mogu podijeliti u dvije grupe (Dong i dr., 2005.)¹:

- mjerenja na ruci i
- mjerenja na dlanu.

U prvu skupinu metoda ulaze mjerenja kod kojih se određuju vibracije koje s ručke prolaze na površinu nokta, zgloba prsta, gornji dio ruke ili zglob ruke te se na temelju omjera vibracija koje su prošle do određenog dijela ruke i vibracija na ručki određuje vibracijski prijenosni faktor. Glavni problem kod ovih metoda je taj što pojedini dijelovi ruke i prsti mogu pojačavati određene niže komponente frekvencijskog spektra i prigušivati više komponente frekvencijskog spektra, što može utjecati na ocjenu rukavica. Na rezultate mjerenja može utjecati i masa akcelerometra koji se koristi, pogotovo pri višim frekvencijama.

U drugu skupinu metoda spadaju metode mjerenja vibracija koje se prenose na dlan ruke, a mjerenja se provode adapterom u kojem se nalazi akcelerometar. Te su metode i osnova mjerenja propisanih u ISO 10819. O nedostacima te metode već je bilo riječi.

Što se tiče terenskih mjerenja, prva skupina metoda za sada ima značajne prednosti jer je takva mjerenja lakše provesti i uz moguća manja rasipanja rezultata koja su uvjetovana promjenama orijentacije adaptera kod druge skupine metoda mjerenja. Druga skupina metoda mjerenja bi bila od izuzetne koristi kada bi se prenosivost mogla računati na temelju vibracija u sve tri ortogonalne osi (TEAT metoda). Za sada nije moguće napraviti tako mali adapter s troosnim akcelerometrom, a da se značajno ne utječe na mjerenja. Time bi se toliko promijenio efektivni promjer ručke na kojoj se provode mjerenja da bi ona postala praktički neprimjenjiva.

¹ Dong, R. G.; Rakheja, S.; McDowell, T. W.; Welcome, D. E.; Wu, J. Z.; Warren, C.; Barkley, J.; Washington, B.; Schopper, A. W. 2005: A method for assessing the effectiveness of anti-vibration gloves using biodynamic responses of the hand-arm system. *Journal of Sound and Vibration*, 282: 1101-1118.

Ipak su rezultati istraživanja (Dong i dr., 2003.)^I pokazali da metoda mjerenja vibracijskog prijenosnog faktora TEAT metodom na ruci može imati zadovoljavajuću ponovljivost i pouzdanost do frekvencija od oko 150 Hz, usporedivu s metodom mjerenja pomoću adaptera na dlanu. Osim toga, tim istraživanjima se pokazalo da što je mjerna točka udaljenija (površina ruke, zglobovi šake) od izvora vibracija, to je i njena ponovljivost za područje viših frekvencija manja.

Daljnijim istraživanjima i željom za pojednostavljenjem i smanjenjem mjerne nesigurnosti standardnog mjernog postupka Dong i dr. (2005.)^{II} istražuju korelaciju prigušne sposobnosti antivibracijskih rukavica i biodinamičkih karakteristika ruke, odnosno prividne mase ruke. Rezultati njihovih istraživanja upućuju na zadovoljavajuću korelaciju između tih dviju veličina u frekventijskom području od 40 do 200 Hz te uviđaju da bi se povećanje prigušnog efekta antivibracijskih rukavica moglo postići povećanjem efektivne mase sustava šaka-ruka. U svojim radovima (Dong i dr., 2005.)^{III} uočavaju da standardna metoda ispitivanja adapterom može podcijeniti prigušnu sposobnost rukavica, pogotovo u području viših frekvencija.

Ovakav pristup mjerenju prigušnih svojstava antivibracijskih rukavica uklanja moguće nepovoljne utjecaje adaptera između ruke i mjerne ručke na rezultate mjerenja. To za sada nije od većeg značenja za mjerenja u stvarnim uvjetima rada jer zahtijeva istovremeno mjerenje sile i ubrzanja, što uglavnom nije praktički izvedivo. Problem kod eksperimentalnog određivanja apsorpcije energije vibracija leži u tome, a posebno je to istaknuto kod terenskih mjerenja, da je za veličine pomoću kojih se određuje prosječna apsorbirana energija, odnosno snaga vibracija, potrebno istovremeno mjerenje brzine (ubrzanja) i sile, što je često teško izvedivo.

Ponekad je to i nemoguće bez značajnijeg mijenjanja dinamičkih karakteristika objekta na kojem se provode mjerenja.

Poboljšanje kvalitete mjerenja, pogotovo sila u stvarnim uvjetima rada, sigurno će pružiti i razvoj mjerne tehnike. Tako je već sada moguće mjerenje kontaktnih sila i distribucije pritisaka po dlanu i prstima tijekom rada pomoću tankih otporničkih ili

I Prvi citat na strani 29.

II Dong, R. G.; McDowell, T. W.; Welcome, D. E.; Smutz, W. P. 2005: Correlations between biodynamic characteristics of human hand-arm system and isolation effectiveness of anti-vibration gloves. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 35: 205-216.

III Prvi citat na strani 32.

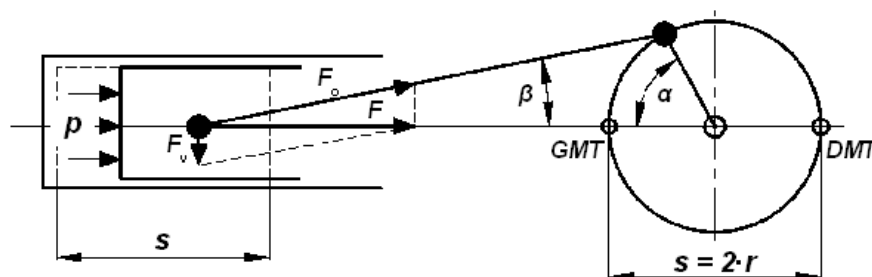
kapacitivnih folija, ali još uvijek ostaje problem niskih graničnih frekvencija takvih mjernih pretvarača, što i onemogućava njihovu kvalitetnu primjenu u određivanju mehaničke impedancije, samim time i parametara modela za određivanje učinkovitosti raznih materijala i zahvata na smanjenje vibracija, i to u stvarnim uvjetima rada. Do sada su uglavnom svi sustavi za istovremeno mjerenje sila i vibracija u stvarnim uvjetima rada bili preveliki da bi se mogli duže vrijeme praktički koristiti za mjerenja, a da se ne smeta radnika i time utječe i na sam ishod mjerenja. Većina dozimetara za mjerenje vibracija uglavnom zahtijeva da se akcelerometri montiraju ili na alat ili na nosač koji se prihvaća rukom. To je nepraktično kod normalnog odvijanja rada. Relativno dobri, jeftini i mali dozimetri za mjerenje sile i vibracija koje se prenose na dlan tijekom radnog dana, a pričvršćuju se pomoću rastezljive trake, nedavno su razvijeni te su u fazi ispitivanja njihove učinkovitosti (Peterson i dr., 2007.)¹. Manjak im je taj što su namijenjeni samo za mjerenje vibracija u jednoj osi i sile u jednoj točki pa te probleme treba još dodatno riješiti.

¹ Peterson, D. R.; Brammer, A. J.; Cherniak, M. G. 2007: Exposure monitoring system for day-long vibration and palm force measurements. *International Journal of Industrial Ergonomics*, doi:10.1016/j.ergon.2007.10.019.

2. TEORIJSKO-MATEMATIČKA ANALIZA VIBRACIJA I NJIHOVOG PRENOŠENJA NA SUSTAV ŠAKA-RUKA KOD MOTORNE PILE LANČANICE

2.1. ANALIZA VIBRACIJA KOD MOTORNE PILE LANČANICE

Vibracije se definiraju kao mehaničke oscilacije sustava s malim amplitudama, dok su oscilacije periodično gibanje bilo koje amplitude (Alfirević, 1997.)^I te su kao takve popratna pojava rada velikog broja strojeva, i to često nepoželjna. Mehaničke vibracije mogu biti periodične i neperiodične (stohastičke) te njihova obrada ovisi o njihovom karakteru. Tako je prvi i osnovni korak kod obrade utvrđivanje tipa vibracija. Kod motornih pila lančanica, kao što je poznato, izvor vibracija je pogonski motor, i to, u većini slučajeva, dvotaktni Otto motor. Za teoretsku analizu može se iskoristiti model jednostavnog klipnog mehanizma prikazan na slici 2.1.



Slika 2.1. Shematski prikaz klipnog mehanizma s ucrtanim bitnim elementima za analizu sila i vibracija koje se javljaju pri radu

Jednocilindrični klipni motor nikada ne može biti savršeno uravnotežen u praksi (Hartog, 1972.)^{II}, a razlog tome su linearno pokretane mase klipnog motora koje dovode do trešnje motora. Poznato je da se ubrzanje klipa približno može odrediti prema izrazu

$$a \simeq r \cdot \omega \cdot \cos \alpha \quad (2.1)$$

gdje je a – ubrzanje stapa (m/s^2), r – polumjer kružnice koju opisuje os letećeg

I Alfirević, I. 1997: Vibracije – Teorijske osnove analize vibracija. Tehnička enciklopedija, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, Zagreb, 13: 462-469.

II Hartog Den, J. P. 1972: Vibracije u mašinstvu. Građevinska knjiga, Beograd.

rukavca (m), ω – kutna brzina (rad/s), α – kut što ga zatvara položaj osi letećeg rukavca sa spojnicom gornje (GMT) i donje mrtve točke (DMT).

Ako detaljnije pogledamo sile koje djeluju na klipni mehanizam, možemo vidjeti da se ukupna sila u horizontalnom smjeru (F_h) može dobiti tako da se ojnica zamijeni dvjema koncentriranim masama: m_{rec} , koja je jednaka zbroju mase klipa i jednog dijela ojnice, i m_{rot} , koja je zbroj ekvivalentne mase koljena i drugog dijela ojnice te se određuje prema izrazu (Hartog, 1972.)¹:

$$F_h = (m_{rec} + m_{rot}) r \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega \cdot t) + m_{rec} \cdot \frac{r^2}{l} \cdot \omega^2 \cdot \cos(2 \cdot \omega \cdot t) \quad (2.2)$$

Vertikalna komponenta inercijalne sile ovdje je nebitna zato što ima samo dio od rotacione mase koji se jednostavno poništava pomoću zamašnjaka.

Iz izraza (2.2) se može vidjeti da je sila koja djeluje u horizontalnom smjeru periodična sila koja se sastoji od komponente koja je jednaka inercijalnom djelovanju kombinacije translatorno i rotaciono pokretane mase ($m_{rec}+m_{rot}$) s frekvencijom proporcionalnom frekvenciji vrtnje motora (n) i od komponente koja je jednaka translatornom gibanju mase m_{rec} s dvostruko većom frekvencijom od frekvencije vrtnje motora.

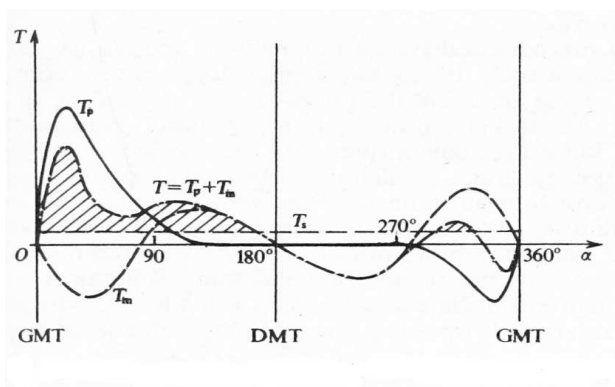
Prema tome je i ubrzanje koje se javlja uslijed inercijskih sila uzrokovanih radom stapnog mehanizma teoretski određeno sljedećim izrazom:

$$a = -r \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega \cdot t) - l \cdot \left(\frac{r^2}{l} \right) \cdot \omega^2 \cdot \cos(2 \cdot \omega \cdot t) \quad (2.3).$$

Osim inercijskih sila (F_m), u horizontalnom smjeru, javljaju se i sile (F_p) uslijed pritiska plinova (p) na klip koje su isto ciklički promjenjive i ovise o ciklusu motora te su isto tako proporcionalne s frekvencijom vrtnje motora. Ukupna sila koja se prenosi u horizontalnom smjeru jednaka je zbroju sila koje nastaju uslijed inercijskog djelovanja masa (F_m) i sila uzrokovanih djelovanjem pritiska plinova na klip (F_p). Ako sile F_p i F_m razložimo na osi letećeg rukavca u tangencijalne sile T_p i T_m , tijekom vrijednosti tih sila tijekom jednog ciklusa dvotaktnog motora može se vidjeti na slici 2.2.

¹ Prvi citat na strani 34.

Iz navedenog se može vidjeti da su sile što uzrokuju vibracije koje se s pogonskog motora prenose na okolinu (kućište stroja) periodičnog karaktera, a njihov iznos je funkcija frekvencije vrtnje motora. Te vibracije se preko ručki motorne pile lančanice dalje prenose i na ruke radnika koji rukuju pilama, a sam signal se mijenja tijekom tog puta kroz elemente prijenosa snage i gibanja, ali ostaje periodičan.



Slika 2.2. Dijagram tangencijalnih sila u dvotaktnom motoru (Jeras i dr., 1984.)¹

Za opisivanje takvih vibracija najčešće se koristi efektivna srednja vrijednost vibracija u promatranom vremenskom intervalu određena izrazom:

$$a_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) \cdot dt} \quad (2.4)$$

gdje je a_{ef} – efektivna srednja vrijednost; T – period tijekom kojeg se određuje efektivna srednja vrijednost; $a^2(t)$ – kvadrat trenutne vrijednosti vibracija.

Efektivna vrijednost periodičnog signala je dobra mjera za prosječnu energiju koja je tijekom određenog vremena sadržana u signalu ili prenešena na okolinu, ali ne daje nam nikakve podatke o vremenskoj promjenjivosti signala, njegovom obliku i, što je često najbitnije, o njegovom frekvencijskom sadržaju. Budući da je iz vremenskog signala vibracija, koji se često sastoji od više frekvencijskih komponenti pa je često prisutan šum, teško doći do podataka o periodu (T) i glavnim frekvencijskim komponentama (f) koje su izuzetno bitne za analizu vibracija, uglavnom se koriste metode frekvencijske analize zasnovane na Fourierovom

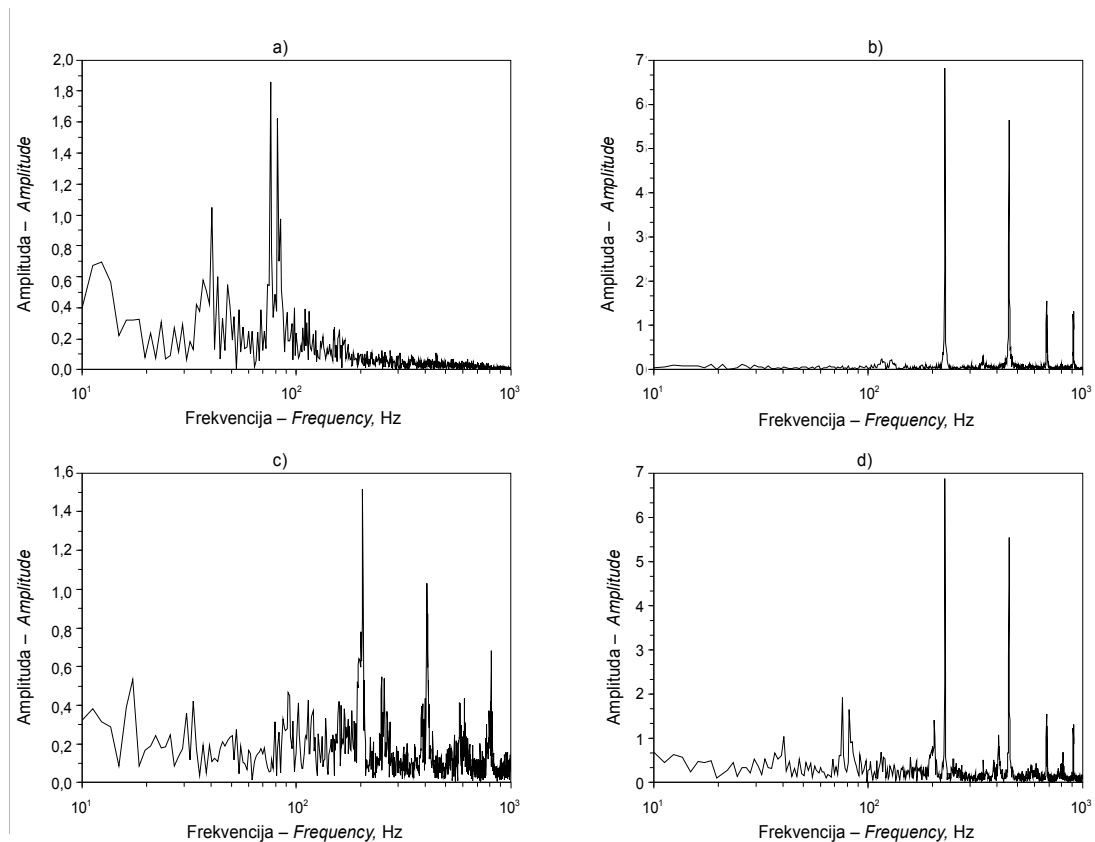
¹ Jeras, D.; Mahalec, I.; Mikuličić, M. 1984: Motori s unutrašnjim izgaranjem. Tehnička enciklopedija, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 9: 1-57.

razvoju periodičnih funkcija pomoću kojih se signal iz vremenske domene preslikava u frekvencijsku domenu.

Kao rezultat frekvencijske analize (FFT analize) za teoretski signal vibracija koje se prenose s klipnog mehanizma dobili bismo dvije karakteristične amplitude frekvencija proporcionalnih ω i $2\cdot\omega$ te njihove više harmonike. Zbog već navedenih utjecaja stvarni rezultati frekvencijske analize tipičnih signala vibracija na ručkama motornih pila lančanica izgledaju kao na slici 2.3. Za sada se vibracije koje nastaju kao posljedica rada motorne pile lančanice ne mogu uspješno smanjiti na prihvatljive razine pomoću konstrukcijskih promjena, a i rezultati pasivne kontrole prigušenja vibracija, kako je poznato, ne mogu kod njih dati zadovoljavajuće rezultate.

Takav način prigušenja je izuzetno efikasan samo u slučajevima kada moramo prigušiti samo jednu karakterističnu frekvenciju, a ne čitav niz, kao što je slučaj kod rada s motornim pilama lančanicama. U cilju smanjenja vibracija pogonskog dijela motorne pile lančanice razvijena je i dvocilindrična motorna pila lančanica (Takimoto i Sasaki, 1986.)^I, ali nije našla širu primjenu. Rješenje se možda može potražiti i u aktivnoj kontroli vibracija, ali za sada to nije izvedeno. Takvo rješenje bi svakako znatno povećalo i cijenu same motorne pile lančanice.

I Takimoto, Y.; Sasaki, I. 1986: The vibration characteristics of a chainsaw fitted with a two cylinder engine and the measuring method. Proceedings of the 18th IUFRO World Congress, Ljubljana.



Slika 2.3. Prikaz frekvencijskih spektara vibracija koje se prenose na ručku pri karakterističnim režimima rada motorne pile lančanice: a) frekvencijski spektar vibracija pri radu motorne pile lančanice u praznom hodu pri najmanjem broju okretaja motora, b) frekvencijski spektar vibracija pri radu motorne pile lančanice kod najvećeg broja okretaja motora, c) frekvencijski spektar vibracija pri nazivnom opterećenju motora tijekom operacije rezanja i d) karakteristični frekvencijski spektar vibracija motorne pile lančanice dobiven na temelju vremenskog signala vibracija dobivenog superponiranjem vremenskih signala pri karakterističnim režimima rada motorne pile lančanice

2.2. DEFINIRANJE SIMULACIJSKOG MODELA SUSTAVA ŠAKA-RUKA

Prema istraživanjima Dong i dr. (2008.)^I pokazalo se da poznavanje kompleksnog biodinamičkog odziva prstiju, šake i ruke može pomoći u boljem shvaćanju i povezivanju uzroka (vibracija koje se prenose na sustav šaka-ruka) i posljedica, odnosno pojava zabilježenih epidemioloških i fizioloških studija vezanih uz HAVS. S obzirom na sve više primjedaba, koje su posljedica provedenih mjerenja (Dong i dr., 2005.^{II}; Dong i dr., 2006.^{III}; Tominaga, Y., 2005.^{IV}), a vezane su uz nedovoljnu korelaciju između kriterija vrednovanja vibracija prema ISO 5349^V i pojave VWF-a, sve se više predlaže mjerenje i korištenje apsorbirane snage vibracija u sustavu šake kao mogućeg boljeg pokazatelja utjecaja različitih izvora vibracija pri raznim promjenama utjecajnih parametara (kut ruke, pritisna sila, promjer ručke i dr.) na stvarna oštećenja koja mogu nastati u sustavu šake. Vrednovanje vibracija prema ISO 5349 pokazuje dobru korelaciju s ostalim dijelovima ruke.

Kako bi se bolje proučila biodinamika sustava šaka-ruka, započeti su i radovi na izradi FEM (*Finite Element Method*) modela dijela prsta (Wu i dr., 2002.^{VI}; Wu i dr., 2007.^{VII}) koji je pokazao zadovoljavajuće slaganje s eksperimentalnim podacima. Izrada takvog modela za čitavu ruku je trenutno praktički neizvediva.

Mjerenjima vibracijskog prijenosnog faktora na različite dijelove ruke pokazalo

-
- I Dong, J. H.; Dong, R. G.; Rakheja, S.; Welcome, D. E.; McDowell, T. W.; Wu, J. Z. 2008: A method for analyzing absorbed power distribution in the hand and arm substructures when operating vibrating tools. *Journal of Sound and Vibration*, 311: 1286-1304.
- II Dong, R. G.; Welcome, D. E.; Wu, J. Z. 2005: Frequency Weightings Based on Byodynamics of Fingers-Hand-Arm System. *Industrial Health*, 43: 516-526.
- III Dong, R. G.; Welcome, D. E.; McDowell, T. W.; Wu, J. Z.; Schopper, A. W. 2006: Frequency weighting derived from power absorption of fingers-hand-arm system under zh-axis vibration. *Journal of Biomechanics*, 39: 2311-2324.
- IV Tominaga, Y. 2005: New Frequency Weighting of Hand-Arm Vibration. *Industrial Health*, 43: 509-515.
- V Prvi citat na strani 3.
- VI Wu, J. Z.; Dong, R.; Rakheja, S.; Schopper, A. W. 2002: Simulation of mechanical responses of fingertip to dynamic loading. *Medical Engineering & Physics*, 24: 253-264.
- VII Wu, J. Z.; Welcome, D. E.; Krajnak, K.; Dong, R. G. 2007: Finite element analysis of the penetrations of shear and normal vibrations into the soft tissues in a fingertip. *Medical Engineering & Physics*, 29: 718-727.

se da je apsorbirana snaga vibracija u dobroj korelaciji s vrednovanjem prema ISO 5349 za sve dijelove ruke osim za prste, gdje je bolja korelacija bila s linearnim efektivnim razinama prenesenih vibracija.

S obzirom na te podatke i na iskustva prethodno razvijenih modela sustava šaka-ruka, od niza autora (Rakheja i dr., 2002.)¹ predložen je mehanički model kod kojeg se šaka ne uzima kao jedna struktura na koju se prenose vibracije, već se posebno tretiraju vibracije koje se prenose na prste, a posebno one koje se prenose na dlan pa onda dalje na ostatak ruke (slika 2.4.).

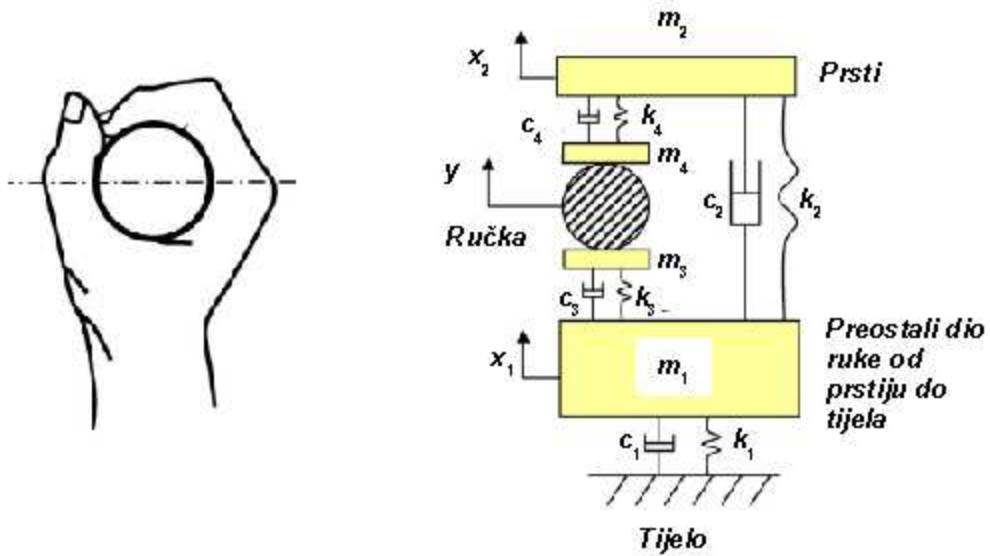
Takav model sustava šaka-ruka je model s četiri ili pet stupnjeva slobode, što ovisi o tome želimo li koristiti model samo za ocjenu učinkovitosti pojedinih metoda izolacije vibracija ili za izradu stvarnih biomehaničkih modela ruke i njihove analize s ciljem detaljnijeg poznavanja širenja i utjecaja vibracija na pojedine dijelove ruke, i to linearni tako da ga se analitički može prikazati u matričnom obliku prema izrazu:

$$[M] \{\ddot{q}\} + [C] \{\dot{q}\} + [K] \{q\} = \{F\} \quad (2.5)$$

gdje je $[M]$ – matrica pripadajućih masa, $[C]$ – matrica odgovarajućih faktora prigušenja pojedinih elemenata, $[K]$ – matrica odgovarajućih koeficijenata krutosti pojedinih elemenata, $\{F\}$ – vektor pobudne sile i $\{q\}$ – vektor pomaka (odziv).

Pokazalo se da modeli s više stupnjeva slobode nemaju zadovoljavajuća statička svojstva. Pri malim silama dolazi do nerealnih pomaka i pojedine mase u modelima su premale s obzirom na stvarne elemente sustava. Takvi sustavi imaju prilično dobro slaganje prijenosnih funkcija s eksperimentalnim podacima. S druge strane, modeli s manje stupnjeva slobode nemaju zadovoljavajuće prijenosne karakteristike.

¹ Rakheja, S.; Wu, J. Z.; Dong, R. G.; Schopper, A. W. 2002: A comparison of biodynamic models of the human hand-arm system for applications to hand-held tools. *Journal of Sound and Vibration* 249(1): 55-82.



Slika 2.4. Prikaz elemenata modela prstiju i ruke s četiri stupnja slobode koji pokazuje dobra slaganja s eksperimentalnim podacima (Dong i dr., 2008.)^I

Na temelju izraza (2.5) i uz pretpostavku sinusne pobudne sile oblika $y = A \cdot e^{j \cdot \omega \cdot t}$ mogu se izračunati sile na dlan i prste iz odziva sustava, a na temelju dinamičke sile i brzine (ubrzanja) ručke. Tada se može odrediti posebno mehanička impedancija (Z) na prstima, a posebno na dlanu prema izrazu:

$$Z_{prsti}(j\omega) = \frac{(k_4 + j\omega \cdot c_4) \cdot (y - x_2)}{j\omega \cdot y} + m_4 \cdot j\omega = \text{Re}(Z_{prsti}) + j \cdot \text{Im}(Z_{prsti}) \quad (2.6)$$

$$Z_{dlan}(j\omega) = \frac{(k_3 + j\omega \cdot c_3) \cdot (y - x_1)}{j\omega \cdot y} + m_3 \cdot j\omega = \text{Re}(Z_{dlan}) + j \cdot \text{Im}(Z_{dlan}) \quad (2.7)$$

gdje je $j = \sqrt{-1}$, a ω – frekvencija pobude.

Na temelju izmjerenih vrijednosti za mehaničku impedanciju i izraza (2.6) i (2.7) moguće je procijeniti vrijednosti parametara modela.

Osim toga, moguće je na temelju izmjerene mehaničke impedancije u dodirnoj točki i brzine vibracija odrediti apsorbiranu snagu vibracija u pojedinim

^I Prvi citat na strani 39.

podstrukturama sustava šaka-ruka prema izrazima:

$$P_{prsti}(\omega) = \frac{1}{2} \cdot \operatorname{Re}[Z_{prsti}(j\omega)] \cdot |v_{ručke}(j\omega)|^2 \quad (2.8)$$

$$P_{dlan}(\omega) = \frac{1}{2} \cdot \operatorname{Re}[Z_{dlan}(j\omega)] \cdot |v_{ručke}(j\omega)|^2 \quad (2.9)$$

gdje je $v_{ručke}$ – brzina vibracija na ručki.

