

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
Infotehnoloogia teaduskond

Kristi Rask 154973IALB

**VIBRATSIOON INIMKEHA SEISUNDI  
HINDAMISEKS – TEKITAMINE,  
MÕÕTMINE**

Bakalaureusetöö

Juhendaja: Ants Koel

Doktor  
Dotsent

Tallinn 2018

## **Autorideklaratsioon**

Kinnitan, et olen koostanud antud lõputöö iseseisvalt ning seda ei ole kellegi teise poolt varem kaitsmisele esitatud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on töös viidatud.

Autor: Kristi Rask

21.05.2018

## **Annotatsioon**

Peamiseks bakalaureusetöö eesmärgiks oli arendatava värinaplaadi soovitud sagedusel liikuma saamise võimaluste uurimine ning ettevalmistus hilisemaks andmete kogumiseks. Töö aluseks on arendatav värinaplaat, mille abil võiks saada tulevikus hinnata inimkeha seisundit, analüüsides vibratsiooni ja inimese subjektiivse heaolutunde seoseid.

Käesolev lõputöö uurib vibratsiooni erinevaid kasutusalasid, keskendudes põhiliselt vibratsiooniga inimese mõjutamisele ja vibratsiooni abil mõõtmisele. Teoreetilises osas on kirjeldatud vibreerivate toolide ja plaatide patente ning põhilisi kirjandusest leitavaid mõõtmisvahendeid. Värinaplaadi vibratsiooni tekitamise võimaluseks on käesolevas lõputöös kirjeldatud ja uuritud siinussignaali generaatorit. Hiljem on võimalik mõõtmise käigus vibreeriva plaadi liikumise kohta andmed koguda kiirendusanduriga LSM6DSL, mis asub Nucleo-64 arendusplaadile mõeldud laiendusplaadil. Reaalselt töötav värinaplaat küll ei valminud, kuid ettevalmistused vibratsiooni abil inimkeha seisundi hindamiseks said käesoleva töö raames tehtud.

Lõputöö on kirjutatud eesti keeles ning sisaldab teksti 27 leheküljel, 7 peatükki, 25 joonist, 1 tabel.

## **Abstract**

### **Vibration for the evaluation of human body – generation, measurement**

The main idea of this bachelor's thesis is based on the investigations of a vibrating plate electronics development.

Vibration can be divided into two parts – influencing or measuring animate or inanimate nature. The research covers some of the most significant work that has been done in this field. There are techniques for measuring some parameters of a human body with vibration, for example electromyography, ballistocardiography and electrocardiography. Also, there are many different ideas for vibrating chairs or plates. The main machines have been described in the research. The vibrating plate described has a main purpose of measuring and influencing. The aim is to measure the vibrating plate's movement with an accelerometer and analyze it in accordance with the user's subjective self-assessment.

Since the vibrating plate mechanics is still in development then the research mainly focuses on the generation of vibration and receiving data from an accelerometer. The vibrating plate will be moved by a sine wave generator. The research includes different sine wave generators. One suitable sine wave generator is selected and it is analyzed and tested in this bachelor's thesis. The main purpose of the generator is that its output frequency should be changed easily. There is a Nucleo-64 development board with a Nucleo expansion board including an accelerometer LSM6DSL for measuring the vibrating plate's movement during the use. In this thesis a program was written for collecting the accelerometer's data.

In conclusion, although the vibrating plate was not completed the main preparation was done.

The thesis is in Estonian and contains 27 pages of text, 7 chapters, 25 figures, 1 table.

## Lühendite ja mõistete sõnastik

WBV	<i>Whole-body vibration</i> , kogu keha vibratsioon
EMG	Elektromüograafia
BCG	<i>Ballistocardiography</i> , ballistokardiograafia
EKG	Elektrokardiogramm
GPIO	<i>General purpose input/output</i> , üldised sisendid/väljundid

## Sisukord

1 Sissejuhatus .....	9
2 Vibratsiooni abil mõõtmine .....	11
2.1 Elektromüograafia .....	12
2.2 Ballistokardiograafia .....	13
3 Vibratsiooniga mõjutamine .....	14
4 Üldine ülesehitus .....	18
4.1 Mikrokontroller STM32 Nucleo.....	18
4.2 Mikrokontrolleriga liikumise mõõtmine .....	20
5 Siinusvõnkumise genereerimine.....	22
6 Siinusgeneraatori variantlahenduse testimine .....	28
6.1 Arvutisimulatsioon .....	28
6.2 Prototüüpimine .....	32
7 Kokkuvõte .....	35
Kasutatud kirjandus .....	36
Lisa 1 – Arendatava värinaplaadi prototüübi pilt .....	38
Lisa 2 – Anduri mõõtetulemuste programmi kood.....	39
Lisa 3 – Siinusvõnkumise generaator makettplaadil .....	40

