TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Virumaa kolledž

Vibratsioonianalüüsi mobiilsüsteemi mudeli väljatöötamine.

Development of a Vibration Analysis Mobile System Model.

MASINAEHITUSTEHNOLOGIA ÕPPEKAVA LÕPUTÖÖ

Üliõpilane: Ilja Leonov
Üliõpilaskood:212426
Juhendaja: Tatjana Baraškova,
vanemlektor

Kohtla-Järve, 2025

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

TalTech Inseneriteaduskond Virumaa kolledž

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Ilja Leonov, 212426EDJR

Õppekava, peaeriala: EDJR16/21 - Masinaehitus- ja energiatehnoloogia protsesside juhtimine, masinaehitustehnoloogia

Juhendaja(d): vanemlektor, Tatjana Baraškova, tatjana.baraskova@taltech.ee

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Vibratsioonianalüüsi mobiilsüsteemi mudeli väljatöötamine.

(inglise keeles) Development of a vibration analysis mobile system model.

Lõputöö põhieesmärgid:

1. EU nõuetele vastavalt vibratsioonianalüüsi mobiilsüsteemi mudeli ülesehitus
2. Sensorite valik ja paigaldus.
3. Mobiilirakenduse arendus ja kasutajaliides

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Süsteemi eesmärgi väljatöötamine ning prototüübi kirjeldamine	21.03.2025
2.	Vibratsioonianalüüsi mobiilsüsteemi mudeli ülesehitus	15.04.2025
3.	Andmete töötlemine ja analüüs	12.05.2025
4.	Lõputöö vormistamine.	23.05.2025

Töö keel: eesti **Lõputöö esitamise tähtaeg:** 23.05. 2025a

Üliõpilane: *Ilja Leonov* 23.05. 2025a

/allkiri/

Juhendaja: Tatjana Baraškova

23.05. 2025a

/allkiri/

Programmijuht: Veroonika Shirokova 23.05. 2025a

LIHTLITSENTS LÕPUTÖÖ ÜLDSUSELE KÄTTESAADAVAKS TEGEMISEKS JA REPRODUTSEERIMISEKS[1]

Mina Ilja Leonov (sünnikuupäev: 13.08.2002)Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Vibratsioonianalüüsi mobiilsüsteemi mudeli väljatöötamine.

1. mille juhendaja on Tatjana Baraškova,
   1.1. reprodutseerimiseks säilitamise ja elektroonilise avaldamise eesmärgil, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
   1.2. üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. Olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta kolmandate isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ja teistest õigusaktidest tulenevaid õigused.

---

[1] *Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingulise tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautori(d) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti*

SISUKORD

EESSÕNA 7

SISSEJUHATUS 8

1. ÜLEVAADE OLEMASOLEVATEST MOBIILSETEST DIAGNOSTIKASÜSTEEMIDEST JA NENDE UURIMINE 10

1.1 Vibratsioonisignaalide rakendamine raudteeröobaste diagnostikas mobiilse raudteeplatvormi abil 10

1.2 Universaalne mobiilne elektrokeemiline detektor, mis on loodud kasutamiseks piiratud ressurssidega rakenduste 12

1.3 Akuusto-seismiline monitooring 13

2. ANDURITE VALIK 15

2.1 Vibratsiooniandurite magnetkinnitus E30449 16

2.2 Ühenduskaabel EVC013 16

2.3 Pistikuga ühenduskaabel EVC002 17

3. ANDURI KALIBREERIMINE 18

3.1 Üldandmed 18

3.2 Anduri kalibrerimine MATLABI abil 20

4. ANDURI KINNITUSE ARENDAMINE 23

4.1 Paigaldamine 24

5. ANDURI ÜHENDAMINE 26

5.1 Anduri väljund 26

5.2 Süsteemi plokkskeem 27

5.3 Tarkvara 27

6. VÕLLI JA LAAGRITE TELLIMINE 28

6.1 Võlli tolerantside tabel 29

6.2 Tolerantside arvutused 29

6.3 Võlli CAD mudel 30

6.4 Laagri tellimine 30

6.5 Laagri rikutamine 31

7. SÜSTEEMIDE TESTIMINE 34

7.1 Kirendusandurite graafikud 34

7.2 Digital multimeter 36

KOKKUVÕTE 37

SUMMARY 38

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU 39

LISA 1 UURITUD SEADMED 41

LISA 2 KASUTATUD SEADMED 42
LISA 3 GRAAFIKUD JA SKEEMID.....50
LISA 4 JOONISED JA TABEL.....54

EESSÕNA

Lõputöö kirjutamise idee tekkis praktika ajal Enefit Solutions. Praktika ajal märgati ka seda, et pea kõik laagreid kasutavad paigaldised ei suutnud laagrite kulumist reaalajas jälgida ja see selgus, et selline olukord esineb paljudes ettevõtetes. Nendest teguritest lähtuvalt tekkis idee luua universaalne mobiilne platvorm koos anduriga laagrite kulumise mõõtmiseks. Seda teoreetilist ühikut saab kasutada mitte ainult laagrite kulumise mõõtmiseks, vaid ka muudes tootmisvaldkondades.

SISSEJUHATUS

Eesmärk määrati Narva ettevõtetele määratud ülesannete põhjal ja korraldati uute tehnoloogiate ja arenduste esitlus. Selle ürituse jaoks sai kolledž tellimuse mobiilse vibratsiooni jälgimisse süsteemi arendamiseks ja rakendamiseks.

Praegu puudub usaldusväärne info selle kohta, et oleks välja töötatud universaalne mobiilne diagnostikaseade magnetpadjal, mis suudaks diagnoosida erinevaid seadmeid reaalajas olenemata nende tüübist või töökeskkonnast. Enamik teadaolevatest lahendustest on piiratud konkreetse funktsiooni või rakendusvaldkonnaga.

Samuti on sarnaseid arengusuundi täheldatud meditsiinitehnoloogia valdkonnas. Näiteks artiklis [1] kirjeldatud odav kandeseade võimaldab kombineerida laialdaselt kasutatavaid elektroanalüütilisi meetodeid ja edastada andmeid mobiiltelefonide kaudu pilve. Seade toetab erinevaid elektroodiformaate, proovide segamist vibratsiooni abil ning andmeedastust läbi audioportide, mis tagab selle ühilduvuse isegi 2G võrku kasutavate telefonidega.

Seade võimaldab järgmisi elektroanalüütilisi mõõtmisi:

- Kronopontensiomeetria
- Tsükliline voltamperomeetria
- Diferentsiaalne impulssvoltamperomeetria
- Ruudulaineline voltamperomeetria
- Potentsiomeetria

Selle tehnoloogia peamised eelised on madalad kulud, sõltumatus mobiilivõrgu põlvkonnast ja lihtne kasutatavus isegi madala ressursitasemega piirkondades. Vastandina vajavad mitmed arenenud riikides välja töötatud mobiilse tervishoiu (mHealth) ja kohapealse diagnostika (POC) seadmed sageli:

- Nutitelefone;
- Spetsiifilisi rakendusi;
- Kiiret 3G/4G ühendust;
- Patenditud sensorite liideseid;
- Kasutajate tehnilist ettevalmistust.

Seetõttu ei ole paljud olemasolevad seadmed sobivad kasutamiseks piiratud infrastruktuuriga keskkondades, kus oleks vaja taskukohast, vastupidavat ja laiaulatuslikku lahendust.

Kokkuvõttes võib järeldada, et kuigi raudtee- ja tööstussektoris on välja töötatud mitmeid mobiilseid diagnostikasüsteeme, puudub senini universaalne, kõikjale sobiv ja mobiilne diagnostikaseade, mis suudaks efektiivselt ja reaalajas hinnata erinevat tüüpi seadmete või sõlmede tehnilist seisundit. Käesolev töö püüab seda puudujääki osaliselt adresseerida, pakkudes kontseptsiooni laiemalt kasutatavast, mobiilsest vibratsioonipõhisest diagnostikasüsteemist.

Vastavalt EL-i ja rahvusvahelistele standarditele, nagu ISO 20816-1:2016, peavad vibratsioonimonitooringu süsteemid tagama:

- mõõtmiste kõrge täpsuse,
- elektromagnetiliste häirete vastupidavuse,
- andmete usaldusväärse kaitse,
- töövõime erinevates kliimatingimustes,
- lihtsa integreeritavuse olemasolevate juhtimissüsteemidega. [1]

Peamised Euroopa ja rahvusvahelised standardid vibratsiooni ja vibratsioonisensorite jaoks

1. ISO 20816-1:2016 / EN ISO 20816-1 — „Mehaaniline vibratsioon — Masinate vibratsiooni mõõtmine ja hindamine — Osa 1: Üldised juhised"
   Uuendatud standard, mis laiendab ja täpsustab tööstusmasinate vibratsiooni mõõtmise nõudeid.
2. IEC 60068-2-6 — „Keskkonnatestid — Osa 2-6: Testid — Test Fc: Sinusoidne vibratsioon"
   Kirjeldab seadmete testimise meetodeid vibratsiooni mõjul.
3. IEC 61326-1 — „Elektriseadmed mõõtmiseks, juhtimiseks ja laboratoorseteks kasutusteks — Elektromagnetiline ühilduvus (EMÜ) — Osa 1: Üldnõuded"
   Standard mõõteseadmete, sealhulgas vibratsioonisensorite, elektromagnetilise ühilduvuse nõuete kohta.
4. EN 61000-6-2 — „Elektromagnetiline ühilduvus (EMÜ) — Osa 6-2: Üldstandardid —Tööstuskeskkonna immuunsus"
   Nõuded seadmete elektromagnetiliste häirete taluvusele tööstuskeskkonnas.
5. EN 50270 — „Elektriseadmed põlevate või toksiliste gaaside ja hapniku mõõtmiseks ja tuvastamiseks — Elektromagnetilise ühilduvuse nõuded"
   Elektromagnetilise ühilduvuse nõuded mõõteseadmetele, mis võivad kehtida ka vibratsioonisüsteemidele.

Andur, vibtratsiooni, andmed, analüüs, laager, diplomitöö.

1. ÜLEVAADE OLEMASOLEVATEST MOBIILSETEST DIAGNOSTIKASÜSTEEMIDEST JA NENDE UURIMINE

1.1 Vibratsioonisignaalide rakendamine raudteerööbaste diagnostikas mobiilse raudteeplatvormi abil

Artikkel "Application of vibration signals in railway track diagnostics using a mobile railway platform" käsitleb uuenduslikku lähenemist raudteetaristu seisundi hindamisele, kasutades mobiilset mõõteplatvormi ning vibratsioonisignaale. Uurimistöö keskmes on võimalus teostada pidevat seisundimonitooringut rongiliikluse katkestamiseta, mis suurendab oluliselt diagnostika efektiivsust ja operatiivset väärtust.

Vibratsioonisignaale koguti spetsiaalsete akseleromeetritega (4504A ja 4508), mis olid paigaldatud veeremi teljekarbi konstruktsioonidele. Mõõtmised viidi läbi kolmes suunas – piki liikumist (x), horisontaalselt (y) ja vertikaalselt (z). Andmete salvestamisel kasutati kõrgsageduslikku diskreetimist 51,2 kHz juures.

Signaalide analüüsimisel rakendati nii aja- kui ka sagedusanalüüsi meetodeid. Kasutati kiiret Fourier' teisendust (FFT), kõrgsagedusfiltreid (IIR), samuti topeltintegreerimist vertikaalsete nihete määramiseks. Tulemuste paremaks interpreteerimiseks viidi läbi ka kolmandiku-oktavi analüüs ning võimsusspektri tiheduse (PSD) hindamine, mis võimaldas hinnata signaali tugevust erinevates sagedusvahemikes.

Uuringu käigus käsitleti kolme põhilist juhtumit:

- Rööbaste jooksupinna defektide (nt squat nr 227) tuvastamine, kus olulised olid madalsageduslikud vertikaalsed võnked kuni 100 Hz;
- Raudteeülekäikude seisundi hindamine, sõltuvalt pinnakattematerjalist (väikese või suure mõõduga plaadid);
- Tee-ehituselementide muutuste tuvastamine, nt liiprite vahetus (puit → betoon) või kinnitusdetailide muutus (K-tüüp → SB-tüüp).

Analüüs näitas, et kõige informatiivsemad andmed saadi vertikaalsuunalise (z) vibratsiooni mõõtmisel. Näiteks SB-tüüpi kinnitusdetailide korral oli vibratsiooni amplituud märgatavalt kõrgem võrreldes K-tüübiga. Spektraalanalüüs näitas tüüpilisi maksimume 200 Hz piirkonnas, olenevalt rööbastee konstruktsioonist ja seisundist.

Lisaks füüsilistele mõõtmismeetoditele toetuti kaasaegsetele tehnoloogiatele nagu inertsiaalmõõteseadmed (IMU, INS), satelliitnavigatsioon (GNSS) ja tehisintellektil põhinevad algoritmid, sealhulgas süvaõpe (deep learning), konvolutsioonilised närvivõrgud (CNN) ning osaliselt jälgitavad Markovi otsustusprotsessid (POMDP). Need lahendused võimaldavad suurendada diagnostika täpsust ja prognoosida rikete

esinemist varases faasis.

Kokkuvõtlikult võib öelda, et vibratsioonisignaale kasutav mobiilne diagnostikasüsteem on tõhus ja töökindel lahendus raudteetaristu seisundi hindamiseks, võimaldades tõhusamat hooldusplaneerimist ning tõstes raudteeliikluse ohutust. [5]

Joonis 1.1 Süsteemi paigaldus [5]

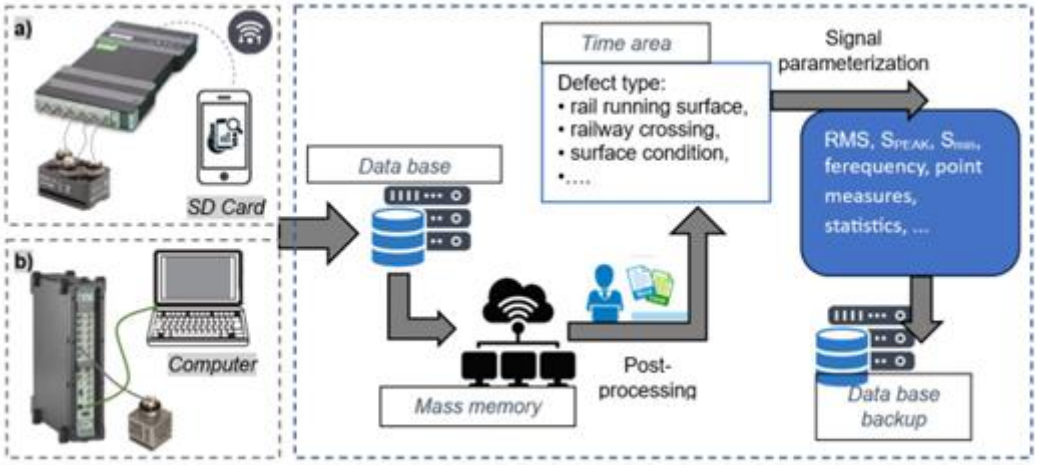


Fig. 3. Scheme of the architecture system for collecting and processing measurement data

Joonis 1.2 Mõõtmisandmete kogumise ja töötlemise arhitektuuri süsteemi skeem [5]

1.2 Universaalne mobiilne elektrokeemiline detektor, mis on loodud kasutamiseks piiratud ressurssidega rakenduste

uMED suudab teha viit peamist tüüpi elektrokeemilisi mõõtmisi: tsükliline voltamperomeetria (CV), krooniline amperomeetria (CA), diferentsiaalne impulssvoltamperomeetria (DPV), ruutlaine voltamperomeetria (SWV) ja potentsiomeetria (ISE). Selle saavutamiseks on seadmesse integreeritud spetsiaalne potentsiostaat, ADC/DAC-muundurid, mikrokontroller Atmega328 ja LCD-ekraan koos nuppudega. Seade toetab nii kahe- kui kolmeelektroodilisi konfiguratsioone ning ühildub erinevat tüüpi kaubanduslike ja paberelektroodidega.