Tada možemo odrediti ukupnu snagu koja se disipira u sustavu šaka-ruka (P_{uk}) prema izrazu:

$$P_{uk}(\omega) = P_{prsti}(\omega) + P_{dlan}(\omega) \quad (2.10).$$

Ako pretpostavimo model s četiri stupnja slobode, kao što je prikazano na slici 2.4, tada možemo vidjeti da je ukupna snaga disipirana u sustavu šaka-ruka ustvari jednaka zbroju disipiranih snaga na pojedinim disipativnim elementima (c_i) u modelu. Na osnovu toga je ukupnu disipiranu snagu moguće napisati kao:

$$P_{uk}(\omega) = \sum_{i=1}^4 P_i(\omega_i) = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^4 c_i \cdot [\Delta v_i(\omega)]^2 \quad (2.11)$$

gdje je P_i – disipirana snaga na i -tom prigušnom elementu modela, v_i – brzina vibracija pojedinog dijela modela sustava šaka-ruka.

Umnoškom ukupne disipirane snage (P_{uk}) ili snage disipirane u pojedinim dijelovima sustava šaka-ruka (P_i) i vremena izloženosti vibracijama (τ) prema izrazu

$$E_k = \tau \cdot \sum_{i=1}^4 P_i(\omega_i) \quad (2.12)$$

možemo dobiti ukupnu energiju koja je disipirana u sustavu šaka-ruka (E_k) tijekom vremena τ i koja može poslužiti kao mjera za uzročno-posljedično povezivanje izloženosti vibracijama i zdravstvenih posljedica.

Na temelju prikazanog modela s četiri stupnja slobode i laboratorijskih mjerenja Dong i dr. (2008.)^I uz pritisnu silu ruke na vibrirajuću ručku od 50 N dobili su parametre modela prikazanih u tablici 2.1.

Mjerenja obavljena u laboratorijskim uvjetima u cilju ispitivanja valjanosti

I Prvi citat na strani 39.

modela s četiri i pet stupnjeva slobode te utvrđivanja ima li opravdane potrebe za odvajanje sustava šake s obzirom na smjer ulaska vibracijske energije na prste i na dlan pokazala su da je takav pristup opravdan.

Tablica 2.1. Parametri modela sustava šaka-ruka s četiri stupnja slobode (Dong i dr., 2008.)^I

Parametar	Vrijednost
m_1 , kg	1,43
m_2 , kg	0,09
m_3 , kg	0,02
m_4 , kg	0,01
k_1 , N/m	3377
k_2 , N/m	12710
k_3 , N/m	29906
k_4 , N/m	190041
c_1 , Ns/m	50,6
c_2 , Ns/m	35,2
c_3 , Ns/m	74,5
c_4 , Ns/m	127,6
f_1 (rezonantna frekvencija), Hz	35
f_2 (rezonantna frekvencija), Hz	257

Mjerenjima je pokazano da se dio vibracijske energije, koja se prenosi s vibrirajuće ručke i apsorbira u svim dijelovima ruke osim u prstima, dobro podudara s vrednovanjem vibracija prema ISO 5349^{II}, dok se na prstima pokazala bolja korelacija s linearno vrednovanim vibracijama, tj. bez vrednovanja, korištenjem čiste efektivne vrijednosti. Iz toga se može zaključiti da vrednovanje vibracija prema ISO 5349 možda i ne može najbolje objasniti uzročno-posljedične veze utjecaja vibracija

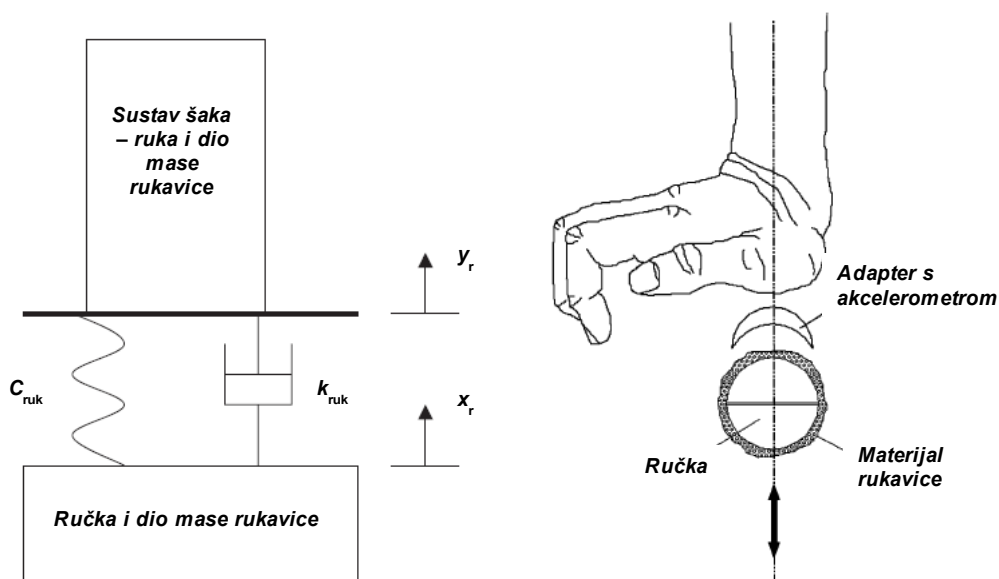
I Prvi citat na strani 39.

II Prvi citat na strani 3.

koje se prenose s alata na pojavu VWF-a, već je možda za to bolje koristiti linearno vrednovanje vibracija.

2.3. DEFINIRANJE SIMULACIJSKOG MODELA SUSTAVA ANTIVIBRACIJSKA RUKAVICA-RUKA

Kao pojednostavljeni model antivibracijske rukavice može se iskoristiti model s jednim stupnjem slobode predložen od strane Dong i dr. (2005.)^I.



Slika 2.5. Pojednostavljeni model s jednim stupnjem slobode kontakta ruke i antivibracijske rukavice (Dong i dr., 2005.)^{II}

Iz predloženog modela, ako se pretpostavi da u promatranom području razina vibracija sustav nije previše nelinearan pa ga se aproksimira linearnim sustavom te ako znamo da je prenosivost vibracija definirana kao omjer ulaznih i izlaznih vibracija u sustav (antivibracijska rukavica), možemo napisati:

I Prvi citat na strani 31.

II Prvi citat na strani 31.

$$T(j\omega) = \frac{F_{ruk}/(j\omega \cdot \dot{x}_r)}{F_r/(j\omega \cdot \dot{x}_r)} = \frac{Z_{ruk}(j\omega)}{Z_r(j\omega)} \quad (2.13)$$

gdje je T – prenosivost vibracija kroz rukavicu, F_{ruk} – sila na kontaktu ruke i rukavice, F_r – sila na ručki bez rukavice, $\dot{x}_r$ – brzina vibracija na ručki.

Ovdje se može vidjeti da je u tom slučaju prenosivost vibracija kroz rukavicu jednaka omjeru mehaničkih impedancija u točki, određenih na kontaktu ruke i rukavice (Z_{ruk}) i na vibrirajućoj ručki bez rukavice (Z_r). Na temelju izraza (2.13) za prenosivost vibracija kroz rukavicu moglo bi se pomoću izraza (2.2) do (2.1) procjenjivati utjecaj prigušnih svojstava rukavica na pojedine dijelove sustava šaka-ruka, i to tako da se određuje mehanička impedancija na prstima i na dlanu sa i bez rukavica te se u kombinaciji s vremenom izloženosti vibracijama određuje energija disipirana u pojedinim dijelovima sustava šaka-ruka kao osnova za uspoređivanje i povezivanje uzročno-posljedičnih veza kod pojave HAVS-a i VWF-a.

3. ANALIZA PRIGUŠNIH MATERIJALA ZA ANTIVIBRACIJSKE RUKAVICE

U tablici 3.1. može se vidjeti usporedba vibracijskih prijenosnih faktora nekih od najpoznatijih prigušnih materijala korištenih u rukavicama ispitanih prema normi HRN EN ISO 10819:2000(E)^I. Osim ISO vrednovanih vibracijskih prijenosnih faktora na temelju kojih se i ocjenjuje prigušna sposobnost rukavica, prikazane su i vrijednosti linearnih (nevrednovanih) vrijednosti vibracijskih prijenosnih faktora. Linearne vrijednosti vibracijskih prijenosnih faktora bolje prikazuju prigušna svojstva samog materijala, pogotovo u području srednjih i viših frekvencija koje su kod vrednovanih vrijednosti znatno manjeg utjecaja sukladno filterima za vrednovanje prema HRN EN ISO 5349:2001(E)^{II}.

Iz podataka se može vidjeti da zahtjeve norme kako bi se rukavice svrstale u antivibracijske ($TR_M < 1$ i $TR_H < 0,6$) zadovoljavaju samo AntiVib™ rukavice s prigušnim materijalom u obliku zračnog jastuka između ruke i ručke stroja. Međutim, nigdje u podacima nije navedeno s kojim debljinama prigušnih materijala u rukavicama su provođena mjerenja.

Da bi rukavice bile efikasne u smanjivanju mogućnosti pojave HAVS-a, osim dobrih prigušnih svojstava, trebaju zadovoljiti i neke osnovne ergonomske zahtjeve koji mogu znatno utjecati na veličine koje imaju utjecaj na veći ili manji prijenos vibracija na ruke.

Tako i američki NIOSH, kao neobvezujuću preporuku u svojoj publikaciji br. 89-106^{III}, navodi da prigušni materijal u antivibracijskim rukavicama, osim što mora imati zadovoljavajuća prigušna svojstva u čitavom frekvencijskom spektru bitnom za utjecaj vibracija koje se prenose na sustav šaka-ruka, odnosno mora zadovoljiti zahtjeve ISO norme 10819, mora imati i dovoljno malu debljinu kako ne bi utjecao na manipulativnu sposobnost, a time i na siguran i efikasan rad s alatom.

I Prvi citat na strani 17.

II Prvi citat na strani 3.

III National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) (1989): Occupational Exposure to Hand-Arm Vibration. DHHS (NIOSH) Publication No. 89-106.

Tablica 3.1. Usporedba vibracijskih prijenosnih faktora određenih prema normi HRN EN ISO 1089:1996(E) za neke od najpoznatijih prigušnih materijala koji se koriste u rukavicama koje se često klasificiraju kao antivibracijske (Izvor: <http://www.2protect.com/>, Impacto™ Protective Products Inc.)

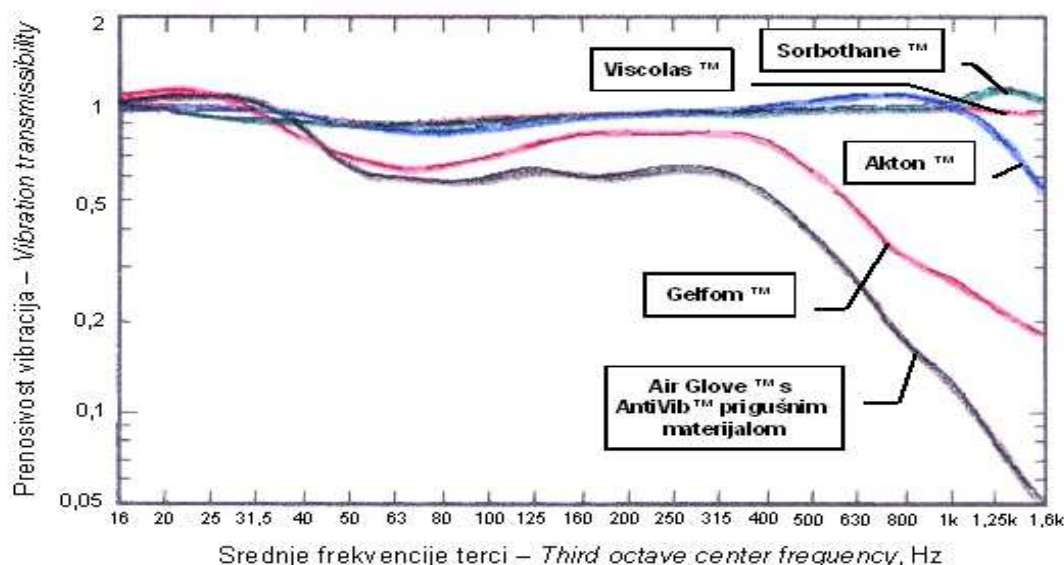
Prigušni materijal rukavice		ISO vrednovani vibracijski prijenosni faktor	Vibracijski prijenosni faktor
AntiVib™	TR _M	0,78	0,60
	TR _H	0,51	0,30
Gelfom™	TR _M	0,79	0,76
	TR _H	0,76	0,50
Viscolas™	TR _M	0,92	0,93
	TR _H	1,00	0,97
Akton™	TR _M	0,92	0,92
	TR _H	1,00	0,89
Sorbothane™	TR _M	0,95	0,96
	TR _H	0,99	1,00

Prema Reynoldsu i Jetzeru (1998.)^I, na ergonomiju bitno utječu položaj ruke s obzirom na alat, pritisna sila na ručku, posmična sila, osjet prihvata ručke i temperatura ruke. Antivibracijske rukavice stoga moraju zadovoljiti neke osnovne zahtjeve i u tom pogledu kako bi se povećala njihova efikasnost u smanjenju vibracija koje se prenose na ruku te kako bi istovremeno bile ugodne za nošenje. Pet osnovnih ergonomske zahtjeva uključuju sljedeće:

- debljina prigušnog materijala u rukavici mora biti relativno mala (u području prstiju manja od 4,5 mm, a u području dlana manja od 6,5 mm)
- prigušni materijal (kao i materijal rukavice) bi trebao biti dovoljno savitljiv tako da što manje utječe na osjet dodira i da se što lakše savija po karakterističnim linijama savijanja prstiju i dlana

I Reynolds, D. D.; Jetzer, T. 1998: Use of Air Bladder Technology to Solve Hand Tool Vibration Problems. Proceedings of the 8th International Conference on Hand-Arm Vibration, Umea, Sweden.

- prigušni materijal u rukavici mora prekrivati područje čitavog dlana i svih prstiju, odnosno sva područja u kojima je moguć kontakt ruke i ručke stroja te direktno prenošenje vibracijske energije
- antivibracijska rukavica bi trebala imati izrađen palac rukavice savitljiv prema natrag jer kod takve izvedbe prigušni materijal u rukavici uvijek ostaje pravilno pozicioniran između palca i ručke stroja, a ne zakreće se kao što je slučaj kod drugih izvedbi i time palac direktno izlaže vibracijama
- antivibracijske rukavice bi trebale biti dovoljno udobne za nošenje (malo veće od običnih rukavica) jer, u suprotnom, korištenjem prigušnog materijala mogu kod korisnika izazvati osjećaj nelagode pri nošenju.



Slika 3.1. Ovisnost prenosivosti vibracija na dlan ruke o srednjim frekvencijama terci za neke od najznačajnijih prigušnih materijala koji se koriste u rukavicama (rezultati dobiveni na temelju mjerenja prema preporukama norme ISO 10819)^I

I Prvi citat na strani 17.

4. MATERIJAL I METODE

Mjerenja vibracija koje se prenose na sustav šaka-ruka rukovatelja provođena su na motornoj pili lančanici STIHL MS 650, serijski broj: 166482605. Mjerene su vibracije koje se prenose sa stražnje ručke. Mjerenja su provođena samo na stražnjoj ručki jer se pokazalo da su vibracije koje se prenose na ruku tijekom rada veće na stražnjoj ručki nego na prednjoj. Motorna pila lančanica je prije mjerenja odgovarajuće pripremljena (zagrijana, lanac naoštren...), u skladu s postupkom propisanim normom ISO 7505^I.

Mjerenja su provedena u skladu s preporukama norme HRN EN ISO 5349-2001: *Mechanical vibration – measurement and evaluation of human exposure to hand-transmitted vibration*^{II} i ISO 7505-1986 (E): *Forestry machinery – Chain saws – Measurement of hand-transmitted vibration*^{III}. To je podrazumijevalo da se mjerenja provode pri karakterističnim uvjetima rada, što znači pri najmanjem broju okretaja motora – PH, najvećem broju okretaja – PG i pri rezanju (nazivnom opterećenju motora) – Rez. Kod rezanja je korištena prizma bukovine (*Fagus sylvatica* L.).

Tijekom mjerenja prema ISO 7505 bitno je da rukovatelj bude u odgovarajućem položaju s motornom pilom lančanicom dok ona radi te da rukama ne dodiruje tijelo. Zato je prije mjerenja potrebno obučiti rukovatelja pravilnom postupanju tijekom mjerenja ili raditi s već obučanim rukovateljem. Pravilan položaj tijekom mjerenja prikazan je na slici 4.1.

Prema preporukama HRN EN ISO 5349:2001(E), akcelerometar bi tijekom mjerenja u idealnom slučaju trebao biti postavljen oko sredine prihvatnog područja ruke na ručku stroja jer se pretpostavlja da se mjerenjem u tom području dobiva najreprezentativnija karakteristika vibracijskog signala, odnosno vibracija koje se prenose na šaku. Kako bi se mjerenja mogla izvesti u toj zoni (između ruke i ručke stroja), potrebno je koristiti neki od oblika adaptera s akcelerometrom koji dobro

I Prvi citat na strani 10.

II HRN EN ISO 5349-1:2001(E): *Mechanical vibration – Measurement and evaluation of human exposure to hand-transmitted vibration – Part 2: Practical guidance for measurement at the workplace.*

III Prvi citat na strani 10.

pristaje ispod ruke ili između prstiju.

Ukoliko se na ručkama na kojima se mjere vibracije nalaze materijali koji mogu imati prigušna svojstva (na ručkama motornih pila lančanica redovito se nalazi gumena obloga za poboljšanje prihvatne sile i olakšanje manipulacijom pri radu), preporučljivo je korištenje adaptera, a ne krutog pričvršćivanja akcelometra za ručku kako bi se mjerenja mogla izvršiti pri radu s karakterističnom pritisnom silom. Takav način mjerenja može biti znatno teži s obzirom na mjerenja kada je akcelometar kruto vezan na ručku stroja, ali u tim slučajevima može biti znatno bolji indikator stvarne izloženosti vibracijama. Poznato je da se impedancija dlana i prstiju na koje se prenose vibracije, kao i prigušna svojstva materijala, znatno mijenjaju u ovisnosti o pritisnoj sili.



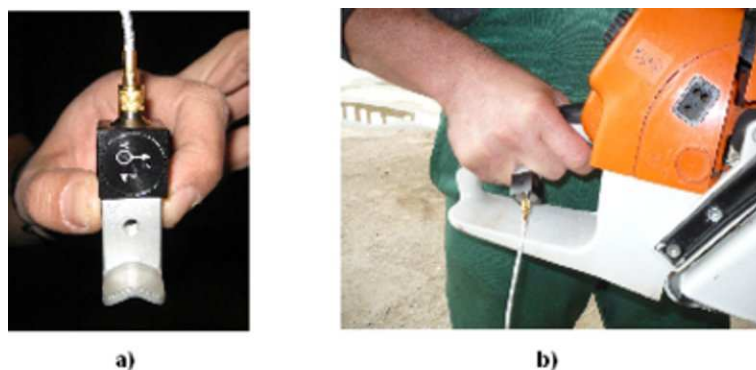
Slika 4.1. Položaj rukovatelja motornom pilom lančanicom pri mjerenju vibracija koje se prenose s ručke pile na sustav šaka-ruka prema preporukama ISO 7505-1986 (E): *Forestry machinery – Chain saws – Measurement of hand-transmitted vibration*^I

S obzirom na postavljene zahtjeve, akcelometar je pričvršćen na aluminijski nosač (slika 4.2.a) za koji se ispostavilo da ima zadovoljavajuća prihvatna svojstva za rukovatelja tijekom mjerenja te je kao takav držan između ruke i ručke motorne pile lančanice kako je to prikazano na slici 4.2.b. Rukovatelj je tijekom mjerenja održavao približno istu pritisnu silu (što sličniju onoj u stvarnom radu) kako bi se

I Prvi citat na strani 10.

smanjio utjecaj promjene pritisne sile na ručki motorne pile lančanicice na mjernu nesigurnost konačnog rezultata. Taj zahtjev je od izuzetnog značaja jer se pokazalo da utjecaj rukovatelja, pogotovo onih s manje iskustva u radu i mjerenjima, može znatno utjecati na rezultate ovakvih mjerenja. Stoga je i odabran rukovatelj s višegodišnjim iskustvom u radu i suradnji na mjerenjima sličnog karaktera.

Mjerenja vibracija su provođena istovremeno u sve tri osi koje su bile postavljene sukladno biodinamičkom koordinatnom sustavu preporučenom u HRN EN ISO 5349-2001 (slika 1.5.).



Slika 4.2. Položaj troosnog akcelometra pripremljenog za mjerenje: a) akcelometar pričvršćen na aluminijski nosač i b) prihvata nosača i akcelometra tijekom mjerenja

4.1. IZBOR ANTIVIBRACIJSKIH RUKAVICA ZA ISPITIVANJA

Za provedena ispitivanja izabrane su rukavice koje se na hrvatskom tržištu na natječajima mogu dobiti kao “antivibracijske”. Kako bi se ujedno provjerila njihova sposobnost prigušenja vibracija pri radu s motornim pilama lančanicama, uzete su rukavice koje kao prigušni materijal koriste neki od već navedenih i isprobanih prigušnih materijala (Viscolas, Gelfom, Sorbothane...), a pogotovo one koje su prošle ispitivanja prema HRN EN ISO 10819:2000(E) te se kao takve prema svim zahtjevima svrstavaju u antivibracijske rukavice.

Nakon izvršenog odabira i pregledavanja rukavica, sve rukavice su pažljivo rasparane u području prstiju između prigušnog materijala i ostatka rukavice kako bi se za potrebe mjerenja adapter s akcelometrom mogao postaviti na dodirnu površinu između prstiju i prigušnog materijala (slika 4.3.).

Tablica 4.1. Prikaz i kratki opis rukavica (s pripadajućim oznakama koje su rabljene u analizi podataka) koje su korištene za ispitivanja prigušnih svojstava antivibracijskih rukavica pri radu s motornim pilama lančanicama

Oznaka rukavice	Slika	Napomene
RUK#1		Kožne zaštitne rukavice koje su na dlanu i prstima imale dodatni zaštitni materijal, ali nisu imale nikakvu popratnu dokumentaciju o prigušnim svojstvima materijala koji bi trebao služiti kao zaštita od vibracija.
RUK#2		Zaštitne rukavice koje su na dlanu i prstima imale dodatni zaštitni materijal, ali nisu imale nikakvu popratnu dokumentaciju o prigušnim svojstvima materijala koji bi trebao služiti kao zaštita od vibracija.
RUK#3		Kožne zaštitne rukavice koje su na dlanu i prstima imale dodatni zaštitni materijal, ali nisu imale nikakvu popratnu dokumentaciju o prigušnim svojstvima materijala koji bi trebao služiti kao zaštita od vibracija.
RUK#4		Zaštitne rukavice koje su na dlanu i prstima imale dodatni zaštitni materijal, ali nisu imale nikakvu popratnu dokumentaciju o prigušnim svojstvima materijala koji bi trebao služiti kao zaštita od vibracija.
RUK#5		Zaštitne rukavice koje su na dlanu i prstima imale dodatni zaštitni materijal, ali nisu imale nikakvu popratnu dokumentaciju o prigušnim svojstvima materijala koji bi trebao služiti kao zaštita od vibracija.
RUK#6		Zaštitne rukavice koje su na dlanu i prstima imale dodatni zaštitni materijal, ali nisu imale nikakvu popratnu dokumentaciju o prigušnim svojstvima materijala koji bi trebao služiti kao zaštita od vibracija.
RUK#7		Zaštitne rukavice koje su na dlanu i prstima imale dodatni zaštitni materijal, ali nisu imale nikakvu popratnu dokumentaciju o prigušnim svojstvima materijala koji bi trebao služiti kao zaštita od vibracija.

RUK#8		Zaštitne rukavice koje su na području dlana i prstiju imale materijal za prigušenje vibracija pod trgovačkim nazivom Nu ² O ₂ ®. Prigušni materijal je ispitan prema HRN EN ISO 10819:2000(E) te je zadovoljio zahtjeve norme.
RUK#9		Uložak za zaštitne rukavice koji je na području dlana i prstiju imao materijal za prigušenje vibracija pod trgovačkim nazivom Nu ² O ₂ ®. Prigušni materijal je ispitan prema HRN EN ISO 10819:2000(E) te je zadovoljio zahtjeve norme.
RUK#10		Uložak za zaštitne rukavice koji je na području dlana i prstiju imao materijal za prigušenje vibracija pod trgovačkim nazivom Sorbothane™. Prigušni materijal je ispitan prema HRN EN ISO 10819:2000(E) te je zadovoljio zahtjeve norme (tablica 3.1.).
RUK#11		Zaštitne rukavice koje su na području dlana i prstiju imale materijal za prigušenje vibracija pod trgovačkim nazivom AntiVib™. Prigušni materijal je ispitan prema HRN EN ISO 10819:2000(E) te je zadovoljio zahtjeve norme (tablica 3.1.).
RUK#12		Zaštitne rukavice koje su na području dlana i prstiju imale materijal za prigušenje vibracija pod trgovačkim nazivom AntiVib™. Prigušni materijal je ispitan prema HRN EN ISO 10819:2000(E) te je zadovoljio zahtjeve norme (tablica 3.1.).

Osim mjerne točke na ručki motorne pile lančanice, koja je označena kao MT1, mjerenja su pri istim režimima rada izvršena i na površini ruke kod druge metakarpalne kosti (MT2), na zglobu ruke (MT3) i na laktu (MT4), i to pri radu bez i s rukavicama. Kako bi mjerenja na tim mjernim točkama bilo moguće izvesti, napravljen je poseban aluminijski držač na koji je montiran akcelerometar i koji je pomoću trake čvrsto pritisnut na mjernu površinu. Držač s akcelerometrom je pritisnut najvećom silom koja je bila podnošljiva rukovatelju kao ugodna za duži rad tijekom mjerenja, a opet dovoljna da se dobije što bolji signal vibracija koje prolaze kroz ruku.



Slika 4.3. Prihvat nosača i akcelerometra za potrebe mjerenja prigušnih svojstava rukavica gdje je nosač akcelerometra smješten između prigušnog materijala i prstiju



Slika 4.4. Pričvršćivanje nosača i akcelerometra na površinu ruke

Način pričvršćivanja i položaj rukovatelja tijekom mjerenja prikazan je na slici 4.5. Kao što je već navedeno, od izuzetnog značaja za reprezentativnost rezultata mjerenja bitno je da rukovatelj tijekom svih mjerenja održava odgovarajući položaj ruku i motorne pile lančanice s obzirom na tijelo te da tijekom svih režima mjerenja održava pritisnu silu na ručku što sličniju onoj u stvarnim uvjetima rada. Stoga su mjerenja uvijek zaustavljana i rukovatelj je uzimao odmor kad god je osjetio umor te kad je procijenio da više nema odgovarajući osjet kako bi zadržavao potrebnu pritisnu silu.

Za režime rada pri najmanjem i najvećem broju okretaja motora uzimani su reprezentativni uzorci vibracija u trajanju od 10 sekundi, i to po tri uzorka za svaki režim, osim za rezanje gdje je uziman po jedan uzorak od 10 sekundi jer je, zbog ograničenja s obzirom na raspoloživu sirovinu, uglavnom bilo praktički neizvedivo uzimati više uzoraka tijekom rezanja. Stoga su pri tom režimu bila očekivana i nešto

veća rasipanja rezultata. Na isti način su provođena mjerenja na svim mjernim točkama (MT1, MT2, MT3 i MT4), i to pri radu sa i bez rukavica.



a)



b)



c)



Slika 4.5. Prikaz načina pričvršćivanja akcelometra i aluminijskog nosača pomoću trake na mjerne točke: a) na ruci - MT2, b) na zglobu ruke - MT3 i c) na laktu - MT4

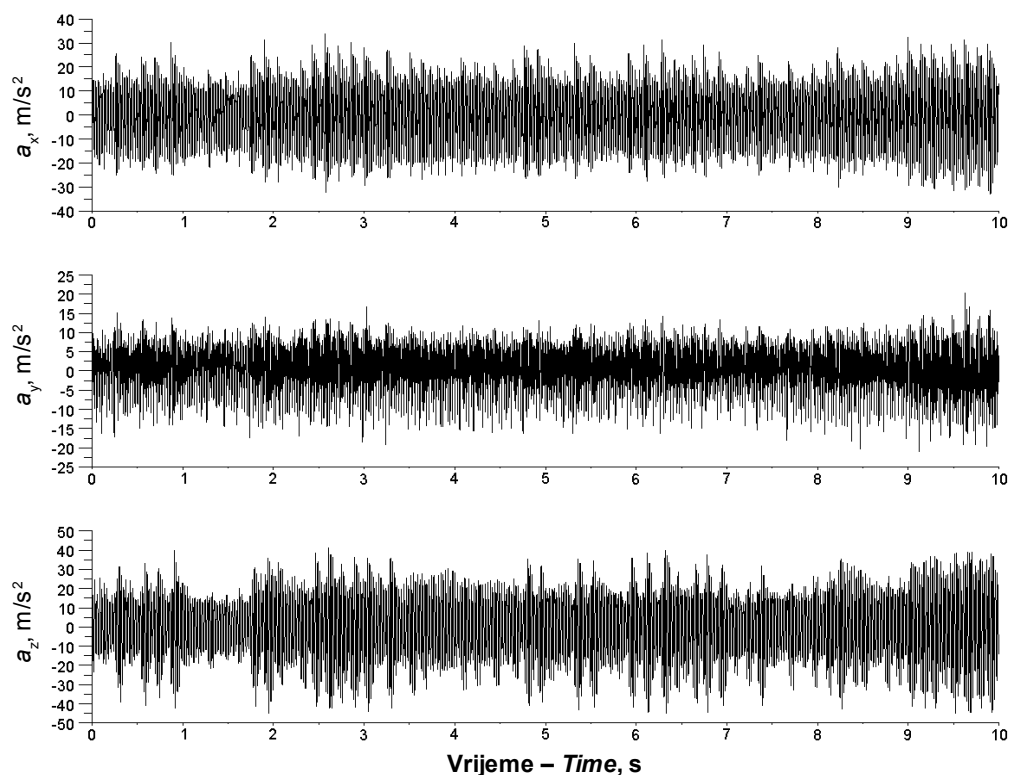
4.2. MJERNI LANAC I OBRADA REZULTATA MJERENJA

Za mjerenja je korišten mjerni lanac koji se sastojao od troosnih akcelometara proizvođača KISTLER. Za mjerenje vibracija koje se prenose direktno na prste (MT1) korišten je troosni akcelometar tip 8762A50, SN: 2042134, mjernog područja ± 50 g i osjetljivosti 100 mV/g. Za mjerenja na ostale tri mjerne točke na ruci korišten je akcelometar tip 8762A10, SN: 2042134, mjernog područja ± 10 g i osjetljivosti 500 mV/g. Za predobradu (osiguravanje izvora konstantne struje za akcelometre i filtriranje pomoću niskopropusnog filtra, tzv. *anti-aliasing* filtra čija je gornja granična frekvencija automatski podešena s obzirom na odabranu frekvenciju uzorkovanja) i prikupljanje mjernih podataka korišten je sustav za predobradu, pojačanje i digitalizaciju proizvođača National Instruments™, tip NI USB 9233, SN: 123101. Isti je i namijenjen mjerenju buke i vibracija pomoću tzv. IEPE pretvarača te prijenosnog računala Toshiba TECRA s NI LabVIEW™ softverom. Za ovo mjerno pojačalo je bitno naglasiti da ima istovremeno uzorkovanje na svim kanalima, što je bitno za kasnije provedenu obradu signala. Kod mjerenja vibracija koje se prenose na ruke frekvencija uzorkovanja (F_s) iznosila je 10 kHz. Ta frekvencija je odabrana jer sigurno udovoljava zahtjevu da frekvencija uzorkovanja mora biti minimalno 2 do 2,5 puta veća od najviše frekvencije signala koji se mjeri i koji je od interesa, tzv. Nyquistova frekvencija. Kod mjerenja vibracija koje se prenose na ruke to je 1,25 kHz. Prema preporukama National Instrumentsa™^I, ukoliko se želi dobiti i kvalitetna rekonstrukcija vremenskog signala, a ne samo provesti frekvencijska analiza, frekvencija uzorkovanja bi trebala biti oko 10 puta veća od najviše frekvencijske komponente signala koji se promatra.