## Jooniste loetelu

Joonis 1. Viskoossuse mõõtmisseadme teostusviis [3]. .....	11
Joonis 2. Müomeetri löökotsiku võnkumise graafikud mõõtmisprotsessis [4]. .....	12
Joonis 3. EKG - südamelihase aktiivsuse ja BCG - vere kiirenduse võrdlus [6]. .....	13
Joonis 4. Heli ja vibratsiooni edastava tooli kõlarite asukoht [7]. .....	15
Joonis 5. Heli ja vibratsiooni edastamise padi [8]. .....	15
Joonis 6. Masseeriv tool valgustusega [9]. .....	15
Joonis 7. Masseeriv teraapiatool [10]. .....	15
Joonis 8. Magnetlevitatsioonil põhinev vibreeriv plaat [11]. .....	16
Joonis 9. Kehavibratsiooni aparaat [12]. .....	17
Joonis 10. Andmevahetuse plokk skeem. ....	18
Joonis 11. STM32 arhitektuur [13]. .....	19
Joonis 12. Kiirendusanduri mõõtetulemused. ....	20
Joonis 13. Wieneri sillaga RC-generaator [15]. .....	22
Joonis 14. Logaritmiliselt siinuse saamine [16]. .....	25
Joonis 15. Pingega tüüritav ostsillaator [16]. .....	25
Joonis 16. Siinusvõnkumise generaator [17]. .....	26
Joonis 17. Programmeeritav lainekuju generaator [18]. .....	27
Joonis 18. Signaaligeneraatori simulatsiooniskeem. ....	29
Joonis 19. Simulatsiooniskeemi väljund. ....	29
Joonis 20. Pulsatsioonigeneraatori simulatsiooniskeem. ....	30
Joonis 21. Pulsatsioonigeneraatori väljund. ....	30
Joonis 22. Siinusgeneraatori elektriskeem. ....	31
Joonis 23. Trükkplaadi disain. ....	32
Joonis 24. Pulsigeneraatori väljundi väikseim võimalik sagedus. ....	33
Joonis 25. Pulsigeneraatori väljundi suurim võimalik sagedus. ....	33

## **Tabelite loetelu**

Tabel 1. Siinusvõnkumise genereerimise tüübid [16]. .....	23
---	----



# 1 Sissejuhatus

Vibratsioon ümbritseb meid kõikjal ja pole sugugi vaid tööstusrevolutsiooni ebameeldiv kaasnähtus. Vibratsiooni amplituud ja sagedus varieerub allikati, alates maavärinatest või loomakarjade liikumisest tekkinud vibratsioonist lõpetades kaasaegse tööstuse kehvasti balansseeritud liikurmehhanismidega. Siiski ei piirdu vibratsiooni mõju vaid negatiivse poolega. Sobiva vibratsiooni lõõgastav mõju on kasutusel spetsiaalsetes massaažiliikides.

Käesolev töö on suunatud vibratsiooni ja inimese subjektiivse heaolutunde seoste uurimisele kasutades vibreerivat plaati.

Esimese ülesandena tuleb välja selgitada valdkonna tegutsemispiirid (freedom to operate), mis on sellel alal eelnevalt tehtud ning millised lahendused patentidega kaitstud. Selleks on vajalik uurida ja analüüsida olemasolevat kirjandust ja patente, mille puhul kasutatakse vibratsiooni, et saada olulist infot lihaste või üleüldiselt inimkeha seisundi kohta, nii Eestist kui ka välismaalt. Vibratsioon on kasutusel lihaspinge analüüsiks (näiteks lihastoonuse mõõtmistehnoloogia Myoton või vibratsioonil põhinevad treeningvahendid), aga ka näiteks vere hulga mõõtmiseks inimkehas.

Teise ülesandena tuleb olemasoleva STM32 arendusplaadil asuva kiirendusanduri abil koguda infot plaadi liikumise kohta.

Kolmanda ülesandena tuleb uurida erinevaid muudetava sageduse genereerimise meetodeid vibreeriva plaadi tüürimiseks. Eelduseks on, et igal inimesel võiks olla oma eelistatud vibratsioonisagedus, et seda saaks ka valida, peab olema sagedus muudetav.

