Mjerni sustav za umjeravanje Instantel uređaja i usporedbena mjerenja sa pretvornikom pomaka

Nekić, Domagoj

Master's thesis / Diplomski rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:436550

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**



Repository / Repozitorij:

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
Diplomski studij geotehnike

MJERNI SUSTAV ZA UMJERAVANJE INSTANTEL UREĐAJA I USPOREDBENA MJERENJA SA PRETVORNIKOM POMAKA

Diplomski rad

Domagoj Nekić

R182

Zagreb, 2019

Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Diplomski rad

MJERNI SUSTAV ZA UMJERAVANJE INSTANTEL UREĐAJA I USPOREDBENA MJERENJA SA PRETVORNIKOM POMAKA

Domagoj Nekić

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za geotehniku
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

U ovom diplomskom radu prikazan je mjerni sustav za umjeravanje vibracija koji se koristi za umjeravanje Instantel uređaja za mjerenje vibracija i buke kod miniranja. Prikazano je kako je sustav složen tj. podešen. Dodatno je napravljena usporedba sa mjernim sustavom za mjerenje pomaka. Sustavom za umjeravanje provedena su probna mjerenja te mjerenja na zadanim frekvencijama. Mjereni podaci analizirani su u programu Labview, te su prikazani grafički i računski.

Ključne riječi: vibracija, umjeravanje, akceleracija, brzina, pomak, LVDT, labview

Završni rad sadrži: 33 stranice, 16 tablica, 20 slika, i 14 reference.

Jezik izvornika: Hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentori: Dr.sc. Dalibor Kuhinek, izvanredni profesor RGNF

Ocjenjivači: Dr.sc. Dalibor Kuhinek, izvanredni profesor RGNF
Dr.sc. Mario Dobrilović, izvanredni profesor RGNF
Dr.sc. Vječislav Bohanek, docent RGNF

Datum obrane: 21.02.2019., Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu

University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

Master's Thesis

MEASUREMENT SYSTEM FOR CALIBRATION OF INSTANTEL MEASUREMENT DEVICES AND COMPARISON MEASUREMENTS WITH DISPLACEMENT SENSOR

Domagoj Nekić

Thesis completed at: University of Zagreb
Faculty of mining, Geology and Petroleum Engineering
Department of Mining Engineering and Geotechnics
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

In this thesis measurement system for calibration of vibration is presented. It is used for calibration of Instantel devices used to measure vibrations and noise during blasting. The measurement system integration is presented. Additionally, comparison of measurement is done to a system measuring vibration table head displacement. Using calibration system test measurements were done on predetermined frequencies. Measurement results are analyzed in software Labview, and results are presented in tables and figures.

Keywords: vibration, calibration, acceleration, frequency, displacement, LVDT, labview

Thesis contains: 33 pages, 16 tables, 20 figures, i 14 references.

Original in: Croatian

Archived in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisors: Associate professor. Dalibor Kuhinek, PhD

Reviewers: Associate professor. Dalibor Kuhinek, PhD
Associate professor Mario Dobrilović, PhD
Assistant professor Vječislav Bohanek, PhD

Defence date: February 21, 2019, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

SADRŽAJ

1. UVOD 1
2. MJERENJE BUKE I VIBRACIJA 2
2.1. Mjerenje vibracija 2
3. SUSTAV ZA UMJERAVANJE 5
3.1. Referentni akcelerometar BK 4370 5
3.2. Pretpojačalo 2647 8
3.3. Nexus mjerno pojačalo s kondicioniranjem signala 9
3.4. Analizator spektra SR780 10
3.5. Signal generator AGILENT 33220A 11
3.6. Vibracijski stol LDS V555 12
3.7. Mjerenje pomaka LVDT pretvornikom 14
3.8. Mjerni sustav QuantumX MX 840A 16
4. PODEŠAVANJE MJERNOG SUSTAVA ZA UMJERAVANJE VIBRACIJA 18
5. PROBNA MJERENJA I KONAČNO MJERENJE 22
5.1. Probno mjerenje 22
5.2. Drugo mjerenje 24
6. REZULTATI I ANALIZA 26
6.1. Rezultati probnog mjerenja 27
6.2. Rezultati konačnog mjerenja 30
7. ZAKLJUČAK 32
8. POPIS KORIŠTENE LITERATURE: 33

POPIS SLIKA

Slika 2-1 Mjerenje brzine oscilacija trokomponentnim geofonom (Krsnik, J. 1989) 3
Slika 2-2 Primjer seizmograma (Božićat al., 2008) 3
Slika 3-1 Dijelovi sustava za umjeravanje 5
Slika 3-2 Referentni akcelerometar B&K 4370 (Brüel & Kjær, 2004) 6
Slika 3-3 Korekcijski dijagram za akcelerometar 4370 (Brüel & Kjær, 2004) 7
Slika 3-4 Pretpojačalo 2647 (Brüel & Kjær, 2007) 8
Slika 3-5 Nexus pojačalo (Brüel & Kjær, 2007) 9
Slika 3-6 Vibracijski stol LDS V555 (Brüel & Kjær, 2017) 13
Slika 3-7 Skica presjeka pretvornika pomaka HBM WA10 15

Slika 3-8 Okomitost pretvornika pomaka HBM WA10 15
Slika 3-9Mjerni sustav QuantumX MX 840 17
Slika 5-1 Odziv pri uključenju vibracijskog stola 23
Slika 5-2 Primjer rezultata za frekvenciju od 2 Hz 25
Slika 5-3 Primjer rezultata za frekvenciju od 25 Hz 25
Slika 6-1 Prednji panel virtualnog instrumenta 26
Slika 6-2 Blok dijagram virtualnog instrumenta izrađenog u programu Labview 27
Slika 6-3 Usporedba namještenih i izmjerenih brzina. 29
Slika 6-4 Usporedba stvarne i izmjerene brzine 30
Slika 6-5 Dijagram namještene i izmjerene brzine pri drugom mjerenju 30
Slika 6-6 Dijagram stvarne i izmjerene brzine pri drugom mjerenju. 31

POPIS TABLICA

Tablica 3-1 Karakteristike akcelerometra B&K 4370 (Brüel & Kjær, 2004) 7
Tablica 3-2 Karakteristike Nexus pojačala (Brüel & Kjær, 2007) 10
Tablica 3-3 Pregled tehničkih karakteristika SR780 analizatora spektra (Stanford Research Systems. 1995, 1996) 11
Tablica 3-4 Karakteristike signal generatora AGILENT 33220A (Agilent Technologies, Inc. 2009) 12
Tablica 3-5 Karakteristike vibracijskog stola LDS V555 (Brüel & Kjær, 2017) 13
Tablica 3-6 Karakteristike LDS LPA1000 naponskog pojačala (Brüel & Kjær, 2017) 14
Tablica 3-7 Karakteristike LDS FPS napajanja (Brüel & Kjær, 2017) 14
Tablica 3-8 Karakteristike pretvornika pomaka HBM WA10 16
Tablica 4-1 Svojstva akcelerometra 18
Tablica 4-2 Proračuni zadanih veličina 18
Tablica 4-3 Proračuni zadanih veličina 19
Tablica 4-4 Proračuni zadanih veličina 20
Tablica 6-1 Rezultati pomaka dobiveni računskim putem 28
Tablica 6-2 Očitani rezultati mjerenja u programu Labwiev 28
Tablica 6-3 Sortirani podaci pri brzini 1 in/s 28
Tablica 6-4 Sortirani podaci pri brzini 1 in/s 29

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Opis
V_r	m/s	rezultantna brzina oscilacija tla
V_l	m/s	brzina longitudinalne komponente oscilacija
V_t	m/s	brzina transverzalne komponente oscilacija
V_v	m/s	brzina vertikalne komponente oscilacija,
a_1	in/s^2	akceleracija
f	Hz	frekvencija
v	in/s	brzina
a_2	mm/s^2	akceleracija
s	mm	pomak
U	dBV	napon na analizatoru spektra
U_n	mV	napon Nexusa

1. UVOD

U ovom radu obrađen je proces umjeravanja vibracija Instantel uređaja. Sustavom za umjeravanje koji se sastoji od referentnog akcelerometra BK 4370, pretpojačala 2647, Nexus pojačala s kondicioniranjem signala, analizatora spektra SR780, signal generatora, vibracijskog stola LDS V555, elektroničkog pretvornika pomaka HBM WA10 te pripadajućeg mjernog sustava QuantumX MX 840A. Osnovna ideja umjeravanja je da se elektroničkim pretvornikom pomaka mjeri pomak na glavi vibracijskog stola iz kojeg se može odrediti brzina koja se uspoređuje s brzinom dobivenom preko akceleracije akcelerometra BK 4370.

2. MJERENJE BUKE I VIBRACIJA

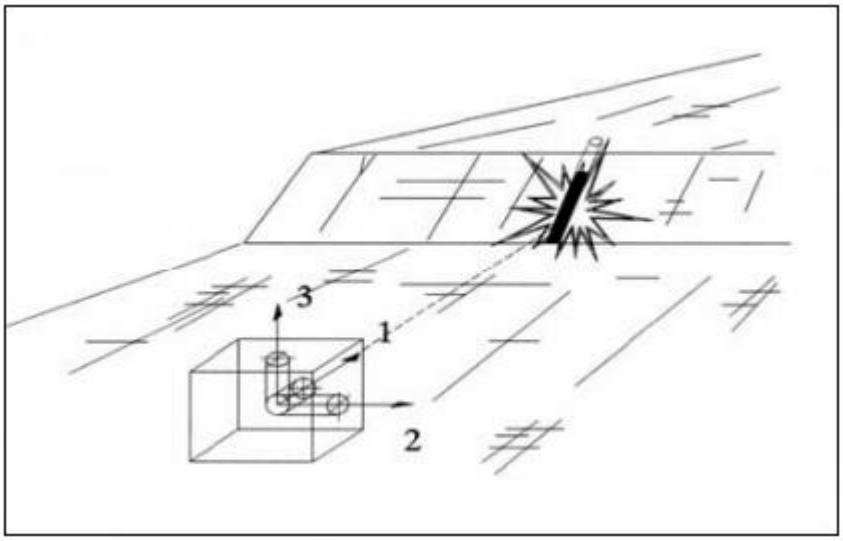
2.1. Mjerenje vibracija

Vibracije se definiraju kao mehaničke oscilacije, odnosno varijacije amplitude u vremenu neke veličine u odnosu na dogovorenu referencu uz napomenu da se amplituda mijenja tako da je naizmjenično veća, odnosno manja od te reference. Ta veličina je kvantitativni opis gibanja nekog mehaničkog sustava. Seizmički efekti obuhvaćaju sve oblike potresnog djelovanja koji su nastali izvođenjem masovnog miniranja (Božić i dr. 2007). Dio energije detonacije eksplozivnog punjenja koji nije pretvoren u koristan rad razaranja, drobljenja i odbacivanja stijenske mase širi se u obliku seizmičkih valova iz centra detonacije u okolni prostor i pri nailasku na građevinski objekt prenosi dio energije oscilacija tla na njegove temelje. Zbog toga u pojedinim dijelovima konstrukcija dolazi do dinamičkih naprezanja koja mogu izazvati trajne deformacije, ukoliko prijeđu graničnu čvrstoću materijala od kojeg je građevina napravljena. Ključni kriterij temeljem kojeg se ocjenjuje ugroženost pojedinog objekta od seizmičkog djelovanja je brzina oscilacija čestica tla ili stijena izazvanih detonacijama eksploziva u minskoj bušotini (Mesec, 2005). Opće je prihvaćeno da se brzina oscilacija tla izazvanih miniranjem dovodi u vezu s količinom eksploziva koji detonira u pojedinom intervalu paljenja, udaljenošću mjesta opažanja od minskog polja i značajkama osnovnog tektonskog sklopa stijenske mase. Parametri vibracija koji se direktno mogu mjeriti su ubrzanje, brzina i pomak, dok se ostale karakteristike vibracija, npr. frekvencija i prigušenje, mogu dobiti analizom navednih veličina.