Prije svakog mjerenja provedena je kalibracija čitavog mjernog lanca, i to za svaku os posebno pomoću kalibratora proizvođača B&K, tip 4291, SN: 775742.

Tijekom mjerenja za svaki uzorak koji je rađen provjeravano je je li vremenski signal približno konstantan, što znači da nema udara ili istosmjernih pomaka u signalu koji mogu znatno utjecati na rezultate mjerenja. Ukoliko je došlo do nekih odstupanja, mjerenje je ponovljeno. Tipičan oblik mjernog signala za sva tri kanala tijekom jednog uzorka prikazan je na slici 4.6.

I **** 2000: LabVIEW – Measurements Manual. National Instruments, Texas, USA.



Slika 4.6. Prikaz vremenskog signala za sva tri kanala vibracija kod jednog uzorka koji je tipičan za mjerenje vibracija na motornoj pili lančanici pri najmanjem broju okretaja motora

Kako bi se odmah tijekom mjerenja mogle kontrolirati dobivene vrijednosti vrednovanih razina ubrzanja (s ciljem provjere ispravnosti mjerenja) u svim osima (a_{hwx} , a_{hwy} i a_{hwz}) te odmah provjeravati kolika je približna vrijednost ukupne vrednovane razine vibracija (a_{hv}) za pojedini uzorak, konstruiran je digitalni filter za vrednovanje vremenskog signala vibracija koji je, uključen u softver LabVIEW, korišten za prikupljanje i početnu obradu rezultata.

4.2.1. Postupak izrade digitalnog filtra za vrednovanje vibracija koje se prenose s alata na ruke

Digitalni filter je napravljen prema specifikacijama koje su dane u HRN EN ISO 5349-1:2001(E): *Mechanical vibration – Measurement and evaluation of human exposure to hand-transmitted vibration*. Sam filter razrađen je u programskom paketu MATLAB™.

U specifikacijama je filter za vrednovanje dan preko dvije prijenosne funkcije od kojih jedna opisuje dinamičke karakteristike niskopropusnog filtra $H_b(s)$ koji ima

zadaću prigušenja svih viših frekvencija koje nemaju dokazan utjecaj na udobnost ili zdravlje rukovatelja, dok druga prijenosna funkcija $H_w(s)$ opisuje dinamička svojstva filtra za vrednovanje vibracija.

Iz parametara danih u normi dobivene su sljedeće prijenosne funkcije:

$$H_b(s) = \frac{6.257 \cdot 10^7 \cdot s^2}{s^4 + 1,12 \cdot 10^4 \cdot s^3 + 6,319 \cdot 10^7 \cdot s^2 + 3,511 \cdot 10^9 \cdot s + 9,835 \cdot 10^{10}} \quad (4.1)$$

$$H_w(s) = \frac{1591 \cdot s + 1,591 \cdot 10^5}{15,91 \cdot s^2 + 2487 \cdot s + 1,591 \cdot 10^5} \quad (4.2).$$

Norma nadalje definira ukupnu prijenosnu funkciju za vrednovanje vibracija kao umnožak $H_{bw}(s) = H_b(s) \cdot H_w(s)$ te je nakon množenja dobivena sljedeća prijenosna funkcija:

$$H_{bw}(s) = \frac{9,957 \cdot 10^{10} \cdot s^3 + 9,957 \cdot 10^{12} \cdot s^2}{15,91 \cdot s^6 + 1,807 \cdot 10^5 \cdot s^5 + 1,034 \cdot 10^9 \cdot s^4 + 2,148 \cdot 10^{11} \cdot s^3 + \dots} \quad (4.3).$$

$$\frac{2,035 \cdot 10^{13} \cdot s^2 + 8,033 \cdot 10^{14} \cdot s + 1,565 \cdot 10^{16}}{}$$

Kako bi se provjerila ispravnost dobivene prijenosne funkcije, nacrtan je Bodeov dijagram (slika 4.7.) koji se dobro slaže s prijenosnom funkcijom filtra za vrednovanje prikazanim u normi.

Kako bi se konstruirao digitalni filter istih karakteristika kao i analogni filter prijenosne funkcije $H_{bw}(s)$, prvo je potrebno prebaciti analognu prijenosnu funkciju u *zero-pole-gain* oblik, gdje je dinamička karakteristika definirana karakterističnim polovima (P), nulama (Z) i pojačanjem (K) prijenosne funkcije.

To je napravljeno pomoću sljedećih naredbi:

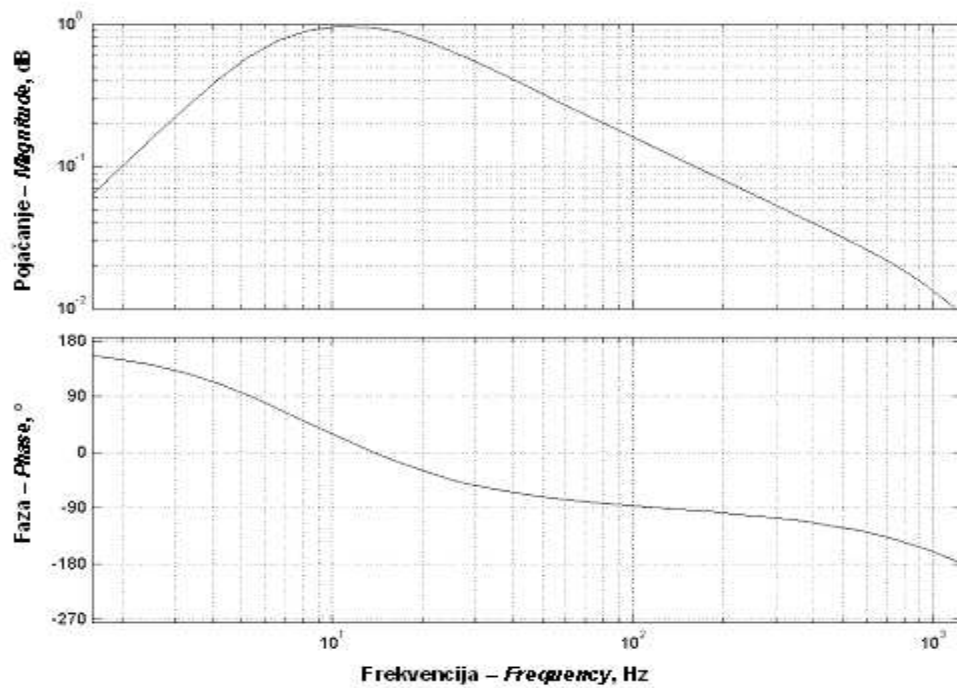
→ **Hbwzpk = zpk(Hbw)**

→ Zero/pole/gain:

6256458335.2843 s^2 (s+100)

(s^2 + 55.84s + 1572) (s^2 + 156.2s + 9999) (s^2 + 1.114e004s + 6.257e007)

Za potrebe daljnjih izračuna izdvojeni su podaci za Z , P , K , i to u obliku vektor retka (funkcija 'v').



Slika 4.7. Bodeov dijagram prijenosne funkcije filtra za vrednovanje vibracija koje se prenose na ruke ($H_{bw}/s/$)

```
→ [Z,P,K] = ZPKDATA(Hbwzpk,'v')
```

```
→ Z =
```

```
0
```

```
0
```

```
-99.9969
```

```
P =
```

```
1.0e+003 *
```

```
-5.5704 + 5.6158i
```

```
-5.5704 - 5.6158i
```

```
-0.0781 + 0.0624i
```

```
-0.0781 - 0.0624i
```

$$-0.0279 + 0.0281i$$

$$-0.0279 - 0.0281i$$

$$K =$$

$$6.2565e+009$$

Nakon toga napravljen je diskretni *ZPK* model iz analognog *ZPK* modela, pri čemu je korištena frekvencija uzorkovanja $F_s = 10$ kHz koja odgovara frekvenciji uzorkovanja korištenoj za sva mjerenja, u njen odgovarajući digitalni oblik.

$$\rightarrow [Z_d, P_d, K_d] = \text{BILINEAR}(Z, P, K, 10000)$$

$$\rightarrow Z_d =$$

$$1.0000$$

$$1.0000$$

$$0.9759$$

$$-1.0000$$

$$-1.0000$$

$$-1.0000$$

$$P_d =$$

$$0.0206 + 0.4164i$$

$$0.0206 - 0.4164i$$

$$0.9810 + 0.0150i$$

$$0.9810 - 0.0150i$$

$$0.9932 + 0.0068i$$

$$0.9932 - 0.0068i$$

$$K_d =$$

$$0.0034 - 0.0000i$$

Na temelju tih podataka izračunati su potrebni koeficijenti filtra (*aa*, *bb*) koji se onda mogu koristiti u sklopu naredbe **filter** za filtriranje ulaznih signala. Koeficijenti su dobiveni interpolacijom koja karakteristične korijene prebacuje u polinom.

```

→ bb = Kd*poly(Zd)

→ bb =

Columns 1 through 5
    0.0034 - 0.0000i    0.0001 - 0.0000i   -0.0101 + 0.0000i
-0.0002 + 0.0000i    0.0101 - 0.0000i

Columns 6 through 7
    0.0001 - 0.0000i   -0.0033 + 0.0000i

→ aa = poly(Pd)

→ aa = 1.0000    -3.9895    6.1825    -4.7743    2.1241
-0.7079    0.1651

```

Radi provjere ispravnosti koeficijenata digitalnog filtera za vrednovanje vibracija konstruirana je njegova prijenosna funkcija.

```

→ f=[1:0.5:1250]; %definiranje frekventnog područja od
interesa

→ H=freqz(bb,aa,f,10000);

→ s.plot = 'mag';

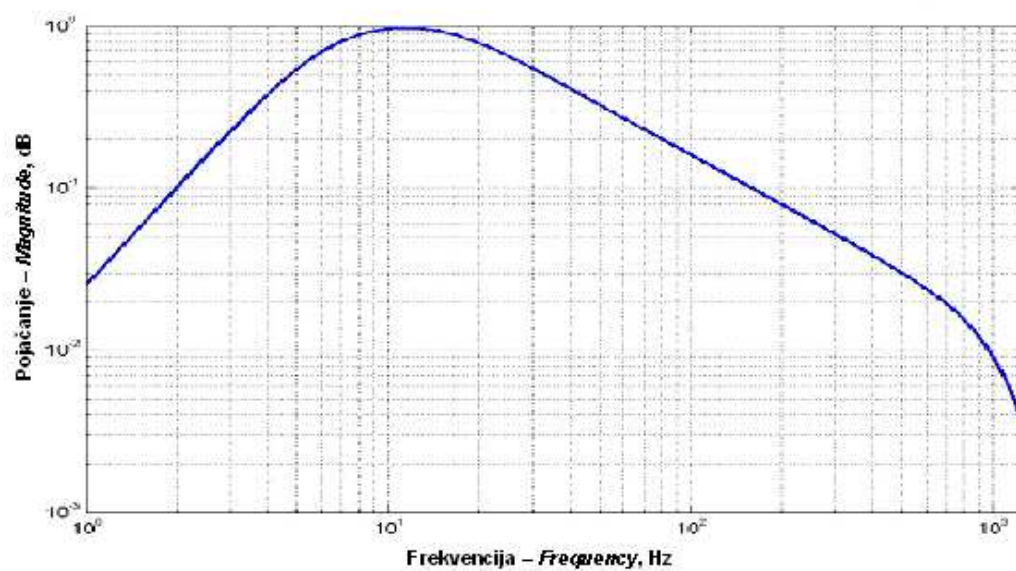
→ s.xunits = 'Hz';

→ s.yunits = 'linear';

→ freqzplot(H,f,s);

```

Dobivena prijenosna funkcija (slika 4.8.) izvrsno se poklapa s prijenosnom funkcijom dobivenom pomoću Bodeova dijagrama, koji proizlazi iz prijenosne funkcije analognog filtra $H_{bw}(s)$, i prijenosnom funkcijom prikazanom u normi. Radi dodatne provjere filter je isprobavan na kalibracijskim signalima i nekim ispitnim signalima koji su vrednovani preko vrednovanja pojedinih terci, kako je već prije opisano, te je pokazao zadovoljavajuće podudaranje vrijednosti. Prednost ovakvog filtera i takvog načina obrade signala vibracija je u znatno boljoj mogućnosti kontrole signala i naprednijih analiza vrednovanog signala.



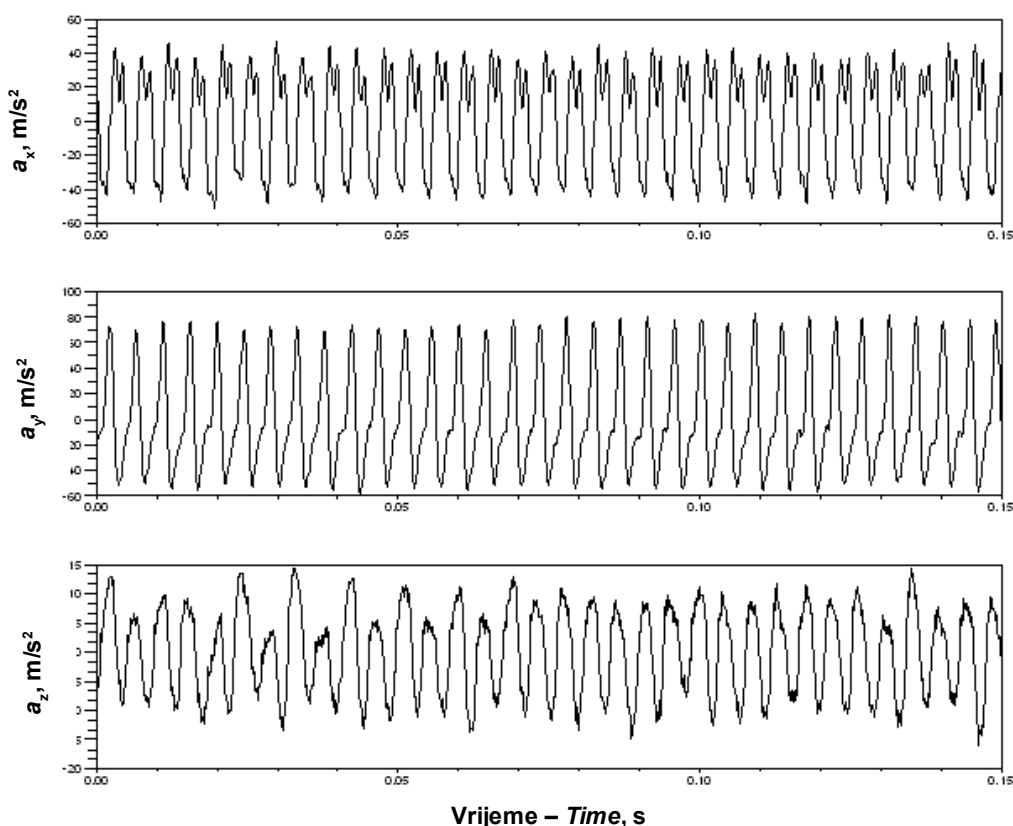
Slika 4.8. Prijenosna funkcija konstruiranog digitalnog filtra za vrednovanje vibracija koje se prenose na ruke prema HRN EN ISO 5349-1^I

I Prvi citat na strani 3.

5. REZULTATI ISTRAŽIVANJA I DISKUSIJA

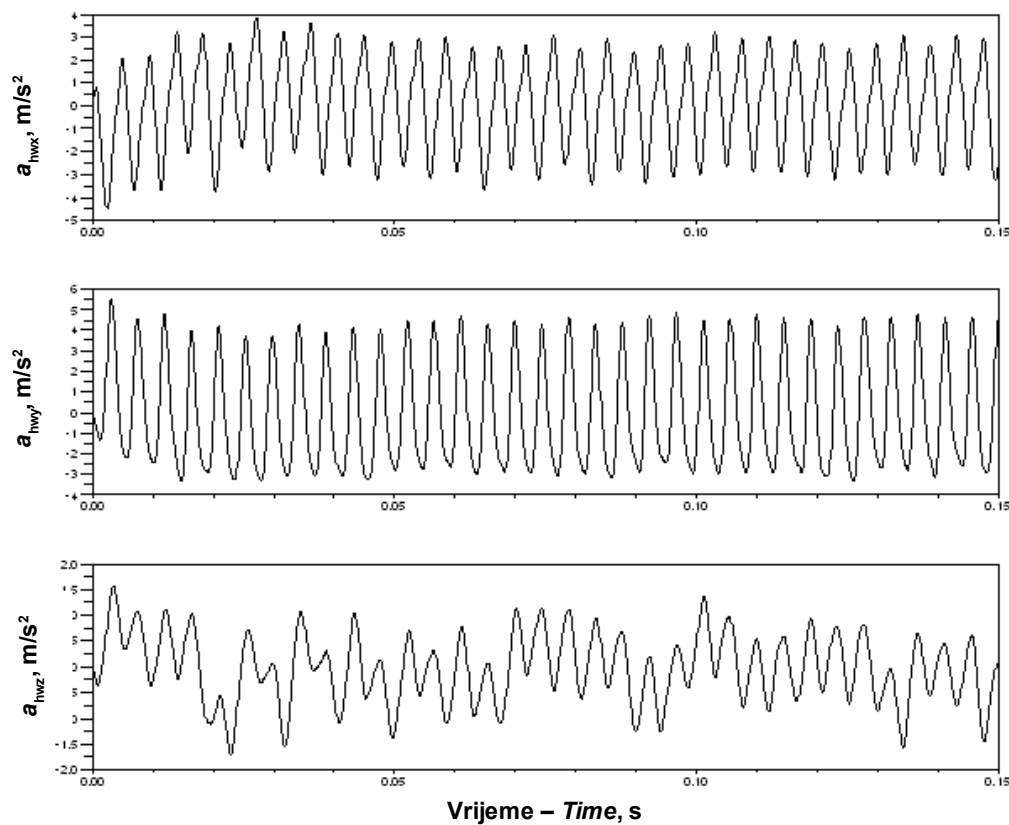
5.1. REZULTATI ANALIZE VREMENSKIH SIGNALA

Prvo su za sva mjerenja bez i s rukavicama provjeravani vremenski signali i njihovi vrednovani ekvivalenti. Ukoliko se naknadno, nakon mjerenja, uočila neka nepravilnost u mjernom signalu, taj dio signala je, ukoliko je to bilo moguće, izdvojen iz analize. Tipičan oblik signala tijekom mjerenja prikazan je na slikama 5.1. i 5.2. (prikazani su uzorci za isto mjerenje i u istom vremenskom intervalu).



Slika 5.1. Prikaz tipičnog mjernog signala nevrednovanih vibracija na ručki motorne pile lančanice u sve tri osi pri najvećem broju okretaja motora

Na slikama se jasno može uočiti razlika između nevrednovanih i vrednovanih razina vibracija u sve tri osi. Zbog utjecaja promjene položaja ruke i akcelerometra tijekom mjerenja za sva mjerenja izračunavan je vektorski zbroj razina vibracija u sve tri osi kako je to već prije opisano i kako preporučuje norma HRN EN ISO 5349-1 (slika 5.3.).

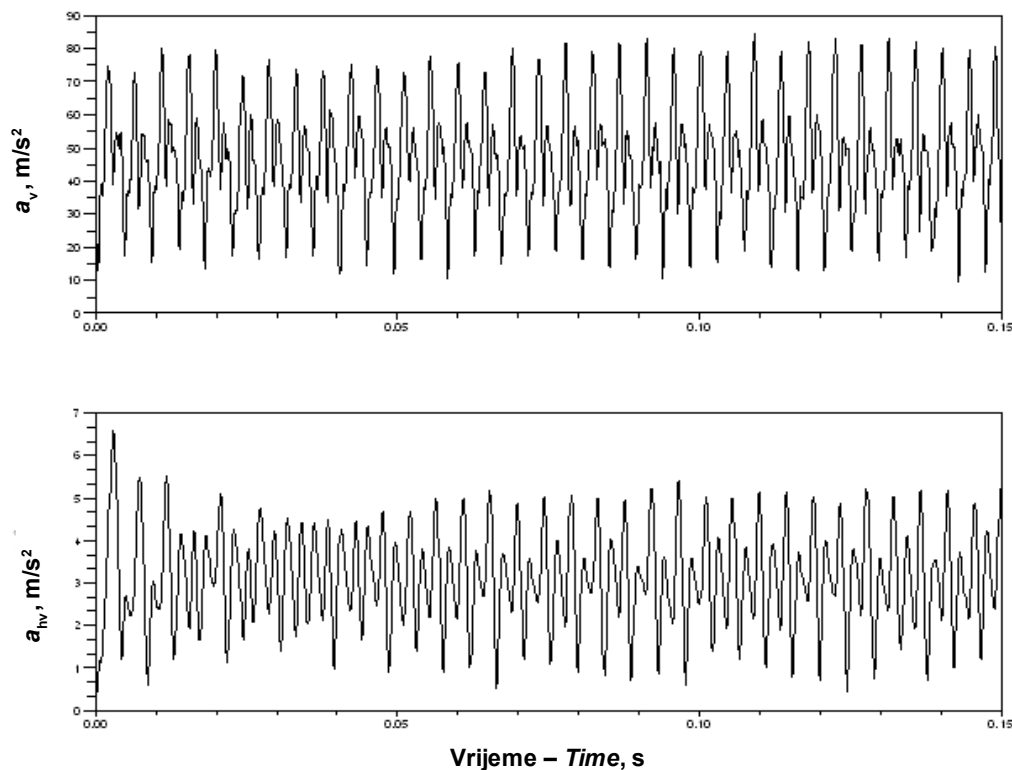


Slika 5.2. Prikaz tipičnog oblika vremenskog signala vrednovanih razina vibracija u sve tri osi tijekom rada motorne pile lančanice pri najvećem broju okretaja motora

Za tako izračunate uzorke pri svim režimima rada, u sve četiri mjerne točke i pri radu bez i s rukavicama, izračunate su efektivne vrijednosti vrednovanih i nevrednovanih razina ubrzanja. Ujedno je za svaki uzorak izračunata i standardna devijacija uzorka kako bi se i kvantitativno provjerilo da nema većih varijacija unutar i između pojedinih uzoraka koje bi mogle upućivati na grešku u mjerenju.

Zbog velike količine podataka koje je trebalo obraditi i mogućnosti vezanih uz vizualizaciju i daljnju obradu korišten je programski paket R.

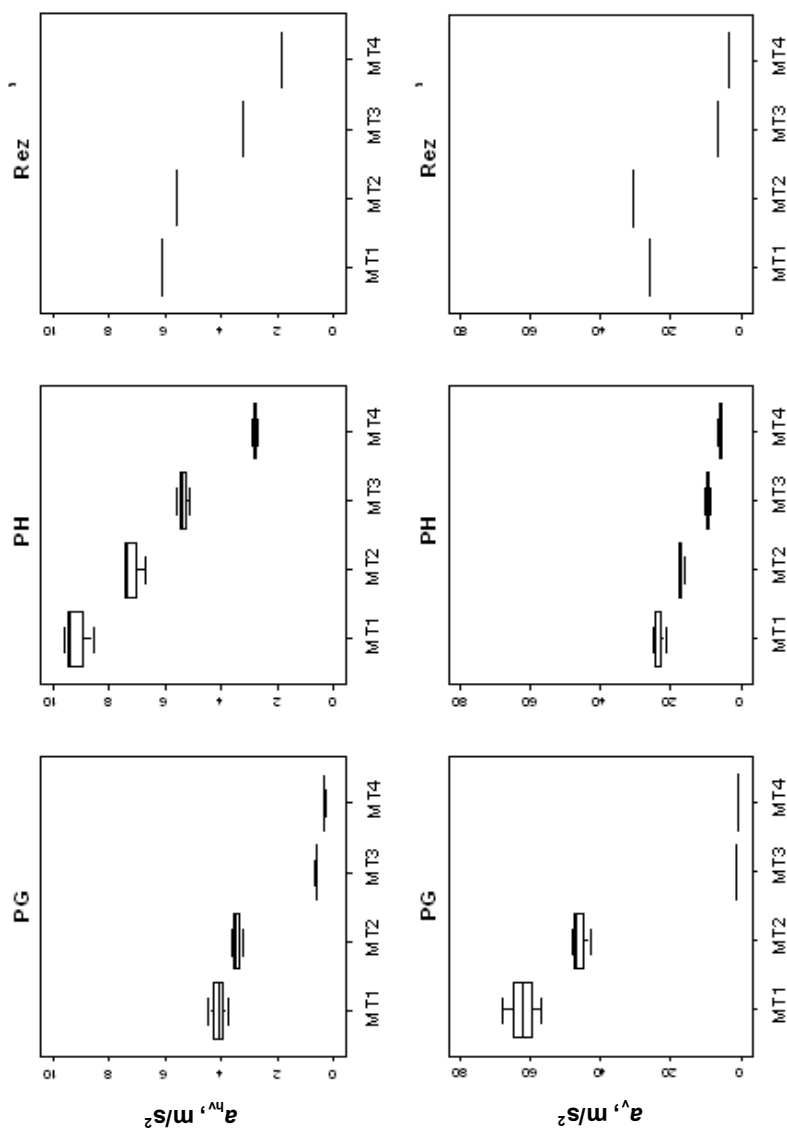
Kako bi se vizualno usporedila prigušenja pojedinih rukavica i prigušenje vibracija koje prolaze kroz ruku, od prstiju do zgloba, za sva mjerenja su napravljeni *box-plot* dijagrami. Iz grafova na slici 5.5. jasno se može vidjeti da su ukupne vrednovane razine ubrzanja (a_{hv}) najviše pri najmanjem broju okretaja motora, a znatno manje pri najvećem broju okretaja motora i rezanju.