Tööstuses on vibratsiooni negatiivsed tagajärjed võrdlemisi kiired tekkima. Töötades masinaga, mis tekitavad kogu keha vibratsiooni (WBV), võivad tulla luukahjustused, alaseljavalud, tasakaalu või nägemishäired. Ka ainult käes hoitavatest tööriistadest (näiteks pneumaatilised tööriistad, saed) võivad tekkida pöördumatud kahjustused nagu

liigese, närvi-, lihaskahjustus. Mõjud sõltuvad vibratsiooniga kokkupuute ajast, sagedusest ja amplituudist. [1]

Maavärinatega seotud seismilised lained on samuti madala sagedusega vibratsioonid, mille tagajärjed võivad erakordselt kohutavad olla. Sellisel juhul on vibratsiooni sagedusala 0,2–20 Hz ja mõõdetav nii nihke, kiiruse kui ka kiirendusena. Maavärinate tõttu tekivad maakoorme nihked, mille suurus võib olla mõnest millimeetrist mitmete meetriteni. [2] Seesuguse looduskatastroofiga kaasneva vibratsiooni puhul on raske leida elusolenditele, loodusele ja tsivilisatsioonile midagi kasulikku.

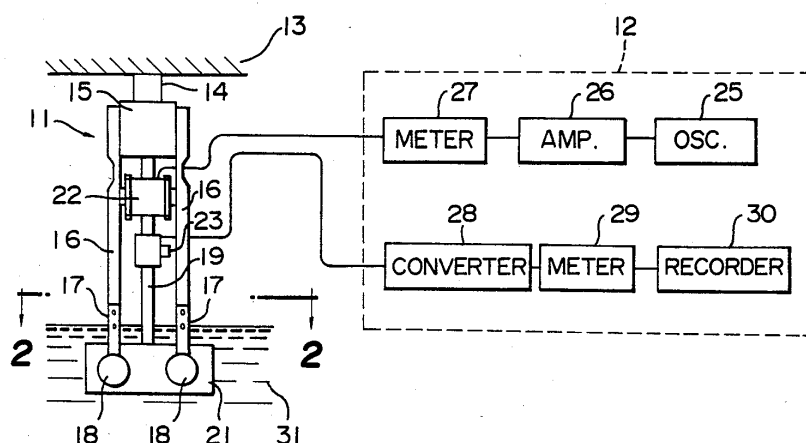
Vibratsioonile on leitud ka rakendusi, millest on teatud kasu. Vibratsiooni abil saab teostada mitmeid mõõtmisi (lihaspinge, vere hulk). Lisaks on teraapia, spordi ja massaaži eesmärkidel vibratsiooni kasutamine järjest enam populariseerunud.

Käesolevas töös arendatava vibreeriva plaadi rakenduseks on mõningal määral mõõtmine, et tuvastada inimkeha seisundit, aga ka heaolutunde tekitamine.

## 2 Vibratsiooni abil mõõtmine

Vibratsiooni rakendamist võiks jagada mõõtmiseks ja mõjutamiseks. Mõlemat saab teostada nii elus- kui ka eluta looduses. Mõjutamine eluta looduse puhul on näiteks betooni tihendamine vibraatoriga. Käesolevas peatükis on näiteid vibratsiooni abil parameetrite mõõtmisest nii ainete kui ka inimeste puhul.

Vibratsiooni kasutatakse erinevate mõõteseadmete juures. Näiteks saab vibreerivate plaatide abil mõõta aine viskoossust [3]. Sellise mõõteaparaadi plaadid vibreerivad võrdsetel sagedustel, kuid vastandfaasides [3]. Sagedus peab olema ka vibratsioonigeneraatoril reguleeritav, sest see võimaldab viskoossust mõõta suures ulatuses ja hea täpsusega [3]. Kirjeldatud seadme skeem on kujutatud joonisel 1.