Oluline uuendus on seadmesse integreeritud vibratsioonimootor, mis segab proove otse elektroodil ilma lisaseadmeid (nt magnetsegaja) kasutamata. See on eriti oluline meetodite puhul, kus difusioon piirab reaktsioonikiirust, näiteks raskmetallide määramisel.

uMED on loodud maksimaalseks lihtsuseks ja universaalsuseks. Tulemuste edastamiseks kasutatakse tavalist heliväljundit (2,5 mm TRRS) ning andmed kantakse mobiiltelefoni kaudu edasi sagedusmanipulatsiooni (FSK) abil tavalises telefonikõnes. Tänu sellele saab seadet kasutada koos mis tahes telefoniga — nii nuputelefonide kui ka nutitelefonidega — ja mis tahes mobiilsidevõrgus. Andmeedastuse usaldusväärsust tagab sisseehitatud veakontroll (CRC).

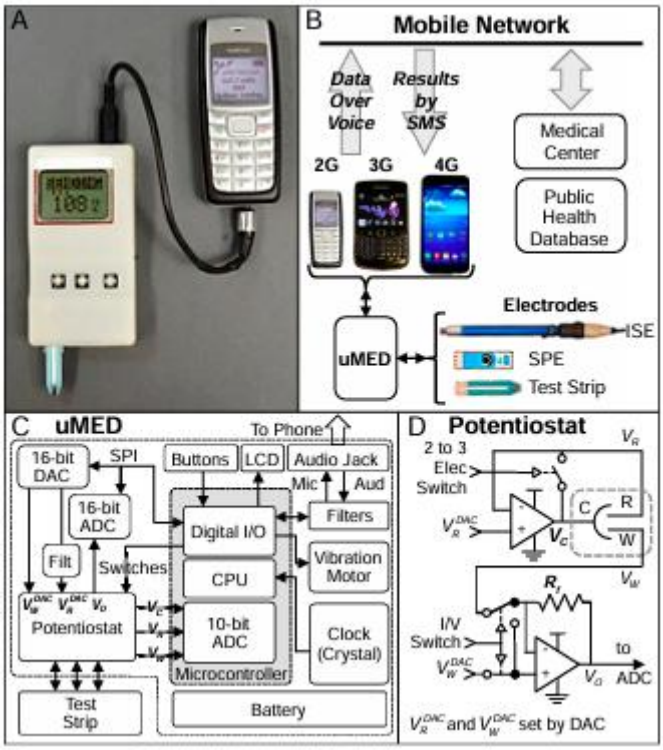
Kasutusvaldkonnad

Seade on edukalt testitud neljas praktilises rakenduses:

1. Vere glükoosisisalduse mõõtmine – kasutades kaubanduslikke testiribasid ja kroonilist amperomeetriat, saavutati täpsus ja lineaarsus kogu füsioloogilises vahemikus (50–500 mg/dL).
2. Raskmetallide (Zn, Cd, Pb) määramine vees – kasutades SWASV ja süsinikust ekraantrükitud elektroode koos vibratsioonisegamisega; plii tuvastuspiiriks saadi 4 µg/L, mis on alla WHO normi.
3. Naatriumisisalduse mõõtmine uriinis – potentsiomeetria ja ionselektiivsete elektroodide abil saavutati ±8% täpsus, mis jääb kliiniliselt aktsepteeritavatesse piiridesse.
4. Malaaria diagnoosimine – kasutades elektrokeemilist ELISA-meetodit PfHRP2 antigeeni määramiseks; avastamispiir oli 20 ng/mL.

uMED on märkimisväärne samm taskukohase ja usaldusväärse elektrokeemilise diagnostika suunas. Selle madal hind, iseseisev töövõime, ühilduvus olemasoleva mobiilsidevõrguga ja lai funktsionaalsus muudavad selle väärtuslikuks tööriistaks

meditsiinilisteks, keskkonnaalasteks ja kliinilisteks mõõtmisteks kohtades, kus tavapärased laborid puuduvad. Seade on loodud olema lihtsalt kasutatav, usaldusväärne ja kohandatav paljudele kasutusvaldkondadele – kõik, mida vaja teha, on sisestada testiriba, valida režiim, lisada proov ja helistada.[6]



Joonis 1.3 Universaalne mobiilne elektrokeemiline detektor (uMED) [6]

1.3 Akuusto-seismiline monitooring

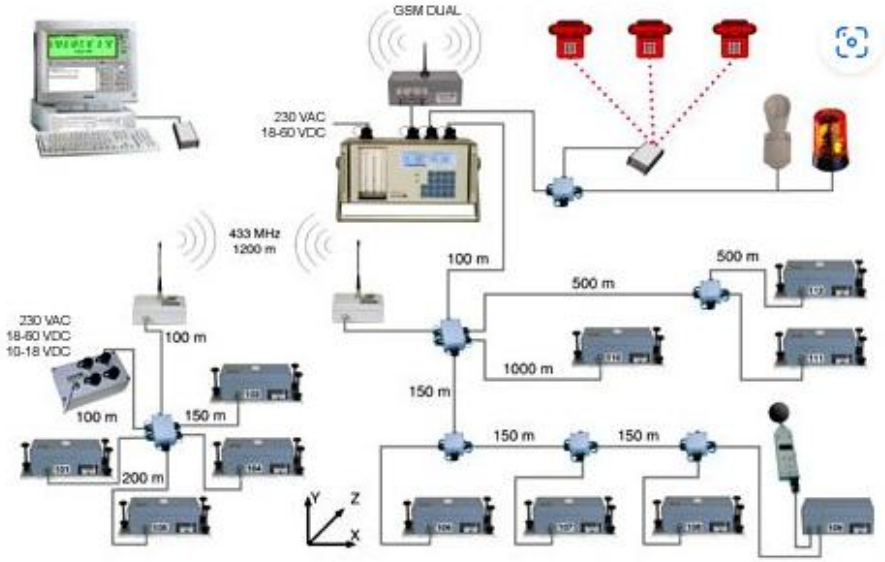
Akuusto-seismiline monitooring on tõhus meetod vibratsioonide reaalajas jälgimiseks. Süsteem „Gorgona" võimaldab tuvastada ja analüüsida objekti võnkeid amplituudiga 1–200 mm/s või kiirendustega kuni 50 m/s². Süsteem koosneb:

- kolmesuunalistest vibratsioonisensoritest, mis paigaldatakse jälgitavale objektile;
- andmekogumisseadmest, mis salvestab ja analüüsib andmeid ning edastab häireid.

Sensorid mõõdavad sagedusi vahemikus 1–315 Hz ning on kaitstud niiskuse ja tolmu eest. Andmekogumisseade suudab teenindada kuni 16 kolmeteljelist või 48 üheteljelist andurit ja aktiveerib häiresignaali, kui vibratsiooni tase ületab määratud künnise.

Iga sensorisignaal teisendatakse digitaalseks ning arvutatakse üldine kiirusvektor, mis võimaldab hinnata vibratsiooni tugevust. Andmeid töödeldakse iga 10 sekundi järel ning edastatakse kesksesse andmejaama ainult siis, kui tuvastatakse normist kõrvalekalle.

Andmekeskus koostab ajalised graafikud ning salvestab viimased 120 sündmust. Süsteem võimaldab automaatset andmeedastust serverisse, kus toimub detailne analüüs spetsiaalse tarkvara „Geoskop" abil. Süsteem on seadistatav vastavalt taustmürale ja keskkonnatingimustele ning võimaldab kiiret reageerimist kriitilistele olukordadele. [7]



Joonis 1.4 Tööstusliku vibratsiooniseire süsteemi skeem [7]

2. ANDURITE VALIK

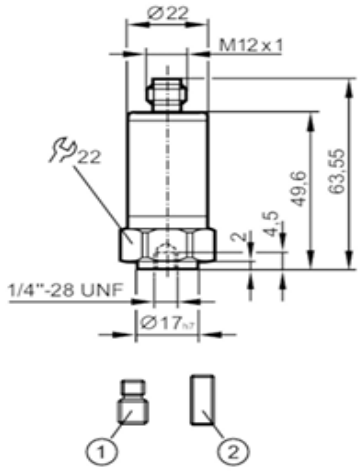
Anduri valimisel arvestati peamiselt võimalusega kinnitada andur liikuv platvormile ja sellega, millist andmeväljundit selle anduriga kasutada saab. Leidsime anduri mis võib koguda suure täpsustega ja selleks anduril peab olema suur töösagedus. Selle põhjal valiti üsna populaarne andurite seeria, millest üks meile igas mõttes sobis, plussiks on ka selle hind, kuigi see varieerub sõltuvalt sellest, kust andurit tellida.

Siis sobiv andurite nimi on Vibration sensor VVB010.

VVB010

Vibration sensor

VIBRATION IO-LINK SWITCH



1 set screw ¼"-28 UNF / M8
2 set screw ¼"-28 UNF

IO-Link

Product characteristics		
Frequency range [Hz]		2...10000
Measuring principle		capacitive
v-RMS		
Measuring range of vibration [mm/s]		0...45
a-Peak / a-RMS		
Measuring range of vibration	0...50 g	0...490.3 m/s²
Application		
Application		Big machines, performance > 300 kW, speed > 600 rpm
Electrical data		
Operating voltage [V]		18...30 DC
Current consumption [mA]		< 50
Min. insulation resistance [MΩ]		100; (500 V DC)
Protection class		III
Reverse polarity protection		yes
Type of sensor		Microelectromechanical system (MEMS)
Inputs / outputs		
Number of inputs and outputs		Number of digital outputs: 2

ifm efector, inc. • 1100 Atwater Drive • Malvern • PA 19355 — We reserve the right to make technical alterations without prior notice. — EN-US — VVB010-01 — 13-04-2023 —

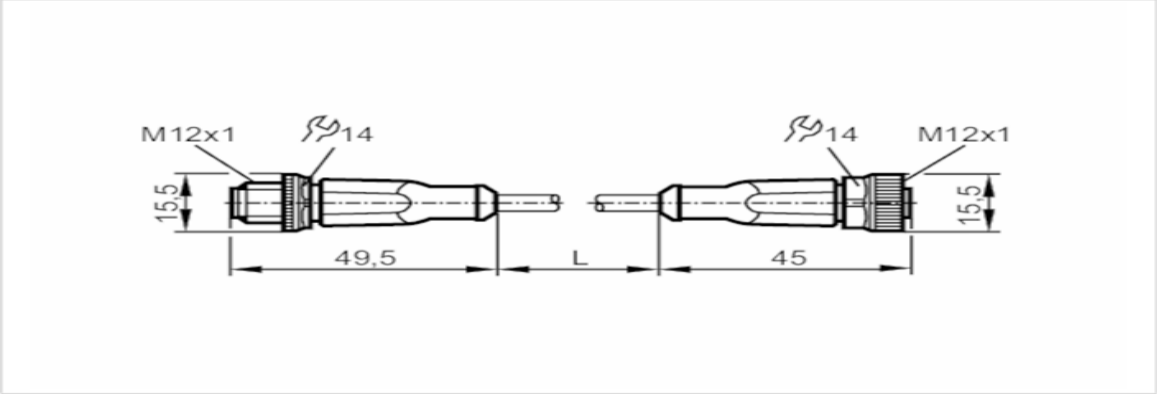
Joonis 2 Andur VVB010 [8]

2.1 Vibratsiooniandurite magnetkinnitus E30449

Seda kinnituse adurite jaoks ei kasutatakse meie juhtumis, sest selline kinntitus pole mobiilne. Kui me paneme seda kinnituse, siis andur jaab platvormis igavesti. See kinnitus kasutab neodüümmagnetit ja seda on peaaegu võimatu metallpinnalt lahti saada, seetõttu me seda ei kasuta ka.

Joonis 2.1 Magnetkinnitus E30449 [11]

2.2 Ühenduskaabel EVC013



Application		
Special feature		Free from silicone; Halogen-free; Gold-plated contacts; Drag chain suitability
Free from silicone		yes
Electrical data		
Operating voltage	[V]	< 250 AC / < 300 DC
Protection class		II
Max. current load total	[A]	4
Operating conditions		
Ambient temperature	[°C]	-25...90
Note on ambient temperature		cULus: ...75
Ambient temperature (moving)	[°C]	-25...90
Note on ambient temperature (moving)		cULus: ...75
Storage temperature	[°C]	-25...55
Storage humidity	[%]	10...100
Other climatic conditions for storage according to stated class		1K22/ DIN 60721-3-1
Protection		IP 65; IP 67; IP 68; IP 69K

Joonis 2.2 Ühenduskaabel EVC013 [10]

2.3 Pistikuga ühenduskaabel EVC002

Application

Special feature	Free from silicone; Halogen-free; Gold-plated contacts; Drag chain suitability
Free from silicone	yes

Electrical data

Operating voltage [V]	< 250 AC / < 300 DC
Protection class	II
Max. current load total [A]	4

Operating conditions

Ambient temperature [°C]	-25...90
Note on ambient temperature	cULus: ...75 °C
Ambient temperature (moving) [°C]	-25...90
Note on ambient temperature (moving)	cULus: ...75 °C
Storage temperature [°C]	-25...55
Storage humidity [%]	10...100
Other climatic conditions for storage according to stated class	1K22/ DIN 60721-3-1
Protection	IP 65; IP 67; IP 68; IP 69K

Joonis 2.3 Ühenduskaabel EVC002 [9]

3. ANDURI KALIBREERIMINE

Vibratsioonisensori VVB010 kalibreerimine on vajalik selleks, et tagada mõõtmiste täpsus ja usaldusväärsus. Aja jooksul võivad sensori omadused muutuda erinevate tegurite mõjul, näiteks temperatuurikõikumiste, mehaaniliste koormuste või komponentide vananemise tõttu. See võib põhjustada kõrvalekaldeid mõõtetulemustes. Kui sensor ei ole kalibreeritud, on oht saada ebausaldusväärseid andmeid. Selle tulemusel võib jääda märkamata arenev rike, näiteks laagris, või vastupidi — tuvastatakse lubatud vibratsioonitaseme ületus seal, kus tegelikult on kõik korras. Kalibreerimine võimaldab kontrollida ja vajadusel korrigeerida sensori tundlikkust, veenduda, et mõõtetulemused vastavad kehtivatele standarditele, ning tuvastada võimalikke kõrvalekaldeid, nagu nullpunkti nihe või mittelineaarne reaktsioon vibratsiooni taseme muutusele. Lisaks tagab kalibreeritud sensor mõõtmistulemuste võrreldavuse erinevate mõõtesüsteemide vahel ning võimaldab kasutada andmeid vastavalt normatiivdokumentide nõuetele.