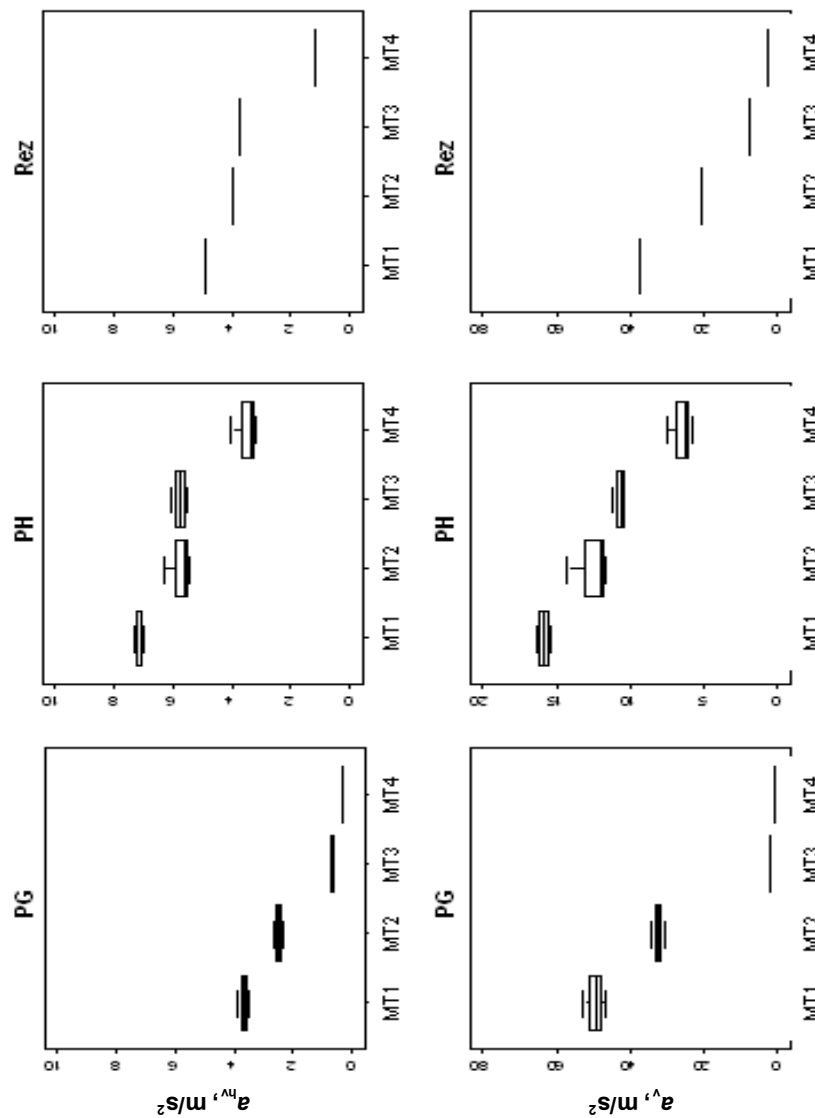
Slika 5.3. Prikaz tipičnog vremenskog signala vektorskog zbroja nevrednovanih (a_v) i vrednovanih razina ubrzanja (a_{hv}) koje se prenose s ručke motorne pile lančanice pri najvećem broju okretaja motora

Takav rezultat je posljedica prijenosne karakteristike filtra za vrednovanje koji znatno veću težinu daje nižim frekvencijama koje lakše prolaze kroz ruku, što se može vidjeti i na grafu (slika 5.4.), gdje pri radu s najmanjim brojem okretaja motora imamo na MT3 i MT4 znatno manje prigušenje nego pri radu s najvećim brojem okretaja. To se najviše ističe u vrijednostima za nevrednovanu ukupnu razinu vibracija (a_v), gdje se jasno može vidjeti da se veći dio visokih frekvencija apsorbira već u prstima i šaci, a tek mali dio dolazi do ostatka ruke, dok niske frekvencije bivaju znatno manje apsorbirane u prstima i šaci. Naravno da su i ukupne razine vibracija znatno veće pri najvećem broju okretaja motora i rezanju. Ako se uzmu u obzir i novije studije o vrlo vjerojatoj većoj ovisnosti pojave VWF-a uslijed viših frekvencija nego što to sugerira vrednovanje prema ISO 5349, tada nam je ovaj uvid od izuzetnog značaja jer se onda treba provjeravati i učinkovitost prigušnih svojstava rukavica pri višim frekvencijama, gdje one uglavnom i imaju znatno bolje prigušne karakteristike.

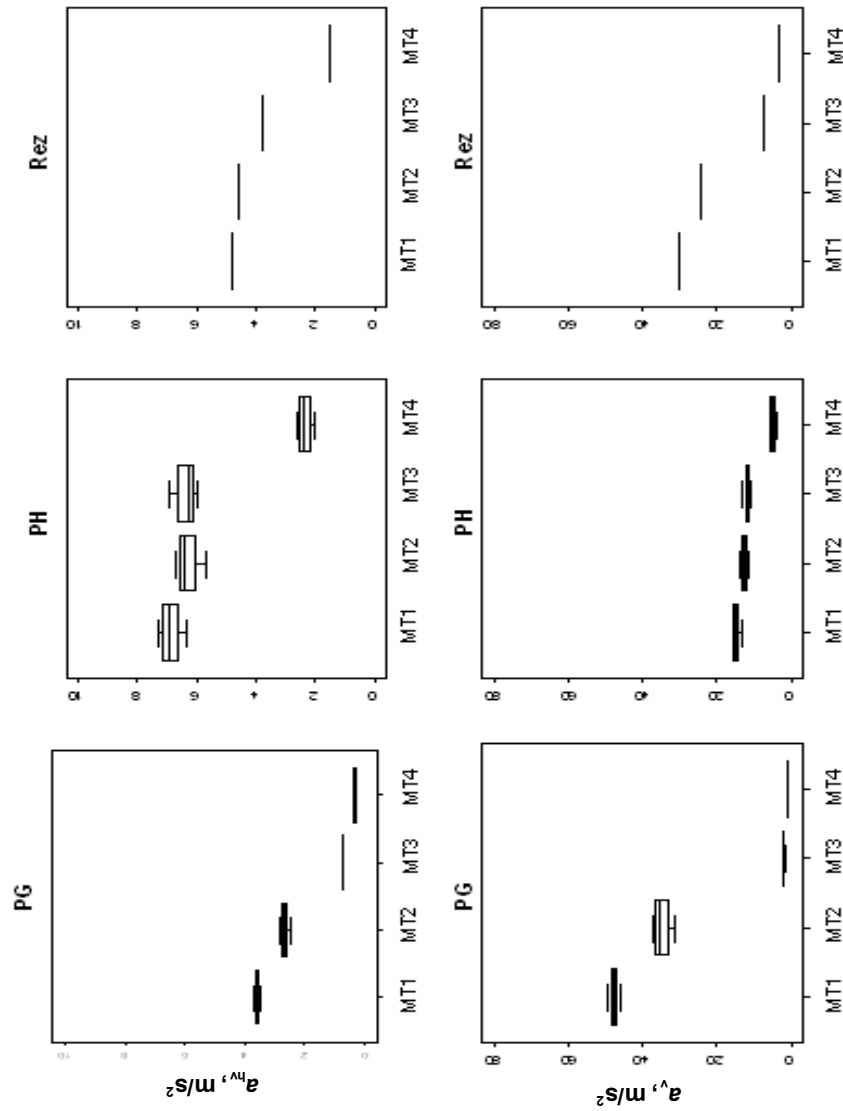
Ista analiza napravljena je i za mjerenja s rukavicama te su grafovi prikazani s istim skalama radi lakše usporedivosti s mjerenjima bez rukavica kao referentnim mjerenjima.



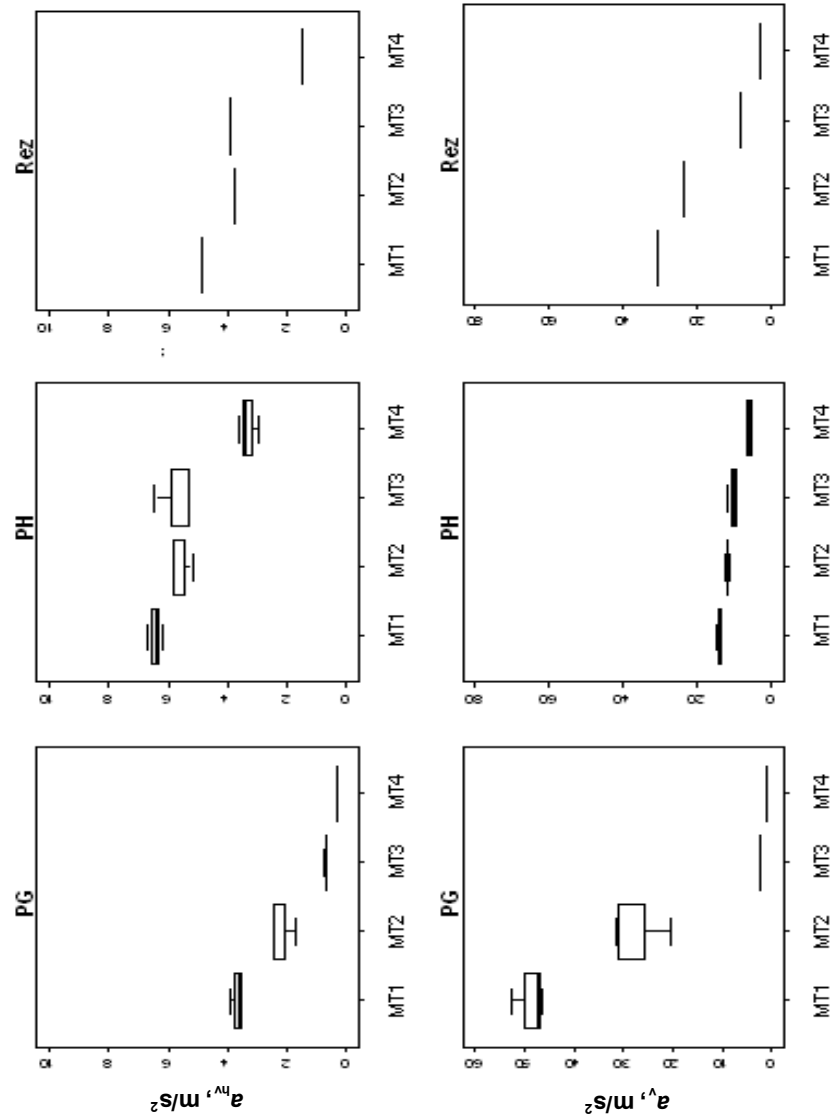
Slika 5.4. *Box-plot* ukupnih vrednovanih (a_{hv}) i nevrednovanih razina vibracija (a_v) pri svim režimima rada i u svim mjernim točkama za rad bez rukavica



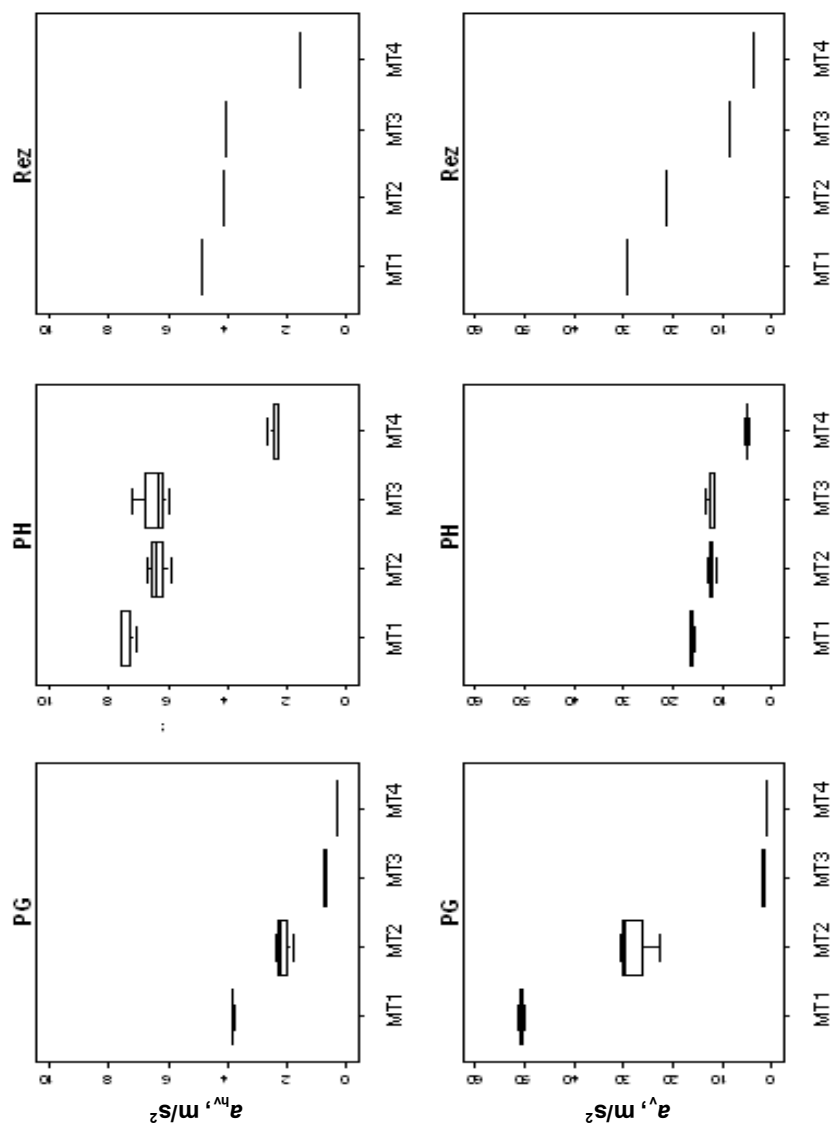
Slika 5.5. *Box-plot* ukupnih vrednovanih (a_{hv}) i nevrednovanih razina vibracija (a_v) pri svim režimima rada i u svim mjernim točkama za rad s RUK#1



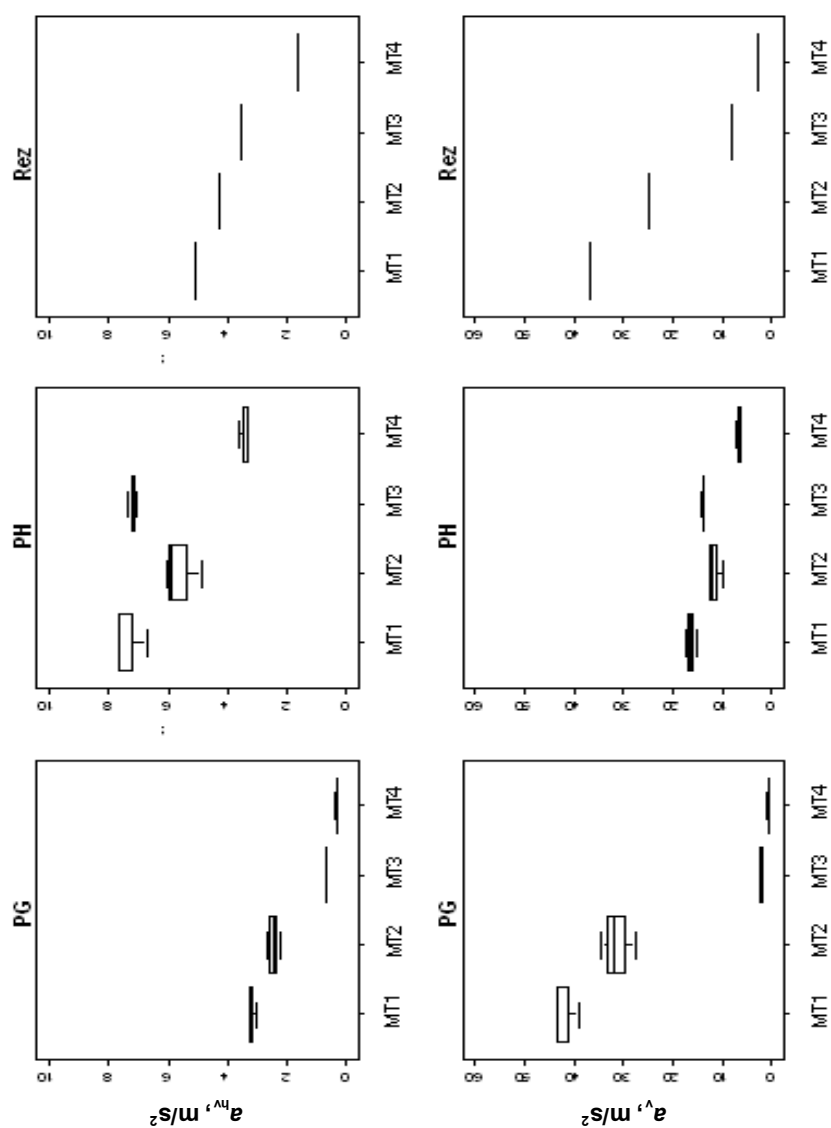
Slika 5.6. *Box-plot* ukupnih vrednovanih (a_{hv}) i nevrednovanih (a_v) razina vibracija pri svim režimima rada i u svim mjernim točkama za rad s RUK#2



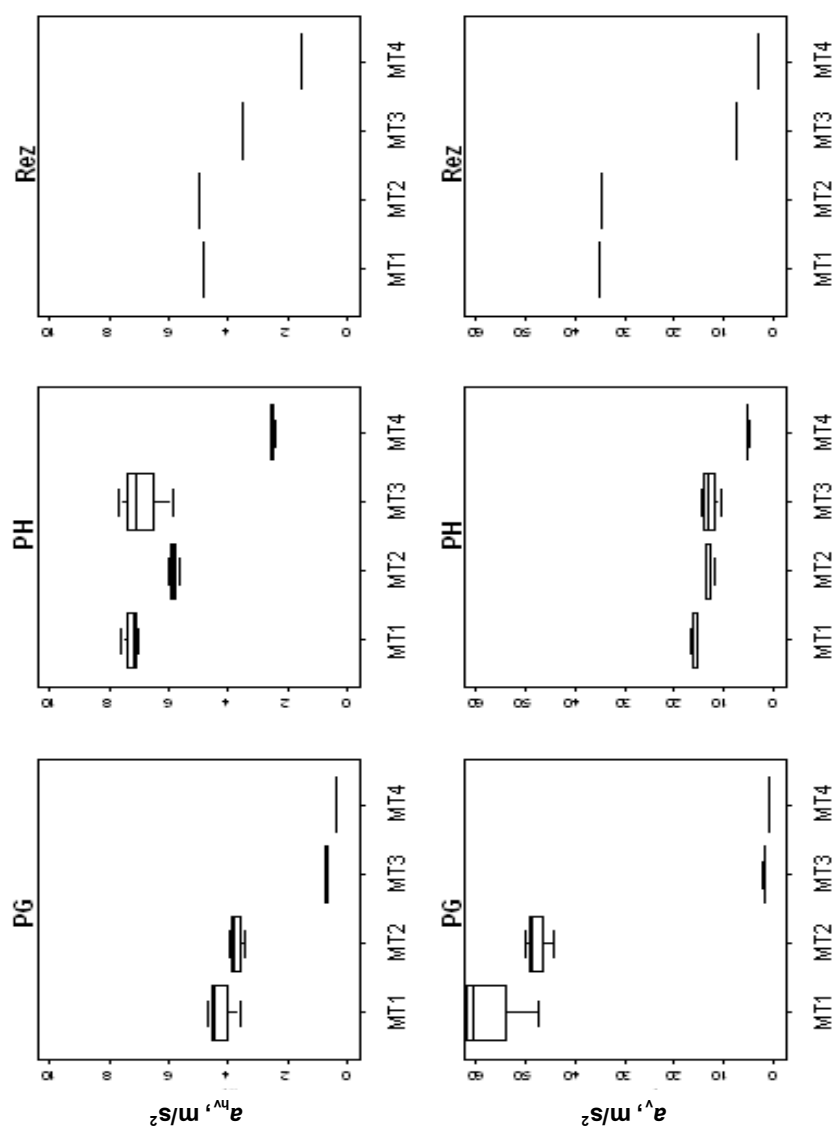
Slika 5.7. *Box-plot* ukupnih vrednovanih (a_{hv}) i nevrednovanih razina vibracija (a_v) pri svim režimima rada i u svim mjernim točkama za rad s RUK#3



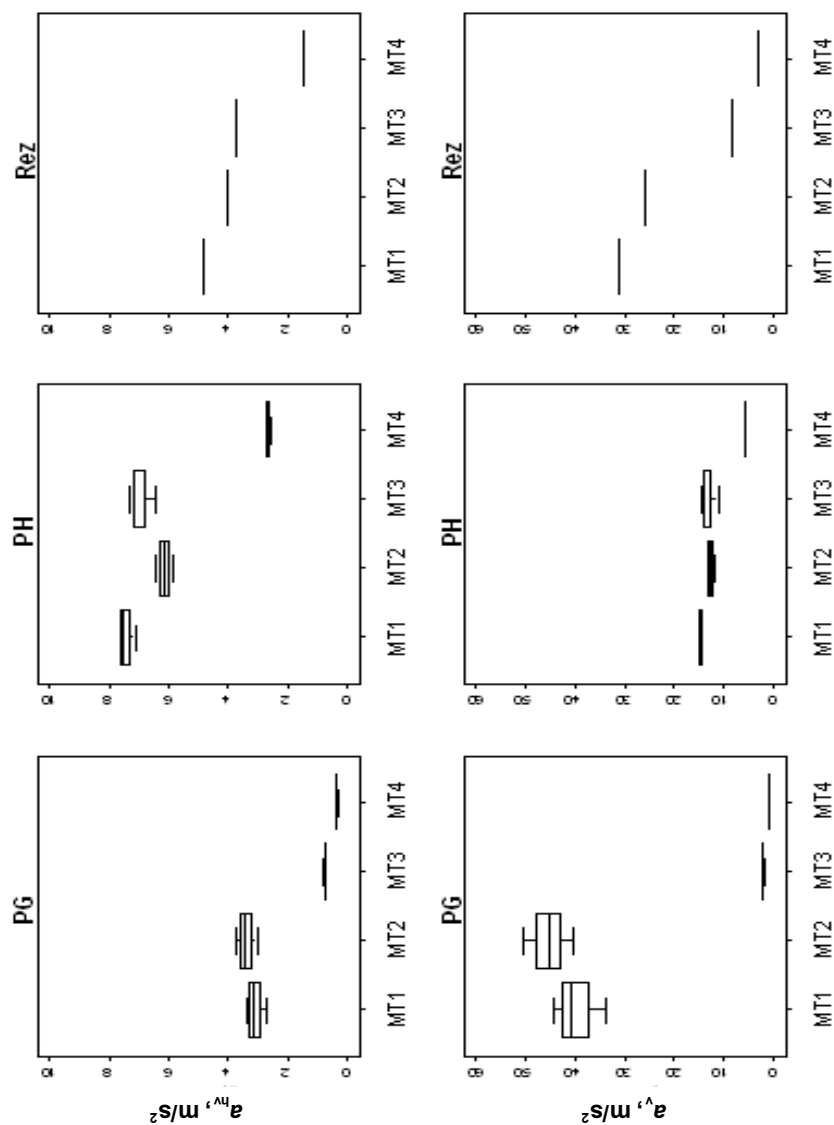
Slika 5.8. *Box-plot* ukupnih vrednovanih (a_{hv}) i nevrednovanih razina vibracija (a_v) pri svim režimima rada i u svim mjernim točkama za rad s RUK#4



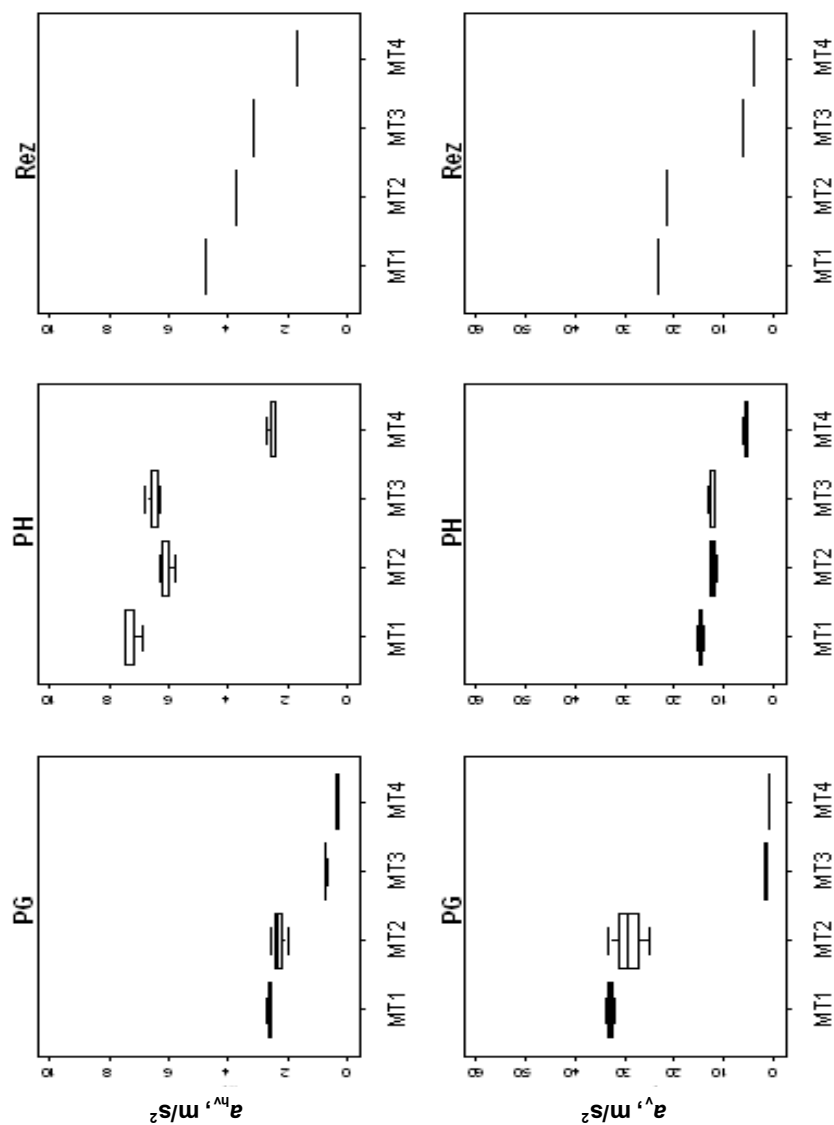
Slika 5.9. *Box-plot* ukupnih vrednovanih (a_{nv}) i nevrednovanih razina vibracija (a_v) pri svim režimima rada i u svim mjernim točkama za rad s RUK#5



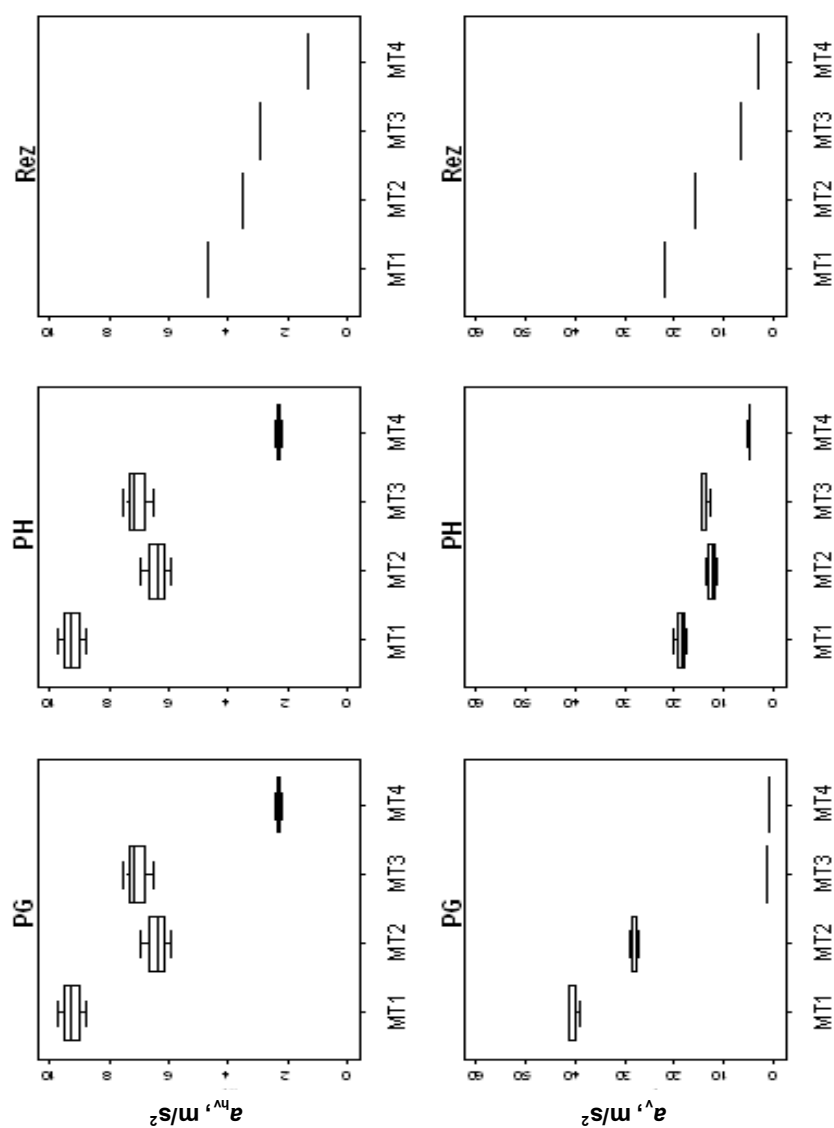
Slika 5.10. *Box-plot* ukupnih vrednovanih (a_{nv}) i nevrednovanih razina vibracija (a_v) pri svim režimima rada i u svim mjernim točkama za rad s RUK#6