Metode mjerenja vibracija mogu se podijeliti na kontaktne i beskontaktne. Kontaktne metode su bazirane na promjeni električnih ili magnetnih osobina nekog tijela uslijed njegovog kretanja izazvanog vibracijama. Beskontakne metode se baziraju na primjeni interferencije laserskih zraka za mjerenje brzine vibracija (Mesec, 2005).

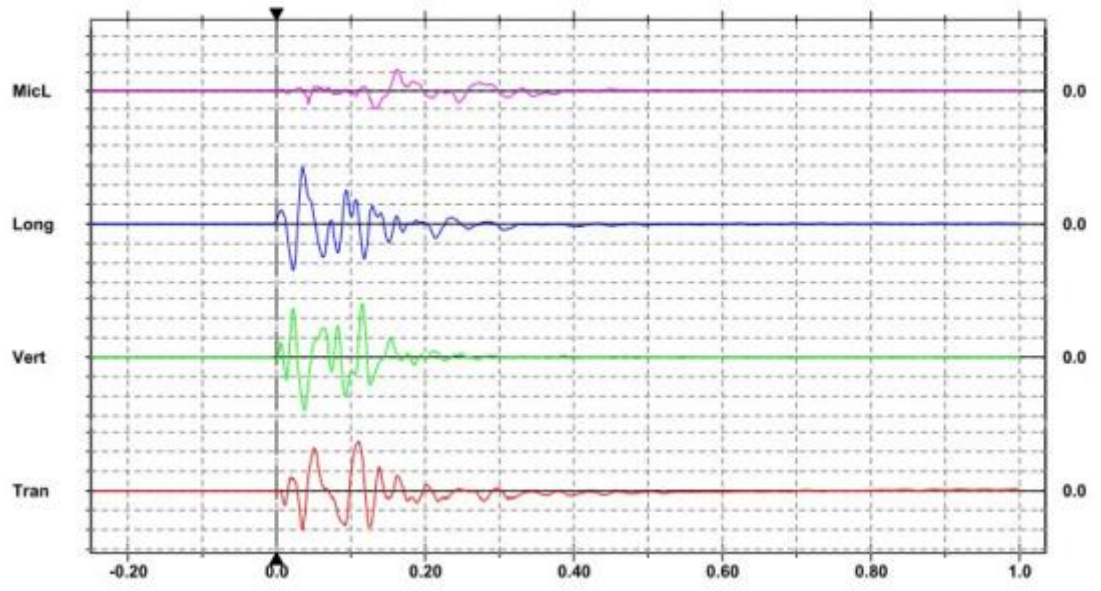
Za mjerenje brzine oscilacija tla nastalih uslijed miniranja koriste se posebno konstruirani prijenosni seizmografi, koji se mogu postaviti na bilo koje mjesto gdje je potrebno izmjeriti nastale oscilacije (Božić i dr., 2008). To može biti neposredno uz građevinu u njenom temeljnom tlu, odnosno stijeni ili na samoj građevini, što ovisi od cilja i svrhe mjerenja. Kao rezultat mjerenja u temeljnom tlu treba očekivati vrijednosti oscilacija koje imaju opći karakter i ne uzimaju u obzir interakciju temeljno tlo-građevina. Na mjernim mjestima registrira se brzina osciliranja materijalne čestice u tri međusobno okomite ravnine.

Vibracije se hvataju trokomponentnim geofonima koji su spojeni na seizmograf pri čemu svaki od njih registrira sve tri komponente brzine oscilacija tla na mjestu mjerenja. Trokomponentni geofon se sastoji od tri pojedinačna geofona, longitudinalnog, vertikalnog i transverzalnog, postavljena u tri prostorne, međusobno okomite osi (Slika 2-1).



Slika 2-1 Mjerenje brzine oscilacija trokomponentnim geofonom (Krsnik, J. 1989)

Nakon detonacije, svaki od geofona registrira po jednu komponentu oscilacija koje su potom vidljive na seizmogramu čiji je primjer prikazan na slici 2-2.



Slika 2-2 Primjer seizmograma (Božićat al., 2008)

Rezultantna brzina oscilacija tla (V_r) jednaka je vektorskoj sumi brzina pojedinih komponenata u svakom trenutku mjerenja prema jednadžbi 2-1.

$$Vr = \sqrt{V_l{}^2 + V_t{}^2 + V_v{}^2} \quad (2\text{-}1)$$

gdje je: V_r - rezultantna brzina oscilacija tla,

V_l - brzina longitudinalne komponente oscilacija,

V_t - brzina transverzalne komponente oscilacija,

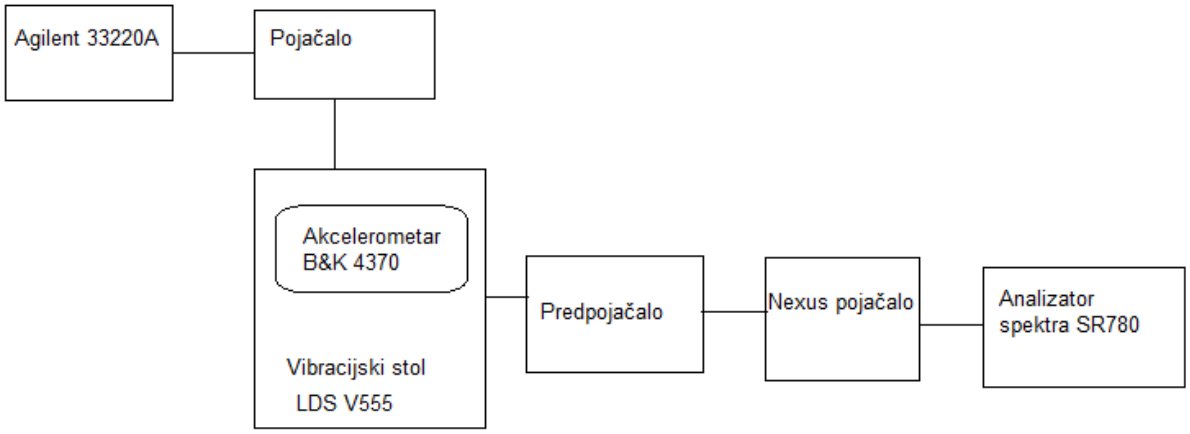
V_v - brzina vertikalne komponente oscilacija

Oslobađanjem energije pri miniranju nastaju seizmički valovi koji izazivaju mehaničke oscilacije u tlu (vibracije) koje imaju štetno djelovanje za okolne objekte. Kada seizmički valovi dopru do nekog objekta, dio energije oscilacija tla prenosi se na njegove temelje, pa u pojedinim dijelovima konstrukcija nastaju dinamička naprezanja, kod kojih pri određenom intenzitetu vibracija ta naprezanja mogu preći graničnu čvrstoću materijala konstrukcije (Petrov, 1993).

3. SUSTAV ZA UMJERAVANJE

Sustav za umjeravanje vibracija sastoji se od signal generatora, vibracijskog stola, referentnog akcelerometra, pretpojačala i mjernog pojačala Nexus te analizatora spektra. Signal generator stvara električni signal željene frekvvencije i amplitude što vibracijski stol pretvara u pomak tj. brzine i akceleracije.

Referentnim akcelerometrom vibracije se pretvaraju u naboje koji se pretvaraju u električne signale i u analizatoru spektra se provjerava da li je dovoljna amplituda signala pri željenoj frekvenciji tj. da li vibracijski stol stvara brzinu ili akceleraciju dovoljno blizu željenim vrijednostima.



Slika 3-1 Dijelovi sustava za umjeravanje

3.1. Referentni akcelerometar BK 4370

Akcelerometar je pretvornik za mjerenje ubrzanja (akceleracije) tijela u pokretu. Koristi se za razne namjene, indikaciju opterećenja, mjerenje prijeđenog puta, navođenje zrakoplova i dr.

Rad akcelerometra se zasniva na mjerenju sila inercije koje djeluju na instrument tijekom kretanja. Na inercijalnu masu koja se slobodno kreće u samo jednoj dimenziji djeluje ubrzanje tog smjera, i ona se pomiče u skladu sa trenutnom akceleracijom. Pomicanje mase se registrira i dalje koristi za željenu namjenu. Postoje akcelerometri koji ne koriste princip kretanja inercijske mase već vibracije pretvaraju u promjenu neke druge veličine, (naboj, kapacitet,...).

Moderni akcelerometri rade na principu piezoelektričnog efekta. Piezoelektrični efekt je proces pri kojem se usred mehaničke deformacije nekih čvrstih materijala stvaraju vezani

električni naboji na njihovim površinama. Ti materijali mogu biti prirodni (kvarc), te umjetni (sintetski, keramički). Osnovna je prednost piezoelektričnih pretvornika u tome što omogućuju mjerenje mehaničkog titranja u širokom rasponu frekvencija.

Referentni akcelerometar 4370 marke Bruel&Kjaer je jednoosni piezoelektrični akcelerometar, čija je os Z osjetljiva na akceleracije do 10 μg, te konvencijalno se koristi za frekvencijske raspone od 0,1 Hz do jedne trećine mehaničke rezonancije koja varira između 15 kHz do 21 kHz (ovisno o konfiguraciji montiranja) (Brüel & Kjær. 2004).

Osjetljivost akcelerometra je omjer promjene napona na izlaznim stezaljkama uz akceleraciju od 1 g. Neke specifikacije uređaja date su u tablici 3-1, a prikazan je na slici 3-2.