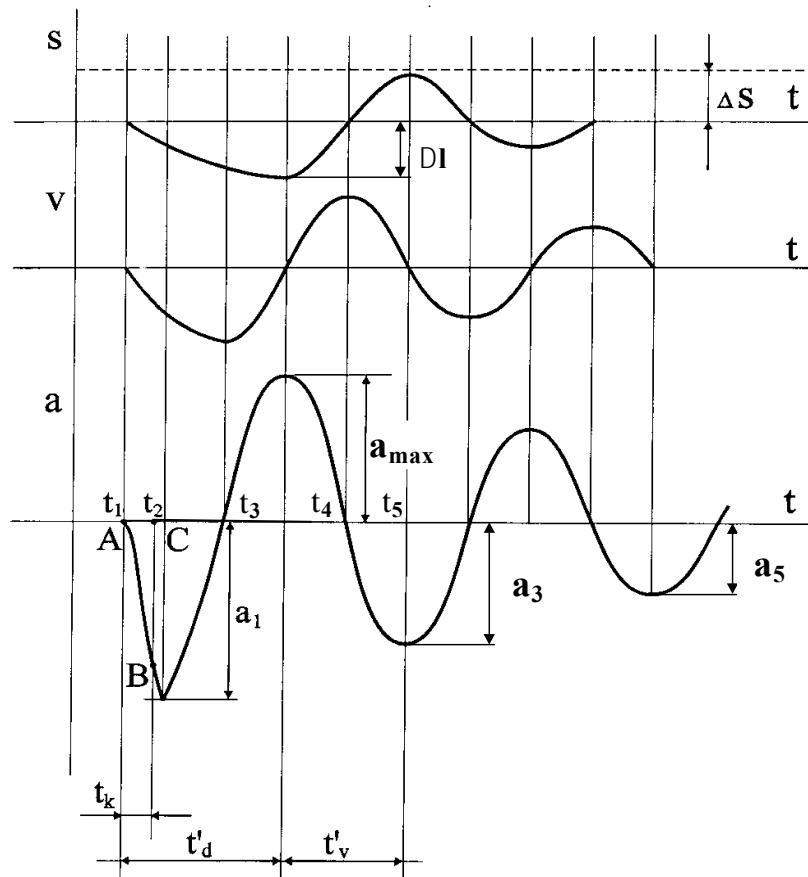


Joonis 1. Viskoossuse mõõtmisseadme teostusviis [3].

Enne lihaste stimuleerimist või ravi määramist peab andma keha kohta ka mingi hinnangu või diagnoosi. On olemas mitmeid seadmeid, millega saab vibratsiooni abil hinnata inimkeha seisundit ehk vibratsiooni abil mõõta mõningaid parameetreid. Edasistes alapeatükkides on kirjeldatud neist kahte: elektromüograafia ning ballistokardiograafia.

## 2.1 Elektromüograafia

Elektromüograafia ehk EMG on lihaspinge mõõtmisel enimkasutatud ning üks paljudest EMG vahenditest (müomeeter) on Tartus leiutatud portatiivne diagnostikaseade Myoton. Müomeetri ja sealjuures ka Myotoni tööpõhimõtteks on skeletilihasele valitud punktis löökotsikuga jõuimpulsi andmine, millel on standardne jõud ja kestvus. Jõuimpulsi järel jääb löökotsik lihasega kontakti ja võngub koos lihasmassiga kuni sumbumiseni. Mõõtmisprotsessi tulemuste graafikud on kujutatud joonisel 2. [4]



Joonis 2. Müomeetri löökotsiku võnkumise graafikud mõõtmisprotsessis [4].

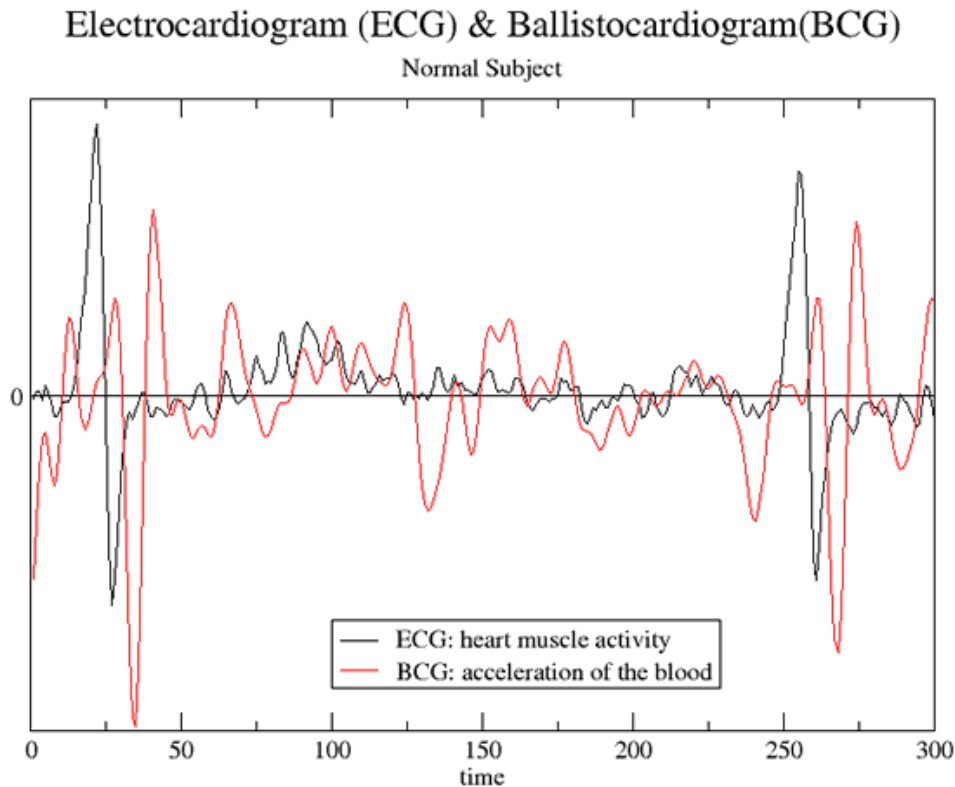
Müomeetri abil saab mõõta lihase omavõnkumise sagedust, mis tähendab lihase pinget; dekrementi, mis iseloomustab elastsust ja jäikust ehk vastupanu osutamise kuju muutvale jõule. Omavõnkumise sageduse tavaliseks väärtuseks on 11–16 Hz, kuid pinges lihase puhul 18–40 Hz ehk pingeoleku puhul omavõnkumissagedus suureneb. Dekrementi väärtused jäävad üldjuhul alla 1,0–1,2, kuid treenitud lihase puhul tulemus