3.1 Üldandmed

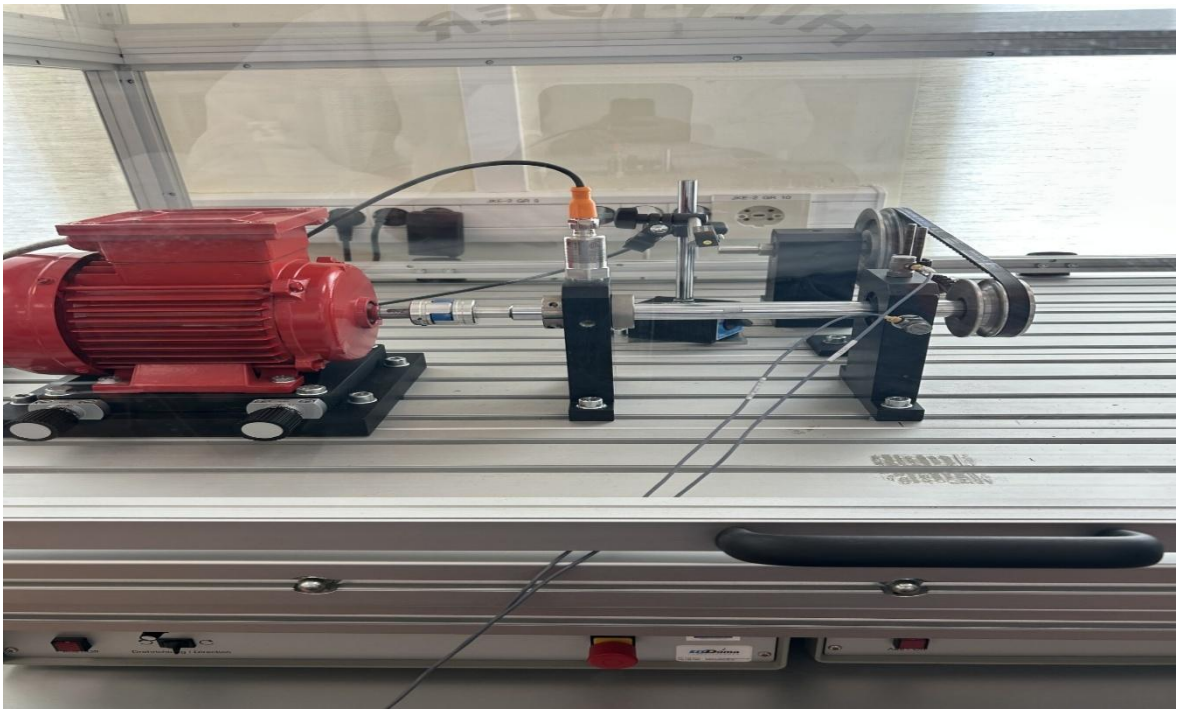
Vibratsioonisensori kalibreerimisel kasutati seadmeid, sealhulgas kalibreerimisplatvormi PT500 ja PT500.04, mis võimaldab täpselt määrata sensori tundlikkuse ja kontrollida selle mõõtetäpsust.

PT500 seadme komplekt sisaldab: alusplaat kaitsekattega, kuvamis- ja juhtseade, asünkroonmootor sagedusmuunduriga, 2 võlli, 2 tasakaalustamata väntvõlli, 2 sidurit, 2 laagrit, hoidikplaat, 2 kinnituskomplekti, tööriistakomplekt, hoiustamissüsteem vahtmaterjaliga, juhendmaterjalide komplekt [12]

Joonis 3.1 GUNT PT500 [12]

PT500.04 mõteseadme komplekt sisaldab: mõõtevõimendi, 2 kiirendusandurit, kiirusandur koos hoidiku ja peegeldava teibiga, GUNT tarkvara + USB-kaabel, USB-karp + andmekaabel, 1 kombivõti AF 13, 1 hoiustamissüsteem vahtmaterjaliga, kasutusjuhend [9]

Joonis 3.2 GUNT PT500.04 [13]



Joonis 3.3 GUNT PT500 ja PT500.04

3.2 Anduri kalibrerimine MATLABI abil

Anduri kalibreerimiseks kasutati seadet, mis on näidatud ülaltoodud pildil. Anduri kalibreerimise programm viidi läbi Matlabis ja kõik arvutused ning nende analüüs tehti samuti selle programmi põhjal. Esialgu oli vajalik tutvuda selle programmi lisas toodud dokumentatsiooniga.

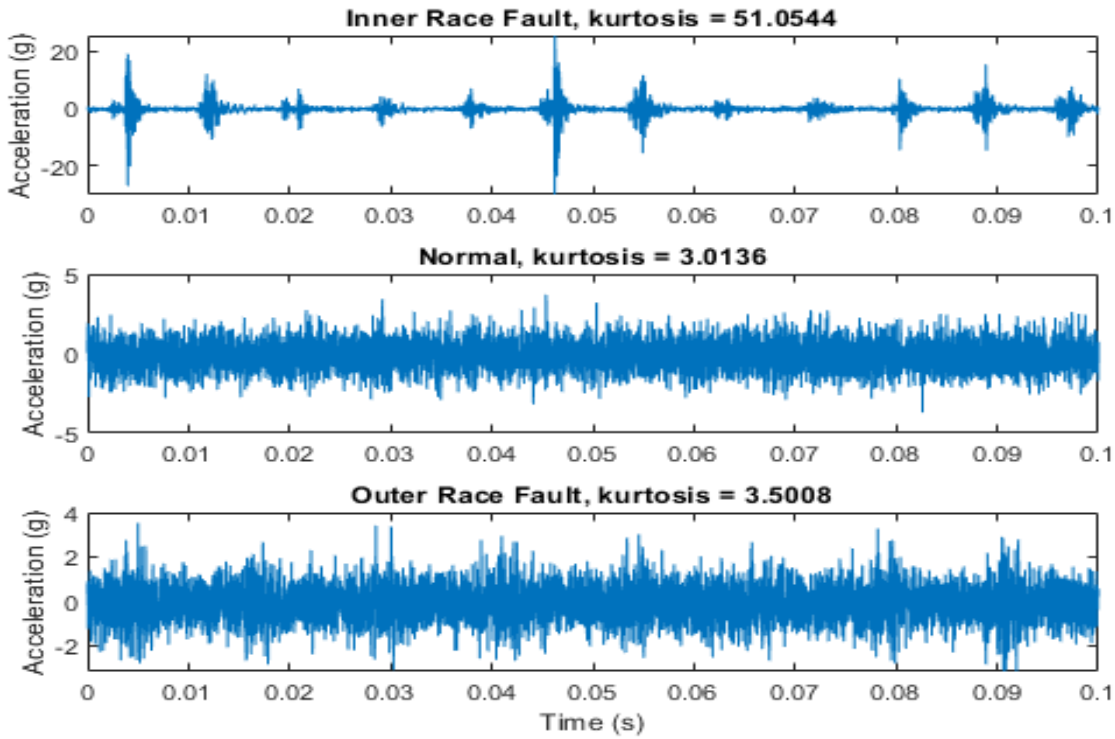
Programm on loodud näidiseks ja laagri rikete tuvastamiseks reaalajas ning keskkonnas, kus teised masinad ja agregaadid tekitavad täiendavaid vibratsioone, mis võivad vähendada mõõtmiste täpsust.

Laagri riketeid saab jaotada järgmistesse:

- siseringi rike
- välisringi rike
- rullimiselemendi rike.

Nende rikete visualiseerimiseks kasutatakse sageduste spektrit, mis omab kindlat mustrit vastavalt rikke lokaliseerimisele.

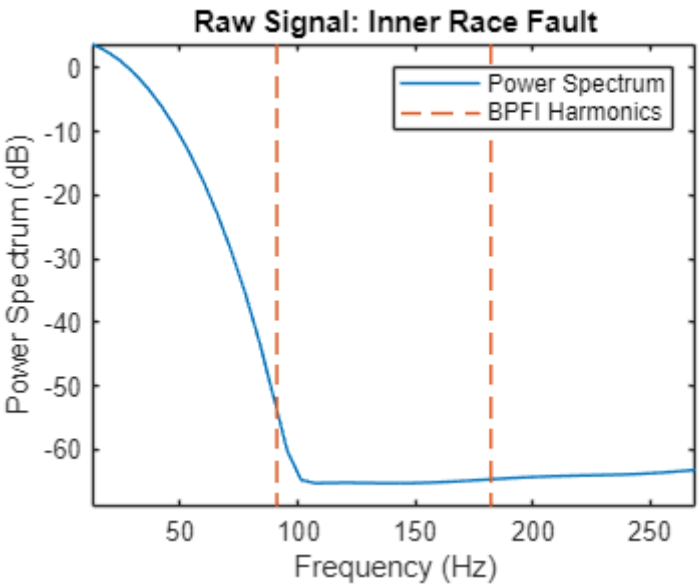
Näidised signaalidest rikete tüüpide kaupa:



Joonis 3.4 Rikete tüüpgraafikud [14]

Järgmine samm on andmete saamine kalibreerimispinkilt ja nende andmete sisestamine programmi, et saada graafik teoreetilise laagri riknemise väärtusega. Selleks on vajalik importida esialgsete andmete tabel juba valmisse programmi ja me saame näha meie andmetel põhinevat tulemust.

Uue MatLabi koodi on välja töötatud spetsiaalselt uurimistulemuste täpsuse suurendamiseks, et rakendada kõiki artiklis esitatud diagnostika teoreetilisi aluseid. Lisaks on loodud uus tarkvara, mis on kooskõlas MatLabi tarkvarapakettidega. C++ keeles on kirjutatud programm, kasutades MFC teeki.



Joonis 3.5 Laagri rike graafik

Ülaltoodud graafikust selgub, et sagedusel, mis on lähedane 100 Hz-le, toimub laagri katkemine.

4. ANDURI KINNITUSE ARENDAMINE

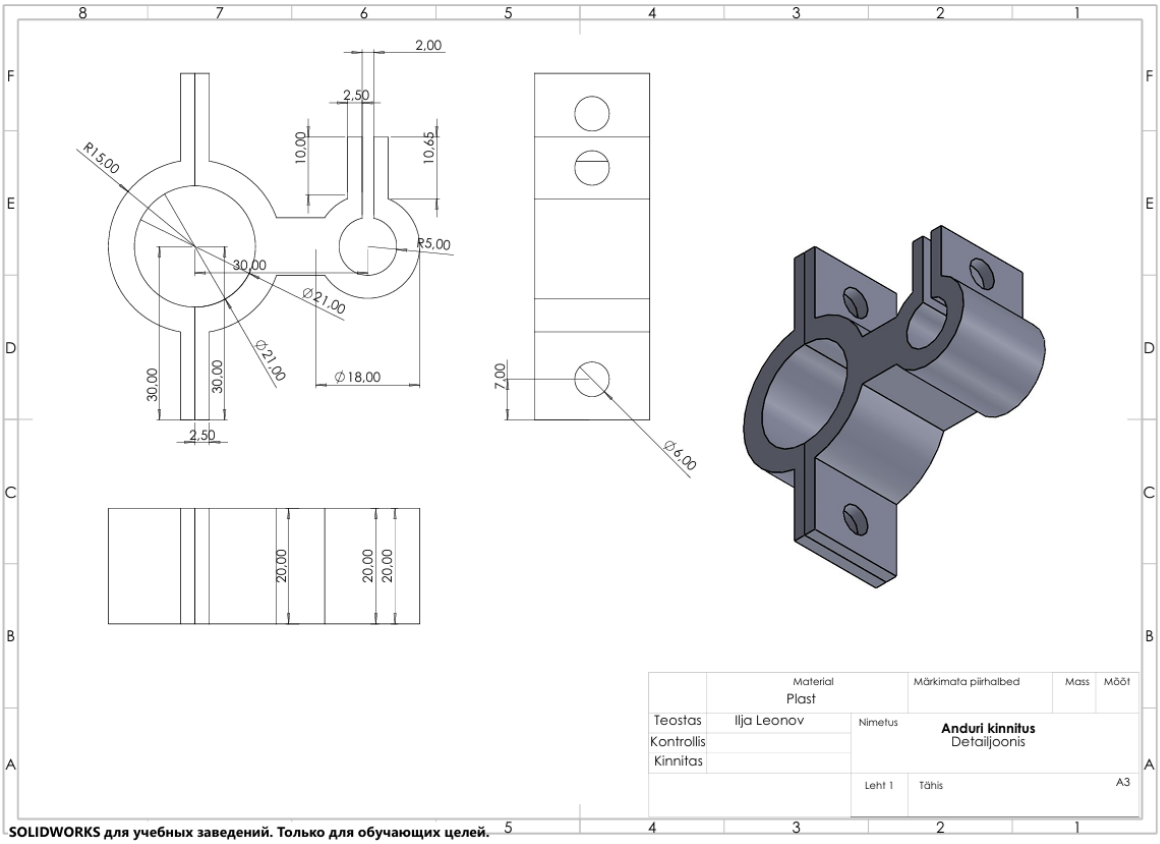
Kasutatav andur võimaldab kahte erinevat kinnitusviisi. Esimene neist on kruvikinnitus, kasutades vastavalt keermeid (1/4" 28 UNF / M8) **või** (1/4" 28 UNF x 5/8", DIN 916)**.** See meetod ei ole meie rakenduse jaoks sobiv, kuna mitte kõikidel detailidel, millelt on vaja mõõteandmeid koguda, ei ole olemas vastavaid keermestatud avasid. Ainuüksi vibratsiooni mõõtmiseks ei ole alati otstarbekas tekitada lisaaavasid detailidesse, kuna see võib mõjutada nende mehaanilisi omadusi ja töökindlust.