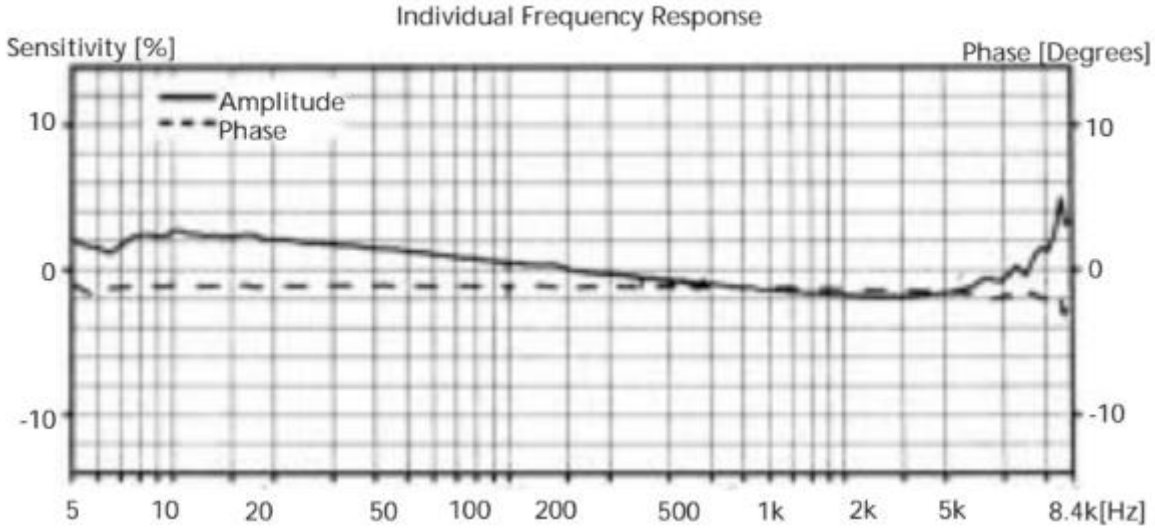


Slika 3-2 Referentni akcelerometar B&K 4370 (Brüel & Kjær, 2004)

Tablica 3-1 Karakteristike akcelerometra B&K 4370 (Brüel & Kjær, 2004)

Karakteristika	Mjerna jedinica	Akceleromear B&K 4370
Osjetljivost naboja (pri 159,2Hz)	pC/g	98±2%
Kapacitet	pF	1200
Temperaturni raspon	°C	-74 do 250
Radna sinusna vibracija	g	2000
Amplitudni odziv ± 10 %	Hz	0,1 do 4800
Rezonantna frekvencija montiranog pretvornika	kHz	16
Masa	grama	54

Proizvođač akcelerometra je priložio je umjernu krivulju prikazanu na slici 3-3. Na njoj je prikazano odstupanje od nazivne osjetljivosti ovisno o frekvenciji. To primjerice znači da je na frekvenciji 20 Hz osjetljivost 2 % veća od nazivne. Za točnija mjerenja to treba uzeti u obzir i korigirati dobivene vrijednosti.



Slika 3-3 Korekcijski dijagram za akcelerometar 4370 (Brüel & Kjær, 2004)

3.2. **Pretpojačalo 2647**

Svrha pretpojačala je da naboje koje generira akcelerometar pretvori u napone koji se šalju dalje uz puno manju mogućnost smetnji i pogreške. Ukupni napon koji se dobiva iz naboja ovisi o kapacitetu mjernog lanca te kako se mijenja kapacitet, uz isti naboj se javljaju različiti naponi. Zato nabojno pojačalo pretvara naboj u napon koji se onda lakše pojačava. Pretpojačalo 2647 ima konstantu pretvorbe od 1 mV/pC te frekvencijski opseg od 0,17 Hz (-10 %, -1 dB) do 50 kHz (-10 %, -1 dB).

Pretpojačalu je potrebno vanjsko napajanje. To inače nije problem, no ako je na raspolaganju koaksijalni kabel (koji se inače koristi za ovakve namjene) potrebno je preko dvije žice dovesti napon napajanja i vratiti izlazni signal nazad. To se radi preko posebnog pojačala (tu tehnologiju Bruel & Kjaer zove "DeltaTron") koja napaja pretpojačalo sa strujnim izvorom od 4 mA ili 20 mA uz korištenje kondenzatora koji odvaja istosmjerni signal napajanja od izmjeničnog izlaznog signala.

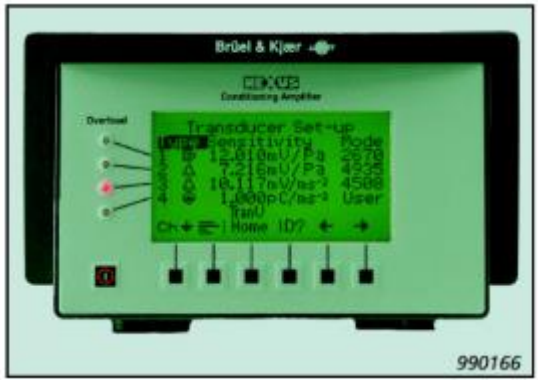
Pretpojačalo 2647 je prikazano na slici 3-4.



Slika 3-4 Pretpojačalo 2647 (Brüel & Kjær, 2007)

3.3. **Nexus mjerno pojačalo s kondicioniranjem signala**

Pojačalo je elektronički sklop čija je osnovna zadaća da pojača jakost električnog signala. Omjer izlaznog i ulaznoga signala pojačala njegovo je pojačanje, a ovisnost pojačanja o frekvenciji signala naziva se frekvencijskom karakteristikom pojačala. Pojačanje se ostvaruje zahvaljujući elektronički aktivnim komponentama. To su tranzistori (bipolarni i unipolarni) ili operacijska pojačala. Ovisno o signalima (napon ili struja) koji se promatraju na izlazu i ulazu, pojačalo može biti naponsko, strujno, strminsko ili otporno, a može imati samo jedan stupanj pojačanja ili više njih. Prema frekvenciji ulaznoga signala koji se pojačava, pojačala se dijele na istosmjerna (koja pojačavaju signale sve do frekvencije jednake nuli) i na pojačala za najniže, mrežne, niske (zvučne), srednje, visoke, vrlo visoke i najviše frekvencije (mikrovalna pojačala). Prema širini frekvencijskoga pojasa koji se pojačava, pojačala se dijele na uskopojasna i širokopojasna, a prema izvedbi na pojačala izvedena od pojedinačnih komponenata i integrirana pojačala (Leksikografski zavod Miroslav Krleža). Nexus pojačalo napravljeno je u suradnji s velikim automobilskim kućama za visoko kvalitetna terenska i laboratorijska ispitivanja. Na njega se mogu spojiti akcelerometri, hidrofoni, pretvornici sile, kondenzatorski mikrofoni, "DeltaTron" akcelerometri, "DeltaTron" pretpojačala, naponski ulazi ili sonde intenziteta zvuka. Također u Nexus pojačalo ugrađeni su filtri koji filtriraju neželjene dijelove spektra pri mjerenju, čime se povećava preciznost mjerenja, a ti filtri su: viskokopropusni filtar, niskopropusni filtar, filtar ubrzanja, filtar pomaka. Na zahtjev kupca postoji dodatna mogućnost instalacije nekih drugih filtera (Product data). Nexus mjerno pojačalo prikazano je na slici 3-5. a neke karakteristike dane su u tablici 3-2. Svrha ovog pojačala je da signale pretpojačala 2647 dodatno pojača. Također daje napajanje pretpojačalu.



Slika 3-5 Nexus pojačalo (Brüel & Kjær, 2007)

Tablica 3-2 Karakteristike Nexus pojačala (Brüel & Kjær, 2007)

Maksimalne ulazne vrijednosti	Difrencijalni naboj	100 nC (vršno)
	Zajednički napon ulaznih stezaljki	4,2 V (vršno) pri pojačanju ≥0,316 mV/pC
Frekvencijsko područje (-10%)	Akceleracija	0,1 Hz do 100 kHz
	Brzina (opcija)	1,0 Hz do 10 kH
	Pomak (opcija)	1,0 Hz do 1 kHz
Sastavni šum	2 Hz do 22,4 kHz	
Pojačanje pojačala	0,01 mV/pC do 10 V/pC	
Dinamički raspon	-30 dBV do +10 dBV (vršno)	
Rezolucija	1 dB	

3.4. **Analizator spektra SR780**

Proizvođač ovog analizatora spektra je Stanford Research Systems. Dijelovi analizatora spektra su: RF ulazni atenuator i nisko-propusni filtar, mješalo, lokalni oscillator, međufrekvencijsko pojačalo, međufrekvencijski filtar, logaritamsko pojačalo, detektor tjemene vrijednost, video filtar, generator pilastog napona, zaslon analizatora spektra.

Ulazni signal prolazi kroz atenuator i niskopropusni filter te dolazi do miješala gdje se miješa sa signalom iz lokalnog oscilatora. Kod analizatora spektra se koristi razlika komponenti koja daje međufrekvencijski signal. Međufrekvencijski signal se sastoji od dva člana, jedan je koristan a drugi zrcalna frekvencija. Pojačavanjem signala kroz međufrekvencijsko pojačalo i potiskivanjem u međufrekvencijskom filtru zrcalna frekvencija, koja daje lažne odzive, je potisnuta. Nakon prolaska logaritamskim pojačalom i video filterom, signal je prikazan na zaslonu analizatora spektra (Shimshon, 2012).

Pregled tehničkih karakteristika SR780 analizatora spektra prikazan je u tablici 3-3.

Tablica 3-3 Pregled tehničkih karakteristika SR780 analizatora spektra (Stanford Research Systems. 1995, 1996)

Karakteristike	Vrijednosti
Broj kanala	2
Raspon ulaznog napona	-50 dBV (3,16 mV vršno) do +34 dBV (50 V vršno) u koracima po 2 dB
Maksimalni ulazni napon	57 V vršno
Ulazna konfiguracija	Jednostruko (A) ili diferencijalno (A-B)
Maksimalna frekevncija	102,4 kHz
Rasponi FFT transformacije	195,3 mHz do 102,4 kHz
Rezolucija FFT-a	100, 200, 400 ili 800 linija
Dinamički opseg	90 dB do 145 dB
Točnost amplitude	± 0,2 dB
Ulazni šum	Manji od 10 nV efektivno/$\sqrt{\text{Hz}}$
Ekran	Jednobojni CRT, 800 H x 600 V

3.5. **Signal generator AGILENT 33220A**

Današnji signal generatori uglavnom su sinusni oscilatori s mogućnošću amplitudne, frekvencijske, fazne i impulsne modulacije. Mogu pokriti dio frekvencijskog područja od 1 Hz do 40 GHz.

Instrument se sastoji od RF oscilatora, širokopojasnog pojačala i kalibriranog atenuatora te pokaznika izlazne razine. RF oscilator ima kontinuiranu kontrolu frekvencije i preklopku za odabir frekvencijskog opsega kojima se određuje frekvencija izlaznog signala. Pojačalo ima ulaz za podešavanje amplitude izlaznog signala. Kalibrirani atenuator i pokaznik izlazne razine jamče preciznost namještanja izlazne razine signala za ispitivane sklopove uz nazivno opterećenje (Bednjanec, 2008).