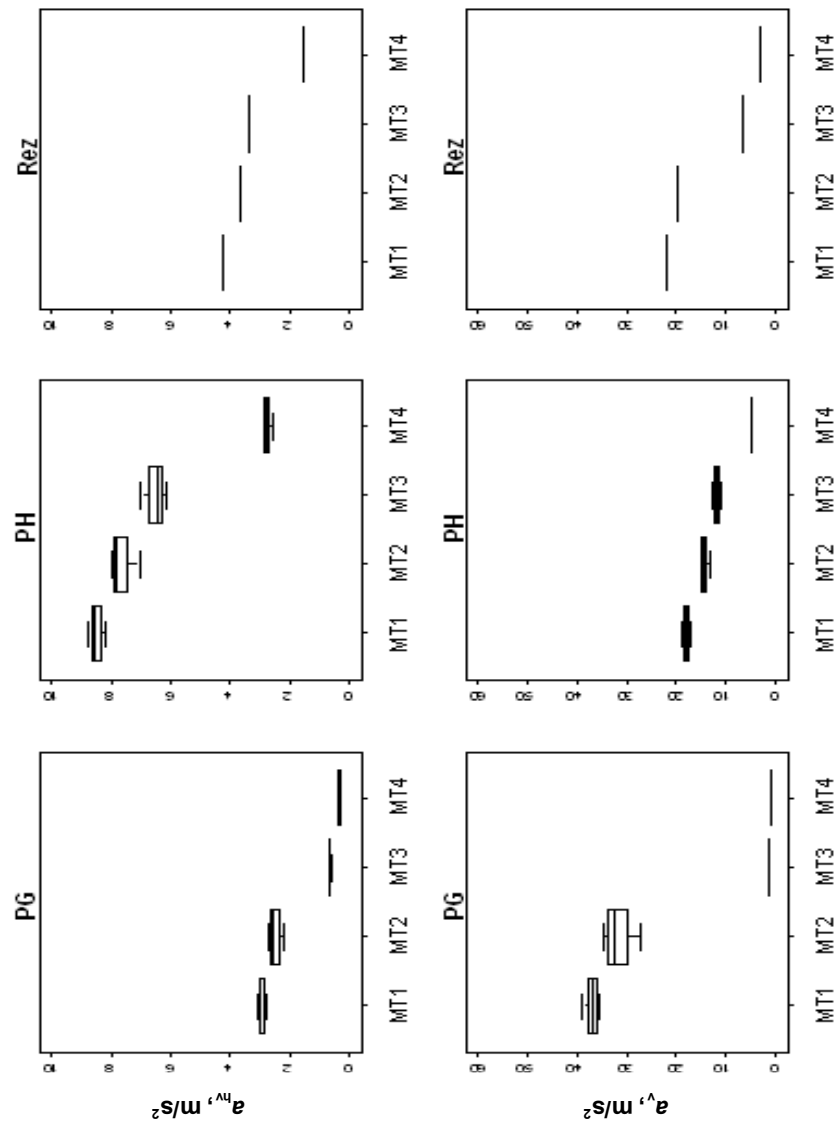
Slika 5.11. *Box-plot* ukupnih vrednovanih (a_{nv}) i nevrednovanih razina vibracija (a_v) pri svim režimima rada i u svim mjernim točkama za rad s RUK#7



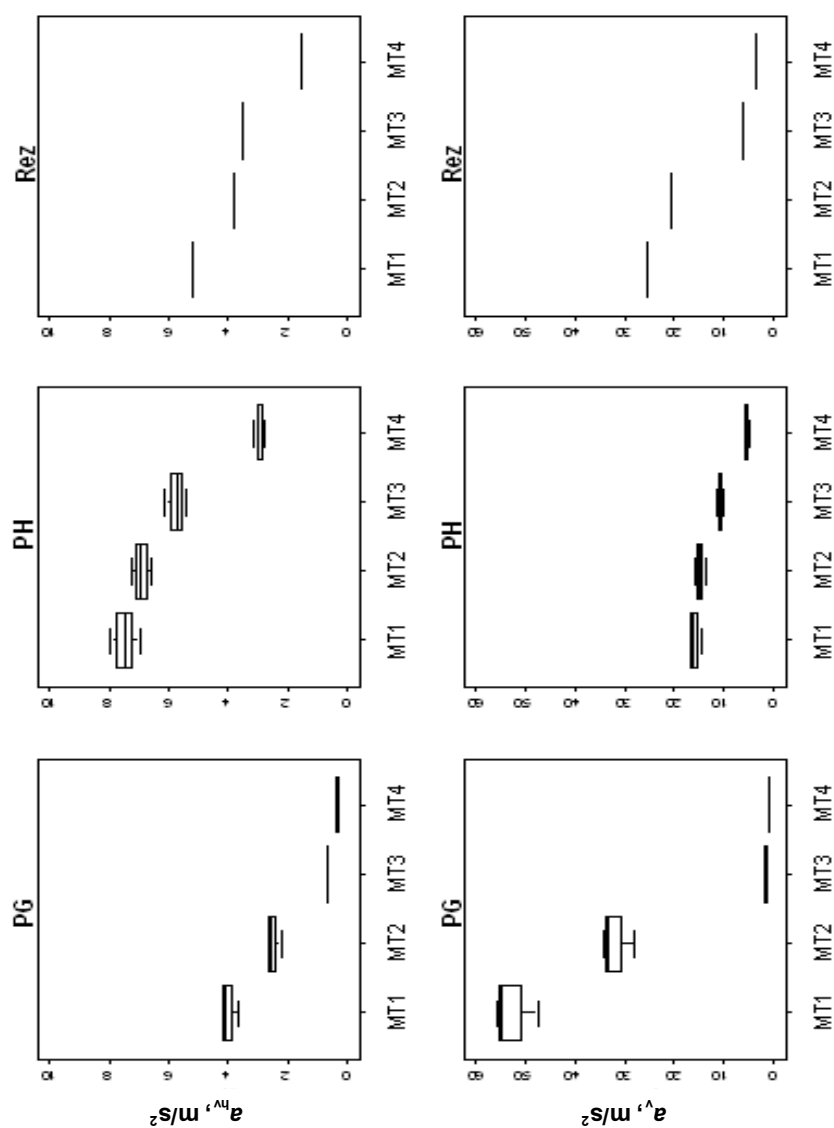
Slika 5.12. *Box-plot* ukupnih vrednovanih (a_{nv}) i nevrednovanih razina vibracija (a_v) pri svim režimima rada i u svim mjernim točkama za rad s RUK#8



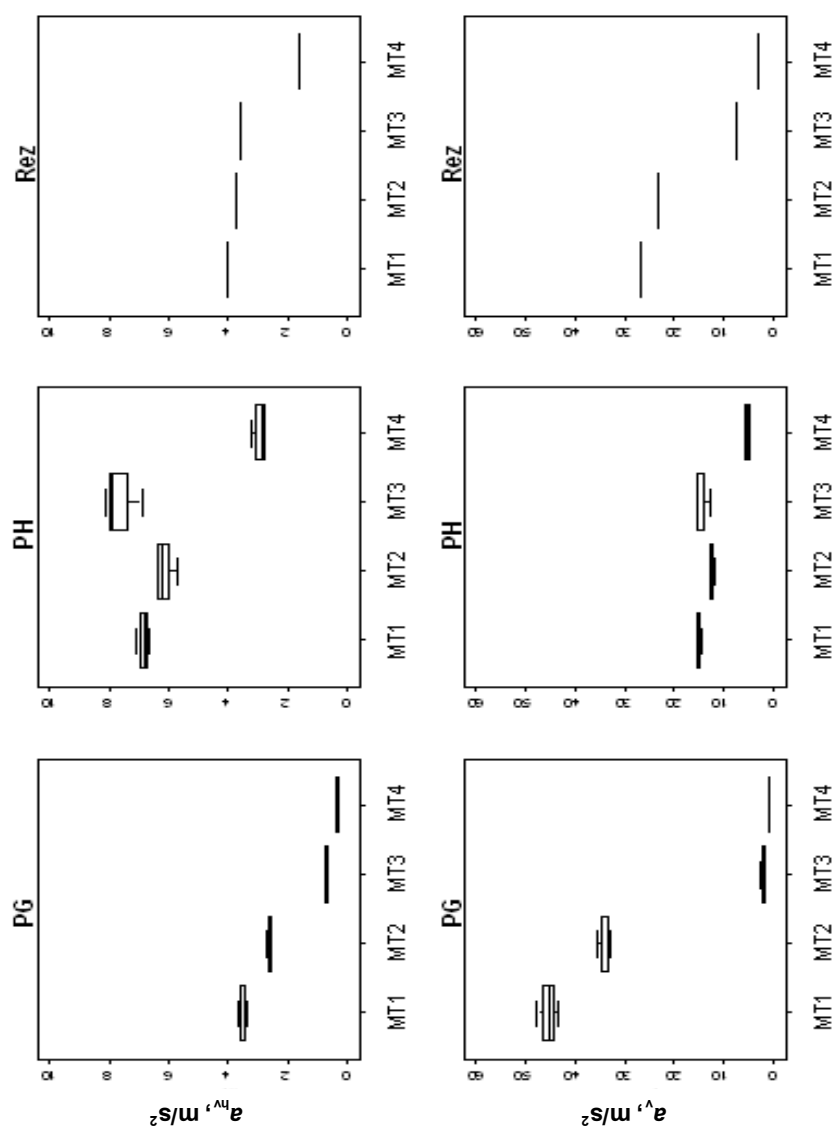
Slika 5.13. *Box-plot* ukupnih vrednovanih (a_{nv}) i nevrednovanih razina vibracija (a_v) pri svim režimima rada i u svim mjernim točkama za rad s RUK#9



Slika 5.14. *Box-plot* ukupnih vrednovanih (a_{nv}) i nevrednovanih razina vibracija (a_v) pri svim režimima rada i u svim mjernim točkama za rad s RUK#10



Slika 5.15. *Box-plot* ukupnih vrednovanih (a_{nv}) i nevrednovanih razina vibracija (a_v) pri svim režimima rada i u svim mjernim točkama za rad s RUK#11



Slika 5.16. *Box-plot* ukupnih vrednovanih (a_{nv}) i nevrednovanih razina vibracija (a_v) pri svim režimima rada i u svim mjernim točkama za rad s RUK#12

Iz prikazanih grafova jasno se može vidjeti sličan uzorak za sva mjerenja. Veći dio vibracija u višem dijelu frekvencijskog spektra biva apsorbiran već u prstima i šaci, s time da sve rukavice pritom imaju niže razine vibracija nego pri radu bez rukavica. Interesantno je primijetiti da za pojedine rukavice pri radu s najmanjim brojem okretaja motora ne dolazi do prigušenja između MT2 i MT3, štoviše, kod nekih rukavica u tom slučaju dolazi do pojačanja razina vibracija. Uzrok može biti rezonancija toga dijela šake, što bi se otprilike i poklapalo s rezonantnim frekvencijama prema modelu koji su napravili Dong i dr. (2008.)^I. Zbog toga možda ne bi bila preporučljiva metoda ocjene prigušnih svojstava antivibracijskih rukavica u stvarnim uvjetima rada s motornim pilama lančanicama mjerenima na zglobov šake (MT3). Tu metodu su kao alternativnu predložili Dong i dr. (2003.)^{II} za mjerenja na pneumatskim čekićima. Uslijed drugačije pritisne sile kojom rukovatelj drži ručku (obično uslijed debelog prigušnog materijala i materijala samih rukavica) dolazi do promjene mehaničke impedancije, a samim time može doći i do povećanih razina vibracija (amplituda pomaka). Ovdje se može naglasiti da bi bilo izuzetno korisno mjeriti dinamiku pritisne sile između ruke i ručke. To je često teško ili nemoguće provesti. Mjeritelj se često mora pouzdati u ocjene i prosudbe rukovatelja strojem vezane uz konstantnost i reprezentativnost pritisne sile na ručku tijekom rada.

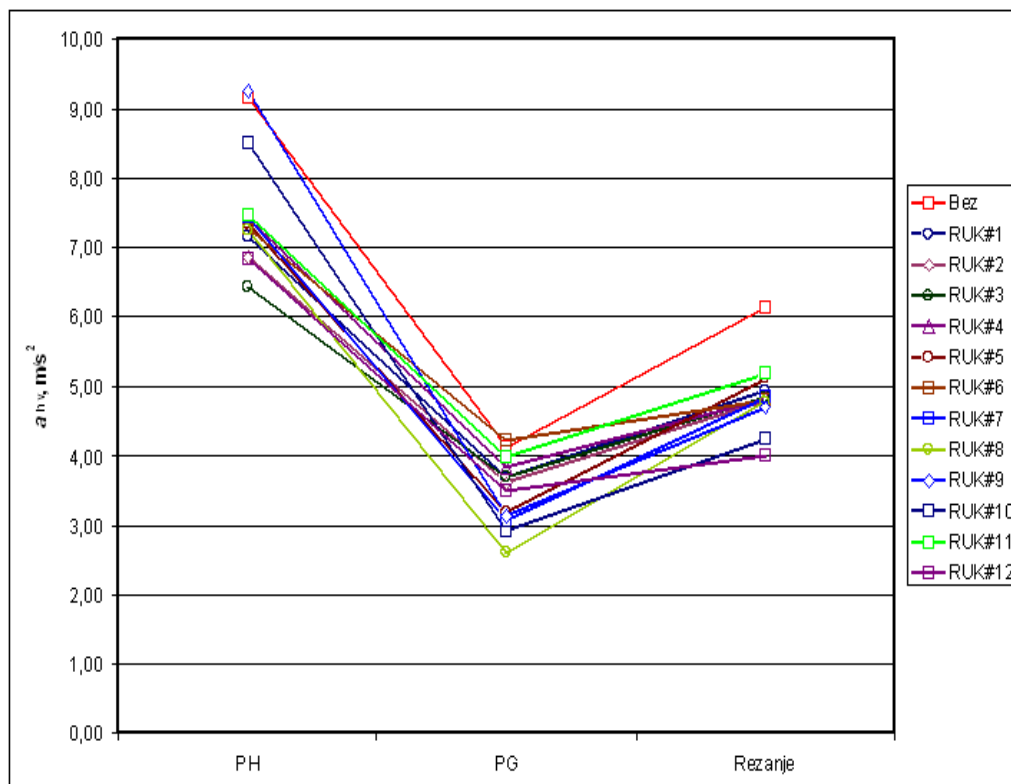
Kod svih mjerenja se može uočiti da su rasipanja rezultata oko srednje vrijednosti (standardne devijacije uzorka) bile uglavnom na razini ili manje od mjerenja koja su provedena bez rukavica. Time je osigurana dobra ponovljivost provedenih mjerenja i kao takva je bitan parametar za ocjenu ispravnosti provedenih mjerenja prigušne sposobnosti antivibracijskih rukavica u stvarnim uvjetima rada (Dong i dr., 2003.)^{III}.

Radi lakše usporedbe i procjene prigušnih svojstava svojstava rukavica napravljeni su grafovi prikazani na slikama 5.17. i 5.18.

I Prvi citat na strani 39.

II Prvi citat na strani 29.

III Prvi citat na strani 29.



Slika 5.17. Prikaz ukupnih vrednovanih razina vibracija (a_{hv}) za mjerenja u svim režimima rada sa i bez rukavica na prstima (MT1) radi procjene prigušnih svojstava rukavica

Iz grafa prikazanog na slici 5.17. jasno se može vidjeti da gotovo sve ispitivane rukavice imaju prigušna svojstva u usporedbi s radom bez njih, i to za sve režime rada s motornom pilom lančanicom. Ovdje treba naglasiti da su to vrednovane razine vibracija koje veću težinu daju nižim frekvencijskim komponentama te je to posebno značajno u području rada pri najmanjem broju okretaja motora.

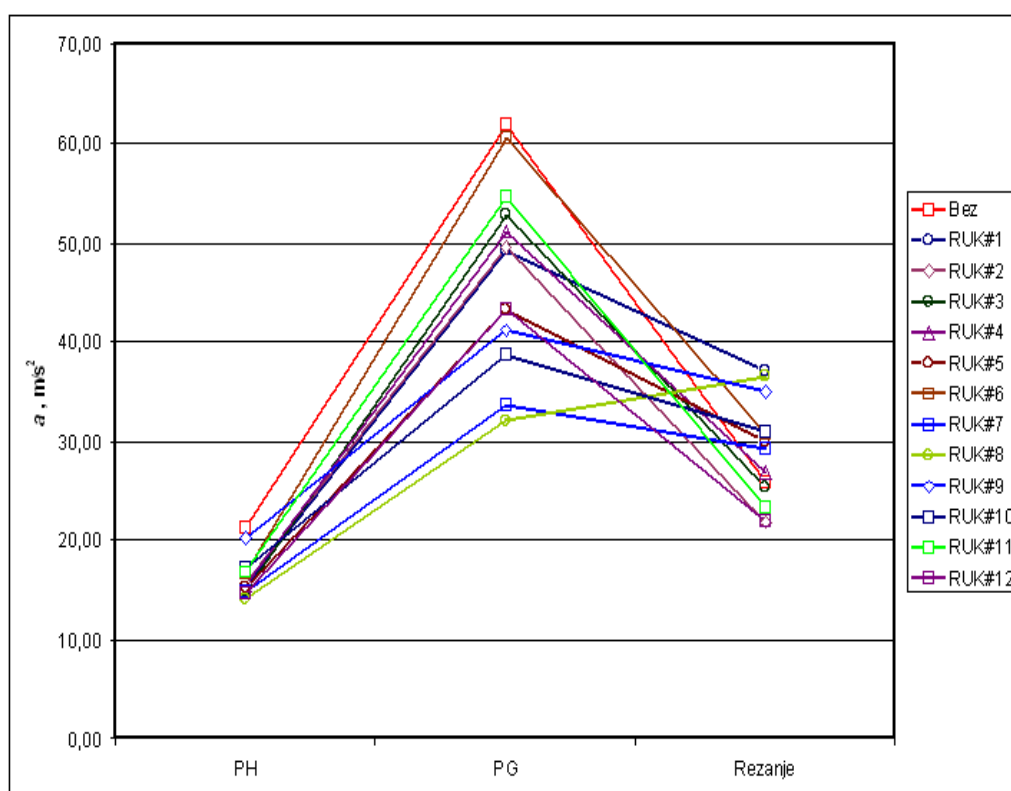
Kako uglavnom karakteristike vibracijskog prijenosnog faktora pokazuju, velik broj rukavica nema prigušna svojstva u tom dijelu frekvencijskog spektra, a kod nekih čak dolazi i do pojačanja vibracija. Ako se rezultati gledaju iz te perspektive, oni su u suprotnosti s rezultatima laboratorijskih ispitivanja vibracijskog prijenosnog faktora.

Slične rezultate su dobili Pinto i dr. (2001.)^I pri mjerenjima prigušnih svojstava antivibracijskih rukavica u stvarnim uvjetima rada, ali na dlanu. Tim istraživanjima su isto dobivena bolja prigušna svojstva antivibracijskih rukavica u stvarnim uvjetima rada nego na temelju laboratorijskih ispitivanja. Na temelju toga se može izraziti

I Prvi citat na strani 21.

dodatna sumnja u ispravnu ocjenu prigušnih svojstava temeljenih isključivo na rezultatima dobivenima prema normi ISO 10819.

U obzir treba uzeti i činjenicu da se mjerenja vibracijskog prijenosnog faktora u laboratorijskim uvjetima provode na dlanu, a ne na prstima, kako su ova mjerenja provođena. Uz to, u laboratorijskim uvjetima održava se konstantna pritisna sila, a poznato je da se tijekom stvarnog rada sa strojevima ona može znatno mijenjati s obzirom na radne uvjete, rukovatelja i dr. Promjena pritisne sile utječe na mehaničku impedanciju, a time, naravno, i na vibracije prenesene na sustav šaka-ruka. Osim toga, mehanička impedancija na dlanu je različita od one na prstima. Ako uzmemo u obzir sve te faktore, oni bi mogli objasniti dobivene rezultate mjerenja. Znatniju nesigurnost u tu tvrdnju bi mogla potaknuti jedino pritisna sila na ručku koja nije mjerena, što bi bilo od izuzetne koristi. Da je mjerena i pritisna sila, mogla se provjeriti njena konstantnost tijekom svih mjerenja te jednostavno odrediti i mehanička impedancija pri radu sa i bez rukavica te još objektivnije ocijeniti prigušna svojstva ispitivanih rukavica.



Slika 5.18. Prikaz ukupnih razina vibracija (a_h) za mjerenja u svim režimima rada sa i bez rukavica na prstima (MT1) radi procjene prigušnih svojstava rukavica

U skladu s novijim sumnjama u potpunu valjanost i povezanost izloženosti vibracijama vrednovanih prema ISO 5349 i pojave VWF-a provjeravana su i prigušna svojstva rukavica za nevrednovane vibracije koje se prenose s ručke motorne pile lančanice.

Kao što se može vidjeti iz grafa na slici 5.18. koji prikazuje razine vibracija koje se prenose s ručke motorne pile lančanice pri radu sa i bez rukavica, sve rukavice u svim režimima rada izuzev rezanja imaju prigušna svojstva. S obzirom na dinamičke karakteristike prigušnih materijala rukavica, očekuju se i veća prigušenja nego pri ocjeni pomoću vrednovanih razina ubrzanja, što je ovdje i slučaj i u skladu je s očekivanjima. Kod nekih rukavica se javlja pojačanje vibracija pri rezanju, što može biti posljedica mjerne pogreške. Međutim, s obzirom na rezultate dobivene pri rezanju, gdje je frekventni spektar vibracija gotovo isti kao i pri radu s najvećim brojem okretaja motora, a razine vibracija su manje, ovakav rezultat je najvjerojatnije posljedica promjene pritisne sile na ručku motorne pile lančanice. Istu je znatno teže održati konstantnom tijekom rezanja trupca nego pri radu s najvećim brojem okretaja motora. Ovdje iznova možemo naglasiti potrebu za konstantnim mjerenjem pritisne sile na ručku radi objektivnije procjene prigušnih svojstava rukavica u stvarnim uvjetima rada.

Radi kvantifikacije prigušnih svojstava ispitivanih rukavica u danim uvjetima za sve rukavice i pojedine režime određen je vibracijski prijenosni faktor (TEAT) prema Dong i dr. (2002.)^I i izračunat je prema izrazu (1.13) za vrednovane i nevrednovane razine vibracija. Na temelju dobivenih vrijednosti vibracijskog prijenosnog faktora za sve režime rada i s obzirom na to da su svi režimi podjednako zastupljeni u ukupnom vremenu rada za ocjenu utjecaja na zdravlje, izračunata je i aritmetička sredina vibracijskog prijenosnog faktora kao osnova za ocjenu prigušnih svojstava.

Rezultati su prikazani u tablicama 5.1. i 5.2.

I Prvi citat na strani 30.

Tablica 5.1. Izračun vibracijskog prijenosnog faktora (TEAT) prema Dong i dr. (2002.)^I za vrednovane razine vibracije (a_{hv}) koje se prenose s ručke motorne pile lančanice kroz prigušni materijal rukavica na prste pri svim karakterističnim režimima rada

Rukavice	Vibracijski prijenosni faktor (TEAT) za a_{hv} , %			
	PH	PG	Rezanje	Aritmetička sredina
RUK#1	78	89	80	82
RUK#2	75	87	78	80
RUK#3	70	89	78	79
RUK#4	80	93	78	84
RUK#5	80	77	83	80
RUK#6	79	102	78	86
RUK#7	81	74	79	78
RUK#8	79	63	77	73
RUK#9	101	76	76	84
RUK#10	92	70	69	77
RUK#11	81	96	84	87
RUK#12	74	84	65	75

Na temelju izračunatih aritmetičkih sredina vibracijskog prijenosnog faktora vrednovanih razina vibracija izdvojena su tri tipa rukavica koje su pokazale najbolja prigušna svojstva. Kao najbolje u ovom slučaju pokazale su se rukavice pod oznakama RUK#8, RUK#10 i RUK#12.

I Prvi citat na strani 30.

Tablica 5.2. Izračun vibracijskog prijenosnog faktora (TEAT) prema Dong i dr. (2002.)^I za nevrednovane razine vibracije (a_v) koje se prenose s ručke motorne pile lančanice kroz prigušni materijal rukavica na prste pri svim karakterističnim režimima rada

Rukavice	Vibracijski prijenosni faktor (TEAT) za a_v , %			
	PH	PG	Rezanje	Aritmetička sredina
RUK#1	72	79	143	98
RUK#2	73	80	84	79
RUK#3	69	85	98	84
RUK#4	73	83	104	86
RUK#5	72	70	116	86
RUK#6	78	98	119	98
RUK#7	69	54	113	79
RUK#8	66	52	141	86
RUK#9	95	66	135	99
RUK#10	81	63	120	88
RUK#11	79	88	90	86
RUK#12	69	70	85	75

Isto kao i za vrednovane vibracije, i za nevrednovane razine na temelju aritmetičke sredine vibracijskog prijenosnog faktora izdvojena su tri tipa rukavica s najboljim prigušnim svojstvima. U ovom slučaju to su rukavice s oznakama RUK#2, RUK#7 i RUK#12.

Nakon takvog selekcijskog procesa, koji je uzeo u obzir i vrednovanje prema ISO 5349, ali i nevrednovane razine ubrzanja radi moguće bolje povezanosti takvog načina vrednovanja na pojavu VWF-a, pokazalo se da za oba načina vrednovanja i određivanje vibracijskog prijenosnog faktora na temelju tih vrijednosti najbolja prigušna svojstva imaju rukavice pod oznakom RUK#12. Inače, kako je već opisano,

I Prvi citat na strani 30.

to su rukavice koje kao prigušni materijal koriste tzv. AntiVib™ materijal koji se, prema laboratorijskim ispitivanjima, pokazao kao jedan od najboljih prigušnih materijala za antivibracijske rukavice te je i zadovoljio ispitivanja prema normi HRN EN ISO 1089:1996(E)^I. Na temelju rezultata dobivenih ovim mjerenjima može se zaključiti da bi rezultati dobiveni laboratorijskim mjerenjima prema HRN EN ISO 1089:1996(E)^{II} mogli biti samo djelomično indikativni i upotrebljivi za ocjenu prigušnih sposobnosti antivibracijskih rukavica pri radu s motornim pilama lančanicama.

Iako indikativni, ovi podaci nam ne govore ništa o tome jesu li razine vibracija na koje ih prigušuju rukavice zadovoljavajuće s obzirom na propisane akcijske i maksimalne dopuštene dnevne izloženosti vibracijama $A(8)$, kako je to određeno u direktivi 2002/44/EC – *On the Minimum Health and Safety Requirements Regarding the Exposure of Workers to the Risks Arising from Physical Agents: Vibration*^{III}. Na temelju izmjerenih ukupnih vrednovanih razina ubrzanja (a_{hv}) i procjena vremena izloženosti određenim razinama ubrzanja prema CEN-*Technical report: Guideline for the assessment of exposure to hand-transmitted vibration based on information from manufacturers of machinery*^{IV} izračunate su vrijednosti $A(8)$ za sve rukavice. Ukupna dnevna izloženost radnika s motornom pilom lančanicom tijekom dana aproksimirana je ravnomjernom raspodjelom ukupnog radnog vremena s motornom pilom lančanicom na tri karakteristična perioda izloženosti, tj. 33% vremena rada pri najmanjem broju okretaja motora, 33% vremena rada pri najvećem broju okretaja motora i 33% vremena rada u rezanju. Pomoću tih podataka i izraza (1.4) dobivene su vrijednosti koje su prikazane na slici 5.19.

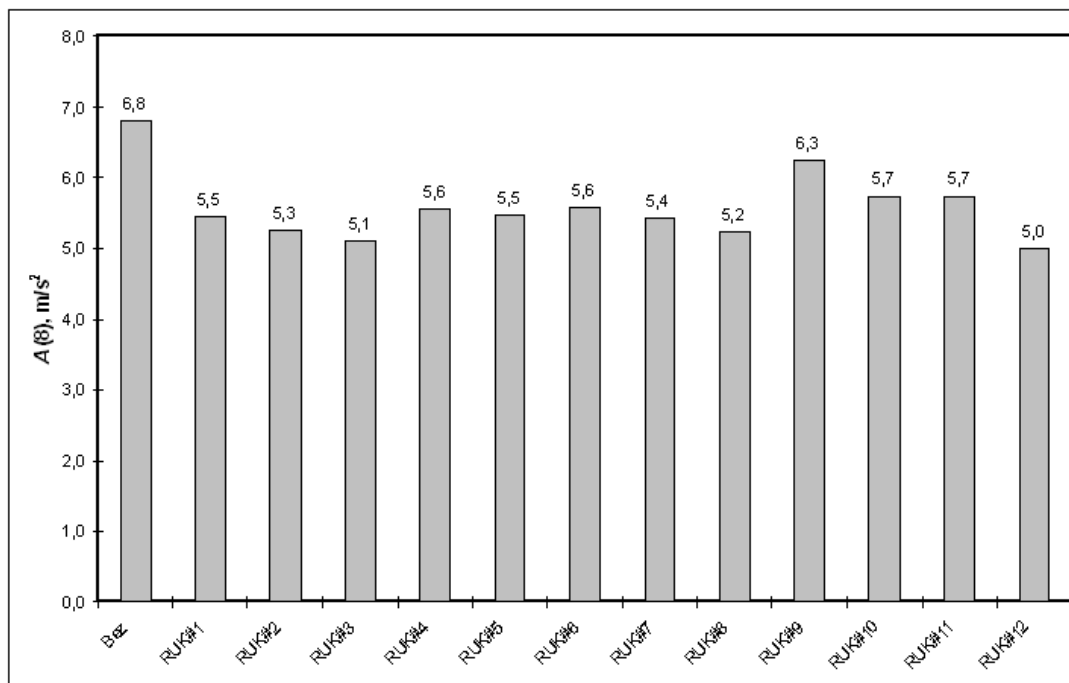
Iz dobivenog grafa jasno se može vidjeti ono što je već rečeno, odnosno da sve promatrane rukavice imaju prigušna svojstva pri radu s odabranom motornom pilom lančanicom u promatranim uvjetima.