Teiseks võimaluseks on kasutada neodüümmagnetit, mille abil saab anduri kinnitada enamiku metallpindade külge. See lahendus on universaalsem, kuid selle puhul võib tekkida probleeme anduri eemaldamisel, kuna magneti tugev hoidvus võib kahjustada andurit või mõõdetavat pinda. Eeltoodud põhjustel otsustati välja töötada andurile sobiv spetsiaalne kinnituslahendus**,** mis oleks ühtaegu kindel, mitteinvasiivne ja lihtsalt eemaldatav.

Selleks kasutati liikuvat andurikinnitust, mis kuulub komplekti GUNT PT500.04. Lähtudes selle kinnitusdetaili omadustest ning kasutatava anduri mõõtmetest ja tehnilistest parameetritest, valmistati spetsiaalne kinnituslahendus, mis võimaldab andurit kindlalt ja täpselt paigutada mõõdetavale pinnale ilma detaili kahjustamata.

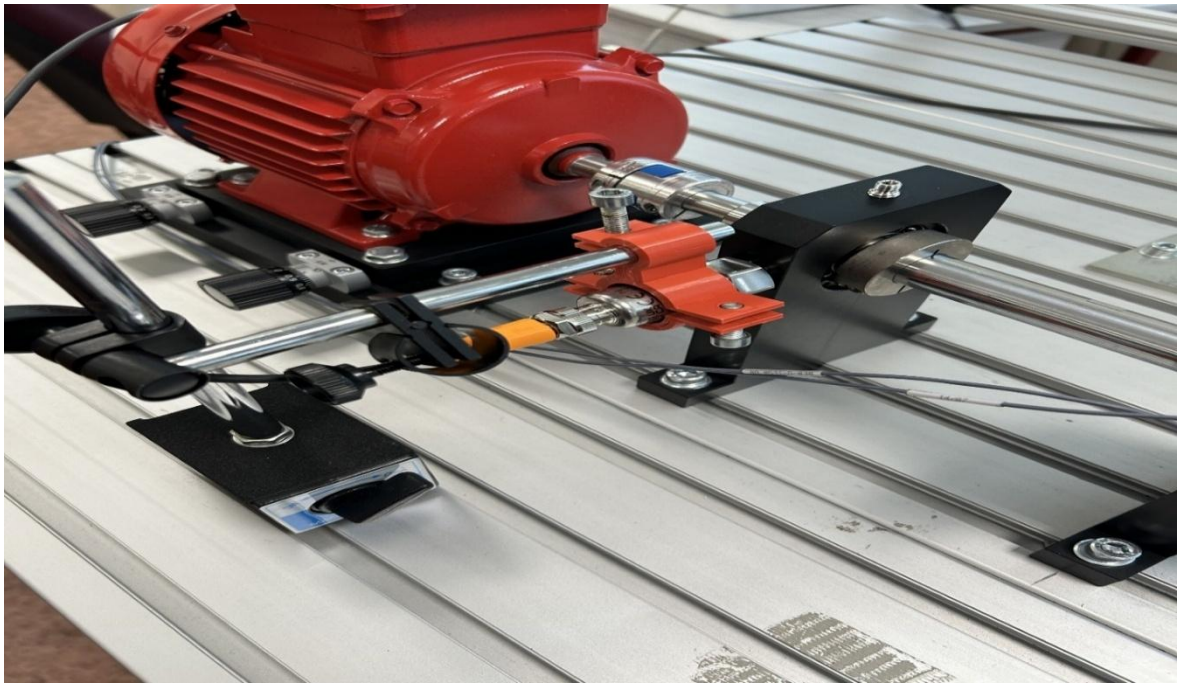
Joonis 4.1 Alus anduri kinnituseks [13]

Sobivate mõõtmete ja omadustega andurikinnituse ning liikuva aluse kavandamiseks kasutati SolidWorksi tarkvara. Valmistamine toimus 3D-printimise teel.



Joonis 4.2 Anduri kinnitus

4.1 Paigaldamine



Joonis 4.3 Andur kinnituses

Anduri paigaldamisel probleeme ei tekkinud, kuna kõik mõõtmed olid õigesti valitud.

5. ANDURI ÜHENDAMINE

5.1 Anduri väljund

Anduri pistik: M12, 4-kontaktiline (M12 4-pin)
Toide: 18–30 V DC
Väljund: IO-Link või digitaalne lülitusväljund

1. Elektriühendus (M12 pistik):

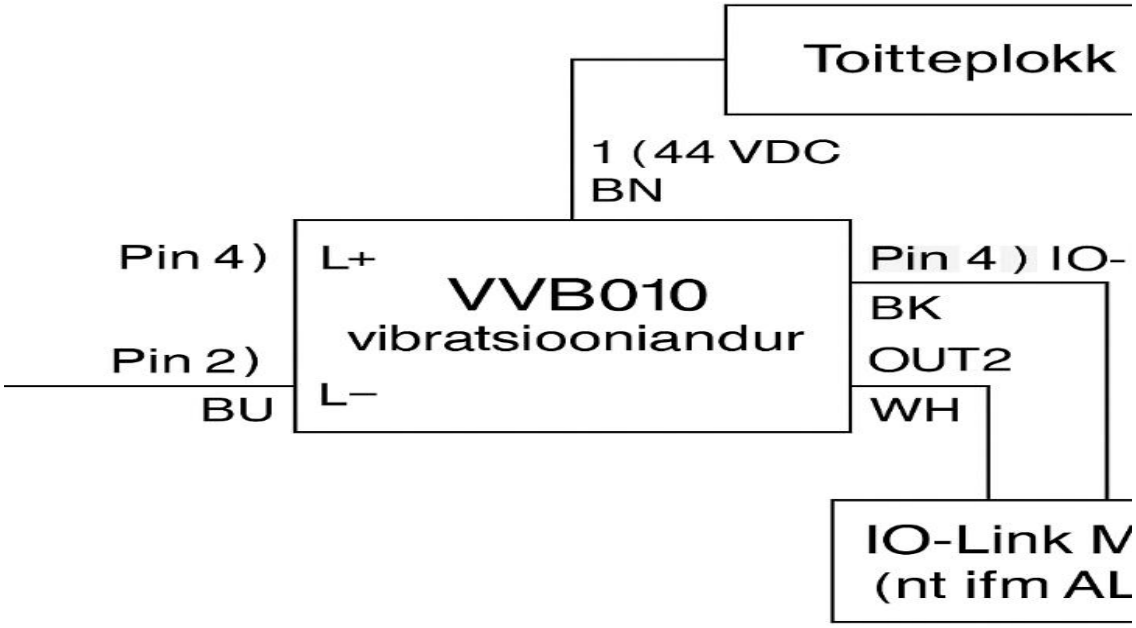
Pin	Juhtme värv	Funktsioon	Märkus
1	Pruun (BN)	L+ (+24 V DC)	Toite positiivne klemmi
2	Valge (WH)	OUT2 (lisa väljund)	Vajadusel häiresignaalina
3	Sinine (BU)	L- (GND)	Toite maandus (0 V)
4	Must (BK)	OUT1 / IO-Link	Andmeside IO-Link masteriga

2. Ühendamine IO-Link süsteemi:

- Chenda anduri Pin 1 (+24 V) ja Pin 3 (GND) toiteallikaga.
- Ühenda Pin 4 (BK) IO-Link masteri vastava sisendiga. → Näiteks ifm AL1xxx seeria.
- Soovi korral ühenda Pin 2 (WH) digitaalse sisendiga, kui kasutad lisaväljundit (nt häire või lülitus).
- IO-Link master ühendatakse arvutiga tarkvaraseadistuseks ja andmete lugemiseks.
- Vajalik IODD-fail.

3. Paigaldussoovitused:

- Kinnita andur tihedalt masina pinnale, võimalusel laagri või rootori lähedusse.
- Ära kasuta elastseid kihtmaterjale sensorite all — need moonutavad mõõtmisi.
- Kasuta sobivat kinnituskeeret (M8 või ¼”-28 UNF), pingutusmoment: 8 Nm.
- Veendu, et mõõtesuund vastaks masina peamisele vibratsioonisuunale. [8]



Joonis 5.1 Anduri väljund

5.2 Süsteemi plokkskeem

Süsteemi plokkskeem kujutab andmeedastuse järjestust alates seireobjektist kuni kasutajani:

1. Mehaanilise süsteemi vibratsioonivõnkeid tuvastab andur VVB010.
2. Andur kinnitatakse seadme pinnale magnetkinnituse E30449 abil.
3. Signaal edastatakse ühenduskaabli Connection cable ja pistikuga ühenduskaabli EVC002 kaudu.
4. Mobiilseade või väline kontroller teisendab analoogsignaali digitaalseks.
5. Andmed edastatakse mobiilirakendusse, kus toimub töötlemine, analüüs ja visualiseerimine.
6. Kui vibratsiooni kriitilised tasemed ületatakse, genereeritakse kasutajale hoiatused.

5.3 Tarkvara

Esialgne idee oli kastuda arvuti, et jalgida andmed mis näitab andur ja selline tarkvara oli telituda, aga seda tarkvara toomise aeg on kuni 6 kuud. Seoses arvuti kasutamise võimatusega andmete saamiseks tarkvara puudumise tõttu, otsustati jätta alles olemasolev skeem. Anduri tundlikkust ja väärtuste seadistusi saab korrektselt muuta ainult vastava tarkvara kaudu.

6. VÕLLI JA LAAGRITE TELLIMINE

Mobiilse andurisüsteemi kontrollimiseks ja mõõtmiste tegemiseks otsustati valmistada võll, mis paigaldatakse AT200 seadmele. Selleks, et koostada võlli 3D-mudel, oli vaja mõõta selle tegelikke mõõtmeid. Mõõtmiste tegemiseks eemaldati võll seadmest, ning viidi läbi vajalikud mõõtmised, mis olid aluseks 3D-mudeli loomisele.

Joonis 6.1 Võll [17]

Joonis 6.2 AT200 platvorm [17]

Plaanis oli kasutada seda ainult anduri kontrollimiseks.

6.1 Võlli tolerantside tabel

Допуски и посадки ЕСДП

| Интервалы размеров, мм | Поля допусков валов, мкм | | |

Ülemine hälve (es) = 0 µm

Alumine hälve (ei) = −8 µm

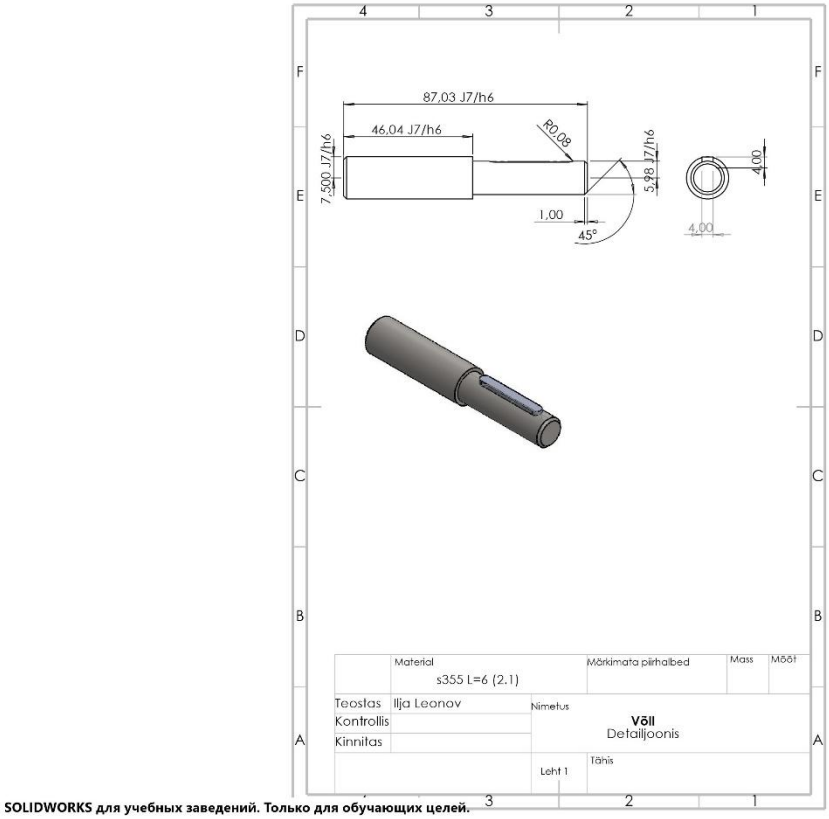
Nende andmete põhjal on võimalik määrata sobivuse lõtku või pinguti vahemik:

- Maksimaalne lõtk: 7 – (−8) = 15 µm
- Maksimaalne pinguti: 0 – (−7) = 7 µm

Selline sobivus võimaldab kas väikest pingutit või väikest lõtku, sõltuvalt konkreetsetest mõõtudest. See tagab kindla, kuid mitte ülemäära tugeva kinnituse, sobides hästi keskmise koormusega töötingimustesse.

Vaatamata sellele, et arvutused ja tolerantsid olid õigesti tehtud, ei suutnud ettevõte varda õigesti valmistada, kuna esimese versiooni joonisel olid tolerantsid juba suurustesse sisse arvestatud, seetõttu valmistas tootja varda väiksema diameetriga, kui vaja, mis tõi endaga kaasa laagri libisemise montaažikohas ja takistamatu liikumise..