Signal generator Agilent 33220 A može generirati razne valne oblike: sinusni, pravokutni, rampu, trokut, puls, šum, DC. Frekvencijsko područje mu je do 20 MHz. Ima 14 bitni D/A pretvornik sa brzinom od 50 milijuna uzoraka u sekundi i sa mogućnošću spremanja oblika od 64 tisuća točaka. Izlazni napon je u rasponu od 10 mV vršno do 10 V vršno. Može se spajati na računalo preko USB, GPIB ili LAN priključka.

Uređaj se koristi tako da se namjesti željeni oblik signala, željena frekvencija te željena amplituda signala. Nakon toga se omogući izlaz te se namješteni signal javlja na izlaznoj BNC priključnici.

Karakteristike signal generatora AGILENT 33220A dane su u tablici 3-4.

Tablica 3-4 Karakteristike signal generatora AGILENT 33220A (Agilent Technologies, Inc. 2009)

Frekvencijsko područje	1 μHz do 20 MHz
Harmonička izobličenja	-70 dBc
Fazni šum	-115 dBc / Hz
Raspon amplituda	10 mV do 10 V (od vrha do vrha)
Preciznost amplitude	± 1%, ± 1 mV (od vrha do vrha)
Preciznost frekvencije	20 ppm + 3 pHz

3.6. **Vibracijski stol LDS V555**

Svrha vibracijskog stola LDS V555 (slika 3-6) je da pomiče objekte koji se montiraju na njega čime se dobivaju određene akceleracije. Vibracijski stol pokreće adekvatno, tiho i energetski efikasno pojačalo. Lagano i čvrsto armaturno postolje pruža odlične performanse ubrzanja i sile.

Da bi vibracijski stol mogao proizvoditi pozitivne i negativne pomake nužno ga je malo podići. To se provodi korištenjem komprimiranog zraka tj. korištenjem kompresora. Dodatno stol ima aktivno hlađenje preko ventilatora koji odvodi toplinu gubitaka te mora biti uključen kada se pali vibracijski stol.

Neke karakteristike vibracijskog stola prikazane su u tablici 3-5.

Tablica 3-5 Karakteristike vibracijskog stola LDS V555 (Brüel & Kjær, 2017)

Sinusna sila (vršna)	0,94 kN
Nasumična sila (efektivna)	0,636 kN
Brzina (vrh sinusa)	1,2 kN
Akceleracija (vrh sinusa)	981 m/s^2
Pomak (od vrha do vrha)	25,4 mm
Rezonantna frekvencija	4850 Hz
Upotrebljive frekvencije	0 Hz do 6300 Hz
Akustična buka	104 dBA
Ukupna masa	97,5 kg
Masa glave stola	0,94 kg



Slika 3-6 Vibracijski stol LDS V555 (Brüel & Kjær, 2017)

Vibracijski stol koristi LDS LPA1000 linearno naponsko pojačalo te LDS FPS napajanje. LDS LPA1000 linearno naponsko pojačalo pruža optimalno, efikasno i pouzdano napajanje sustava. Neke karakteristike pojačala date su u tablici 3-6.

Tablica 3-6 Karakteristike LDS LPA1000 naponskog pojačala (Brüel & Kjær, 2017)

Ulazni napon napajanja (±10%)	100 V, 120 V, 230 V, pri 50 Hz / 60 Hz
Nazivna izlazna snaga	961 W pri 4,0 Ω
Maksimalna prividna snaga	1296 VA pri 4,0 Ω
Frekvencijska područja pri maksimalnoj snazi	40 Hz do 10 kHz
Maksimalni izlazni napon	72 V efektivno, DC do 10 kHz
Korisnost pojačala	64 %

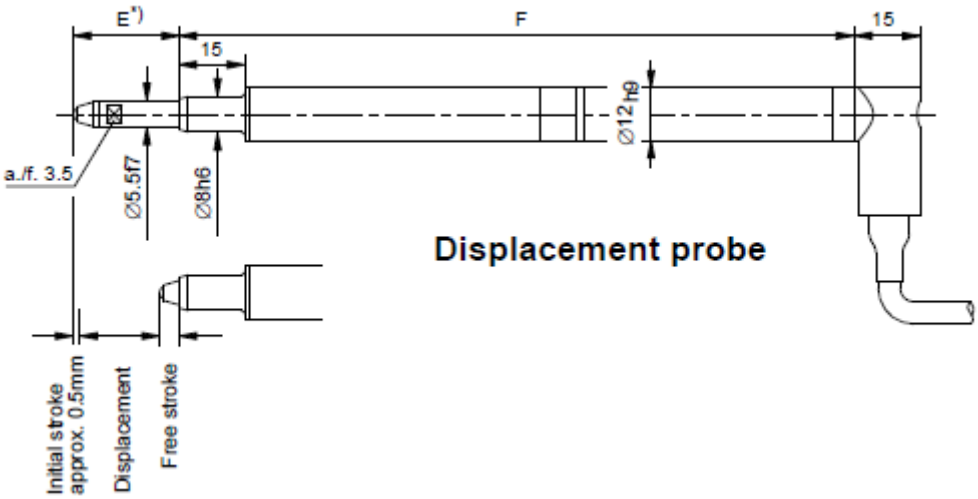
LDS FP napajanje pruža nam istosmjernu struju za vibracijski stol te napaja naponsko pojačalo LPA1000. Karakteristike LDS FPS napajanja su date u tablici 3-7.

Tablica 3-7 Karakteristike LDS FPS napajanja (Brüel & Kjær, 2017)

Ulazni napon (±10%)	100, 120, 230 V, pri 50 / 60 Hz
Nazivni izlazni napon	70 V DC @ 5,5 Ω
Nazivni izlazni napon na nižem području	44 V DC 5,5 Ω
Nazivna struja pri nižem području	12,73A
Nazivna struja	8 A

3.7. **Mjerenje pomaka LVDT pretvornikom**

Pomak glave vibracijskog stola može se mjeriti pomoću pretvornika pomaka HBM WA10 i pripadnog mjrnog sustava HBM QuantumX MX840A. Rezultati pomaka i mjerene akceleracije mogu se usporediti (izračunavanjem brzine) te se tako može dobiti usporedba sa mjerenjem akcelerometra. Pomak je je mjeren pomoću LVDT-a (linearni varijabilni diferencijalni transformartor) marke HBM WA10 koji pravocrtne pomake pretvara u električni signal, te je prikazan na slikama 3-7. i 3-8.



Slika 3-7 Skica presjeka pretvornika pomaka HBM WA10



Slika 3-8 Okomitost pretvornika pomaka HBM WA10

Na slici 3-7. uočljivo je da pri mjerenju LVDT-om treba obratiti pažnju na okomitost uređaja, jer bilo kakvo odstupanje od okomitosti može dovesti u pitanje točnost rezultata. Neke karakteristike pretvornika pomaka HBM WA10 dane su u tablici 3-8.

Tablica 3-8 Karakteristike pretvornika pomaka HBM WA10

Osjetljivost pri maksimalnom pomaku	80 mV/V
Tolerancija osjetljivosti	± 1 %
Napon napajanja	2,5 V efektivno
Frekvencija napajanja	4,8 kHz ± 1%
Masa: Tijela pretvornika Pomičnog dijela	 56 grama 6 grama
Maksimalna dozvoljena akceleracija pomičnog dijela	2500 m/s^2
Konstanta opruge	0,116 N/mm
Granična frekvencija za hod od 1 mm	60 Hz
Granična frekvencija za nazivni pomak	18 Hz

3.8. **Mjerni sustav QuantumX MX 840A**

QuantumX MX 840 (slika 3-9.) je 8 kanalni mjerni sustav s 24-bitnim A/D konverterima. Na svaki kanal se može spojiti jedan od petnaest različitih tipova pretvornika (elektrootporna traka, LVDT, potenciometar, impulsni senzori, razni naponi, …). Uređaj ima 8 pojačala sa nositeljem frekvencije što je patentirana tehnologija tvrtke HBM a omogućava precizna mjerenja signala elektrootpornih traka uz aktivno smanjivanje svih vrsta smetnji i šuma. Napon napajanja uređaja je od 10 V do 30 V a uređaj komunicira sa računalom preko Ethernet kabela. Uređaj može generirati napajanja za vanjske aktivne pretvornike u rasponu od 5 V do 24 V. Brzina prikupljanja podataka je 19200 Hz po kanalu. Sadrži niskopropusni filter za smanjenje šuma koji se mogu softverski uključiti i isključiti.



Slika 3-9Mjerni sustav QuantumX MX 840

4. PODEŠAVANJE MJERNOG SUSTAVA ZA UMJERAVANJE VIBRACIJA

Uz poznavanje konstanti proporcionalnosti odziva pojedinih komponenti mjernog lanca sustava za umjeravanje mjernih sustava za mjerenje vibracija može se proračunati kako se vibracija pretvara u konačni signal koji se očitava na analizatoru spektra. Time se postiže da se određeni napon povezuje sa određenom akceleracijom koju treba namjestiti tj. povećava se ili smanjuje napon napajanja vibracijskog stola koji onda daje veće ili manje vibracije.

Svojstva akcelerometra očitana su iz umjernice koja je isporučena s njime te su podaci prikazani u tablici 4-1.

Tablica 4-1 Svojstva akcelerometra

Konstanta akcelerometra:		9,931	pC/ms^{-2}
	ili	97,39	pC/g
pri	kružna fr.	1000	s^{-1}
	frekvencija	159,2	Hz
	akceleracija	20	ms^{-2} RMS
	pomak peak	0,028284271	mm

Tablica 4-2 Proračuni zadanih veličina

Frekvencija	Brzina	Akceleracija	Akceleracija	Pomak
Hz	in/s	in/s^2	mm/s^2	mm
2	1	12,56637061	319,1858136	2,021267777
4	1	25,13274123	638,3716272	1,010633889
10	1	62,83185307	1595,929068	0,404253555
15	0,25	23,5619449	598,4734005	0,067375593
15	1	94,24777961	2393,893602	0,26950237
25	1	157,0796327	3989,82267	0,161701422
40	1	251,3274123	6383,716272	0,101063389
50	30,92	9713,804485	246730,6339	2,499903987
80	1	502,6548246	12767,43254	0,050531694
125	1	785,3981634	19949,11335	0,032340284
250	1	1570,796327	39898,2267	0,016170142
315	1	1979,203372	50271,76564	0,012833446
500	1	3141,592654	79796,4534	0,008085071

U tablici 4-2. prikazani su proračuni zadanih veličina. U prvom stupcu tablice 4-2. zadane su frekvencije u Hz, a u drugom brzine u in/s. U trećem stupcu izračunate su akceleracije za zadanu frekvenciju i brzinu preko formule za akceleraciju zadanu izrazom 4-1.

$$a_1 = 2 \cdot \Pi \cdot f \cdot v \qquad (4\text{-}1)$$

gdje je:

a_1 – akceleracija (in/s^2)

f – frekvencija (Hz)

v – brzina (in/s)

Zatim se izračunata akceleracija u in/s^2 pretvara u mm/s^2 preko izraza 4-2. a rezultati su prikazani u četvrtom stupcu tablice 4-2.

$$a_2 = a1 \cdot 25{,}4 \qquad (4\text{-}2)$$

U izrazu 4-2. konstanta 25,4 omogućava pretvorbu iz inča u milimetre.