I Prvi citat na strani 17.

II Prvi citat na strani 17.

III Prvi citat na strani 10.

IV **** Technical Report CEN/TR 231064: Guideline for the assessment of exposure to hand-transmitted vibration based on information provided by manufacturers of machinery.



Slika 5.19. Ukupna dnevna izloženost vibracijama $A(8)$ pri radu s danom motornom pilom lančanicom i ispitivanim tipovima antivibracijskih rukavica

Međutim, značajno je to da najbolje rukavice u ispitivanjima (RUK#12) ne pružaju efikasnu zaštitu radnika prema preporukama direktive 2002/44/EC – *On the Minimum Health and Safety Requirements Regarding the Exposure of Workers to the Risks Arising from Physical Agents: Vibration*^I. Kako je već prije navedeno, u direktivi se kao maksimalna dnevna izloženost vibracijama navodi vrijednost od 5 m/s^2 , a kao akcijska vrijednost $2,5 \text{ m/s}^2$ (ona kod koje treba početi poduzimati mjere u cilju smanjenja dnevne izloženosti vibracijama).

Iz grafa se može vidjeti da je pri radu s rukavicama RUK#12 ta razina upravo oko 5 m/s^2 . Naravno da ovdje treba uzeti u obzir i činjenicu da su ovi proračuni i preporuke bazirane na temelju osmosatnog radnog dana i osmosatne izloženosti izmjerenim razinama vibracija te bi, u slučaju manjih vremena izloženosti ili rada s tipovima motornih pila lančanica koje imaju manje razine vibracija koje se prenose s ručke, ovi podaci bili znatno bolji.

S druge strane, treba uzeti u obzir da je ova preporuka temeljena na vrednovanju vibracija prema ISO 5349, gdje se veća težina daje nižim frekvencijama,

^I Prvi citat na strani 10.

a za sada nema preporuka s obzirom na nevrednovane razine vibracija, tj. moguću bolju povezanost takvog načina vrednovanja s pojavom VWF-a, gdje bi antivibracijske rukavice mogle imati znatno povoljnije učinke.

5.2. REZULTATI FREKVENCIJSKE ANALIZE

Kako bi se provjerio mogući utjecaj različitih frekvencijskih komponenti vibracija koje se prenose s ručke motorne pile lančanice na ostale dijelove ruke pri radu sa i bez rukavica, izvršena je frekvencijska analiza vibracijskih signala za sve promatrane mjerne točke (MT1, MT2, MT3 i MT4). Kako je već prikazano u grafovima na slikama 5.5. do 5.16, može se vidjeti da se veći dio vibracija prigušuje već u šaci.

Frekvencijska analiza je napravljena u programskom paketu Scilab, i to za svaki režim i rukavicu posebno, u svim mjernim točkama. Rezultati frekvencijske analize su, sukladno očekivanjima, pokazivali karakteristične oblike koji su prikazani na slikama 2.3.a, 2.3.b i 2.3.c, gdje se jasno može vidjeti da su dominantne frekvencije direktno proporcionalne s frekvencijom pogonskog motora s unutrašnjim sagorijevanjem u promatranim režimima rada.

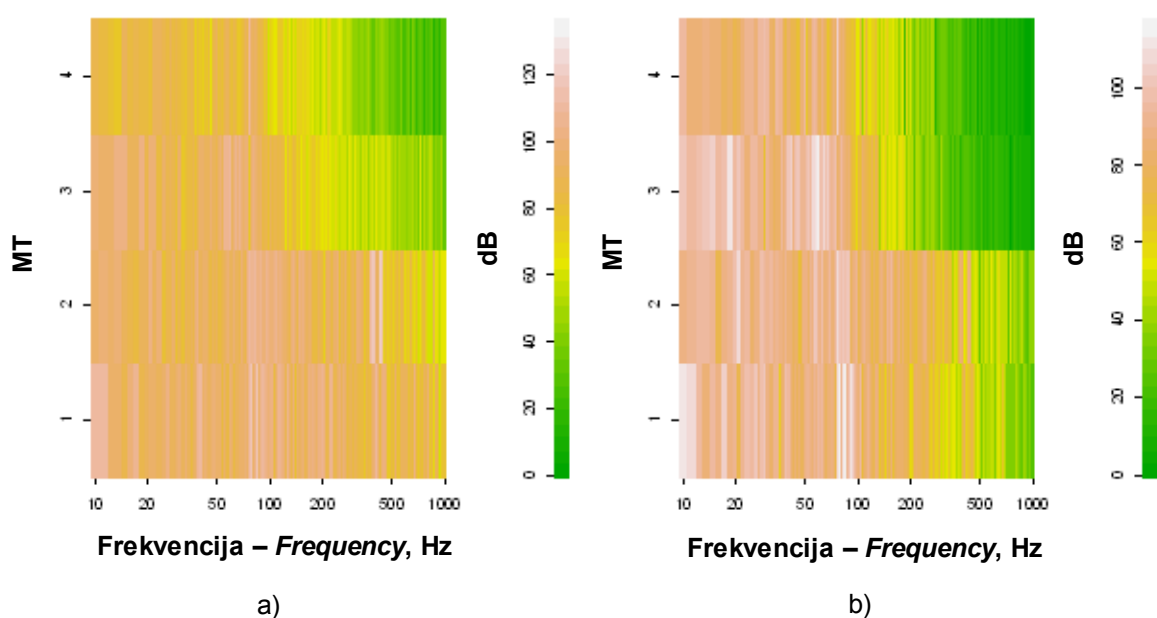
Nakon toga je za pojedinu mjernu točku (i rad s određenim tipom rukavica) izvršena superpozicija vrijednosti dobivenih frekvencijskom analizom u sva tri režima rada. Tipičan izgled dobivene reprezentativne frekvencijske analize za sva tri režima rada može se vidjeti na slici 2.3.d.

Budući da su razlike u dobivenim amplitudama u promatranom frekvencijskom spektru velike, vrijednosti su prebačene u dB pomoću izraza $20 \cdot \log(a/a_0)$, gdje su a – efektivne vrijednosti amplituda vibracija za pojedinu frekvenciju, a_0 – referentna vrijednost koja iznosi 10^{-6} m/s².

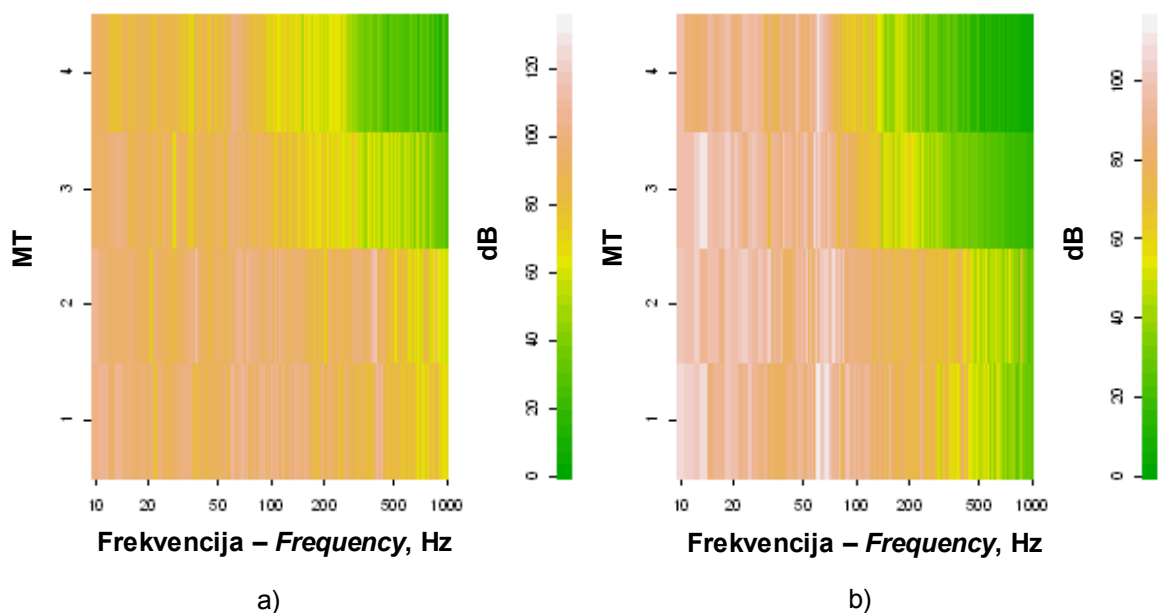
Za tako dobivene rezultate frekvencijske analize za rad sa svim rukavicama i bez rukavica te za vrednovane i nevrednovane razine vibracija napravljeni su tzv. *intensity* dijagrami. Na tim dijagramima kao x os je postavljena frekvencija u promatranom rasponu, a na y os oznaka pojedine mjerne točke (MT1, MT2, MT3 i

MT4). Sama slika različitim bojama za svaku mjernu točku pokazuje razinu vibracija u dB u pojedinom frekventnom području, sukladno legendi, odnosno odabranom *colour mapu*.

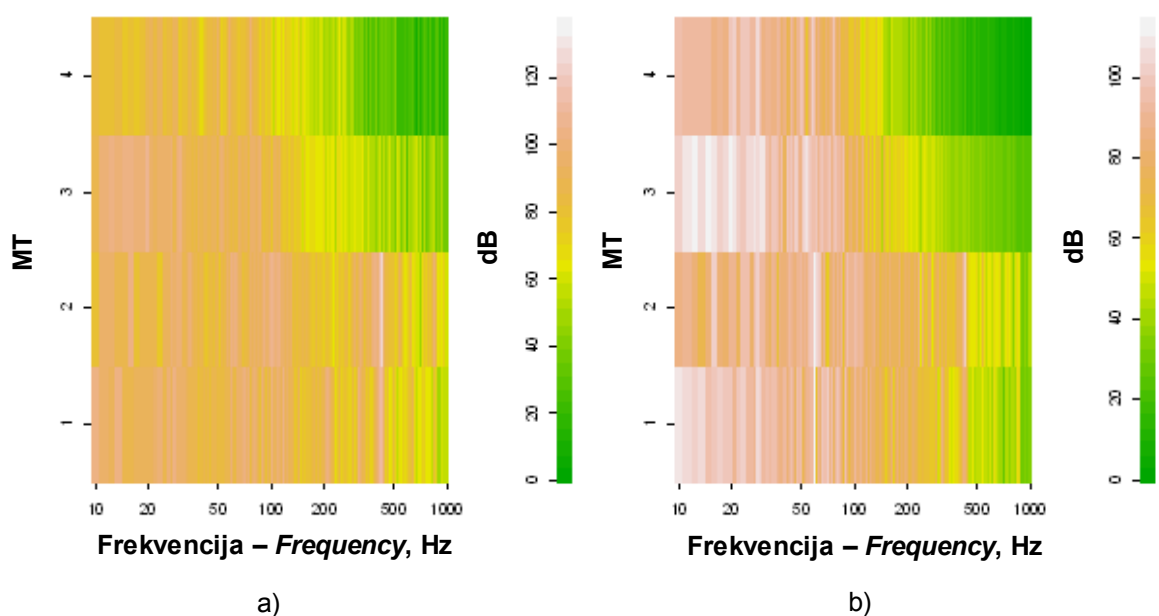
Dobiveni rezultati prikazani su na sljedećim slikama.



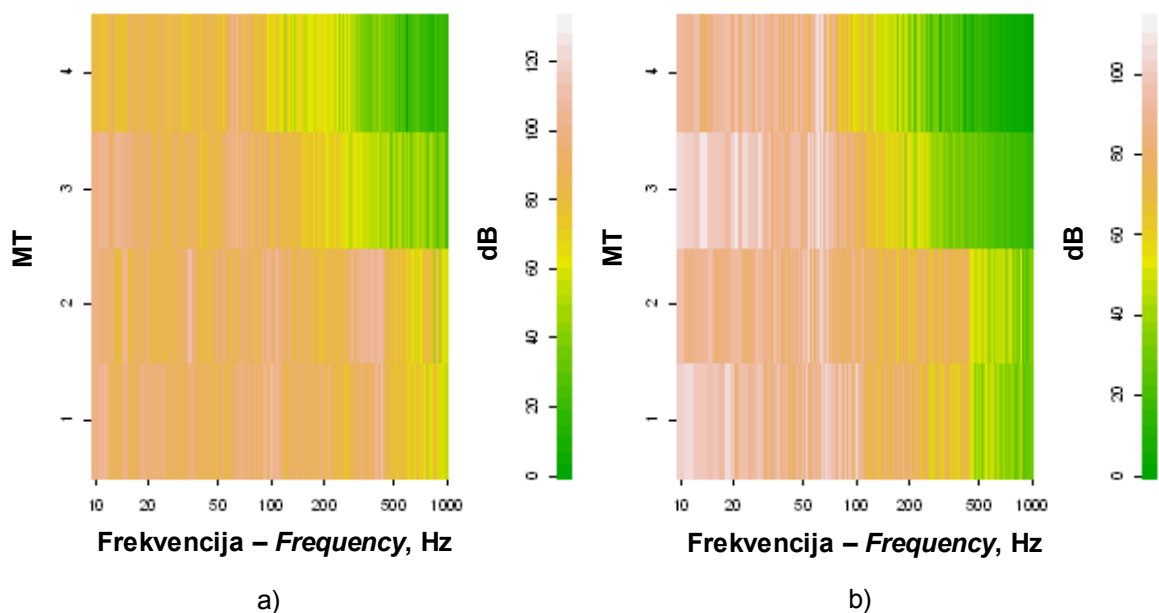
Slika 5.20. Prikaz rezultata frekvencijske analize karakterističnog signala vibracija koje se prenose s ručke motorne pile lančanice pri radu bez rukavica:
a) nevrednovane i b) vrednovane razine vibracija



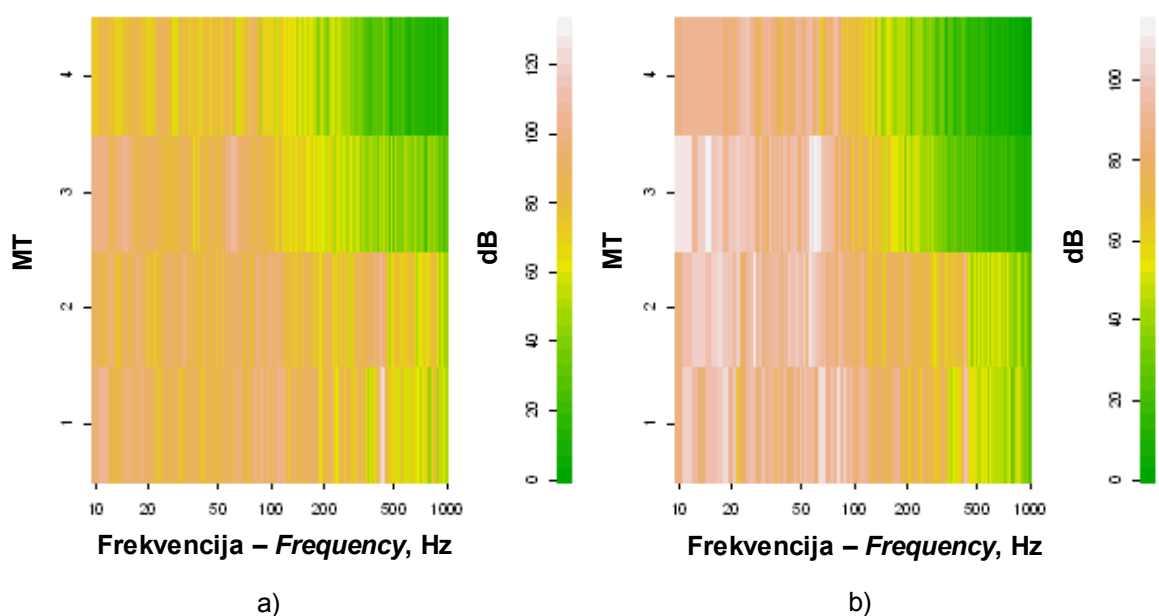
Slika 5.21. Prikaz rezultata frekvencijske analize karakterističnog signala vibracija koje se prenose s ručke motorne pile lančanice pri radu s RUK#1: a) nevrednovane i b) vrednovane razine vibracija



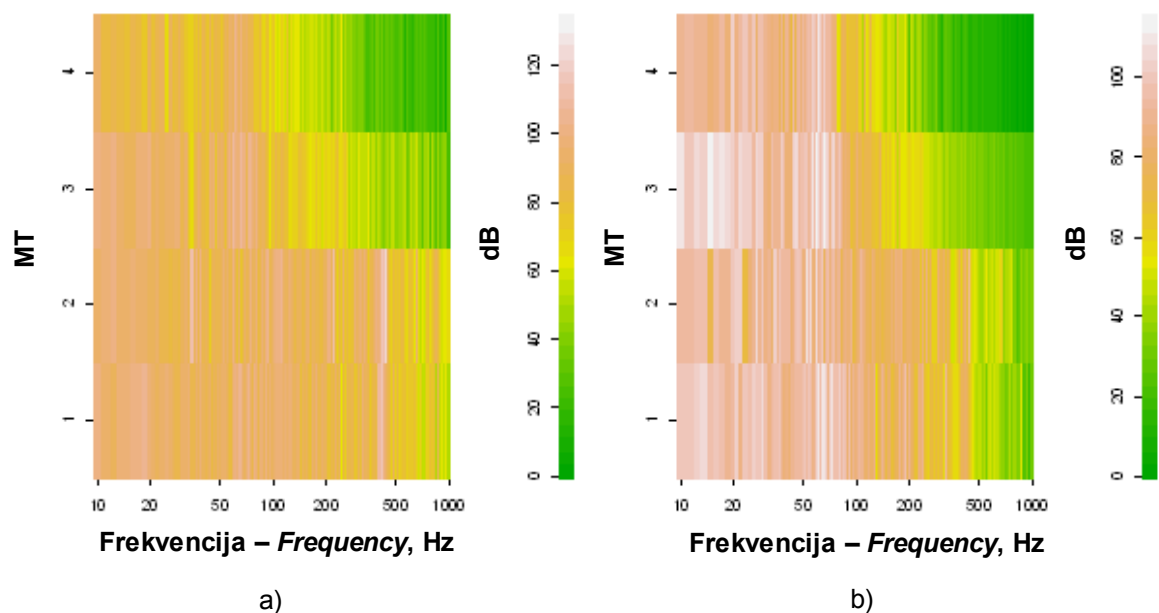
Slika 5.22. Prikaz rezultata frekvencijske analize karakterističnog signala vibracija koje se prenose s ručke motorne pile lančanice pri radu s RUK#2: a) nevrednovane i b) vrednovane razine vibracija



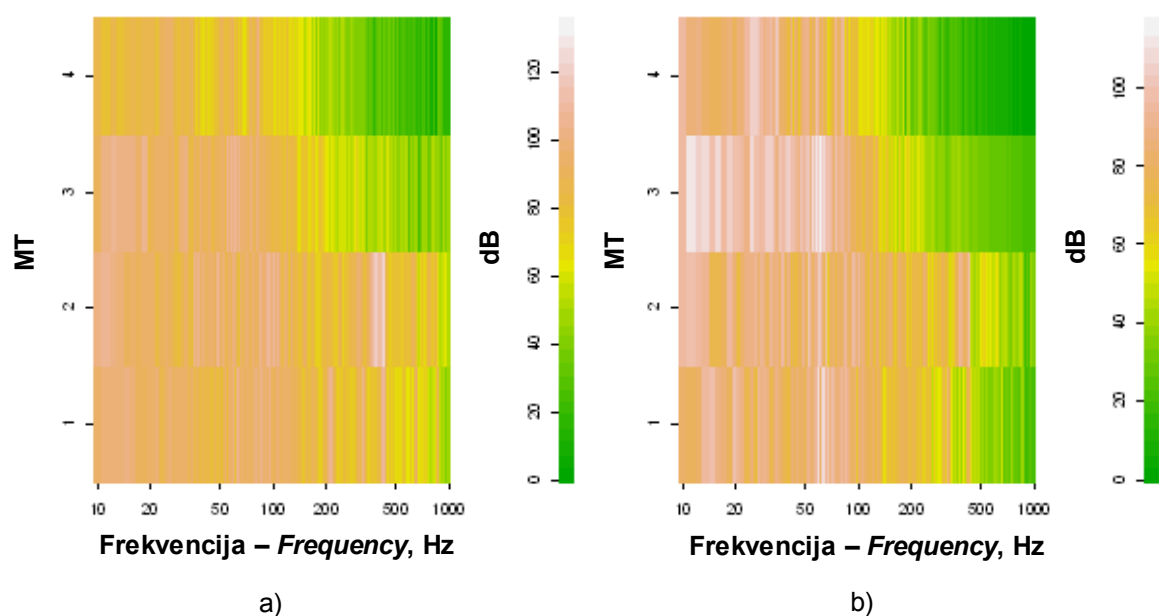
Slika 5.23. Prikaz rezultata frekvencijske analize karakterističnog signala vibracija koje se prenose s ručke motorne pile lančanice pri radu s RUK#3: a) nevrednovane i b) vrednovane razine vibracija



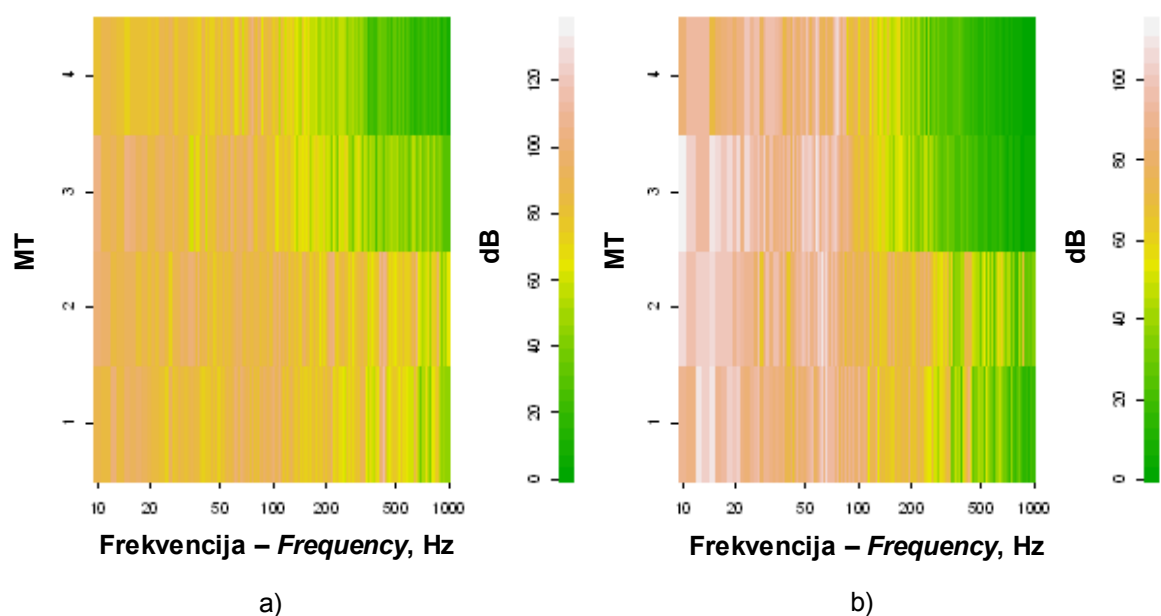
Slika 5.24. Prikaz rezultata frekvencijske analize karakterističnog signala vibracija koje se prenose s ručke motorne pile lančanice pri radu s RUK#4: a) nevrednovane i b) vrednovane razine vibracija



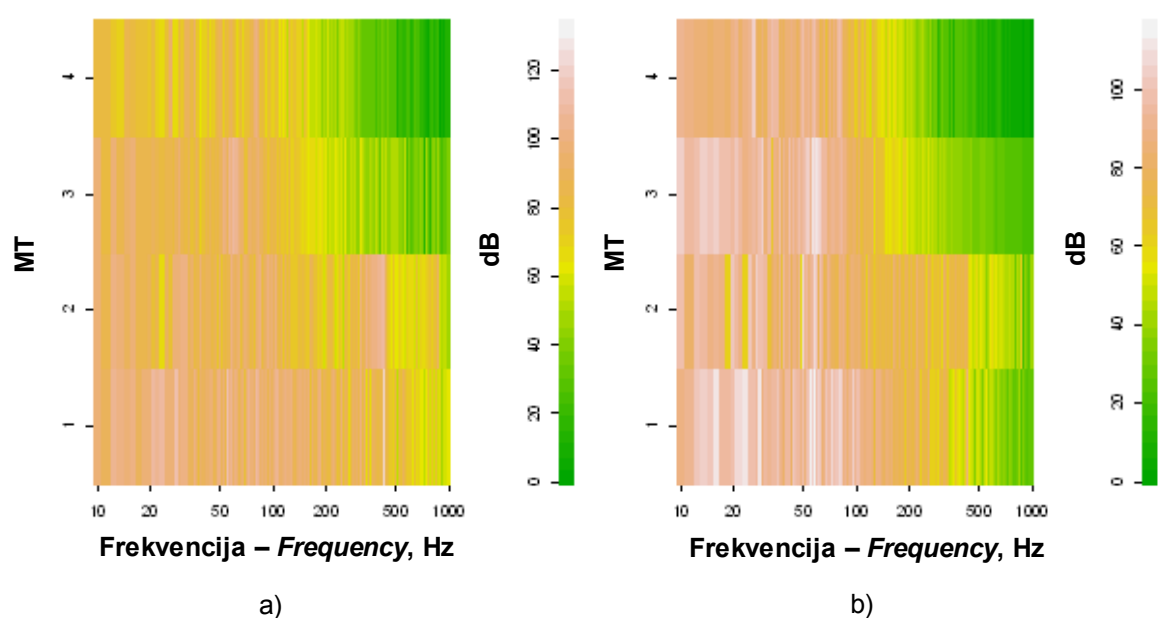
Slika 5.25. Prikaz rezultata frekvencijske analize karakterističnog signala vibracija koje se prenose s ručke motorne pile lančanice pri radu s RUK#5: a) nevrednovane i b) vrednovane razine vibracija



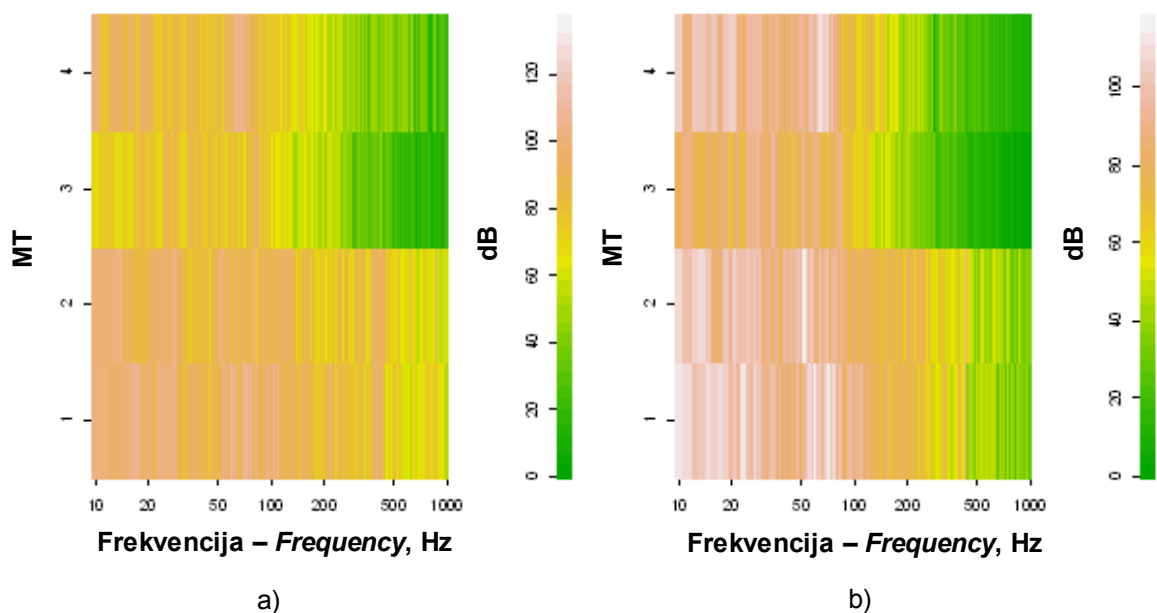
Slika 5.26. Prikaz rezultata frekvencijske analize karakterističnog signala vibracija koje se prenose s ručke motorne pile lančanice pri radu s RUK#6: a) nevrednovane i b) vrednovane razine vibracija