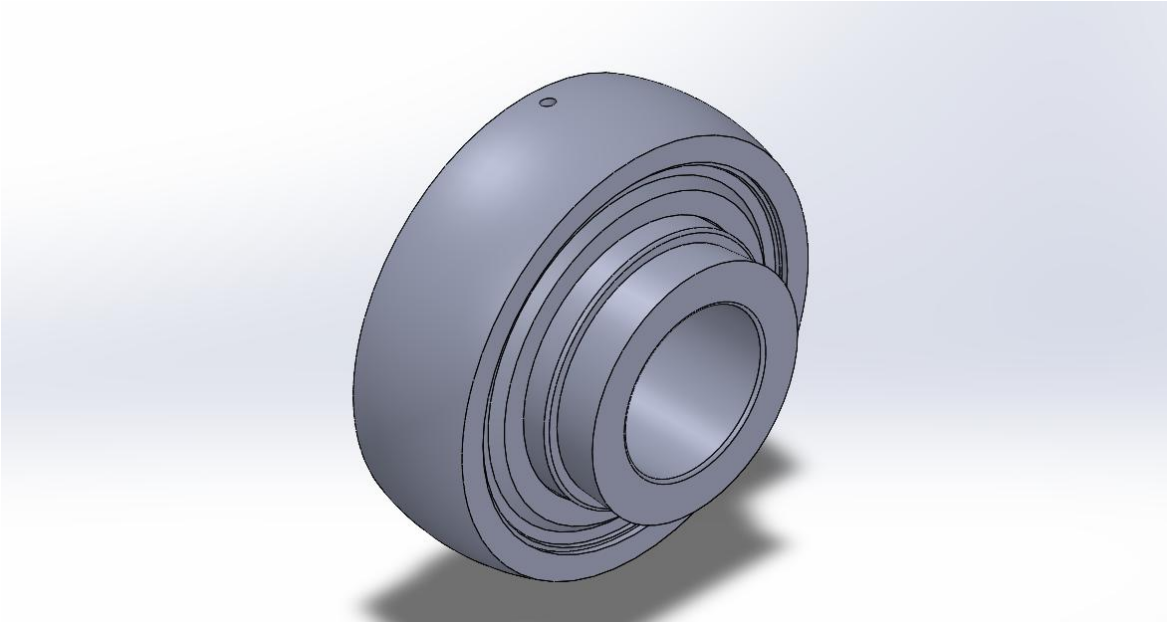
6.3 Võlli CAD mudel



Joonis 6.3 Võll

6.4 Laagri tellimine

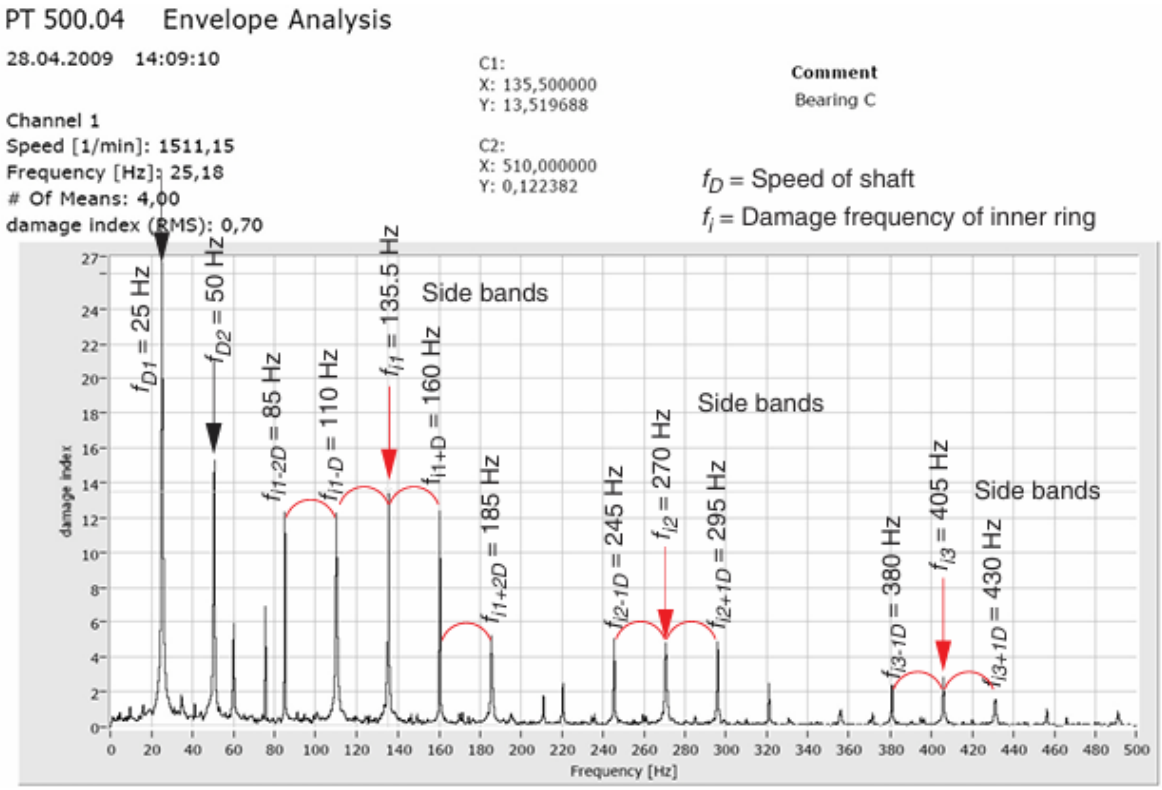
Oli telitud laagrid sissediametriga 15mm ja välisdiametriga 40mm, mis sobivad AT200. Need me ei kasuta, sest tellitud võll ei sobi meie eksperemendi jaoks.



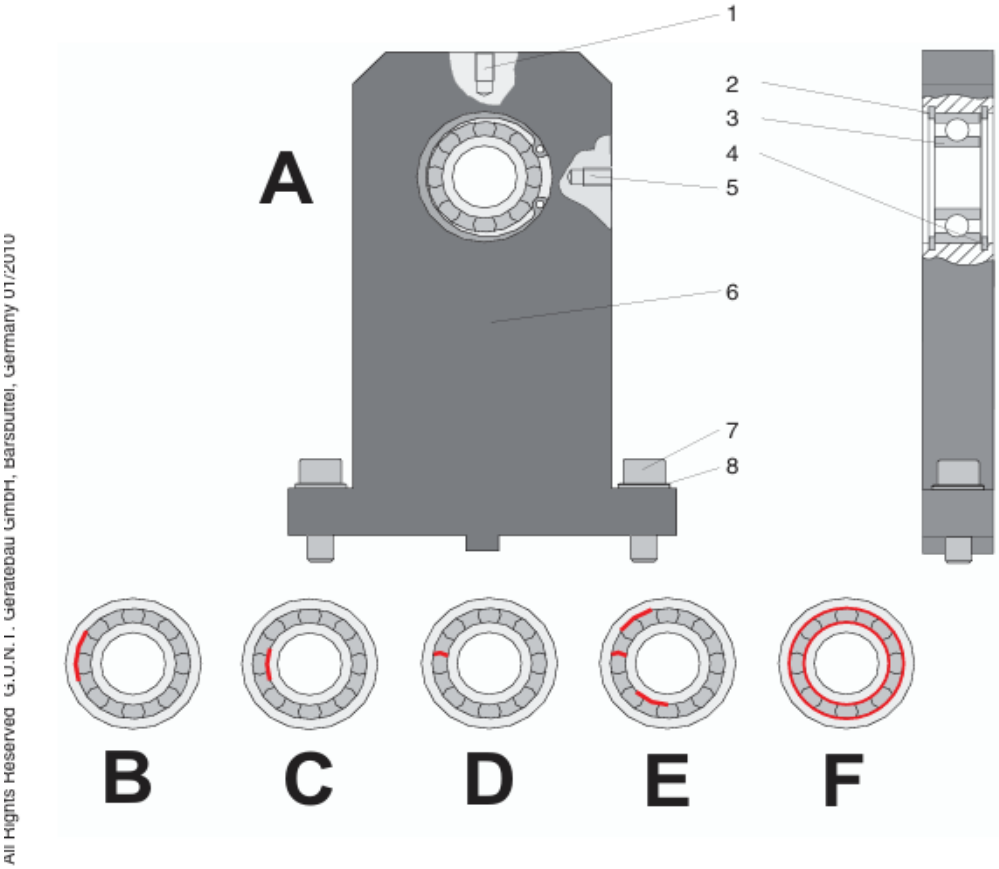
Joonis 6.4 Laager

6.5 Laagri rikutamine

Anduri töökõlblikkuse uurimiseks telliti laagrikomplekt PT500.12 koos FAG-i laagritega, mille mõõtmed on: siseläbimõõt – 20 mm, välisläbimõõt – 42 mm. Katsete läbiviimiseks kasutati komplekti PT500.12 juurde kuuluvat faili, milles on kirjeldatud tüüpilisi laagrite rikete tüüpe, sealhulgas sisemise rõnga defekte, ning selgitatud, kuidas neid vibratsioonisignaali graafikutel tuvastada. Katse käigus modelleeriti käsitsi laagri rike, mis imiteeris sisemise rõnga defekti.



Joonis 6.5 Envelope Analysis [18]



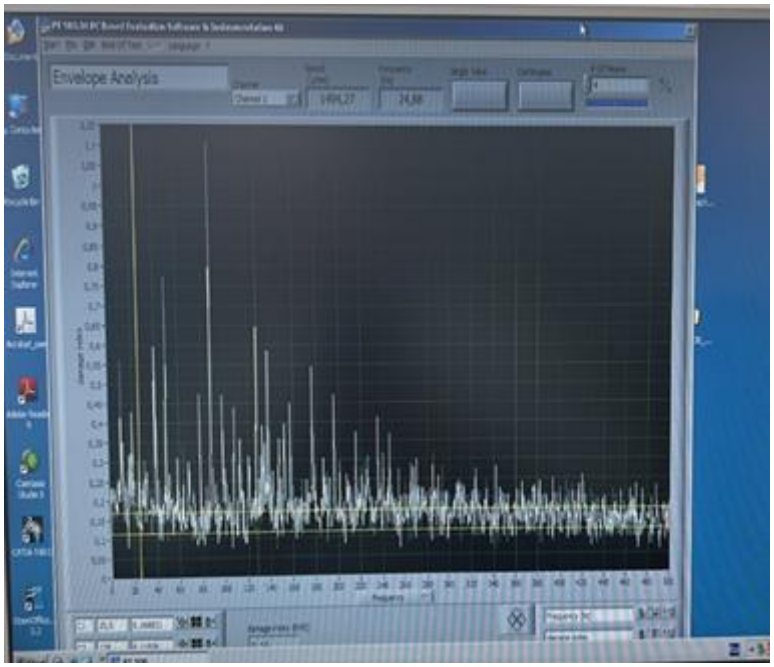
Joonis 6.6 Laagrite rikked [18]

Joonis 6.7 Laagri rikke

7. SÜSTEEMIDE TESTIMINE

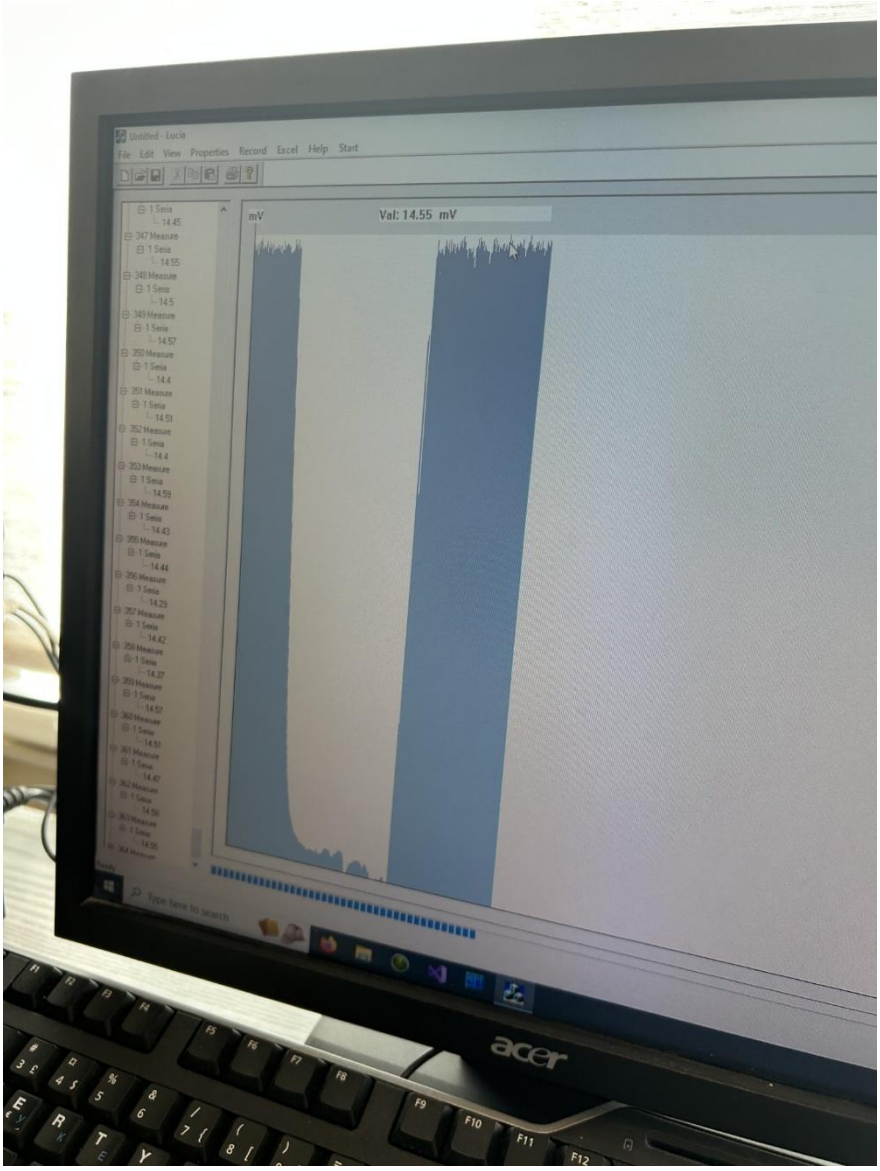
Süsteemi testimiseks kasutati digitaalset multimeetrit, toiteplokki, Fluke 45 multimeetrit ning seadmeid PT500 ja PT500.04. Meie kasutuses olev andur VB010 kinnitati korras laagri toestusele, et kontrollida selle töökorrasolekut meie süsteemis. Samuti ühendati kaks kiirendusandurit: üks neist oli toestusreferentstandur ja teine tööstusandur laagri võlli teisel toestusel. Antud laagri sisemises rõngas esines rike, mistõttu kiirendusandurid andsid signaali selle defektist. Seda on võimalik mõista allpool toodud saadud graafikute põhjal. Nende graafikute saamiseks kasutati tehase tarkvara firmalt GUNT, mis kuulub seadme PT500.04 komplekti.

7.1 Kirendusandurite graafikud



Joonis 7.1 Kesta signaalianalüüs

Antud graafikul on kujutatud riketindeksi sõltuvus sagedusest. Graafiku põhjal on näha, et rike avaldub sagedusel 135 Hz, mis viitab sellele, et rike asub laagri sisemises rõngas. Samuti on näha, et graafiku väärtused ületavad 0,3 piiri, mis tähendab, et süsteemis esinevad ka teised vibratsiooni allikad, näiteks ajamirihm ja võimalusel ka selle testi statiivi liikuvad osad. Seda, kuidas vibratsiooni allikaid määrata, oli detailselt kirjeldatud MATLABi failis ja PT500.04 juhendis, mida me kasutasime süsteemi kalibreerimiseks.



Joonis 7.2 Pinge graafik

Joonisel on kujutatud hetke, mil antakse toide uuritavale vibratsioonisensorile, mis on paigaldatud korras laagriga toele, samuti reaalajas andmete kogumise protsessi. Ekraanil kuvatakse pinged väärtusega 14,55 mV. See viitab tegelikule rikkele teisel toel asuvas laagrisse. Kuid kuna vibratsioonisensor on seadistatud tehase poolt määratud kõrgele (resonants)sagedusele, jääb madalsageduslike vibratsioonide amplituud liiga väikeseks, et sensor neid tuvastaks. Seetõttu jääb rike märkamatuks.