Kao krajnji rezultat dobiva se pomak koji je prikazan u petom stupcu tablice 4-2 a računa se preko izraza 4.3.

$$s = \frac{a2}{(2 \cdot \Pi \cdot f)^2} \qquad (4\text{-}3)$$

s – pomak (mm).

Tablica 4-3 Proračuni zadanih veličina

Frekvencija	Brzina	Akceleracija	Akceleracija	Naboj	Naboj	Korekcija	Korigirana konstanta	Napon nakon pretpojačala
Hz	in/s	m/s^2	g	pC	pC	%	pC/ms^{-2}	mV
2	1	0,319185814	0,032547895	3,169834	3,169839	2	10,12962	3,233231
4	1	0,638371627	0,065095684	6,339669	6,339669	2	10,12962	6,466462
10	1	1,595929068	0,162739209	15,84917	15,84917	2,4	10,169344	16,2295517
15	0,25	0,598473401	0,061027203	5,943439	5,943439	2	10,12962	6,06230813
15	1	2,393893602	0,244108814	23,77376	23,77376	2	10,12962	24,2492325
25	1	3,98982267	0,406848023	39,62293	39,62293	1,4	10,070034	40,1776499
40	1	6,383716272	0,650956836	63,39669	63,39669	1,1	10,040241	64,0940498
50	30,92	246,7306339	25,15948173	2450,282	2450,282	-0,8	9,851552	2430,67967
80	1	12,76743254	1,301913673	126,7934	126,7934	0,6	9,990586	127,554133
125	1	19,94911335	2,034240114	198,1146	198,1146	0,2	9,950862	198,510874
250	1	39,8982267	4,068480228	396,2293	396,2293	-0,3	9,901207	395,040601
315	1	50,27176564	5,126285087	499,2489	499,2489	-0,8	9,851552	495,254913
500	1	79,7964534	8,136960455	792,4586	792,4586	-1	9,83169	784,533993

Tablica 4-4 Proračuni zadanih veličina

		Napon nakon	SR780
Frekvencija	Brzina	Nexusa	Napon
Hz	in/s	mV	dBV
2	1	10,288	-39,7534
4	1	20,57599	-33,7328
10	1	51,64171	-25,74
15	0,25	19,28999	-34,2934
15	1	77,15998	-22,2522
25	1	127,8435	-17,8664
40	1	203,9444	-13,8098
50	30,92	7734,315	17,76844
80	1	405,8716	-7,83223
125	1	631,6528	-3,99043
250	1	1257,002	1,986717
315	1	1575,879	3,950458
500	1	2496,352	7,946117

U tablici 4-3 u prva dva stupca prikazane su zadane frekvencije i brzine. U trećem stupcu nalazi se izračunata akceleracija prikazana u m/s^2. Četvrti stupac prikazuje akceleraciju u g, koja je dobivena tako da se treći stupac tablice 4-3 podijelili sa ubrzanjem zemljine sile teže koja iznosi $g=9,80665\ ms^{-2}$. Nakon toga izračunati su naboji preko konstane akcelerometra (tablica 4-1). Množeći akceleraciju zadanu u m/s^2 (treći stupac tablice 4-3) s konstantom akcelerometra od 9,931 $pC/(ms^{-2})$ dobiven je naboj u pC prikazan u petom stupcu tablice 4-3. Rezultat za šesti stupac tablice dobiven je na isti način kao za stupac 5, samo što je akceleracija zadana u g množena s konstantom akcelerometra od 97,39 pC/g. Korekcijski koeficjenti prikazani u sedmom stupcu tablice 4-3 očitani su iz korekcijskog dijagrama za akcelerometar 4370 prikazanog na slici 3-2. Nakon toga, konstanta akcelerometra je povećana ili smanjena množenjem s korekcijskim koeficjentom, te je dobivena korigirana konstanta akcelerometra čiji su rezultati prikazani u osmom stupcu tablice 4-3. Deveti stupac tablice prikazuje napon nakon pretpojačala. Taj napon dobiven je tako da je umnožak akceleracije (u m/s^2) i korigirane konstante akcelerometra ($pC/(ms^{-2})$) pomnožen s konstantom pretpojačala danoj od strane proizvođača koja u ovom slučaju iznosi 1 mV/pC. Poznavajući napon nakon pretpojačala, izračunat je napon Nexusa tako da je napon nakon pretpojačala pomnožen s koeficjentom ukupnog pojačanja Nexusa koji iznosi 3,182 mV/mV, čiji su rezultati prikazani u desetom stupcu tablice 4-3. Napon na analizatoru spektra dobiven je preko izraza 4-4 gdje se dobiva rezultat u decibelima u odnosu na referentni napon od 1 V (dBV).

$$U = 20 \cdot \log(\frac{Un}{1000}) \quad (4\text{-}4.)$$

gdje je:

U – Napon na analizatoru spektra (dBV),

U_n – napon Nexsa (mV)

5. PROBNA MJERENJA I KONAČNO MJERENJE

U ovom radu provedena su dva seta mjerenja. Prvo je bilo probno mjerenje kojim se verificiralo da mjerni sustav radi i da se ocijene njegova svojstva i ograničenja. Također je pri tome provedeno osposobljavanje za rad sa sustavom za umjeravanje vibracija (korištenje signal generatora i spektralnog analizatora). Nakon toga je provedeno drugo mjerenje gdje se više pažnje posvetilo okomitoj montaži pretvornika pomaka LVDT-a i mjerenja su ponovljena.

Osnovna ideja ovog umjeravanja je da se mjeri pomak pretvornikom pomaka. Taj se rezultat onda preračunava u brzinu. Mjerenje akcelerometra se također preračunava u brzinu. Onda se napravljena usporedba tih dvaju brzina.

LVDT je montiran korištenjem magnetskog držača koji ima pomične krakove koji se slobodno rotiraju te je teško postići potpuno okomitu montažu. Značajna pogreška mjerenja se može dogoditi ako pretvornik pomaka nije potpuno okomito montiran u odnosu na glavu vibracijskog stola (kosinusna pogreška). Ta pogreška se može dogoditi u dvije osi (lijevo - desno tj. naprijed - nazad). Dakle, potrebno je LVDT montirati što okomitije a to se postiže usporedbom sa kutnom letvom i to u dvije osi (slika 3-7). Signali LVDT-a očitavani su na mjernom sustavu HBM QuantumX MX840A.

5.1. Probno mjerenje

Prvo probno mjerenje obuhvatilo je niz provjera mogućih utjecajnih veličina te je testiran princip mjerenja. Naime, podešavanje amplituda niskih frekvencija može potrajati nekoliko minuta pa se naglasak stavio na to da se obavi što više provjera pri čemu se nije strogo pazilo da mjerenja budu izvedena najbolje što je to moguće.

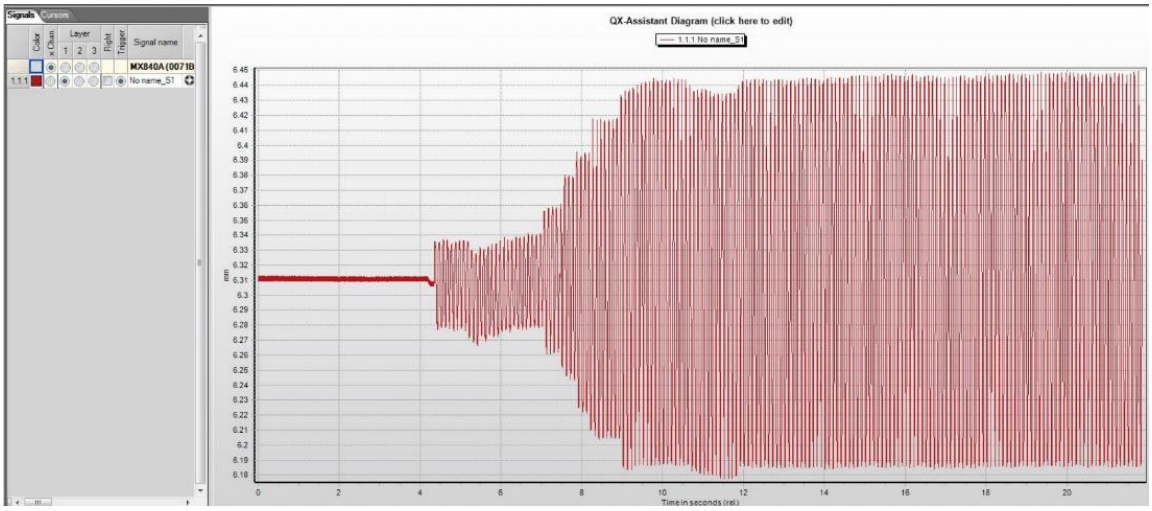
Prvo je obavljena procjena električnog šuma koji se javlja u sustavu mjerenja pomaka LVDT-om. To je napravljeno prije pokretanja vibracijskog stola. Brzina prikupljanja je namještena na 4800 Hz (tj. uzoraka u sekundi).

Prvo je signal je filtriran sa IIR Beselovim filtrom frekvencije 100 Hz. Mjerenje je pokazalo da je LVDT montiran na poziciji od 6,30525 mm što znači da može mjeriti pomake od približno ±4 mm. Šum se nalazi u rasponu od ±0,1 μm. Nakon što se uključi pretlak na vibracijskom stolu, došlo je do pomaka glave na poziciju 6,3089 mm uz šum u rasponu od ±1,9 μm. Dakle, svi rezultati koji su manji od te granice su problematični jer upadaju u raspon šuma uz uključen IIR Beselov filtar.

Nakon toga narinute su određene frekvencije na vibracijski stol te je amplituda povećavana do okvirno željenih vrijednosti brzina tj. akceleracija. To je napravljeno za sljedeće frekvencije i brzine:

- 10 Hz 1 in/s,
- 4 Hz 1 in/s,
- 2 Hz 1 in/s,
- 15 Hz 0,25 in/s,
- 15 Hz 1 in/s,
- 25 Hz 1 in/s,
- 40 Hz 1 in/s.

Za sve slučajeve snimljen je signal pomaka. Za prvi slučaj signal izgleda kao na slici 5-1 gdje se vidi uključenje vibracijskog stola te zatim povećanje amplitude kako se podešavala željena akceleracija.



Slika 5-1 Odziv pri uključenju vibracijskog stola

Za frekvenciju od 10 Hz i brzinu od 1 in/s napravljena je usporedba mjerenja uz brzinu prikupljanja uzoraka od 1200 Hz i trajanje 3 sekunde te 10 sekundi te je utvrđeno da su odstupanja na razini šuma što znači da se može prikupljati podatke kraće vremena.