väheneb ehk elastsus suureneb. Jäikuse väärtuseks normaalasendis on 150–300 N/m, pingestamisel võib tõusta üle 1000 N/m. [4]

## 2.2 Ballistokardiograafia

Termin *ballistokardiograaf* (BCG) tuleb kreeka keelsetest sõnadest *βάλλω* (*ballō*), mis tähendab “viskama”, *κάρδια* (*kardia*) ehk “süda” ja *γραφία* (*graphia*) ehk “kirjeldus”. BCG on südamele olevate ballistiliste jõudude mõõtmine. Iga südame lööbiga vere voolamise korduvast liikumisest suurtes veresoontes luuakse graafiline esitus. [5]

Tehnika leiutati küll üle 50 aasta tagasi, aga diagnostikavahendina polnud BCG siiski väga kasulikuks osutunud, sest mõõdetud vere kiirenduse vead olid suured. Seda seetõttu, et kiirendava vere mass on keha massi suhtes väga väike. Tänapäevased signaalitötlusmeetodid on aga võimaldanud mõõtmisvigu vähendada ja BCG-d kasutatakse nüüdseks meditsiinis tihedamini. Elektrokardiogramm (EKG) ehk südamelihaste aktiivsuse mõõtmine, on siiski rohkem kasutusel. Tavalise patsiendi EKG ja BCG on toodud joonisel 3. [6]



Joonis 3. EKG - südamelihase aktiivsuse ja BCG - vere kiirenduse võrdlus [6].

### 3 Vibratsiooniga mõjutamine

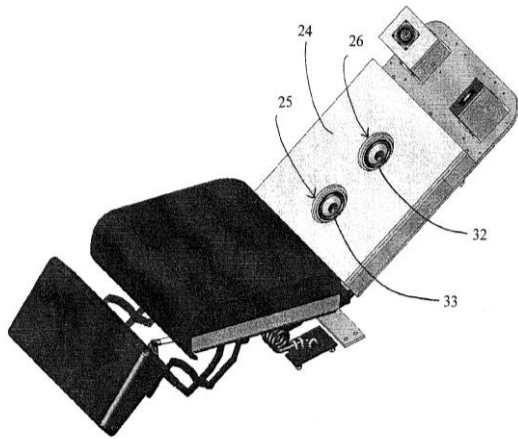
Vibratsiooni positiivsete omaduste rakendamiseks ehk eluslooduse (peamiselt inimeste) mõjutamiseks on patenteeritud erinevad treening- ja massaaživahendid. Osad neist on peal seismiseks, nagu käesolevas töös mainitud arendatav plaat, mõned istumiseks ehk tooli versioonis, aga on ka teistsuguseid lahendusi. Enamasti on patendis määratud ka kasutuseesmärk, milleks võib olla treening, ravi või mõõtmine.

Tuntuim lahendus vibratsiooniga masseerimisel on massaažitoolid. Üks selliseid patente pärineb aastast 2007, millel on lisaks vibratsiooniallikale ka heliallikas [7]. Toolil (võib kasutada ka lamavas asendis korpusesse panemiseks) on heli ja vibratsiooni edastamiseks kõlarid (kõlarite asukoht joonisel 4), andurid või nende kombinatsioon [7]. Kasutatavad sagedused ulatuvad peamiselt tuntavatest madalatest sagedustest kuni kuuldavate sagedusteni [7].

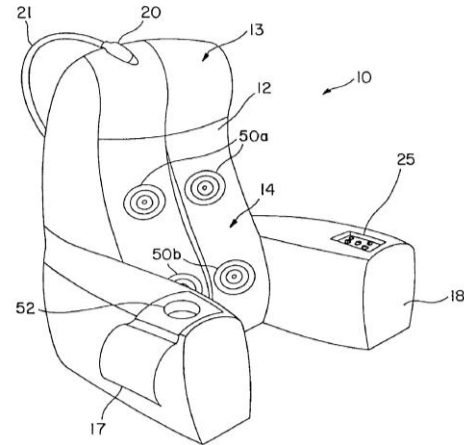
Leiutis tagab kasutajale vibraalse energia, kusjuures heli ja vibratsiooni saab reguleerida. Patendis on kirjeldatud ka toolide järjestikku asetamist ja korraga juhtimist. Tooli eesmärgiks on tervise parandamine ja põhiline kasu tervisele seisneb kolmes väljundis: paraneb homöostaas sümpaatiliste ja parasümpaatiliste süsteemide vahel, heli ja vibratsiooni energia otsesed mõjud ning närvisüsteemi ümberprogrammeerimine. [7]