7.2 Digital multimeter

Joonis 7.3 Multimeter

Anduri nimipinge oli seatud 24 voldile, kuid väljundseadmest saime väärtusi, mis olid veidi alla 24 voldi. See tähendab, et andur ei registreeri selles katses vibratsioone, kuid töötab siiski korralikult. Andur ei registreeri vibratsioone, sest tehase seadistus on häälestatud suurema vibratsiooni kiiruse vahemikule, kui see, mis vastab antud riketunnusele. Seadistusi saab muuta tarkvara abil, mis meil hetkel puudub, kuid on tellitud.

KOKKUVÕTE

Lõputöö keskendus universaalse mobiilse süsteemi kontseptsiooni väljatöötamisele seadmete tehnilise seisukorra jälgimiseks vibratsioonianalüüsi alusel. Projekti käigus saavutati kõik seatud eesmärgid: viidi läbi olemasolevate lahenduste analüüs, valiti sobivad komponendid (vibratsiooniandurid, ühenduskaablid, liidesed) ning töötati välja süsteemi struktuur ja andmetöötlusalgoritm vastavuses rahvusvaheliste standarditega ISO 10816 ja ISO 20816.

Väljatöötatud süsteemi testiti reaalse andmestiku põhjal, kasutades kaasaegseid sensori- ja arvutustehnoloogiaid. Vibratsioonisignaalide analüüs kinnitas pakutud lahenduse tõhusust seadmete seisundi diagnostikas, eriti sellistes valdkondades nagu raudteetaristu ja tööstusseadmed, kus on oluline pöörlevate komponentide, näiteks laagrite, kulumise hindamine.

Saavutatud tulemused on olulised nii teoreetilisest, kui ka praktilisest vaatenurgast. Töö käigus süvenesid minu teadmised vibratsioonianalüüsi, digitaalse signaalitöötluse ja süsteemi integratsiooni vallas. Edaspidi on võimalik projekti edasi arendada tööstusliku prototüübi loomise ja selle laiaulatusliku välitestimise suunas.

SUMMARY

This thesis focused on the development of a concept for a universal mobile system for monitoring the technical condition of equipment based on vibration analysis. All the initial objectives were successfully achieved: an overview of existing solutions was conducted, suitable components (vibration sensors, connecting cables, interfaces) were selected, and a system architecture and data processing algorithm were proposed in accordance with international standards ISO 10816 and ISO 20816.

The developed system was tested using real data collected with modern sensing and computing technologies. The analysis of vibration signals confirmed the high efficiency of the proposed approach for diagnosing equipment condition, particularly in areas such as railway infrastructure and industrial systems involving rotating components, such as bearings.

The results obtained are valuable both theoretically and practically. This work helped deepen my knowledge in the fields of vibration analysis, digital signal processing, and system integration. The project has potential for further development towards industrial implementation, including the creation of a prototype and conducting large-scale field testing.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

1. ISO20816-1:2016.https://www.iso.org/standard/63180.html. [Online] (11.2016).
2. IEC 60068-2-6. https://webstore.iec.ch/en/publication/544. [Online] (13.12.2007)
3. EN 61000-6-2. https://webstore.iec.ch/en/publication/25630. [Online] (08.11.2016).
4. EN50270 https://www.evs.ee/en/evs-en-50270-2015. [Online] (05.09.2016).
5. Application of vibration signals in railway track diagnostics using a mobile railway platform. https://www.researchgate.net/publication/384758948_Application_of_vibration_signals_in_railway_track_diagnostics_using_a_mobile_railway_platform. [Online] (2024).
6. Universaalne mobiilne elektrokeemiline detektor, mis on loodud kasutamiseks piiratud ressurssidega rakenduste. https://www.researchgate.net/publication/264502391_Universal_mobile_electrochemical_detector_designed_for_use_in_resource-limited_applications. [Online] (30.06.2014).
7. Akuusto-seismiline monitooring http://sixense.com.ua/ru/akusto-sejsmicheskij_monitoring.html. [Online] (6.04.2025).
8. Vibration sensor VVB010. https://www.ifm.com/ee/en/product/VVB010?_gl=1*1kn9hzd*_up*MQ..&gclid=CjwKCAjwgfm3BhBeEiwAFfxrG89km0l_enLGltmlHpLhUBaUEr9Ttn8my-INHqWUuo4eG1WRex9d8hoC2G8QAvD_BwE. [Online] (05.02.2025).
9. Connecting cable with socet EVC002. https://www.ifm.com/ee/en/product/EVC002?_gl=1*gkzffl*_up*MQ..&gclid=CjwKCAjwgfm3BhBeEiwAFfxrG89km0l_enLGltmlHpLhUBaUEr9Ttn8my-INHqWUuo4eG1WRex9d8hoC2G8QAvD_BwE. [Online] (05.02.2025).
10. Conection cable EVC013. https://www.ifm.com/ee/en/product/EVC013?_gl=1*1k9t84s*_up*MQ..&gclid=CjwKCAjwgfm3BhBeEiwAFfxrG89km0l_enLGltmlHpLhUBaUEr9Ttn8my-INHqWUuo4eG1WRex9d8hoC2G8QAvD_BwE. [Online] (05.02.2025).
11. Magnetic mount for vibration sensors. https://www.ifm.com/ee/en/product/E30449?_gl=1*aa3kgi*_up*MQ..&gclid=CjwKCAjwgfm3BhBeEiwAFfxrG89km0l_enLGltmlHpLhUBaUEr9Ttn8my-INHqWUuo4eG1WRex9d8hoC2G8QAvD_BwE. [Online] (05.02.2025).
12. PT500 Machinery diagnostic system, base unit. https://gunt.de/en/products/mechatronics/machinery-diagnosis/machinery-

diagnostic-system-base-unit/052.50000/pt500/glct-1:pa-148:ca-77:pr-1022 . [Online] (01.03.2025).

13. PT500.04 Computerised vibration analyser. https://gunt.de/en/products/mechatronics/machinery-diagnosis/computerised-vibration-analyser/052.50004/pt500-04/glct-1:pa-148:ca-77:pr-1026. [Online] (01.03.2025).
14. Rolling Element Bearing Fault Diagnostics Using Deep Learning https://se.mathworks.com/help/predmaint/ug/rolling-element-bearing-fault-diagnosis-using-deep-learning.html?requestedDomain=. [Online] (12.03.2025).
15. Таблица допусков и посадок. https://sl3d.ru/slovar/t/435-tablica-dopuskov-i-posadok.html [Online] (08.03.2025).
16. Solidworks. https://www.solidworks.com/. [Online] (1.04.2025).
17. AT200 Determination of gear efficiency https://gunt.de/en/products/engineering-mechanics-and-engineering-design/engineering-design/machine-elements-transmission-elements/determination-of-gear-efficiency/031.20000/at200/glct-1:pa-148:ca-31:pr-3. [Online] (03.03.2025).
18. PT 500.12 Roller Bearing Faults Kit. Pdf. (18.05.2025).
19. OpenAI. ChatGPT (GPT-4o). [Online] (12.05.25).

LISA 1 UURITUD SEADMED

Joonis 1.1 Süsteemi paigaldus [5]

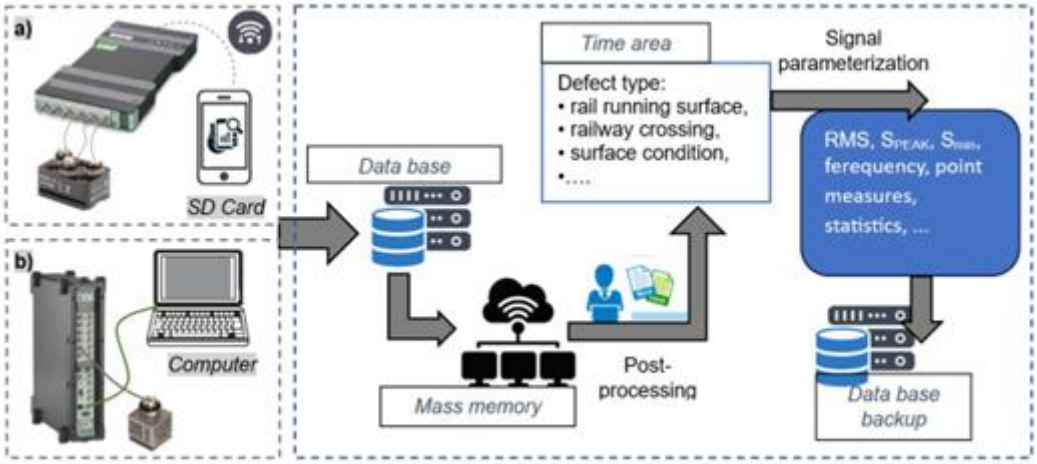
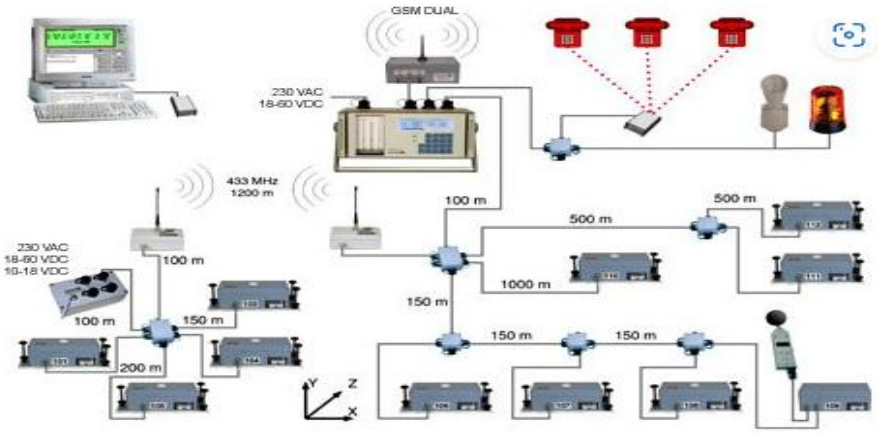


Fig. 3. Scheme of the architecture system for collecting and processing measurement data

Joonis 1.2 Mõõtmisandmete kogumise ja töötlemise arhitektuuri süsteemi skeem [5]

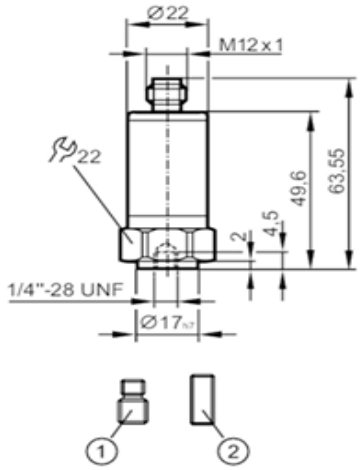


Joonis 1.4 Tööstusliku vibratsiooniseire süsteemi skeem [7]

VVB010

Vibration sensor

VIBRATION IO-LINK SWITCH



1 set screw ¼"-28 UNF / M8
2 set screw ¼"-28 UNF

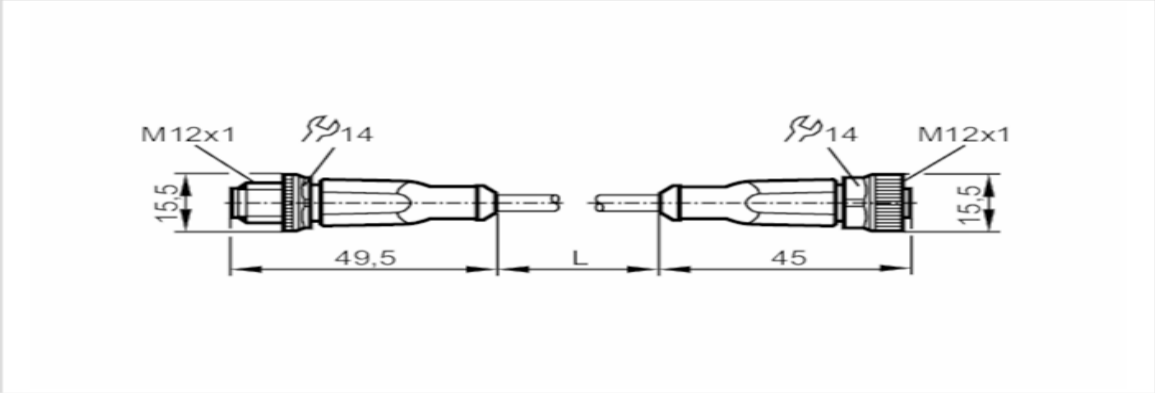
IO-Link

Product characteristics		
Frequency range [Hz]		2...10000
Measuring principle		capacitive
v-RMS		
Measuring range of vibration [mm/s]		0...45
a-Peak / a-RMS		
Measuring range of vibration	0...50 g	0...490.3 m/s²
Application		
Application		Big machines, performance > 300 kW, speed > 600 rpm
Electrical data		
Operating voltage [V]		18...30 DC
Current consumption [mA]		< 50
Min. insulation resistance [MΩ]		100; (500 V DC)
Protection class		III
Reverse polarity protection		yes
Type of sensor		Microelectromechanical system (MEMS)
Inputs / outputs		
Number of inputs and outputs		Number of digital outputs: 2

ifm efector, inc. • 1100 Atwater Drive • Malvern • PA 19355 — We reserve the right to make technical alterations without prior notice. — EN-US — VVB010-01 — 13.04.2023 —

Joonis 2 Andur VVB010 [8]

Joonis 2.1 Magnetkinnitus E30449 [11]



Application		
Special feature		Free from silicone; Halogen-free; Gold-plated contacts; Drag chain suitability
Free from silicone		yes
Electrical data		
Operating voltage	[V]	< 250 AC / < 300 DC
Protection class		II
Max. current load total	[A]	4
Operating conditions		
Ambient temperature	[°C]	-25...90
Note on ambient temperature		cULus: ...75
Ambient temperature (moving)	[°C]	-25...90
Note on ambient temperature (moving)		cULus: ...75
Storage temperature	[°C]	-25...55
Storage humidity	[%]	10...100
Other climatic conditions for storage according to stated class		1K22/ DIN 60721-3-1
Protection		IP 65; IP 67; IP 68; IP 69K

Joonis 2.2 Ühenduskaabel EVC013 [10]

Application

Special feature	Free from silicone; Halogen-free; Gold-plated contacts; Drag chain suitability
Free from silicone	yes

Electrical data

Operating voltage [V]	< 250 AC / < 300 DC
Protection class	II
Max. current load total [A]	4