Ponovljeno je isto mjerenje uz brzinu prikupljanja od 19200 Hz. Zaključeno je da nema značajne razlike između 1200 Hz i 19200 Hz jer su sve frekvencije uzorkovanja dovoljno velike u odnosu na frekvenciju signala.

Nakon toga određena je ponovljivost signala kada se pali i gasi signal generator. Dobivena je srednja vrijednost od 0,051945752 mm sa rasponom od $5{,}38 \cdot 10^{-5}$ mm tj. 0,1 %.

Na kraju je napravljena usporedba mjerenja pomaka za 25 Hz i 1 in/s uz brzinu prikupljanja uzoraka od 4800 Hz i 19200 Hz u trajanju od 3 sekunde. Oba dva rezultata su jako slična sa razlikom od 0,000237 mm što je opet blizu ranije određenog šuma.

5.2. **Drugo mjerenje**

Drugo mjerenje je dosta slično prvom mjerenju. Bitna razlika je da se posvetila maksimalna moguća pozornost na okomitost montaže pretvornika pomaka. Također, amplitude pomaka vibracijskog stola su podešavane jako blizu željenim vrijednostima što je znalo potrajati i 20ak minuta za jedno mjerenje. Obavljena su mjerenja na svim točkama te su rezultati zabilježeni.

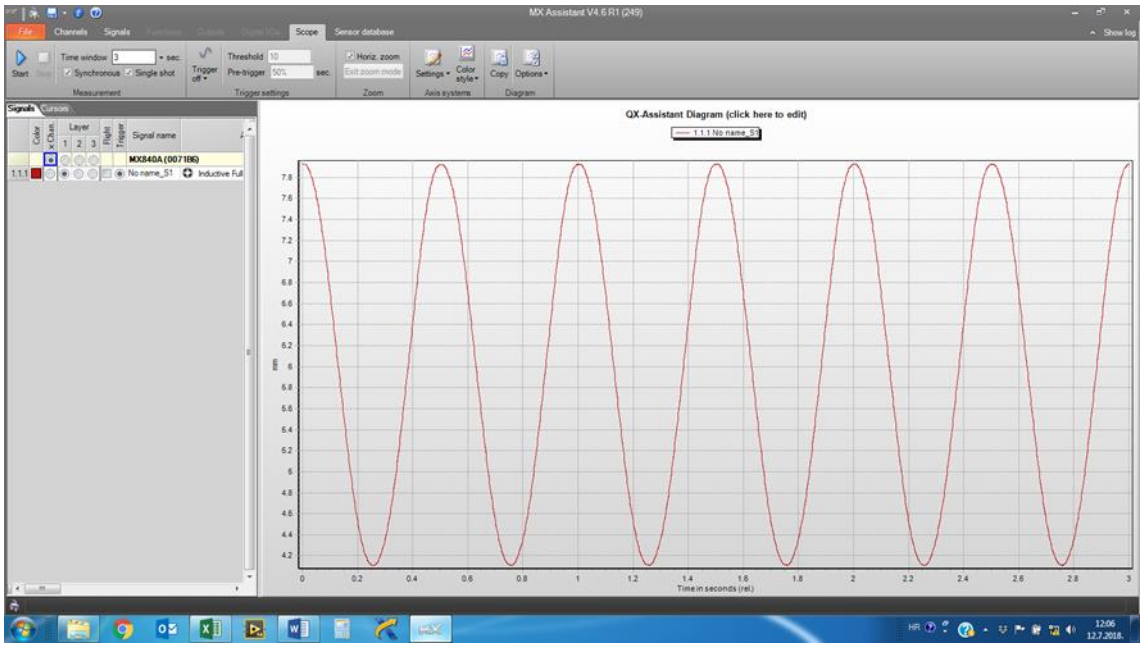
Prije mjerenja na željenim točkama, ponovno su provedena mjerenja šuma bez korištenja filtra.

Mjerenje je pokazalo da je LVDT montiran na poziciji od 3,8587 mm što znači da može mjeriti pomake od približno ±4 mm. Šum se nalazi u rasponu od ± 0,55 μm. Nakon što se uključi pretlak na vibracijskom stolu, došlo je do pomaka glave na poziciju 6,3718 mm uz šum u rasponu od ± 1,6 μm. Praktično gledano ukupni šum sustava prije pokretanja vibracijskog stola je negdje oko ± 2 μm. Kada se uključi pretlak, stol se podigne na određenu visinu. Ako se pretlak povećava, stol će se još više podignuti. Šum je veći ako se ne koristi filtar.

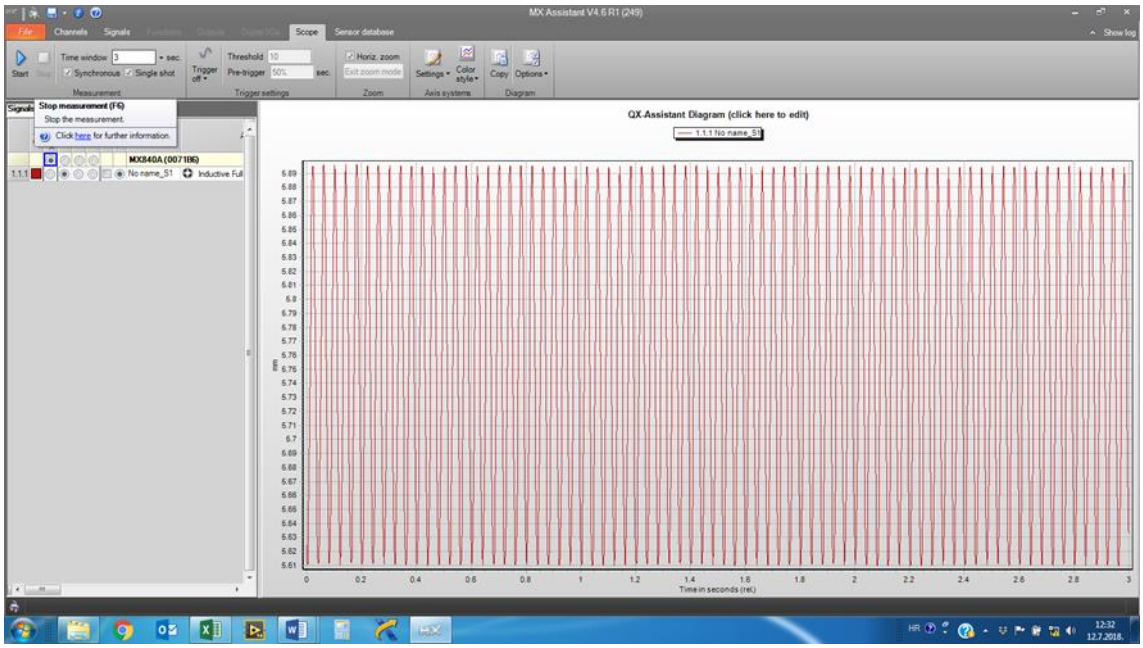
Tijekom mjerenja na frekvencijama od 2 Hz, 4 Hz i 10 Hz korišten je prozor od 25 Hz na signal analizatoru. Za više frekvencije korišten je prozor od 100 Hz.

Tijekom mjerenja su provedena snimanja korištenjem fotoaparata. Snimljene su slike i video zapisi navedenih mjerenja.

Primjer rezultata za frekvenciju od 2 Hz prikazano je na slici 5-2 a za frekvenciju od 25 Hz prikazani su na slici 5-3.