Sarnane patent on leitav ka aastast 2003, mille juures kasutatakse nii vibratsiooni kui ka heli. Sel juhul on tegemist pigem padjaga, millel on kõlarid ja võimendi. Seda võiks kasutada vaadates televiisorit või mängides videomänge ehk eesmärgiks on lihtsalt massaaž. Leiutise kujutis toolina on joonisel 5. [8]

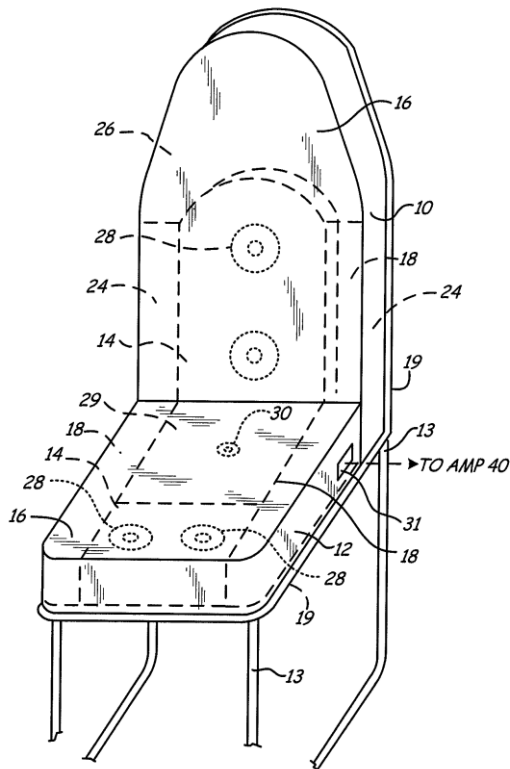
Teistsuguse lahendusena on sisseehitatud masseeriv element, mida juhib elektrimootor. Ühele sellistest on lisatud ka kõlarid ja valgustus, et oleks hea telerit vaadata või lugeda [9]. Valgustusega tool on joonisel 6. Masseerivast teraapilise toimega toolist, mis on kujutatud joonisel 7, on ka lahendus, et täielikuks lõdvestumiseks on toolile lisatud virtuaalreaalsuse komplekt [10].



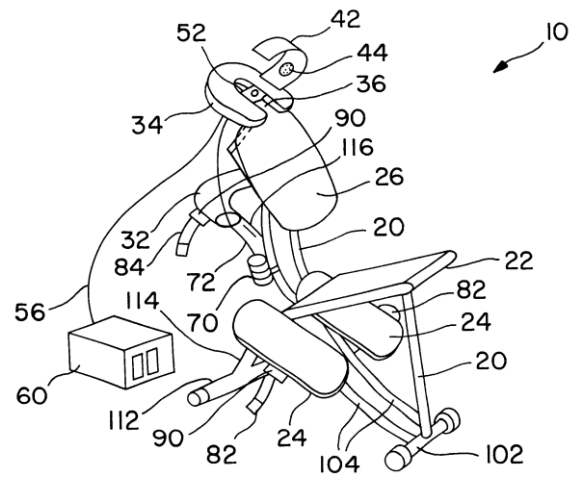
Joonis 4. Heli ja vibratsiooni edastava tooli kõlarite asukoht [7].



Joonis 6. Masseuriv tool valgustusega [9].



Joonis 5. Heli ja vibratsiooni edastamise padi [8].



Joonis 7. Masseuriv teraapiatool [10].

Vibratsiooni tajumiseks ei pea istuma just toolile. Üks näiteid, mis sarnaneb enim käesolevas lõputöös viidatud arendatavale plaadile, mille prototüüpide pildid on leitavad lisa 1, on magnetlevitatsioonil põhinev vibreeriv süsteem lihasskeleti näidustuste ravimiseks või ennetamiseks [11]. Selle plokk skeem on kujutatud joonisel 8.