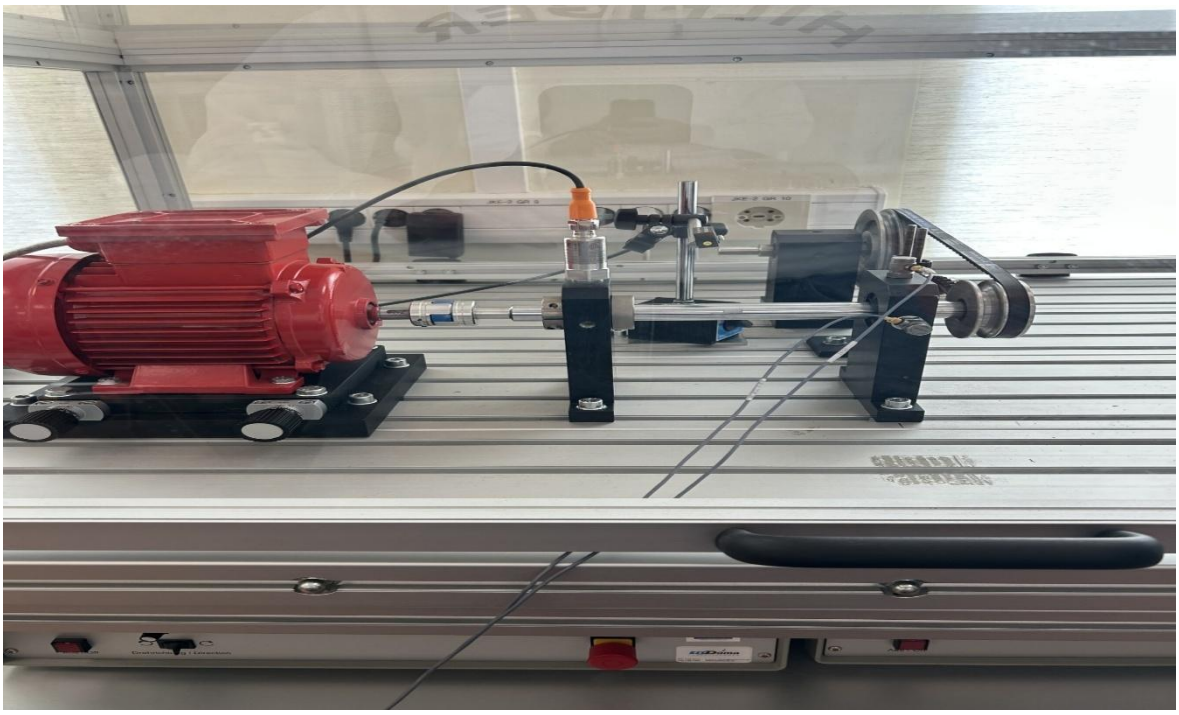
Operating conditions

Ambient temperature [°C]	-25...90
Note on ambient temperature	cULus: ...75 °C
Ambient temperature (moving) [°C]	-25...90
Note on ambient temperature (moving)	cULus: ...75 °C
Storage temperature [°C]	-25...55
Storage humidity [%]	10...100
Other climatic conditions for storage according to stated class	1K22/ DIN 60721-3-1
Protection	IP 65; IP 67; IP 68; IP 69K

Joonis 2.3 Ühenduskaabel EVC002 [9]

Joonis 3.1 GUNT PT500 [12]

Joonis 3.2 GUNT PT500.04 [13]



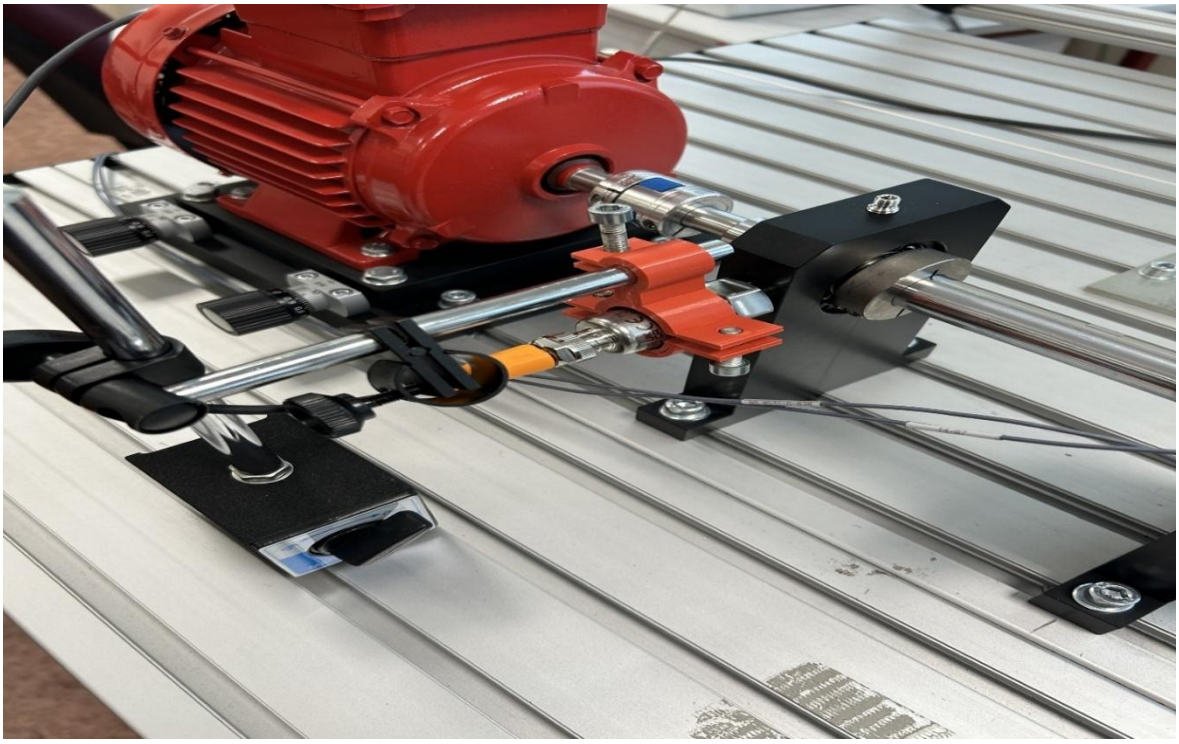
Joonis 3.3 GUNT PT500 ja PT500.04

Joonis 6.1 Võll [17]

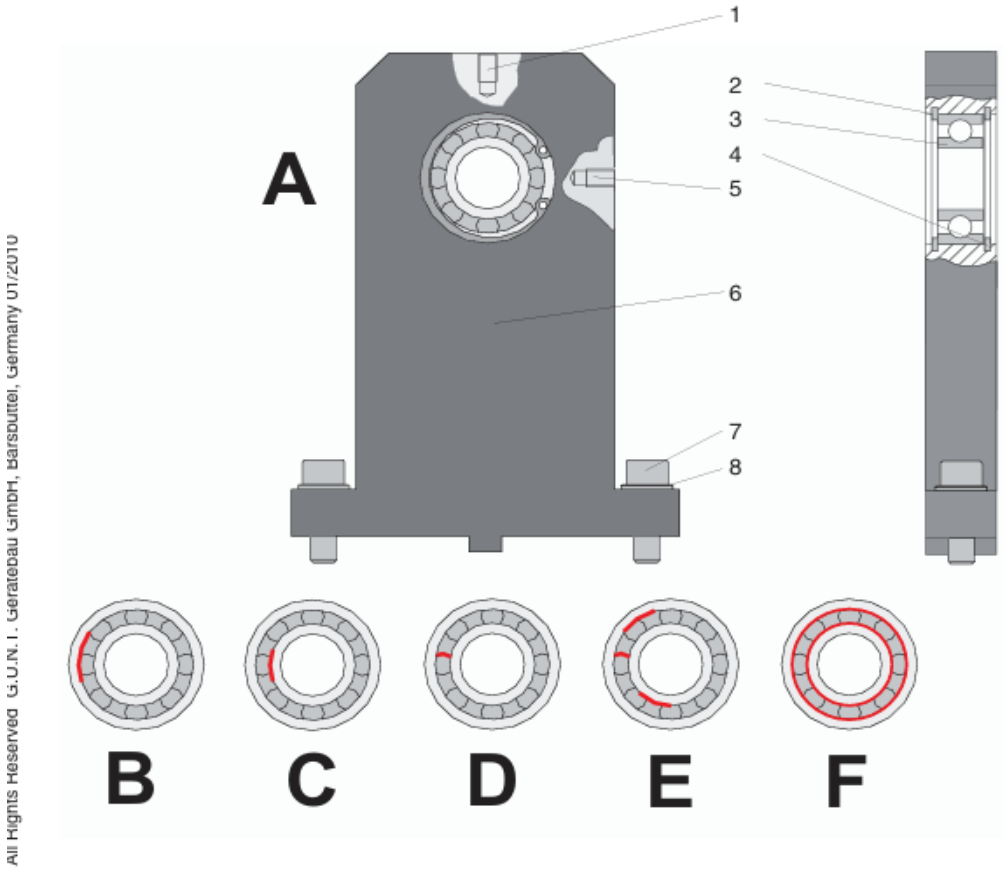
Joonis 6.2 AT200 platvorm [17]

Joonis 7.3 Multimeter

Joonis 4.1 Alus anduri kinnituseks [13]



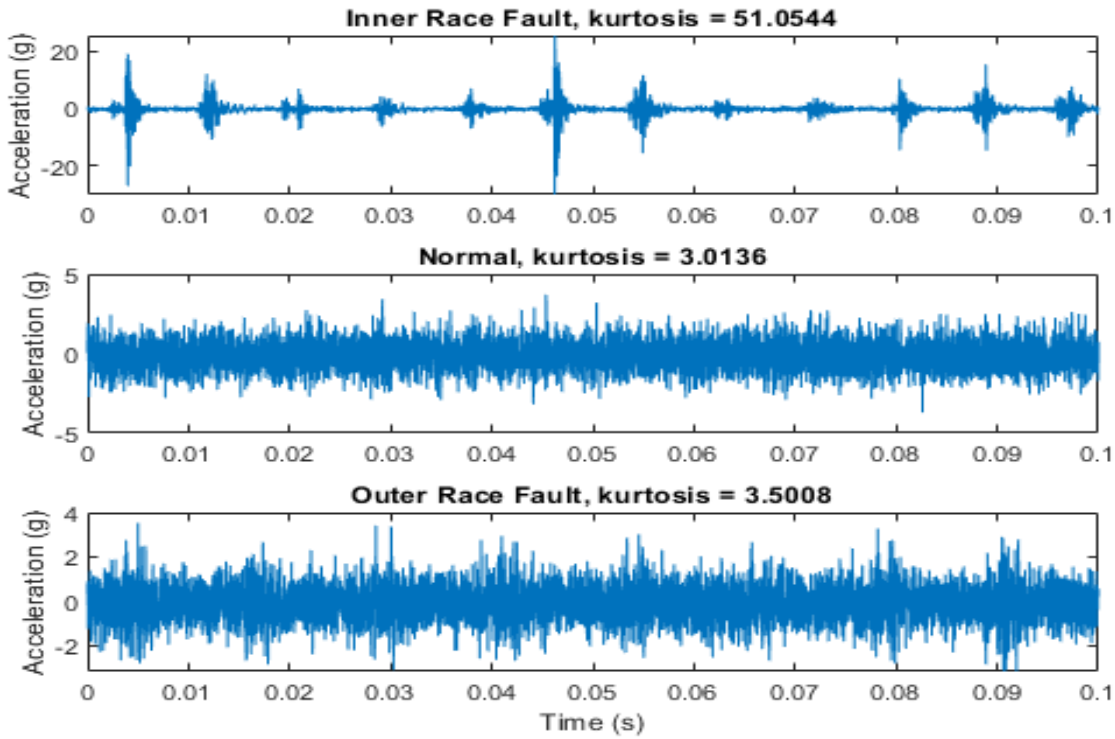
Joonis 4.3 Andur kinnituses



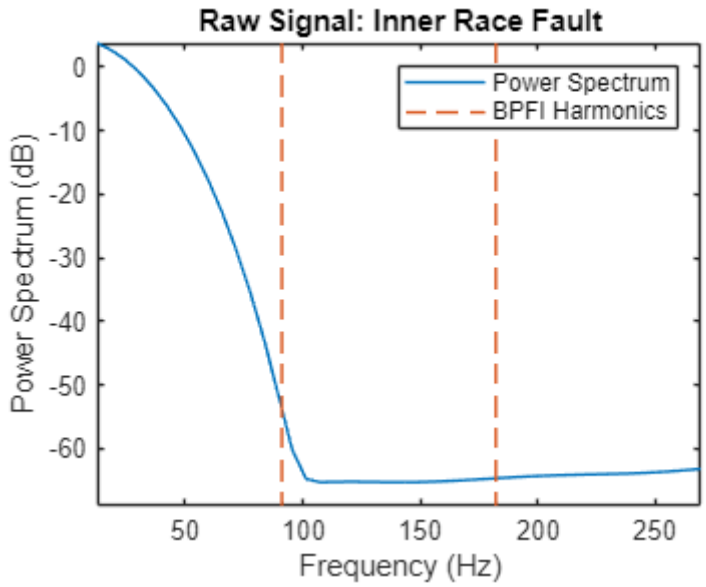
Joonis 6.6 Laagrite rikked [18]