Slika 5-2 Primjer rezultata za frekvenciju od 2 Hz

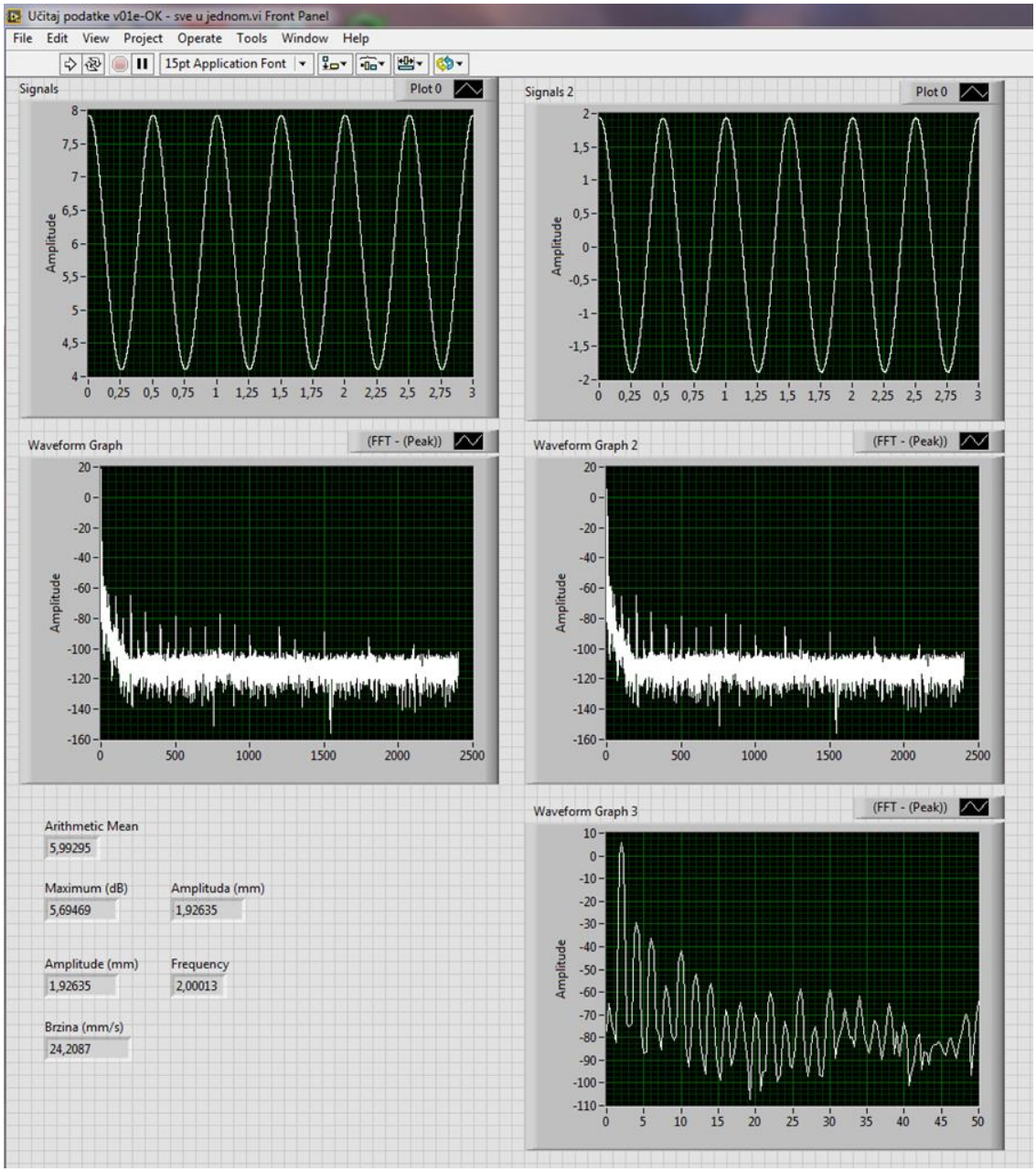


Slika 5-3 Primjer rezultata za frekvenciju od 25 Hz

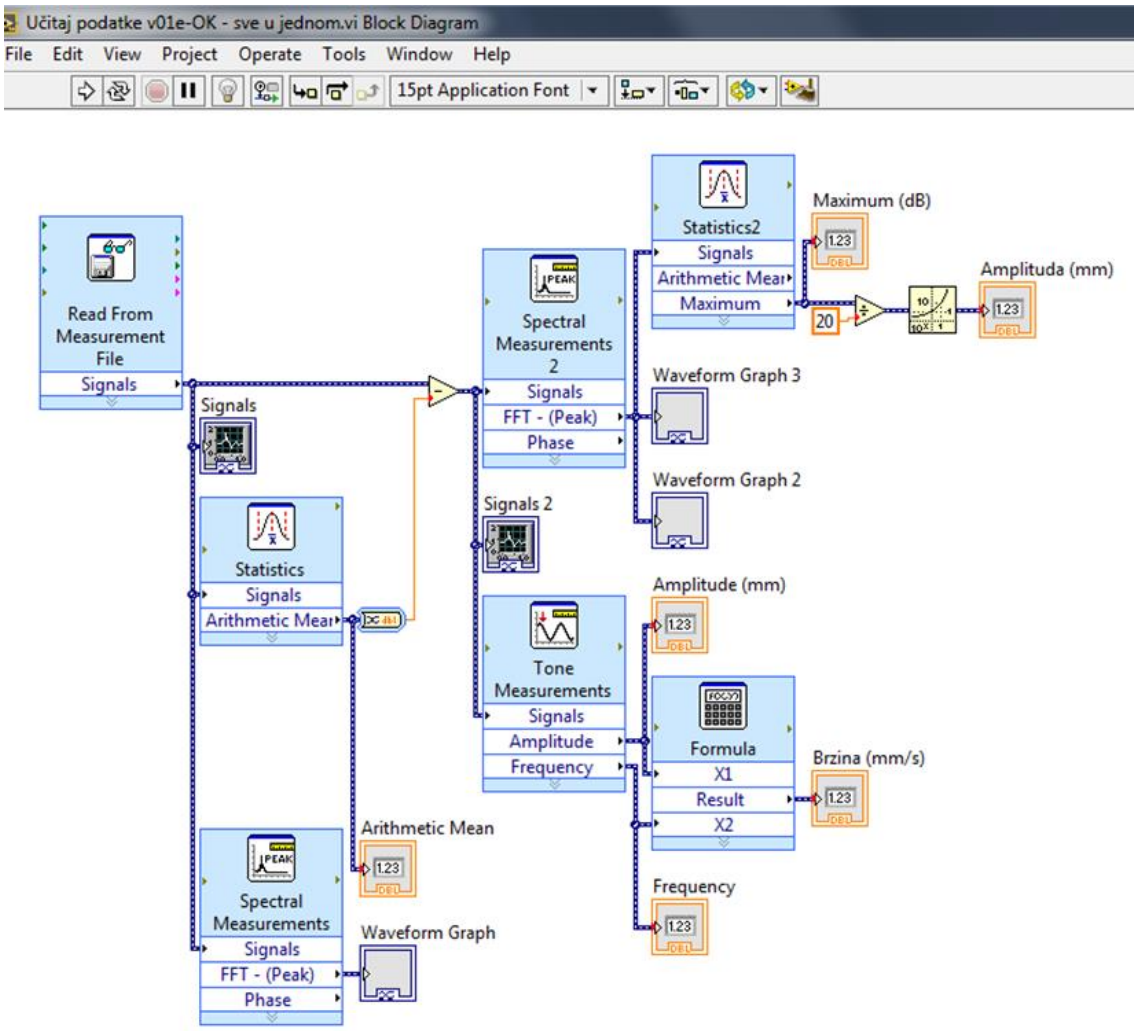
Iz slika 5-2. i 5-3. vidljiva je razlika u gustoći amplituda pri različitim frekvencijama te različite amplitude signala za iste brzine (1 in/s).

6. REZULTATI I ANALIZA

Analiza prikupljenih podataka radila se u posebno izrađenom virtualnom instrumentu izrađenom u programu Labview tvrtke National Instruments prikazanog na slikama 6-1 i 6-2. Za analizu podataka u programu Labview potrebno je učitati pripadnu datoteku i na grafovima se prikazuju rezultati iz snimljene datoteke te se prikazuju izračunate vrijednosti u pripadnim kućicama.



Slika 6-1 Prednji panel virtualnog instrumenta



Slika 6-2 Blok dijagram virtualnog instrumenta izrađenog u programu Labview

6.1. **Rezultati probnog mjerenja**

Za usporedbu rezultata potrebno je na glavu vibracijskog stola narinuti traženu akceleraciju. Pri tome se dobiva određena brzina. Mjerenjem signala pomaka dobiva se vršna vrijednost pomaka a iz toga se dobiva brzina dobivena iz pomaka.

U tablici 6-1. prikazane su namještene brzine dobivene akcelerometrom. Zatim se mjeri pomak LVDT-om za različite frekvencije i brzine uzrokovanja, a analizom mjerenja u programu Labwiev dobiveni su rezultati za pomak te brzinu što je prikazano u tablici 6-2.

Tablica 6-1 Rezultati pomaka dobiveni računskim putem

	Brzina uzorkovanja	Frekvencija	Brzina	Brzina	Pomak računski
	(Hz)	(Hz)	(in/s)	(mm/s)	(mm)
1	1200	10	1	25,4	0,404253555
2	1200	4	1	25,4	1,010633889
3	1200	2	1	25,4	2,021267777
4	1200	15	0,25	6,35	0,067375593
5	4800	15	0,25	6,35	0,067375593
6	4800	15	1	25,4	0,26950237
7	4800	25	1	25,4	0,161701422
8	4800	40	1	25,4	0,101063389

Tablica 6-2 Očitani rezultati mjerenja u programu Labwiev

	Brzina uzorkovanja	Frekvencija	Pomak izmjeren	Pomak izmjeren	Izmjerena frekvencija	Brzina
	(Hz)	(Hz)	(dB)	(mm)	(Hz)	(mm/s)
1	1200	10	-8,02905	0,396778	10,0001	24,9306
2	1200	4	-0,15458	0,98236	4,00001	24,6895
3	1200	2	5,82318	1,95506	1,99978	25,5652
4	1200	15	-23,8848	0,063938	15,0001	6,02604
5	4800	15	-23,8979	0,063842	15,0002	6,01701
6	4800	15	-11,5463	0,264657	15,0001	24,9434
7	4800	25	-16,4702	0,150137	25,0002	23,5838
8	4800	40	-20,0461	0,099471	40,0001	25

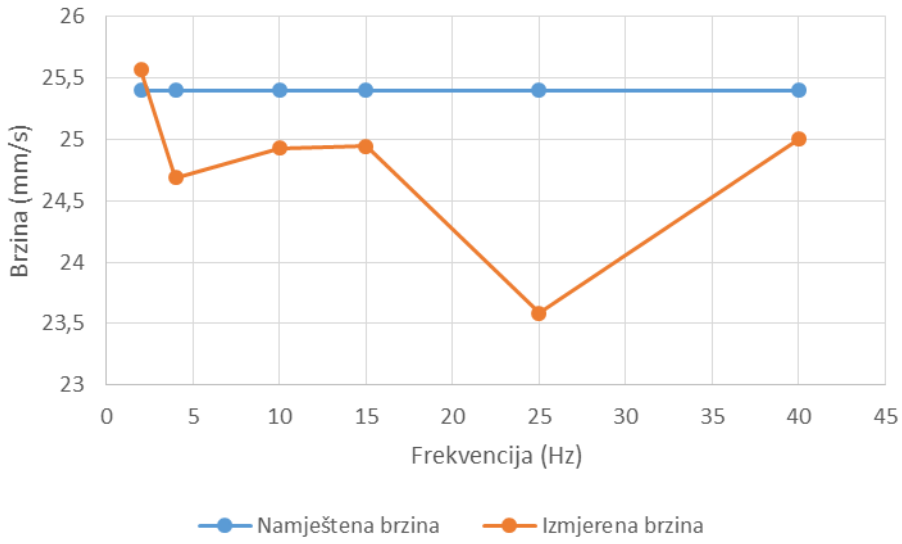
Kada se odvoje podaci sa brzinom od 1 in/s te se podaci sortiraju dobiva se tablica 6-3 i 6-4. Ti rezultati su prikazani na slici 6-1. Razlike su do 7,2 %.

Tablica 6-3 Sortirani podaci pri brzini 1 in/s

Brzina uzorkovanja	Frekvencija	Brzina	Namještena brzina	Pomak računski	Potreban signal	Stvarni signal	Stvarna brzina
(Hz)	(Hz)	(in/s)	(mm/s)	(mm)	(dBV)	(dBV)	(mm/s)
1200	2	1	25,4	2,021267777	-39,75	-39,702	25,54075415
1200	4	1	25,4	1,010633889	-33,73	-33,73	25,4
1200	10	1	25,4	0,404253555	-25,74	-25,764	25,32991408
4800	15	1	25,4	0,26950237	-22,25	-22,249	25,40292445
4800	25	1	25,4	0,161701422	-17,8664	-17,859	25,42164892
4800	40	1	25,4	0,101063389	-13,809	-13,797	25,43511565

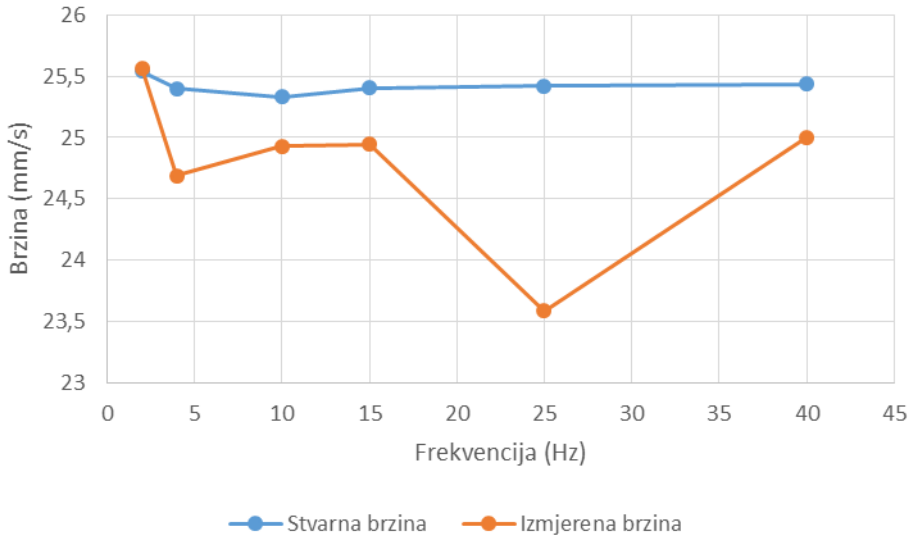
Tablica 6-4 Sortirani podaci pri brzini 1 in/s

Brzina uzorkovanja	Frekvencija	Pomak izmjeren	Pomak izmjeren	Izmjerena frekvencija	Izmjerena brzina
(Hz)	(Hz)	(dB)	(mm)	(Hz)	(mm/s)
1200	2	5,82318	1,95506	1,99978	25,5652
1200	4	-0,15458	0,98236	4,00001	24,6895
1200	10	-8,02905	0,396778	10,0001	24,9306
4800	15	-11,5463	0,264657	15,0001	24,9434
4800	25	-16,4702	0,150137	25,0002	23,5838
4800	40	-20,0461	0,099471	40,0001	25



Slika 6-3 Usporedba namještenih i izmjerenih brzina.