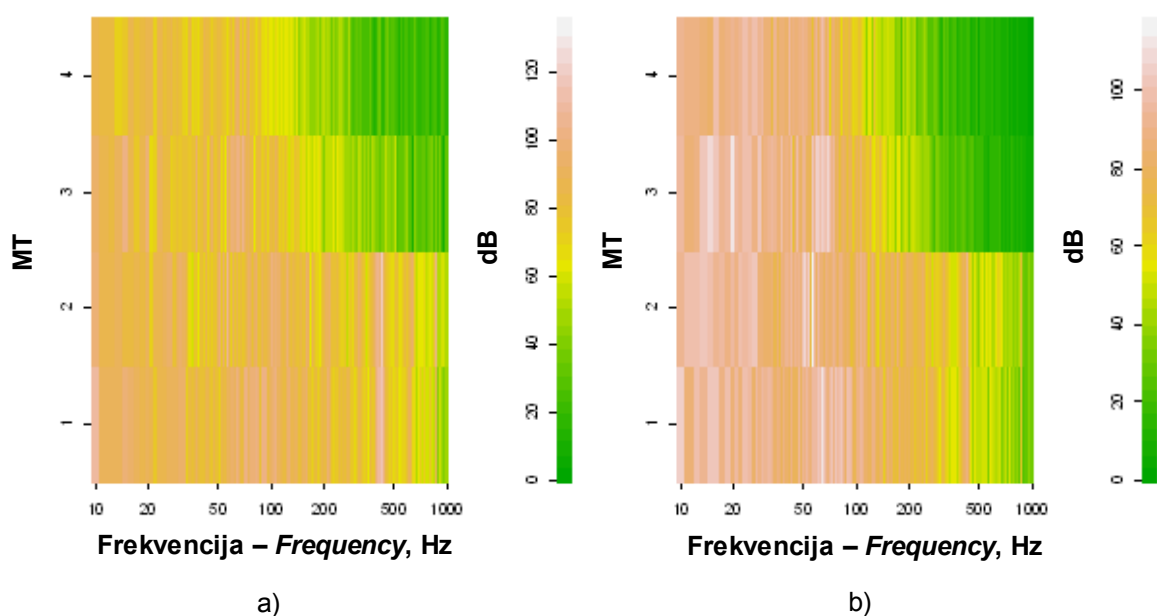
Slika 5.27. Prikaz rezultata frekvencijske analize karakterističnog signala vibracija koje se prenose s ručke motorne pile lančanice pri radu s RUK#7: a) nevrednovane i b) vrednovane razine vibracija



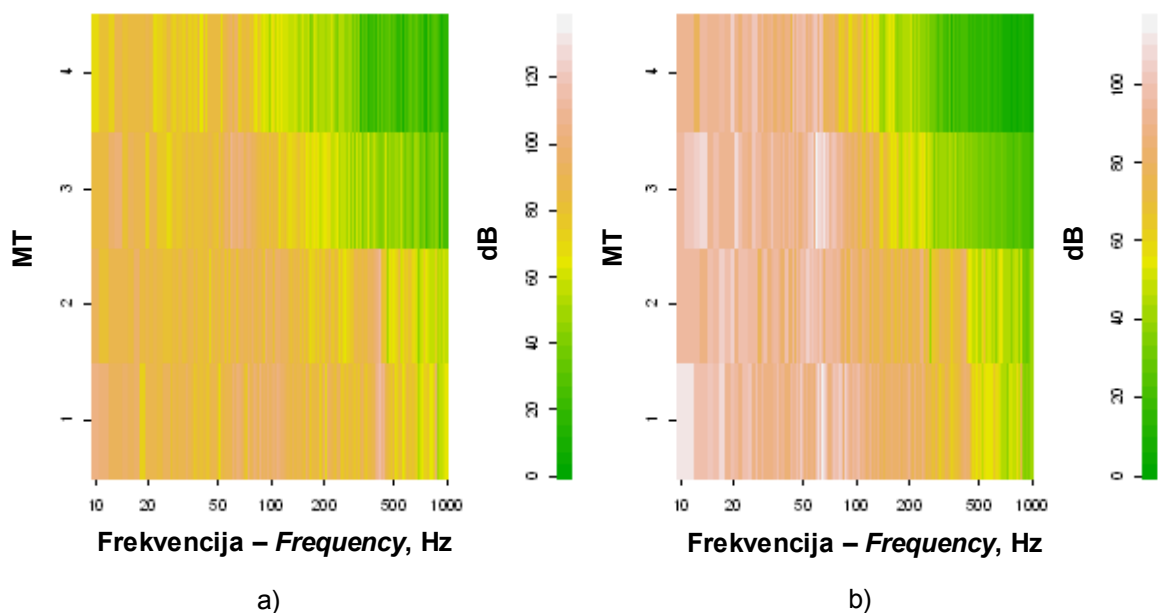
Slika 5.28. Prikaz rezultata frekvencijske analize karakterističnog signala vibracija koje se prenose s ručke motorne pile lančanice pri radu s RUK#8: a) nevrednovane i b) vrednovane razine vibracija



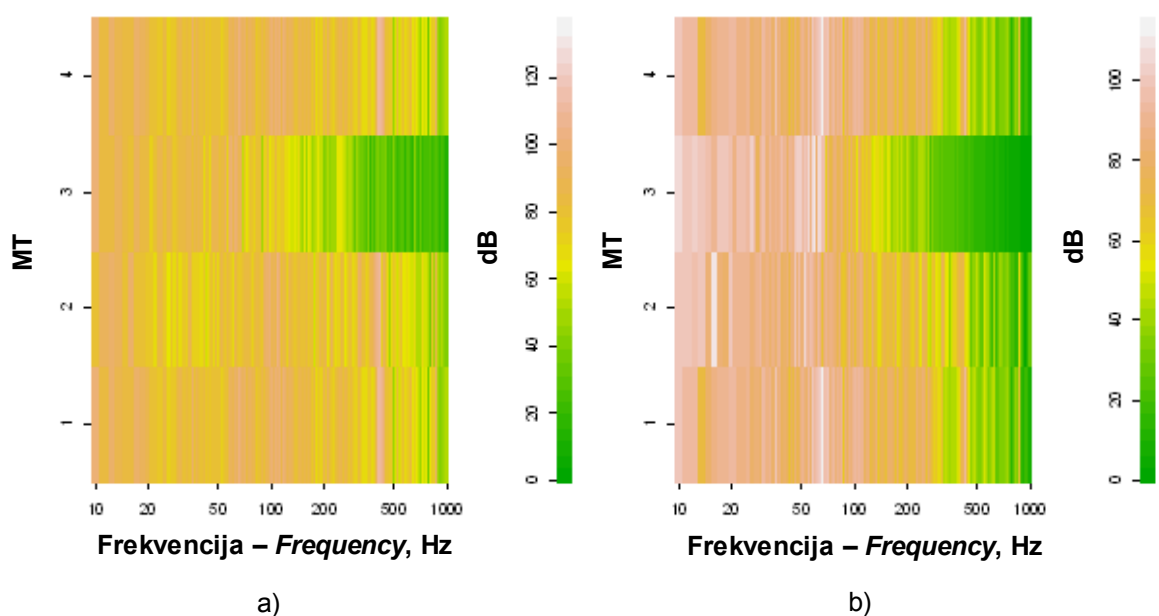
Slika 5.29. Prikaz rezultata frekvencijske analize karakterističnog signala vibracija koje se prenose s ručke motorne pile lančanice pri radu s RUK#9: a) nevrednovane i b) vrednovane razine vibracija



Slika 5.30. Prikaz rezultata frekvencijske analize karakterističnog signala vibracija koje se prenose s ručke motorne pile lančanice pri radu s RUK#10: a) nevrednovane i b) vrednovane razine vibracija



Slika 5.31. Prikaz rezultata frekvencijske analize karakterističnog signala vibracija koje se prenose s ručke motorne pile lančanice pri radu s RUK#11: a) nevrednovane i b) vrednovane razine vibracija



Slika 5.32. Prikaz rezultata frekvencijske analize karakterističnog signala vibracija koje se prenose s ručke motorne pile lančanice pri radu s RUK#12: a) nevrednovane i b) vrednovane razine vibracija

Iz prikazanih grafova jasno se može vidjeti da je najznačajnija visokofrekventna komponenta vibracijskog signala prisutna pri radu s najvećim brojem okretaja motora i pri rezanju te da se taj dio frekvencijskog spektra gotovo sasvim disipira u prstima i šaci. Prigušenja rukavica su u tom dijelu spektra efikasna. Za niže frekvencije, do 50-100 Hz, koje lakše prolaze do ostalih dijelova ruke i tijela i koje su glavni uzročnik poremećaja na zglobovima, također su kod nekih rukavica vibracije prigušene u odnosu na rad bez njih.

Kod frekvencijske analize vrednovanih razina ubrzanja može se vidjeti da je najveći doprinos ukupnim razinama vibracija onaj pri radu motorne pile lančanice s najmanjim brojem okretaja motora. Vibracije u tom dijelu frekvencijskog spektra bez većih poteškoća prodiru do daljnjih dijelova ruke i tijela gdje se apsorbiraju. Jasno se može vidjeti da nema većeg prigušenja dominantne frekvencijske komponente koja bez prigušenja prolazi do MT4 te da ovdje rukavice nemaju nekog većeg utjecaja. Moglo bi se zaključiti da u ovom dijelu frekvencijskog spektra rukavice ipak ne obavljaju svoju prigušnu funkciju kako se to može zaključiti iz prethodno provedene analize.

Na temelju dobivenih vrijednosti vibracijskog prijenosnog faktora te kao moguća efikasna zaštita od pojave VWF-a (prigušenje viših frekvencija) rukavice koje prođu ispitivanje prema HRN EN ISO 1089:1996(E)^I, pogotovo ako nemaju značajnijeg pojačanja vibracija pri niskim frekvencijama, mogle bi biti efikasna mjera u sklopu programa smanjivanja vibracija koje se prenose na ruke pri radu s motornim pilama lančanicama.

I Prvi citat na strani 17.

6. ZAKLJUČAK

Sukladno ciljevima koji su postavljeni pred istraživanja i prema planu istraživanja, iznose se zaključna razmišljanja.

U radu je obuhvaćen utjecaj reprezentativne skupine prigušnih materijala za antivibracijske rukavice na prigušenje vibracija koje se pri radu prenose s ručke motorne pile lančanice STIHL MS650. Rezultati mjerenja prigušnih svojstava rukavica s obzirom na vibracije koje se prenose pri radu s motornom pilom lančanicom u uvjetima propisanim normom HRN EN ISO 7505-1986 (E): Forestry machinery – Chain saws – Measurement of hand-transmitted vibration upućuju na sljedeće zaključke:

Sve ispitivane rukavice, koje se mogu uzeti kao reprezentativni uzorak antivibracijskih rukavica za hrvatsko tržište, pokazale su prigušenje ukupne razine vibracija vrednovanih prema normi HRN EN ISO 5349-1:2001(E): Mechanical vibration – Measurement and evaluation of human exposure to hand-transmitted vibration. Rukavice su pokazale i prigušenje ukupne razine (nevrednovanih) vibracija koje se prenose s ručke motorne pile lančanice. Ovdje treba uzeti u obzir da je veći broj ispitivanih rukavica pokazao pojačanje vibracija tijekom režima rezanja, čemu je najvjerojatniji uzrok promjena mehaničke impedancije između prstiju i prigušnog materijala rukavica uslijed promjene pritisne sile na ručku s obzirom na to da su pri radu s najvećim brojem okretaja motora, koji ima isti frekvencijski spektar i više razine vibracija, sve rukavice pokazale prigušna svojstva.

Upotrebljena je TEAT metoda ocjenjivanja prigušne sposobnosti antivibracijskih rukavica koja zahtijeva istovremeno mjerenje ubrzanja u sve tri osi s ciljem smanjenja nesigurnosti mjernog rezultata radi pomicanja adaptera s akcelerometrom. To je posebno značajno tijekom mjerenja koja se ne provode u strogo kontroliranim (laboratorijskim) uvjetima. Metoda je primijenjena i na vrednovane i na nevrednovane razine vibracija, pri čemu su dobivene različite prigušne sposobnosti antivibracijskih rukavica. Kao ukupna ocjena prigušne sposobnosti rukavica uzeti su rezultati i jednih i drugih izračuna.

Najbolje rukavice, koje su pokazale i najbolje prigušenje u obje metode

ocjenjivanja, bile su rukavice pod oznakom RUK#12. To su bile rukavice s prigušnim materijalom pod trgovačkim nazivom AntiVib™. Interesantno je primijetiti da su i rukavice pod oznakom RUK#11 imale isti prigušni materijal, ali su pokazale lošije prigušenje. Uzrok takvom rezultatu je najvjerojatnije u subjektivnom doživljaju rukovatelja, čime je on utjecao na pritisnu silu na ručku motorne pile lančаницe, a samim time i na mehaničku impedanciju.

Sukladno iznesenom, može se zaključiti da bi od izuzetnog značaja za poboljšanje usporedivosti i ponovljivosti mjerenja prigušnih svojstava antivibracijskih rukavica, ali i vibracija pri radu s motornim pilama lančanicama u stvarnim uvjetima rada bilo od izuzetne koristi i istovremeno mjerenje pritisne sile na ručku motorne pile lančаницe.

Sukladno prijašnjim iskustvima i očekivanjima, pokazalo se da same antivibracijske rukavice ne mogu pružiti adekvatnu zaštitu od vibracija koje se prenose s ručke motorne pile lančаницe za osmosatno dnevno izlaganje vibracijama, ali uz odgovarajuću organizaciju rada mogu produžiti vrijeme izloženosti vibracijama kako bi se zadovoljili zahtjevi od strane direktive 2002/44/EC – *On the Minimum Health and Safety Requirements Regarding the Exposure of Workers to the Risks Arising from Physical Agents: Vibration*.

Rezultati mjerenja prolaska vibracija kroz ruku pri radu sa i bez antivibracijskih rukavica pokazali su, sukladno očekivanjima, da se veći dio vibracija apsorbira u prstima i šaci, i to uglavnom vibracije više frekvencije.

Za veći broj rukavica može se primijetiti da u točki MT3 (zglob ruke) dolazi čak i do pojačanja vibracija pri radu motorne pile lančаницe s najmanjim brojem okretaja motora. To pojačanje može se pripisati rezonanciji sustava šake ako se uzmu u obzir rezultati modela prema Dong i dr. (2008.)^I, gdje je prva rezonantna frekvencija modela u blizini izražene osnovne frekvencije pobude s ručke motorne pile lančаницe. Prema tome, metoda mjerenja prenosivosti vibracija na zglobov ruke, kako to predlažu Dong i dr. (2003.)^{II}, ne bi bila pogodna kao ocjenska metoda prigušne sposobnosti antivibracijskih rukavica pri radu s motornim pilama lančanicama.

Na temelju frekvencijske analize mogu se jasnije vidjeti prigušenja pojedinih

I Prvi citat na strani 39.

II Prvi citat na strani 29.

dijelova frekvencijskog spektra vibracija kroz ruku.

Rezultati provedenih istraživanja upućuju na to da bi se podaci za vibracijski prijenosni faktor dobiveni prema HRN EN ISO 10819:2000 (E), koji služe za klasificiranje antivibracijskih rukavica u laboratorijskim uvjetima, mogli upotrijebiti za određivanje prigušne sposobnosti vibracija ispitanih rukavica u stvarnim uvjetima rada. To je u skladu i s rezultatima istraživanja koje su proveli Pinto i dr. (2001.)^I, s time da su oni provodili mjerenja vibracija na dlanu, a ne na prstima.

Iako antivibracijske rukavice za sada u većini slučajeva pri profesionalnom osmosatnom radu s motornim pilama lančanicama ne mogu pružiti zahtijevanu razinu zaštite, mogu produžiti dozvoljeno vrijeme izlaganja danim razinama vibracija.

U ovom radu obuhvaćen je utjecaj prigušnog materijala antivibracijskih rukavica kao jednog od najbitnijih čimbenika na prigušnu sposobnost vibracija koje se prenose s ručki motornih pila lančanica. Na temelju dobivenih rezultata i spoznaja mišljenja smo da bi buduća istraživanja trebalo usmjeriti na sljedeće:

- Zbog očitog utjecaja pritiskne sile na ručku motorne pile lančanice od izuzetnog bi značaja bilo uvesti i po potrebi usavršiti istovremeno mjerenje pritiskne sile na ručku pile i vibracija u sve tri osi. Time bi se zasigurno povećala ponovljivost i usporedivost mjerenja u stvarnim uvjetima rada.
- Kvantifikacija utjecaja radnika na varijabilnost rezultata mjerenja prigušnih svojstava antivibracijskih rukavica u stvarnim uvjetima rada.
- Utjecaj razine vibracija, odnosno različitih tipova motornih pila lančanica na prigušnu sposobnost antivibracijskih rukavica.
- Utjecaj subjektivnog doživljaja radnika naspram mjerenjima objektivno dobivenih podataka kao mogućeg dodatnog ocjenskog faktora u procjeni prigušne sposobnosti antivibracijskih rukavica pri radu s motornim pilama lančanicama.
- Usporedba rezultata vibracijskog prijenosnog faktora dobivenog mjerenjima na dlanu i na prstima pri radu s motornom pilom lančanicom u stvarnim uvjetima.

I Prvi citat na strani 21.

7. LITERATURA

1. Aldien, Y.; Marcotte, P.; Rakheja, S.; Boileau, P. E. 2005: Influence of hand-arm posture on biodynamic response of the human hand-arm exposed to z_h -axis vibration. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 36: 45-59.
2. Aldien, Y.; Marcotte, P.; Rakheja, S.; Boileau, P. E. 2006: Influence of hand forces and handle size on power absorption of the human hand-arm exposed to z_h -axis vibration. *Journal of Sound and Vibration*, 290: 1015-1039.
3. Alfirević, I. 1997: Vibracije – Teorijske osnove analize vibracija. Tehnička enciklopedija, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, Zagreb, 13: 462-469.
4. Barnes, R.; Longley, E. O.; Smith, A. R. B.; Allen, J. G. 1969: Vibration disease. *The Medical Journal of Australia*, 5: 901-905.
5. Besa, A. J.; Valero, F. J.; Suñer J. L. Carballeira 2007: Characterisation of the mechanical impedance of the human hand-arm system: The influence of vibration direction, hand-arm posture and muscle tension. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 37: 225-231.
6. Broch, J. T. 1976: Mechanical Vibration and Shock Measurements – Application of B&K Equipment. Brüel & Kjær, Nærum, Denmark.
7. Burström, L. 1994: The influence of individual factors on the absorption of vibration energy in the hand-arm. *Journal of the Low Frequency Noise and Vibration*, 14: 115-122.
8. Burström, L.; Lundström, R., 1994: Absorption of vibration energy in the human hand and arm. *Ergonomics*, 37: 879-890.
9. Brubaker, R. L.; Mackenzie, C. J. G.; Hertzman, C.; Hutton, S. G.; Slakov, J. 1987: Longitudinal study of vibration-induced white finger among coastal fallers in British Columbia. *Scandinavian Journal of Work, Environment and Health*, 13: 305-308.
10. Chadwick, E. K. J.; Nicol, A. C. 2001: A novel force transducer for the measurement of grip force. *Journal of Biomechanics*, 34: 125-128.

11. Dessureault, P. C.; Laperrière, A.; Vincent, J. Y. 1988: The control of chain-saw vibration. *Sound and Vibration*, 22: 32-34.
12. Dong, R. G.; Rakheja, S.; Smutz, W. P.; Schopper, A. W.; Welcome, D. E.; Wu, J. Z. 2002: Effectiveness of a new method (TEAT) to assess vibration transmissibility of gloves. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 30: 33-48.
13. Dong, R. G.; McDowell, T.W.; Welcome, D. E.; Smutz, W. P.; Schopper, A. W.; Warren, C.; Wu, J. Z.; Rakheja, S. 2003: On-the-hand measurement method for assessing effectiveness of anti-vibration gloves. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 22: 283-298.
14. Dong, R. G.; Schopper, A. W.; McDowell, T.W.; Welcome, D. E.; Wu, J. Z.; Smutz, W. P.; Warren, C.; Rakheja, S. 2004: Vibration energy absorption (VEA) in human fingers-hand-arm system. *Medical Engineering & Physics*, 26: 483-492.
15. Dong, R. G.; McDowell, T. W.; Welcome, D. E.; Smutz, W. P. 2005: Correlations between biodynamic characteristics of human hand-arm system and isolation effectiveness of anti-vibration gloves. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 35: 205-216.
16. Dong, R. G.; Rakheja, S.; McDowell, T. W.; Welcome, D. E.; Wu, J. Z.; Warren, C.; Barkley, J.; Washington, B.; Schopper, A. W. 2005: A method for assessing the effectiveness of anti-vibration gloves using biodynamic responses of the hand-arm system. *Journal of Sound and Vibration*, 282: 1101-1118.
17. Dong, R. G.; Welcome, D. E.; Wu, J. Z. 2005: Frequency Weightings Based on Biodynamics of Fingers-Hand-Arm System. *Industrial Health*, 43: 516-526.
18. Dong, R. G.; Welcome, D. E.; McDowell, T. W.; Wu, J. Z. 2006: Measurement of biodynamic response of human hand-arm system. *Journal of Sound and Vibration*, 294: 807-827.
19. Dong, R. G.; Welcome, D. E.; McDowell, T. W.; Wu, J. Z.; Schopper, A. W. 2006: Frequency weighting derived from power absorption of fingers-hand-arm system under z_h -axis vibration. *Journal of Biomechanics*, 39: 2311-2324.
20. Dong, J. H.; Dong, R. G.; Rakheja, S.; Welcome, D. E.; McDowell, T. W.; Wu, J.

- Z. 2008: A method for analyzing absorbed power distribution in the hand and arm substructures when operating vibrating tools. *Journal of Sound and Vibration*, 311: 1286-1304.
21. Døssing, O. 1988: *Structural Testing I – Mechanical Mobility Measurements*. Brüel & Kjær, Nærum, Denmark.
22. Goglia, V. 1994: Osigurava li ISO 7505 mjernu ponovljivost. *Mehanizacija šumarstva*, 19: 39-45.
23. Goglia, V. 1995: Parameters Influencing the Vibration Level of the Motor Chain Saws. Invited Paper, IUFRO XX. World Congress. Tampere.
24. Goglia V. 1996: Neki utjecajni parametri na razinu vibracija motornih pila lančanica. *Šumarski list*, 3-4: 187-194.
25. Goglia, V.; Grbac, I. 2005: Whole-body vibration transmitted to the framesaw operator. *Applied Ergonomics*, 36: 43-48.
26. Goglia, V.; Grbac, I.; Đukić, I. 2005: Human Vibration Transmitted to the Framesaw Operator. IUFRO XXIIth World Congress, Brisbane, Australia.
27. Goglia, V.; Đukić, I. 2006: Measurement and evaluation of the vibration transmissibility of gloves. 5. Medzinárodná vedecká konferencia – Trieskové a beztrieskové obrábanie dreva. Tatry, Slovakia: 135-143.
28. Goglia, V.; Žgela, J.; Đukić, I. 2008: Učinkovitost antivibracijskih rukavica – I dio. *Šumarski list*, 3-4: 115-119.
29. Goglia, V.; Žgela, J.; Đukić, I. 2008: Učinkovitost antivibracijskih rukavica – II dio. *Šumarski list*, 5-6: 239-244.
30. Griffin, M. J. 1982: The effects of vibration on health. Memorandum No. 632, Institute of Sound and Vibration Research, University of Southampton.
31. Griffin, M. J. 1996: *Handbook of Human Vibration*. Academic press, London.
32. Griffin, M. J. 1998: Evaluating the effectiveness of gloves in reducing the hazards of hand-transmitted vibration. *Occup. Environ. Med.*, 55:340-348.
33. Griffin, M. J.; Macfarlane, C. R.; Norman, C. D. 1982: The transmission of vibration to the hand and the influence of gloves. *Vibration Effects on the Hand and Arm in Industry*, Wiley, New York.

34. Hamilton, A. 1918: A Study of Spastic Anemia in the Hands of Stonecutters. U.S. Bureau of Labor Statistics, Publication #236, Industrial Accidents and Hygiene Series, No. 191, U.S. Government Printing Office, Washington D.C.
35. Hartog Den, J. P. 1972: Vibracije u mašinstvu. Građevinska knjiga, Beograd.
36. Hewitt, S. 1998: Assessing the Performance of Anti-vibration Gloves: A Possible Alternative to ISO 10819:1996, Ann. iiceup. Wry., 42 (4): 245-252.
37. Huzl, F.; Stolarik, R.; Mainerova, J.; Jankova, J.; Sykora, J. 1961: Noxious action of vibrations and noise on work with hand motor saws. Pracovni Lekarstvi, 13: 505-510.
38. Inaba, R.; Mirbod, S.M.; Komura, Y.; Yoshida, H.; Nagata, C.; Miyashita, K.; Fujita, S.; Iwata, H. 1993: A vibration-dose limit for Japanese workers exposed to hand-arm vibration. Proceedings of the 6th International Conference on Hand-Arm Vibration. BIA, Sankt Augustin, 913-918.
39. Jeras, D.; Mahalec, I.; Mikuličić, M. 1984: Motori s unutrašnjim izgaranjem. Tehnička enciklopedija, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 9: 1-57.
40. Jetzer, T.; Haydon, P.; Reynolds, D. 2003: Effective intervention with ergonomics, antivibration gloves and medical surveillance to minimize hand-arm vibration hazards in the workplace. Journal of Occupational and Environmental Medicine, 45 (12):1312-1317.
41. Lidström, I. M. 1977: Vibration injury in rock drillers, chislers and grinders – Some views on the relationship between the quantity of energy absorbed and the risk of occurrence of vibration injury. Proceedings of the International Occupational Hand-Arm Vibration Conference, NIOSH, Cincinnati, 77-83.
42. Marcotte, P.; Aldien, Y.; Boileau, P. E.; Rakheja, S.; Boutin, J. 2005: Effect of handle size and handle-handle contact force on the biodynamic response of the hand-arm system under z_h-axis vibration. Journal of Sound and Vibration, 283: 1071-1091.
43. Matsumoto, T.; Yamada, S.; Hisanaga, N.; Harada, N.; Kaneda, K. 1977: On vibrational hazards in rock-drill operators of a metal mine. Japanese Journal of Industrial Health, 19: 256-265.
44. McDowell, T. W.; Wiker, S. F.; Dong, R. G.; Welcome, D. E. 2007: Effects of vibration on grip and push force-recall performance. International Journal of Industrial Ergonomics, 37: 257-266.

45. Miura, T.; Kimura, K.; Tominaga, Y.; Kimotsuki, K. 1966: On the Raynaud's phenomenon of occupational origin due to vibrating tools – its incidence in Japan. Report of the Institute for the Science of Labour, No. 65, Japan.
46. Miyashita, K.; Shiomi, S.; Itoh, N.; Kasamatsu, T.; Iwata, H. 1983: Epidemiological study of vibration syndrome in response to total hand-tool operating time. *British Journal of Industrial Medicine*, 40: 92-98.
47. Pelmear, P. L.; Wasserman, D. E. 1998: *Hand-Arm Vibration: A Comprehensive Guide for Occupational Health Professionals*. 2nd Edition, OEM Medical Press, Beverly Farms, Mass.
48. Peterson, D. R.; Brammer, A. J.; Cherniak, M. G. 2007: Exposure monitoring system for day-long vibration and palm force measurements. *International Journal of Industrial Ergonomics*, doi:10.1016/j.ergon.2007.10.019.
49. Pinto, I.; Stacchini, N.; Bovenzi, M.; Paddan, G.S.; Griffin, M.J. 2001: Protection effectiveness of anti-vibration gloves: field evaluation and laboratory performance assessment. Appendix H4C to Final Report, Biomed 2 project no. BMH4-CT98-3251, Vibration Injury Network.
50. Pitts, P. 2004: Hand-arm vibration emission of chainsaws – comparison with vibration exposure. Health and Safety Laboratory, Derbyshire, UK.
51. Pyykkö, I.; Korhonen, O.; Färkkilä, M.; Starck, J.; Aatola, S.; Jäntti, V. 1986: Vibration syndrome among Finnish forest workers, a follow-up from 1972 to 1983. *Scandinavian Journal of Work, Environment and Health*, 12: 395-399.
52. Rakheja, S.; Dong, R.; Welcome, D.; Schopper, A. W. 2002: Estimation of tool-specific isolation performance of antivibration gloves. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 30: 71-87.
53. Rakheja, S.; Wu, J. Z.; Dong, R. G.; Schopper, A. W. 2002: A comparison of biodynamic models of the human hand-arm system for applications to hand-held tools. *Journal of Sound and Vibration* 249(1): 55-82.
54. Randall, R. B. 1977: *Frequency Analysis – Application of B&K Equipment*. Brüel & Kjær, Nærum, Denmark.
55. Reynolds, D. D.; Jetzer, T. 1998: Use of Air Bladder Technology to Solve Hand Tool Vibration Problems. Proceedings of the 8th International Conference on Hand-Arm Vibration, Umea, Sweden.
56. Reynolds, D. D.; Wolf, E. 2005: Evaluation of Antivibration Glove Test Protocols

- Associated with the Revision of ISO 10819. *Industrial Health*, 43: 556-565.
57. Schulz, R. 1976: *Motorsägen arbeit*. VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag, Berlin.
 58. Sever, S. 1992: Šumarski strojevi. Tehnička enciklopedija svezak 12, Leksikografski zavod "Miroslav Krleža", Zagreb.
 59. Shibata, N.; Maeda, S. 2007: Effect of tool handle diameter on temporary threshold shift (TTS) of vibrotactile perception. *International Journal of Industrial Ergonomics*, doi:10.1016/j.ergon.2007.10.006.
 60. Silva De, C. W. 2000: *Vibration – Fundamentals and Practice*. Boca Raton, CRC Press LLC.
 61. Smutz, W. P.; Dong, R. G.; Schopper, A. W. : A Study of Tissue Vibration Transmissibility Using a Scanning Laser Vibrometer. NIOSH, Morgantown, USA.
 62. Stewart, A. M.; Goda, D. F. 1970: Vibration syndrome. *British Journal of Industrial Medicine*, 27: 19-27.
 63. Takagi, S. 1968: Raynaud's phenomenon due to chain saw and chipping machine. *Japanese Circulation Journal* 32: 32-33, 99-110.
 64. Takamatsu, M. 1966: Raynaud's phenomenon among workers using vibratory tools. 15th International Congress: *Medicine du Travail*, A IV-58: 213-216.
 65. Takimoto, Y.; Sasaki, I. 1986: The vibration characteristics of a chainsaw fitted with a two cylinder engine and the measuring method. *Proceedings of the 18th IUFGRO World Congress*, Ljubljana.
 66. Tominaga, Y. 2005: New Frequency Weighting of Hand-Arm Vibration. *Industrial Health*, 43: 509-515.
 67. Welcome, D.; Rakheja, S.; Dong, R.; Wu, J. Z.; Schopper, A. W. 2004: An investigation on the relationship between grip, push and contact forces applied to a tool handle. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 34: 507-518.
 68. Wu, J. Z.; Dong, R.; Rakheja, S.; Schopper, A. W. 2002: Simulation of mechanical responses of fingertip to dynamic loading. *Medical Engineering & Physics*, 24: 253-264.
 69. Wu, J. Z.; Welcome, D. E.; Krajnak, K.; Dong, R. G. 2007: Finite element analysis of the penetrations of shear and normal vibrations into the soft tissues in a fingertip. *Medical Engineering & Physics*, 29: 718-727.