Joonis 6.7 Laagri rikke

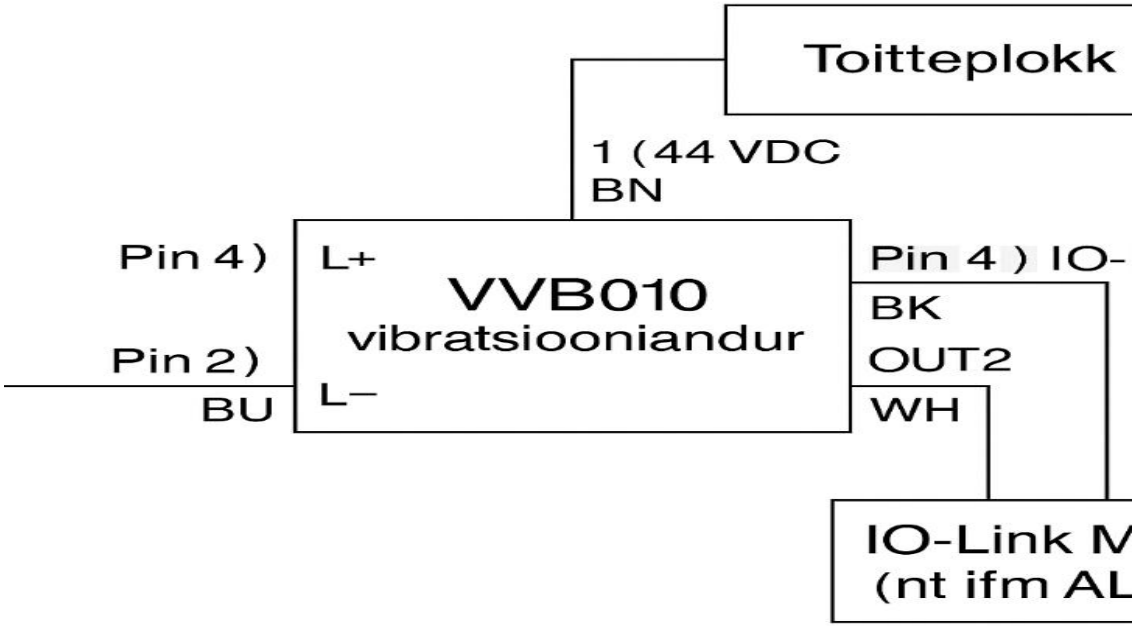
LISA 3 GRAAFIKUD JA SKEEMID



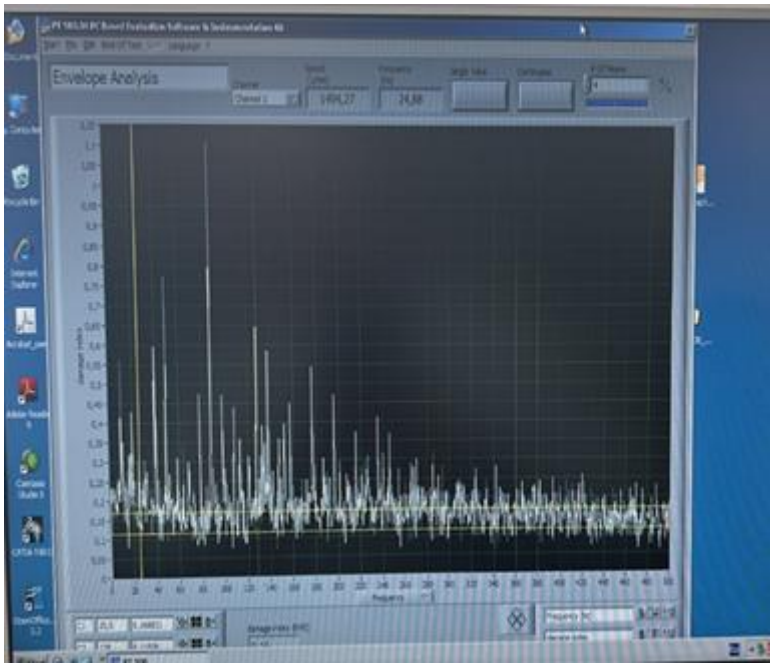
Joonis 3.4 Rikete tüüpgraafikud [14]



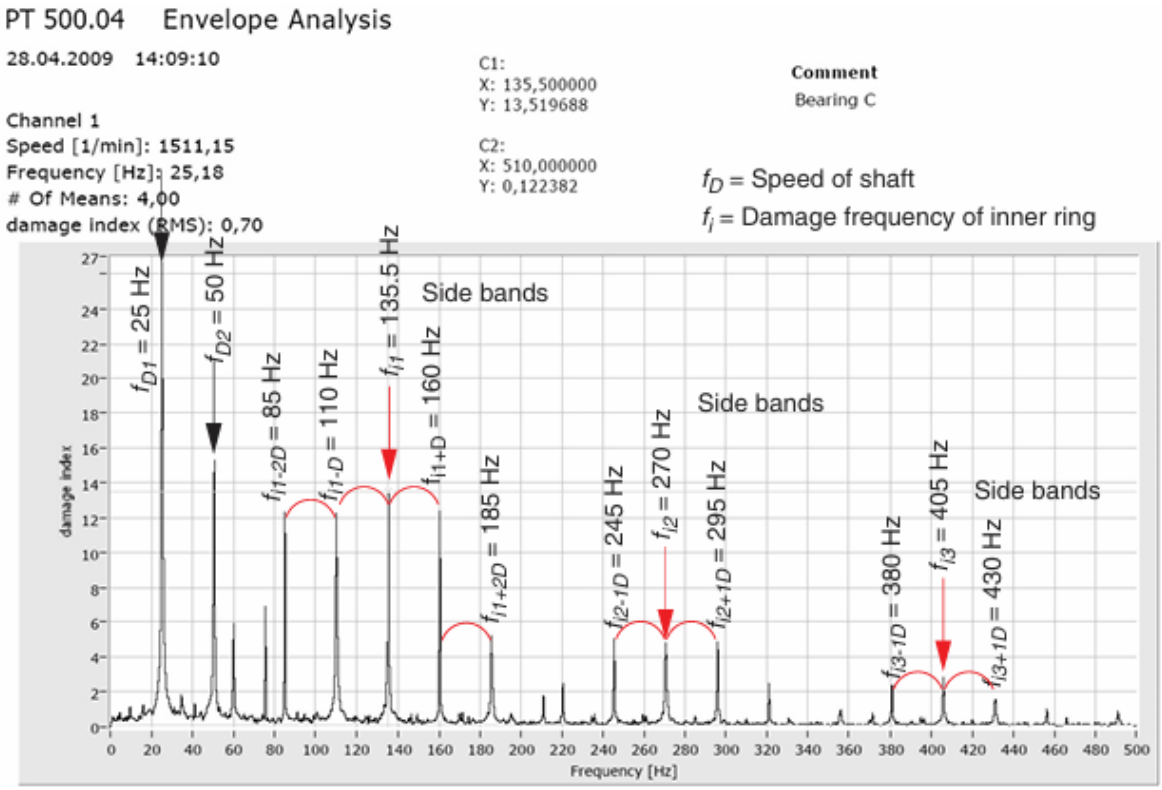
Joonis 3.5 Laagri rike graafik



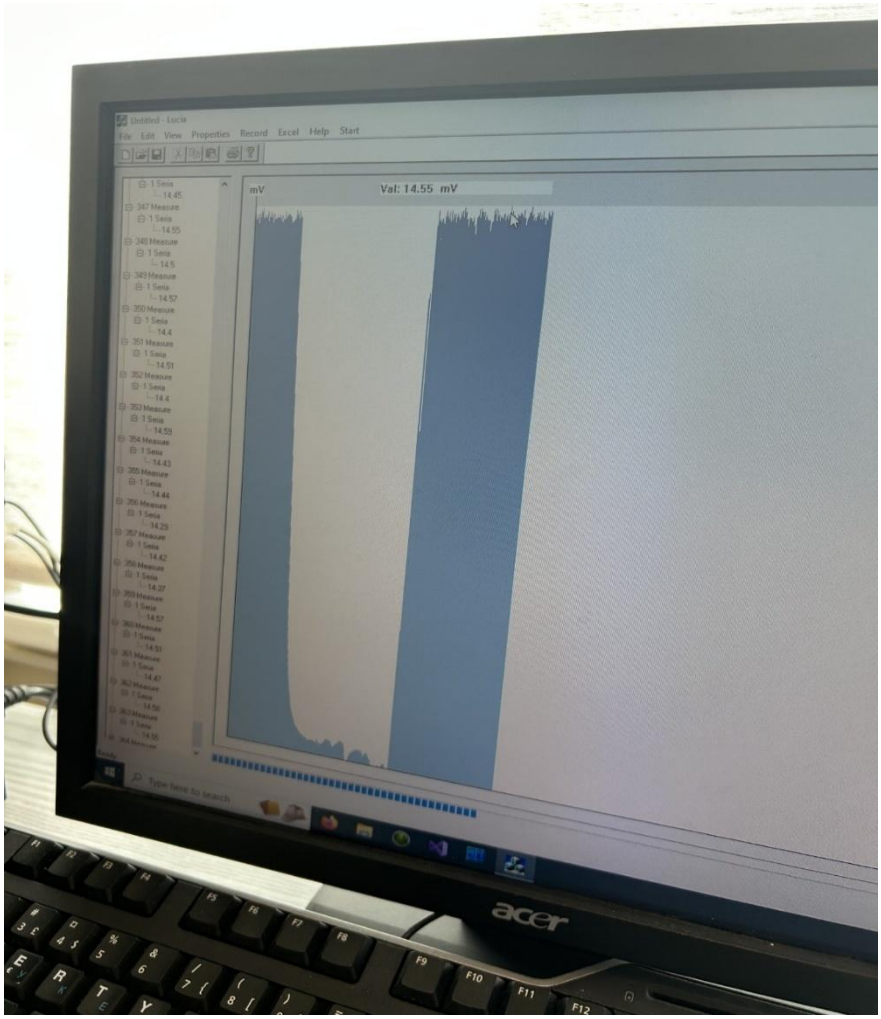
Joonis 5.1 Anduri väljund



Joonis 7.1 Kesta signaalianalüüs

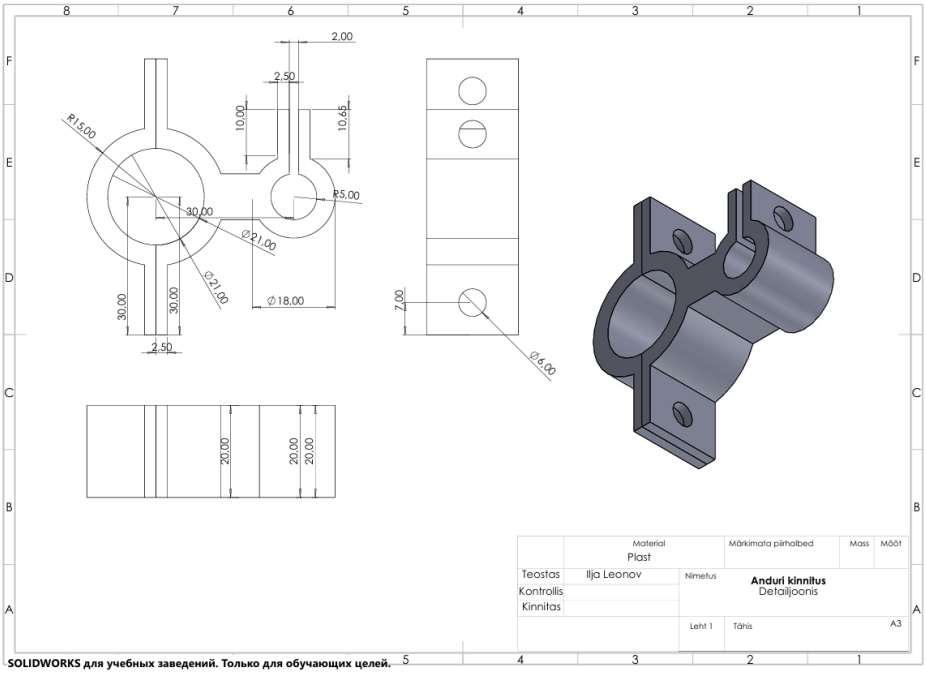


Joonis 6.5 Envelope Analysis [18]

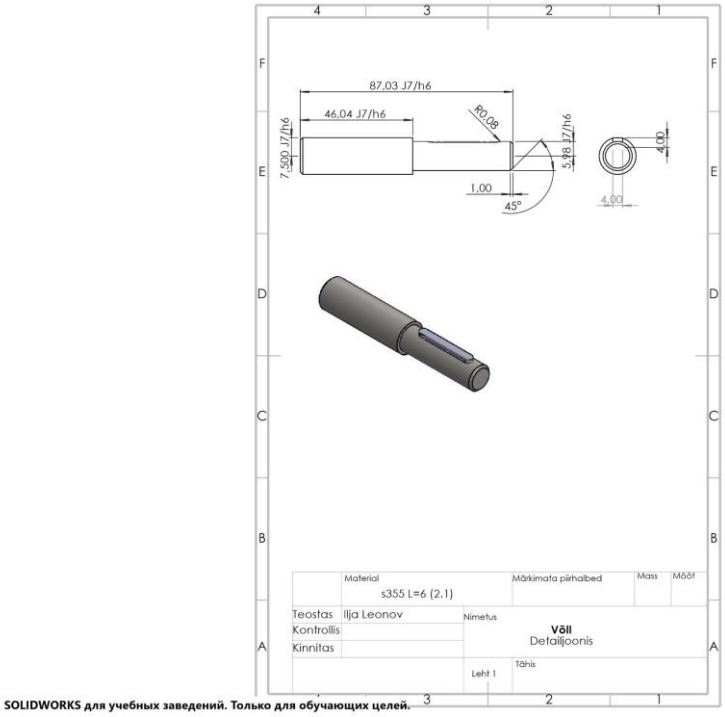


Joonis 7.2 Pinge graafik

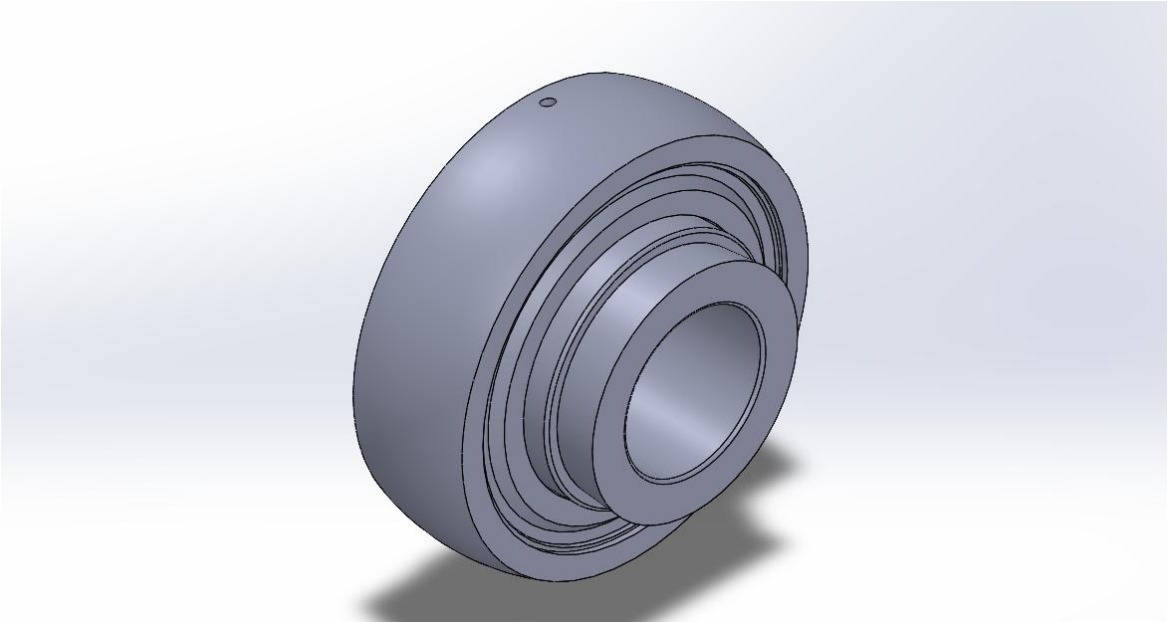
LISA 4 JOONISED JA TABEL



Joonis 4.2 Anduri kinnitus



Joonis 6.3 Võll



Joonis 6.4 Laager

Допуски и посадки ЕСДП

| Интервалы размеров, мм | Поля допусков валов, мкм | | |