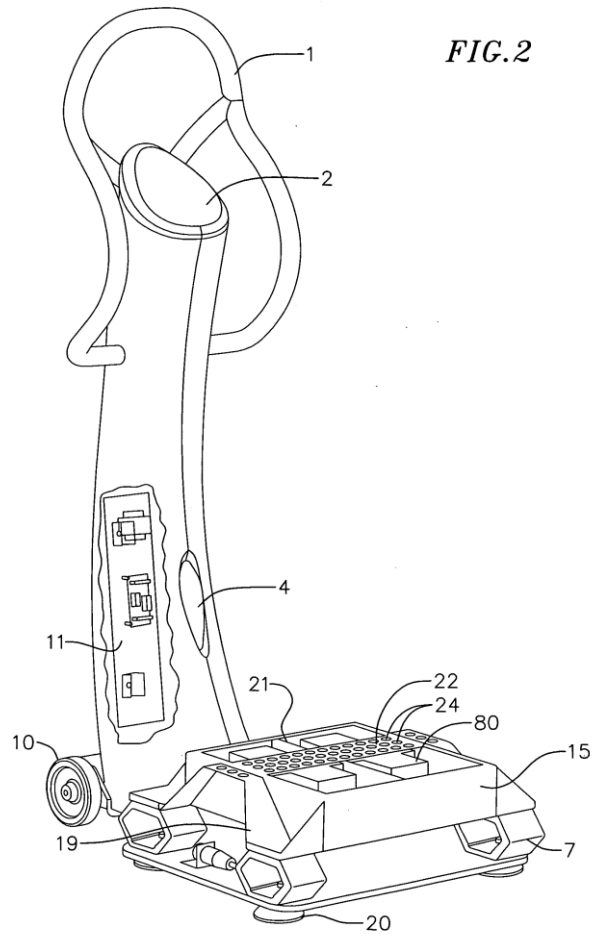
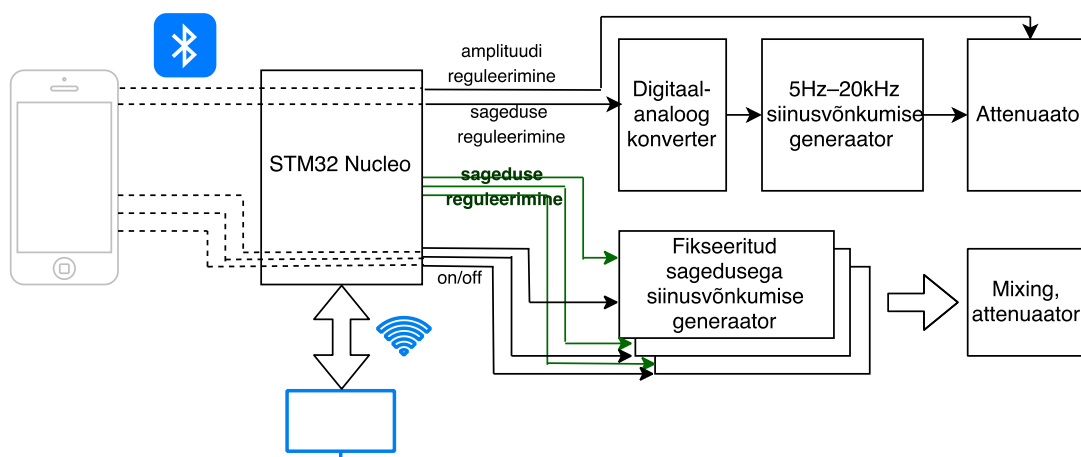


FIG. 2

Joonis 9. Kehavibratsiooni aparaat [12].