70. **** National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) (1983): Vibration Syndrome. Current Intelligence Bulletin #38, NIOSH Publication #83-110, NIOSHTIC Number 20000268.
71. **** HRN EN ISO 7505-1986 (E): Forestry machinery – Chain saws – Measurement of hand-transmitted vibration.
72. **** Stockholm Workshop 86 (1987): Symptomatology and diagnostic methods in the hand-arm vibration syndrome. Scandinavian Journal of Work, Environment and Health, Vol. 4: 271-388.
73. **** National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) (1989): Occupational Exposure to Hand-Arm Vibration. DHHS (NIOSH) Publication No. 89-106.
74. **** 1999: LabVIEW – Sound nad Vibration Toolset Reference Manual. National Instruments, Texas, USA.
75. **** 2000: LabVIEW – User Manual. National Instruments, Texas, USA.
76. **** 2000: LabVIEW – Measurements Manual. National Instruments, Texas, USA.
77. **** HRN EN ISO 10819:2000(E): Mehaničke vibracije i udari – Vibracije ruke – Metoda mjerenja i ocjenjivanja vibracijskoga prijenosnog faktora rukavica na dlanu ruke.
78. **** HRN EN ISO 5349-1:2001(E): Mechanical vibration – Measurement and evaluation of human exposure to hand-transmitted vibration - Part 1: General requirements.
79. **** HRN EN ISO 5349-1:2001(E): Mechanical vibration – Measurement and evaluation of human exposure to hand-transmitted vibration - Part 2: Practical guidance for measurement at the workplace.
80. **** European Union Directive 2002/44/EC of the European Parliament and the Council 2002: On the Minimum Health and Safety Requirements Regarding the Exposure of Workers to the Risks Arising from Physical Agents: Vibration. 16th Individual Directive Within the Meaning of Article 16(1) of Directive 89/391/EEC, Brussels, Belgium.
81. **** Regulatory Impact Assessment (Full): The Draft Control of Vibration at Work Regulations (2005)
<http://www.havsrn.com/pub/docs/lp/vibrate2005/index.htm>

82. **** 2007: Odluka o Nacionalnoj klasifikaciji djelatnosti 2007. - NKD 2007. Narodne novine, 58.
83. **** Husqvarna – Vibration calculator;
<http://www.husqvarna.co.uk/node2528.aspx>, 2008.
84. **** http://www.stihl.com/vib/english/documents/GB_MS.pdf, 2008.
85. **** Shame of Stockton Council (2009)
<http://www.archerssolicitors.co.uk/contents.asp?id=4&doc=21>
86. **** Chain Saw Vibration, Health and Safety Executive (HSE),
<http://www.hse.gov.uk/lau/lacs/36-1.htm>
87. **** Technical Report CEN/TR 231064: Guideline for the assessment of exposure to hand-transmitted vibration based on information provided by manufacturers of machinery.

POPIS SLIKA I GRAFIKONA

Slika 1.1.	Motorne pile lančанице: a) namijenjena radu s dva radnika i b) današnji tip moderne, lake pile	1
Slika 1.2.	Osnovni dijelovi motorne pile lančанице (Schulz, 1976.)	2
Slika 1.3	Neke od posljedica dugotrajnog izlaganja visokim razinama vibracija koje se sa strojeva prenose na sustav šaka-ruka su: a) gubitak osjeta u prstima i bijeljenje vrhova prstiju, tzv. VWF - Vibration white finger, b) promjene na zglobovima prstiju	6
Slika 1.4.	Shematski prikaz uzročno-posljedičnih veza između pojedinih faktora kod vibracija koje se sa stroja prenose na sustav šaka-ruka (Griffin, 1996.)	8
Slika 1.5.	Shematski prikaz biodinamičkog koordinatnog sustava vezanog za ruku prema ISO 5349	9
Slika 1.6.	Prikaz frekvencijske analize napravljene na signalima vibracija izmjerenih na ručkama motornih pila lančаница iz 1972. godine i na ručkama antivibracijskih motornih pila lančаница iz 1982. godine (Pyykkö i dr., 1986.)	13
Slika 1.7.	Karakteristične vrijednosti ukupnih vrednovanih razina ubrzanja (a_{hv}) prema HRN EN ISO 5349:2001(E) koje se prenose s motornih pila lančаница na ruke radnika (podaci skupljeni mjerenjima na radnim mjestima u razdoblju od 1997. do 2005. godine od strane udruženja HSL - <i>Health and Safety Laboratory</i> i INRS - <i>Institut national de recherche et de sécurité</i>)	14
Slika 1.8.	Dnevna izloženost vibracijama na prednjoj i stražnjoj ručki pri radu s reprezentativnim modelima motornih pila lančаница proizvođača Husqvarna	16
Slika 1.9.	Dnevna izloženost vibracijama na prednjoj i stražnjoj ručki pri radu s reprezentativnim modelima motornih pila lančаница proizvođača STIHL	17
Slika 1.10.	Shematski prikaz mjernog lanca, položaja ispitanika i položaja adaptera za mjerenje vibracija koje se prenose na dlan za ocjenjivanje antivibracijskih rukavica ispitivanjem vibracijskog prijenosnog faktora na dlan ruke prema HRN EN ISO 10819	18
Slika 1.11.	Frekvencijski spektri dani po srednjim frekvencijama pojedinih terci ispitnih signala M i H za ispitivanje vibracijskog prijenosnog faktora rukavica na dlan ruke prema HRN EN ISO 10819: 2000(E)	19
Slika 1.12.	Usporedba vibracijskih prijenosnih faktora pri radu s "antivibracijskim rukavicama" i bez njih. Mjerenja obavljena na rukavicama s 12 mm debelim prigušnim materijalom na šest ispitanika i s prosječnom pritiskom silom od 46 N (Griffin i dr., 1982.)	22
Slika 1.13.	Shematski prikaz (a) i fotografija (b) izvedbe i dijelova ispitne mjerne ručke koja ima bolje dinamičke karakteristike od one	

	predložene u HRN EN ISO 10819 (Dong i dr., 2006.)	24
Slika 1.14.	Prikaz nekih od karakterističnih položaja radnika s motornom pilom lančanicom pri radovima izrade drva gdje se može uočiti stalna promjena položaja ruke, a samim time i pritisne sile na ručku s obzirom na glavne smjerove vibracija koje se prenose s ručke motorne pile lančanice (prema Schulzu, 1976.)	26
Slika 1.15.	Prikaz karakterističnih položaja radnika s motornom pilom lančanicom pri sječi drva	26
Slika 2.1.	Shematski prikaz klipnog mehanizma s ucrtanim bitnim elementima za analizu sila i vibracija koje se javljaju pri radu	34
Slika 2.2.	Dijagram tangencijalnih sila u dvotaktnom motoru (Jeras i dr., 1984.)	36
Slika 2.3.	Prikaz frekvencijskih spektara vibracija koje se prenose na ručku pri karakterističnim režimima rada motorne pile lančanice: a) frekvencijski spektar vibracija pri radu motorne pile lančanice u praznom hodu pri najmanjem broju okretaja motora, b) frekvencijski spektar vibracija pri radu motorne pile lančanice kod najvećeg broja okretaja motora, c) frekvencijski spektar vibracija pri nazivnom opterećenju motora tijekom operacije rezanja i d) karakteristični frekvencijski spektar vibracija motorne pile lančanice (dobiven na temelju vremenskog signala vibracija dobivenog superponiranjem vremenskih signala dobivenih pri karakterističnim režimima rada motorne pile lančanice)	38
Slika 2.4.	Prikaz elemenata modela prstiju i ruke s četiri stupnja slobode koji je pokazuje dobra slaganja s eksperimentalnim podacima (Dong i dr., 2008.)	41
Slika 2.5.	Pojednostavljeni model s jednim stupnjem slobode kontakta ruke i antivibracijske rukavice (Dong i dr., 2005.)	44
Slika 3.1.	Ovisnost prenosivosti vibracija na dlan ruke o srednjim frekvencijama terci za neke od najznačajnijih prigušnih materijala koji se koriste u rukavicama (rezultati dobiveni na temelju mjerenja prema preporukama norme ISO 10819)	48
Slika 4.1.	Položaj rukovatelja motornom pilom lančanicom pri mjerenju vibracija koje se prenose s ručke pile na sustav šaka-ruka prema preporukama ISO 7505-1986 (E): <i>Forestry machinery – Chain saws – Measurement of hand-transmitted vibration</i>	50
Slika 4.2.	Položaj troosnog akcelometra pripremljenog za mjerenje: a) akcelometar pričvršćen na aluminijski nosač i b) prihvat nosača i akcelometra tijekom mjerenja	51
Slika 4.3.	Prihvat nosača i akcelometra za potrebe mjerenja prigušnih svojstava rukavica, gdje je nosač akcelometra smješten između prigušnog materijala i prstij	54
Slika 4.4.	Pričvršćivanje nosača i akcelometra na površinu ruke	54
Slika 4.5.	Prikaz načina pričvršćivanja akcelometra i aluminijskog nosača pomoću trake na mjerne točke: a) na ruci - MT2, b) na	

	zglobu ruke - MT3 i c) na laktu - MT4	55
Slika 4.6.	Prikaz vremenskog signala za sva tri kanala vibracija kod jednog uzorka koji je tipičan za mjerenje vibracija na motornoj pili lančanicu pri najmanjem broju okretaja motora	57
Slika 4.7.	Bodeov dijagram prijenosne funkcije filtra za vrednovanje vibracija koje se prenose na ruke ($H_{bw}(s)$)	59
Slika 4.8.	Prijenosna funkcija konstruiranog digitalnog filtra za vrednovanje vibracija koje se prenose na ruke prema HRN EN ISO 5349-1	62
Slika 5.1.	Prikaz tipičnog mjernog signala nevrednovanih vibracija na ručki motorne pile lančаницe u sve tri osi pri najvećem broju okretaja motora	63
Slika 5.2.	Prikaz tipičnog oblika vremenskog signala vrednovanih razina vibracija u sve tri osi tijekom rada motorne pile lančаницe pri najvećem broju okretaja motora	64
Slika 5.3.	Prikaz tipičnog vremenskog signala vektorskog zbroja nevrednovanih (a_v) i vrednovanih razina ubrzanja (a_{hv}) koje se prenose s ručke motorne pile lančаницe pri najvećem broju okretaja motora	65
Slika 5.4.	<i>Box-plot</i> ukupnih vrednovanih (a_{hv}) i nevrednovanih razina vibracija (a_v) pri svim režimima rada i u svim mjernim točkama za rad bez rukavica	66
Slika 5.5.	<i>Box-plot</i> ukupnih vrednovanih (a_{hv}) i nevrednovanih razina vibracija (a_v) pri svim režimima rada i u svim mjernim točkama za rad s RUK#1	67
Slika 5.6.	<i>Box-plot</i> ukupnih vrednovanih (a_{hv}) i nevrednovanih razina vibracija (a_v) pri svim režimima rada i u svim mjernim točkama za rad s RUK#2	68
Slika 5.7.	<i>Box-plot</i> ukupnih vrednovanih (a_{hv}) i nevrednovanih razina vibracija (a_v) pri svim režimima rada i u svim mjernim točkama za rad s RUK#3	69
Slika 5.8.	<i>Box-plot</i> ukupnih vrednovanih (a_{hv}) i nevrednovanih razina vibracija (a_v) pri svim režimima rada i u svim mjernim točkama za rad s RUK#4	70
Slika 5.9.	<i>Box-plot</i> ukupnih vrednovanih (a_{hv}) i nevrednovanih razina vibracija (a_v) pri svim režimima rada i u svim mjernim točkama za rad s RUK#5	71
Slika 5.10.	<i>Box-plot</i> ukupnih vrednovanih (a_{hv}) i nevrednovanih razina vibracija (a_v) pri svim režimima rada i u svim mjernim točkama za rad s RUK#6	72
Slika 5.11.	<i>Box-plot</i> ukupnih vrednovanih (a_{hv}) i nevrednovanih razina vibracija (a_v) pri svim režimima rada i u svim mjernim točkama za rad s RUK#7	73
Slika 5.12.	<i>Box-plot</i> ukupnih vrednovanih (a_{hv}) i nevrednovanih razina	

	vibracija (a_v) pri svim režimima rada i u svim mjernim točkama za rad s RUK#8	74
Slika 5.13.	<i>Box-plot</i> ukupnih vrednovanih (a_{hv}) i nevrednovanih razina vibracija (a_v) pri svim režimima rada i u svim mjernim točkama za rad s RUK#9	75
Slika 5.14.	<i>Box-plot</i> ukupnih vrednovanih (a_{hv}) i nevrednovanih razina vibracija (a_v) pri svim režimima rada i u svim mjernim točkama za rad s RUK#10	76
Slika 5.15.	<i>Box-plot</i> ukupnih vrednovanih (a_{hv}) i nevrednovanih razina vibracija (a_v) pri svim režimima rada i u svim mjernim točkama za rad s RUK#11	77
Slika 5.16.	<i>Box-plot</i> ukupnih vrednovanih (a_{hv}) i nevrednovanih razina vibracija (a_v) pri svim režimima rada i u svim mjernim točkama za rad s RUK#12	78
Slika 5.17.	Prikaz ukupnih vrednovanih razina vibracija (a_{hv}) za mjerenja u svim režimima rada sa i bez rukavica na prstima (MT1) radi procjene prigušnih svojstava rukavica	80
Slika 5.18.	Prikaz ukupnih razina vibracija (a_v) za mjerenja u svim režimima rada sa i bez rukavica na prstima (MT1) radi procjene prigušnih svojstava rukavica	81
Slika 5.19.	Ukupna dnevna izloženost vibracijama $A(8)$ pri radu s danom motornom pilom lančanicom i ispitivanim tipovima antivibracijskih rukavica	86
Slika 5.20.	Prikaz rezultata frekvencijske analize karakterističnog signala vibracija koje se prenose s ručke motorne pile lančanice pri radu bez rukavica: a) nevrednovane i b) vrednovane razine vibracija	88
Slika 5.21.	Prikaz rezultata frekvencijske analize karakterističnog signala vibracija koje se prenose s ručke motorne pile lančanice pri radu s RUK#1: a) nevrednovane i b) vrednovane razine vibracija	89
Slika 5.22.	Prikaz rezultata frekvencijske analize karakterističnog signala vibracija koje se prenose s ručke motorne pile lančanice pri radu s RUK#2: a) nevrednovane i b) vrednovane razine vibracija	89
Slika 5.23.	Prikaz rezultata frekvencijske analize karakterističnog signala vibracija koje se prenose s ručke motorne pile lančanice pri radu s RUK#3: a) nevrednovane i b) vrednovane razine vibracija	90
Slika 5.24.	Prikaz rezultata frekvencijske analize karakterističnog signala vibracija koje se prenose s ručke motorne pile lančanice pri radu s RUK#4: a) nevrednovane i b) vrednovane razine vibracija	90
Slika 5.25.	Prikaz rezultata frekvencijske analize karakterističnog signala vibracija koje se prenose s ručke motorne pile lančanice pri radu s RUK#5: a) nevrednovane i b) vrednovane razine vibracija	91

Slika 5.26.	Prikaz rezultata frekvencijske analize karakterističnog signala vibracija koje se prenose s ručke motorne pile lančanice pri radu s RUK#6: a) nevrednovane i b) vrednovane razine vibracija	91
Slika 5.27.	Prikaz rezultata frekvencijske analize karakterističnog signala vibracija koje se prenose s ručke motorne pile lančanice pri radu s RUK#7: a) nevrednovane i b) vrednovane razine vibracija	92
Slika 5.28.	Prikaz rezultata frekvencijske analize karakterističnog signala vibracija koje se prenose s ručke motorne pile lančanice pri radu s RUK#8: a) nevrednovane i b) vrednovane razine vibracija	92
Slika 5.29.	Prikaz rezultata frekvencijske analize karakterističnog signala vibracija koje se prenose s ručke motorne pile lančanice pri radu s RUK#9: a) nevrednovane i b) vrednovane razine vibracija	93
Slika 5.30.	Prikaz rezultata frekvencijske analize karakterističnog signala vibracija koje se prenose s ručke motorne pile lančanice pri radu s RUK#10: a) nevrednovane i b) vrednovane razine vibracija	93
Slika 5.31.	Prikaz rezultata frekvencijske analize karakterističnog signala vibracija koje se prenose s ručke motorne pile lančanice pri radu s RUK#11: a) nevrednovane i b) vrednovane razine vibracija	94
Slika 5.32.	Prikaz rezultata frekvencijske analize karakterističnog signala vibracija koje se prenose s ručke motorne pile lančanice pri radu s RUK#12: a) nevrednovane i b) vrednovane razine vibracija	94

POPIS TABLICA

Tablica 1.1.	Pet grupa poremećaja povezanih s utjecajem vibracija koje se prenose na sustav šaka-ruka (Griffin, 1982. i HRN EN ISO 5349-1:2001(E) - Annex B)	4
Tablica 1.2.	Stadiji živčano-osjetilnih promjena u perifernom živčanom sustavu kod HAVS-a (prema Stockholm Workshop skali, 1987.)	4
Tablica 1.3.	Ljestvica znakova i simptoma pojave bijeljenja prstiju (VWF) kao jedne, odnosno najčešće komponente HAVS-a prema raširenosti, učestalosti i jačini simptoma, kao posljedice reverzibilnih ili ireverzibilnih promjena nastalih u krvožilnom sustavu šake i prstiju ruke	5
Tablica 1.4.	Udio radnika iz grupe djelatnosti poljoprivrede, lova i šumarstva (grupa A prema NKD) s dijagnosticiranim slučajevima vibracijskog sindroma s obzirom na ukupni broj radnika s dijagnosticiranom profesionalnom bolešću u djelatnosti poljoprivrede, lova i šumarstva te s obzirom na sveukupni broj radnika s dijagnosticiranim profesionalnim bolestima u Republici Hrvatskoj za razdoblje od 2003. do 2007. godine, prema podacima Hrvatskog zavoda za medicinu rada	15
Tablica 1.5.	Približni utjecaj pojedinih istraživanih utjecajnih varijabli na vrijednost vibracijskog prijenosnog faktora na dlan ruke, određenog prema ISO 10819 (prema Hewitt, 1998.)	27
Tablica 2.1.	Parametri modela sustava šaka-ruka s četiri stupnja slobode (Dong i dr., 2008.)	43
Tablica 3.1.	Usporedba vibracijskih prijenosnih faktora određenih prema normi HRN EN ISO 1089:1996(E) za neke od najpoznatijih prigušnih materijala koji se koriste u rukavicama koje se često klasificiraju kao antivibracijske (Izvor: http://www.2protect.com/ , Impacto™ Protective Products Inc.)	47
Tablica 4.1.	Prikaz i kratki opis rukavica (s pripadajućim oznakama koje su rabljene u analizi podataka) koje su korištene za ispitivanja prigušnih svojstava antivibracijskih rukavica pri radu s motornim pilama	52
Tablica 5.1.	Izračun vibracijskog prijenosnog faktora (TEAT) prema Dong i dr. (2002.) za vrednovane razine vibracije (a_{hv}) koje se prenose s ručke motorne pile lančanice kroz prigušni materijal rukavica na prste pri svim karakterističnim režimima rada	83
Tablica 5.2.	Izračun vibracijskog prijenosnog faktora (TEAT) prema Dong i dr. (2002.) za nevrednovane razine vibracije (a_v) koje se prenose s ručke motorne pile lančanice kroz prigušni materijal rukavica na prste pri svim karakterističnim režimima rada	84

Ključna dokumentacijska kartica

TI (naslov)	Utjecaj antivibracijskih rukavica na smanjenje vibracija koje se prenose na ruke operatera motornih pila lančanicama	
AU (autor)	mr. sc. Igor Đukić	
AD (adresa)	Jana Sibeliusa 6, 10000 Zagreb	dukic@sumfak.hr
SO (izvor)	Sveučilište u Zagrebu, Šumarski fakultet, Svetošimunska 25, 10000 Zagreb, Hrvatska	
PY (godina objave)	2010.	
LA (izvorni jezik)	hrvatski	
LS (jezik sažetka)	hrvatski, engleski	
DE (ključne riječi)	antivibracijske rukavice, vibracijski prijenosni faktor, prigušenje vibracija, vibracije motorne pile lančanicama, vibracije koje se prenose na sustav šaka-ruka	
GE (zemlja objave)	Republika Hrvatska	
PT (vrsta objave)	doktorski znanstveni rad	
VO (volumen)	(X) + 114 stranica, 61 slika i grafikon, 10 tablica, 87 navoda literature	
AB (sažetak)	U radu se iznose rezultati mjerenja prigušnih svojstava reprezentativne grupe antivibracijskih rukavica na hrvatskom tržištu pri radu s motornom pilom lančanicom u stvarnim uvjetima rada. Mjerene su vibracije koje se prenose sa stražnje ručke motorne pile lančanicama na ruku operatera u tri karakteristična režima rada, i to pri najmanjem broju okretaja motora, pri najvećem broju okretaja motora i tijekom rezanja. Mjerenja su izvedena sukladno preporukama norme HRN EN ISO 5349-1:2001(E): <i>Mechanical vibration – Measurement and evaluation of human exposure to hand-transmitted vibration</i> i HRN EN ISO 7505-1986 (E): <i>Forestry machinery – Chain saws – Measurement of hand-transmitted vibration</i>. Istražena su prigušna svojstva antivibracijskih rukavica na četiri mjerne točke: na prstima, šaci, zglobov šake i na laktu. Mjerenja su provedena s ciljem utvrđivanja prigušnih svojstava antivibracijskih rukavica na različite dijelove frekvencijskog spektra pri radu s motornim pilama lančanicama. Rezultati mjerenja prigušnih sposobnosti odabranih antivibracijskih rukavica pri radu s motornom pilom lančanicom pokazali su prigušenje ukupne razine vibracija koje se prenose na prste. Prigušenje je bilo uočljivo kod nevrednovanih i kod vibracija vrednovanih prema HRN EN ISO 5349-1:2001(E). Kao najbolje u ispitivanjima pokazale su se rukavice s AntiVib™ prigušnim materijalom, ali ni te rukavice, prema dobivenim izračunima, ne mogu pružiti adekvatnu zaštitu od vibracija koje se prenose s ručke motorne pile lančanicama za osmosatno dnevno izlaganje vibracijama. Ukoliko su ukupno vrijeme izlaganja i razina vibracija niži od korištenih u izračunima, tada je i zaštita od vibracija proporcionalno efikasnija. Rezultati mjerenja prolaska vibracija kroz ruku pri radu sa i bez rukavica pokazali su da se veći dio vibracija apsorbira u prstima i šaci, i to uglavnom vibracije više frekvencije. Radi bolje ponovljivosti i usporedivosti mjerenja vibracija koje se prenose s ručke motorne pile lančanicama bilo bi preporučljivo istovremeno mjeriti pritisnu silu na ručku i vibracije u sve tri osi.	

Keyword documentation

TI (title)	Influence of the anti-vibration gloves on the reduction of vibration transmitted to the hands of the chainsaw operator	
OT (original title)	Utjecaj antivibracijskih rukavica na smanjenje vibracija koje se prenose na ruke operatera motornih pila lančanica	
AU (author)	Igor Đukić, M.Sc.	
AD (address of author)	Jana Sibeliusa 6, 10000 Zagreb	dukic@sumfak.hr
SO (source)	Sveučilište u Zagrebu, Šumarski fakultet, Svetošimunska 25, 10000 Zagreb, Croatia	
PY (publication year)	2010.	
LA (language of text)	Croatian	
LS (lan. of summary)	Croatian, English	
DE (descriptors)	anti-vibration gloves, vibration transmissibility, vibration attenuation, chainsaw vibration, hand-arm vibration	
GE (geo. headings)	Croatia	
PT (publication type)	doctoral scientific thesis	
VO (volume)	(X) + 114 pages, 61 figures and graphs, 10 tables, 87 references	
AB (abstract)	This study presents the results of measuring damping characteristics of a representative group of anti-vibration gloves on the Croatian market, at work with a chainsaw. Vibrations transmitted from the rear handle of the chainsaw to the hand of the worker were measured during three characteristic regimes of work (minimum engine revolutions, maximum engine revolutions and cutting). Measurements were performed in accordance with the recommendations of the HRN EN ISO 5349-1:2001 (E) Mechanical vibration - Measurement and evaluation of human exposure to hand-transmitted vibration and ISO 7505-1986 (E): Forestry machinery - Chain saws - Measurement of hand-transmitted vibration. Damping properties of anti-vibration gloves were investigated on measurement points located at the fingers, third metacarpal, wrist and elbow. Measurements were made to determine damping properties of anti-vibration gloves in different parts of the frequency spectrum when working with a chainsaw. The results of vibration transmissibility to the fingers of selected anti-vibration gloves, when working with a chainsaw, showed attenuation of the overall level of weighted vibration. Attenuation was evident at vibration frequency-weighted according to EN ISO 5349-1:2001 (E) and at unweighted vibration levels. The study showed that best gloves were the gloves with AntiVib™ damping material, but the calculations showed that none of the tested gloves can not provide adequate protection from the chainsaw vibration garlands for 8-hour daily exposure. If the total time of exposure and vibration levels is lower than those used in the calculations, then the vibration protection of anti-vibration gloves is proportionally more efficient. The results of measurements of vibrations passing through the hands when working with or without anti-vibration gloves showed that most of the higher frequency vibration is absorbed in the fingers and hand. For better repeatability and comparability of measurements of chainsaw vibrations transmitted to the hand-arm it would be advisable to simultaneously measure the grip force on the handle and vibration in all three axes.	

ŽIVOTOPIS

Igor Đukić rođen je 11. studenog 1976. godine u Zagrebu. Osnovnu školu pohađao je u Zagrebu, gdje je 1991. godine upisao i Tehničku školu "Ruđer Bošković" te je po završetku školovanja stekao zvanje tehničar za elektroniku. Godine 1995. upisao je studij Drvne tehnologije na Šumarskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Tijekom studija je bio demonstrator iz predmeta Nacrtna geometrija, Osnove strojarstva i Radni strojevi i uređaji u DI. Diplomski rad "Određivanje kakvoće drva pomoću ultrazvuka" obranio je krajem 2001. godine, odmah nakon odsluženja vojnog roka. Time je stekao zvanje diplomiranog inženjera drvne tehnologije.

Od 7. siječnja 2002. godine zapošljava se kao znanstveni novak na Šumarskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu u tadašnjem Zavodu za matematiku i osnove tehnike, a danas u Zavodu za procesne tehnike. Akademske godine 2002/2003. upisuje poslijediplomski znanstveni studij na Šumarskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, usmjerenje Vođenje procesa u preradi drva na skupini predmeta Tehnologija finalnih proizvoda. Sve ispite s poslijediplomskog studija s uspjehom je položio i u listopadu 2005. godine obranio znanstveni magistarski rad pod naslovom "Usporedba ergonomske i energetske značajke jarmača i tračnih pila trupčara" (mentor prof. dr. sc. Vlado Goglia).

Nastavni rad počinje na održavanju mjernih i računskih vježbi iz predmeta Strojevi za obradu drva, a kasnije i na predmetima Tehnike mjerenja i Automatizacija i mjerna tehnika u drvnoj industriji te održava vježbe iz predmeta Strojevi i alati u obradi drva I i II i Tehnike mjerenja na Stručnom studiju drvne tehnologije u Virovitici. Kao mentor je sudjelovao u izradi jednog diplomskog rada.

Od 2003. godine sudjeluje na projektu 0068139 pod nazivom Izloženost radnika buci i vibracijama, a od 2007. godine na projektu 068-1782011-0705 pod nazivom Ergonomija u poljoprivredi i šumarstvu čiji je voditelj prof. dr. sc. Vlado Goglia. Aktivno je sudjelovao u izradi nekoliko stručnih elaborata, u organizaciji međunarodne znanstvene konferencije u Zalesini, na više znanstvenih skupova u zemlji i inozemstvu te je u koautorstvu objavio 30 radova.

Uspješno je završio tečaj osposobljavanja za rad na EMCO CNC strojevima u sklopu projekta "Usvajanje CNC tehnologije na području obdelave lesa" pod pokroviteljstvom Leonardo da Vinci programa Europske unije.