Na slici 6-3. se može primijetiti da je namještena brzina (plava boja) pravac. S obzirom da je namještena pobuda bila malo drugačija od željene obavljeno je preračunavanje u stvarne brzine. Rezultat je prikazan na slici 6-4 na kojoj se vidi da plavi stvarna brzina (plava boja) ipak nije konstantna. No i dalje postoji značajno odstupanje rezultata tako da neprecizno namještanje nije razlog.

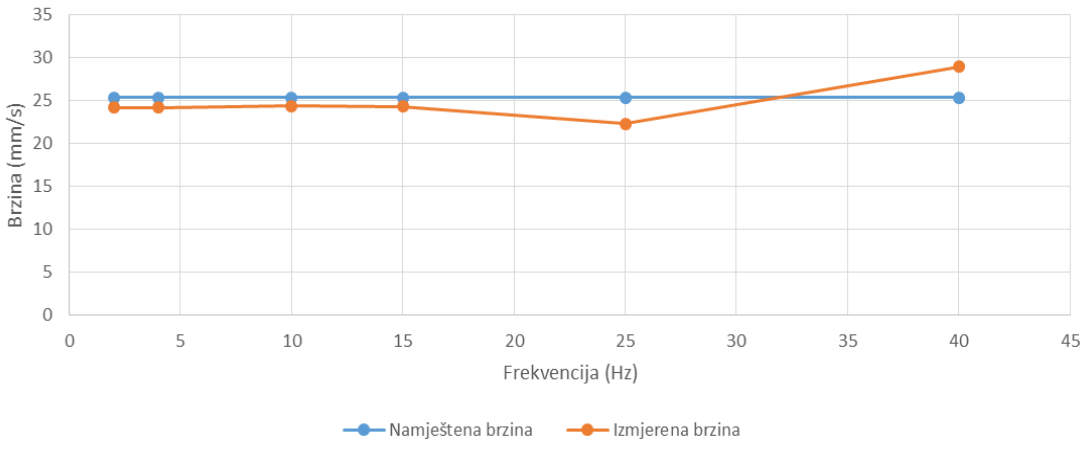


Slika 6-4 Usporedba stvarne i izmjerene brzine

Naime, na slici 6-4 uočljivo je da stvarna brzina nije jednaka namještenoj, te da linija stvarne brzine ipak nije ravni pravac.

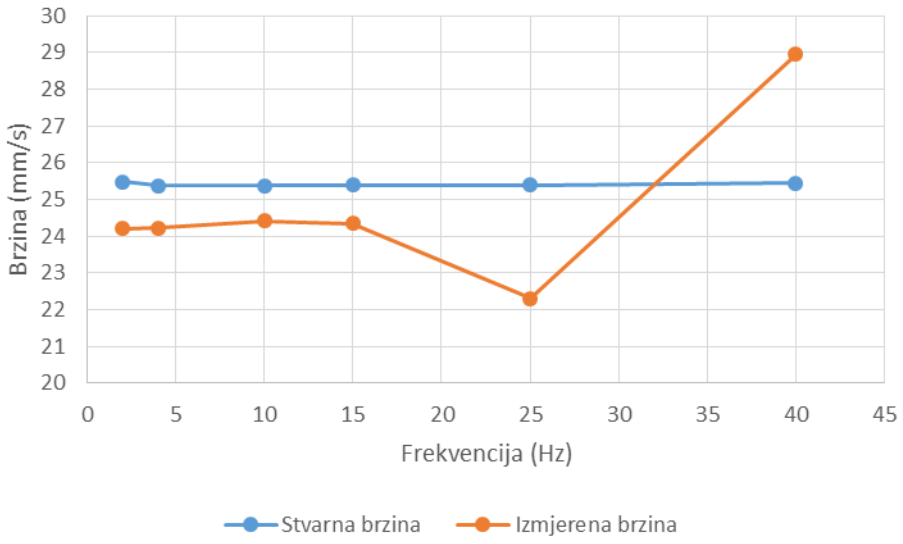
6.2. **Rezultati konačnog mjerenja**

Rezultati drugog mjerenja prikazani su na slici 6-5 i 6-6. I dalje postoje značajnije razlike pri višim frekvencijama. Izmjerena brzina je za zadnju točku veća od namještene.



Slika 6-5 Dijagram namještene i izmjerene brzine pri drugom mjerenju

Na slici 6-6. prikazan je odnos stvarne brzine i mjerene brzine. U ovom slučaju je stvarna brzina slična pravcu kao i kod namještene brzine što je potvrda da se pažljivim namještanjem može dobiti precizniji rezultat. Brzina dobivena preko LVDT-a je za oko 5 % manja od namještene pri nižim frekvencijama. Razloge za to treba pomnije istražiti.



Slika 6-6 Dijagram stvarne i izmjerene brzine pri drugom mjerenju.

Odstupanja pri višim frekvencijama se može pripisati efektu granične frekvencije LVDT-a te utjecaju osjetljivosti i točnosti na mjerenje pomaka.

LVDT se ponaša poput niskopropusnog filtra te ako mu se narine pomak više frekvencije on će davati manji izlazni signal premda se i dalje pomiče za jednaki korak. Kao što se vidi iz specifikacije granična frekvencija je 60 Hz za pomak od 1 mm što znači da se taj efekt javlja na frekvencijama koje su iznad 6 Hz.

Utjecaj osjetljivosti znači da LVDT ima određenu prosječnu osjetljivost te moguća odstupanja od te karakteristike. Što je pomak manji (veća frekvencija) to se na manjem dijelu mjernog područja nalazimo te postoji mogućnost da je osjetljivost različita od nazivne. To se može riješiti umjeravanjem LVDT-a na puno više točaka unutar mjernog područja.

Utjecaj točnosti znači da ako LVDT ima točnost od ± 5 µm, to će biti veći problem pri mjerenju malih pomaka (više frekvencije) nego kod većih pomaka (niže frekvencije) tj. relativna greška može značajno narasti za mjerenje malih pomaka.

Dodatni mogući razlog je da LVDT ima rezonantnu frekvenciju koja uzrokuje povećanje amplitude signala kako frekvencija raste.

7. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada je bio pokazati kako je složen sustav za umjeravanje vibracija te kako se iz konstanti osjetljivosti pojedinih dijelova mjernog lanca dobiva željena brzina tj. akceleracija.

Dodatno je napravljena usporedba brzina dobivenih iz mjerenja akceleracije akcelerometra u odnosu na brzine dobivene iz mjerenja pomaka glave vibracijskog stola. Pomak je mjeren sa pretvornikom LVDT-om nazivnog pomaka od 10 mm i mjernog sustava HBM QuantumX MX840A. Mjerenjem je procijenjen utjecaj na razultat različitih postavki mjernog sustava HBM. Zaključeno je da je šum unutar raspona od oko ± 2 μm, da se podaci mogu prikupljati sa brzinom od 4800 Hz te da je dovoljno prikupiti uzorke u trajanju od 3 sekunde kako datoteke ne bi bile nepotrebno prevelike.

Mjerenjima su utvrđene neobično velike razlike u ova dva principa mjerenja. Razlog za to nije odstupanje od namještene vrijednosti. Također nije ni odstupanje od okomitosti montaže LVDT-a u odnosu na glavu vibracijskog stola.

U konačnom mjerenju brzina dobivena preko LVDT-a je za oko 5 % manja od namještene pri nižim frekvencijama. Razloge za to treba pomnije istražiti.

Odstupanja pri višim frekvencijama se može pripisati efektu granične frekvencije LVDT-a te utjecaju osjetljivosti i točnosti na mjerenje pomaka.

Dodatni mogući razlog je da LVDT ima rezonantnu frekvenciju koja uzrokuje povećanje amplitude signala kako frekvencija raste.

8. POPIS KORIŠTENE LITERATURE:

Agilent Technologies, Inc. 2009. Agilent 33210A/20A/50Afunction/arbitrary waveform generators. U.S.A.

Bednjanec A. 2008. Elektronička instrumentacija. Zagreb. Element

Božić, B. Koprek T. Gazdek M. 2007. Elaborat o mjerenju seizmičkih efekata miniranja, autocesta Zagreb-Split-Dubrovnik, dionica Šestanovac – Zagvozd, Lokacija: Grabovac. Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet. Varaždin

Božić, B., Koprek T., Žetko T., Petrović N. 2008. Elaborat o mjerenju seizmičkih efekata miniranja, autocesta Zagreb-Split-Dubrovnik, dionica Šestanovac – Zagvozd, Lokacija: Dujmovići, Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Varaždin

Brüel & Kjær. 2004. 4370 accelerometer and charge amplifer manual. Microelectronic systems laboratory department of computer science. University of North Carolina

Brüel & Kjær. 2007. Charge to DeltaTron Converters Types 2647, 2647-A, 2647-B, 2647-C and 2647-D. Denmark

Brüel & Kjær. 2007. The NEXUS range of conditioning amplifiers types 2690, 2691, 2692 and 2693. Denmark

Brüel & Kjær. 2017. LDS Small electromagnetic vibration systems. Denmark

Krsnik, J. 1989. Miniranje. Sveučilište u Zagrebu. Rudarsko-geološko-naftni fakultet. Zagreb

Leksikografski zavod Miroslav Krleža. Pojačalo/enciklopedija. URL: http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=49022

Mesec, J. 2005. Dopuštene količine eksplozivnog punjenja ovisno o relativnoj seizmičkoj osjetljivosti stijenskih masa. Rudarsko-geološko-naftni zbornik. Vol. 17. str. 61-72. Zagreb

Petrov M. 1993. Rudarsko-geološko-naftni-zbornik. Smanjenje intnziteta potresa izazvanih miniranjem na kamenolomima>>Hercegovac<< i >>Max-Stoja<<, Vol. 5, str. 187-195, Zagreb

Shimshon L. October, 2012. Spectrum analyzer and spectrum analysis. Product data

Stanford Research Systems. 1995, 1996. Model SR780 network signal analyzer. California