## 4 Üldine ülesehitus

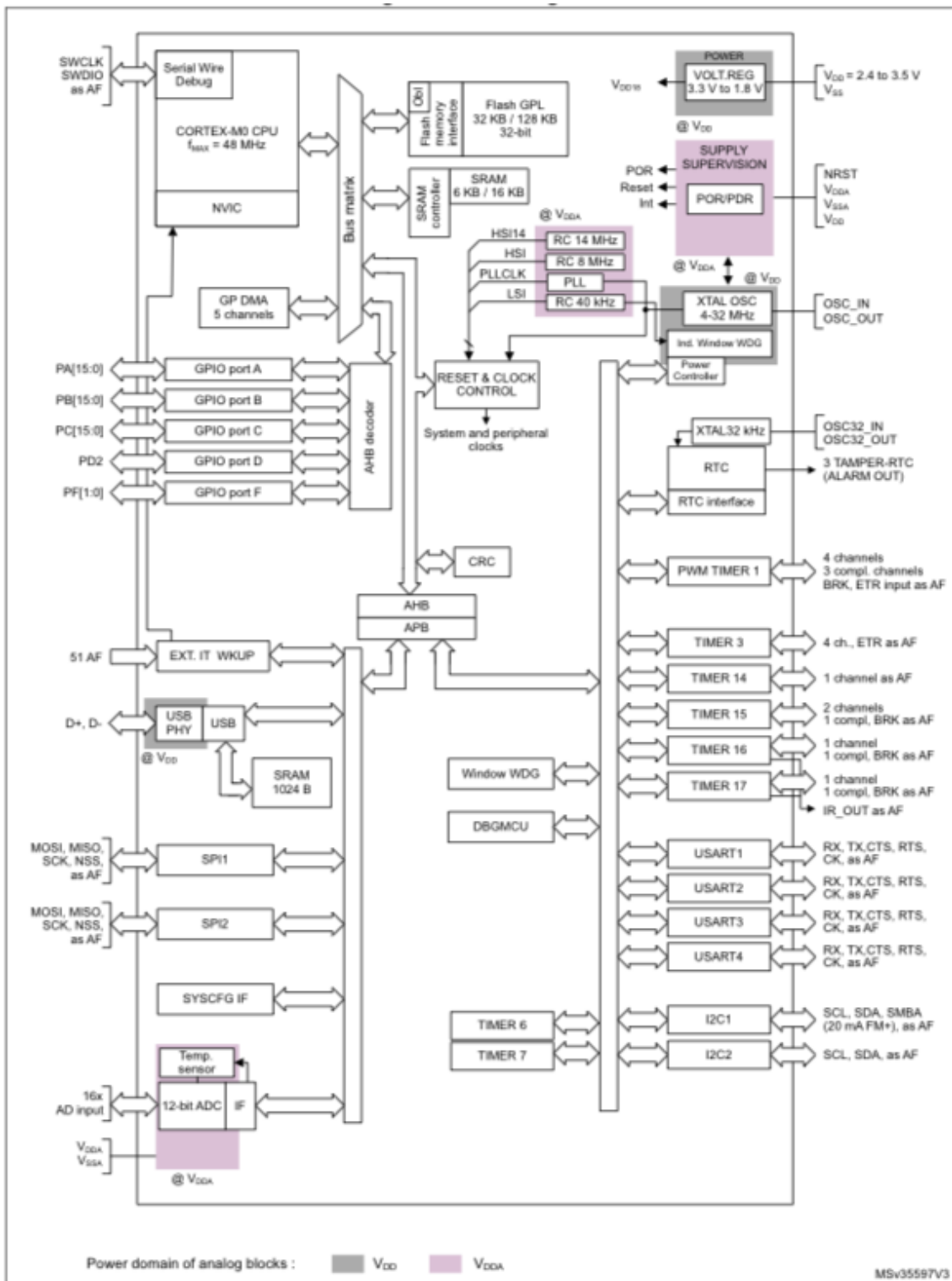
Värinplaadi kasutaja peab esmalt laadima oma nutitelefoni rakenduse ning looma Bluetoothi abil ühenduse plaadi küljes oleva mikrokontrolleriga STM32 Nucleo. Mikrokontroller juhib siinusvõnkumise generaatorit ning registreerib kiirendusanduri abil plaadi liikumist. Kasutaja sagedus- ja amplituudieelistused salvestatakse nutitelefoni identifitseerimisnumbriga kesksesse andmebaasi. Lisaks küsitakse mobiilirakenduse kaudu kasutajalt subjektiivne hinnang enesetunde kohta. Kasutaja tagasiside ning kiirendusanduri info salvestatakse samuti kesksesse andmebaasi. Plaadi toimimisega seotud plokkskeem on kujutatud joonisel 10. Nutitelefoni rakenduse loomine ei ole käesoleva töö eesmärgiks.



Joonis 10. Andmevahetuse plokkskeem.

### 4.1 Mikrokontroller STM32 Nucleo

Valituks osutus tootja STMicroelectronics mikrokontroller STM32F070RB, mis sobib kasutamiseks paljudes rakendustes: kasutajaliidesed, mängud, tööstuslikud rakendused, inverterid, printerid, häiresüsteemid. Mikrokontrolleril on 128 kilobaiti *Flash*-mälu ja 16 kilobaiti staatiline suvapöördusmälu, 51 *General-purpose input/output* (GPIO), mis on käesolevas töös piisav. Arhitektuur on joonisel 11. [13]



Joonis 11. STM32 arhitektuur [13].

STM32 Nucleo-64 arendusplaadil on küll mõningad sensorid, näiteks temperatuurisensor, kuid vajaliku kiirendusanduriga on varustatud STM32 Nucleole laiendusplaat X-NUCLEO-IKS01A2. Plaadil on LSM6DSL MEMS 3D kiirendusandur

täpsusega  $\pm 2/\pm 4/\pm 8/\pm 16$  g. Lisaks on veel LSM303AGR MEMS 3D kiirendusandur, güroskoop, magnetomeeter, niiskuse ja temperatuuri sensor ning rõhuandur, kuid neid käesolevas töös ei kasutatud. [14]

## 4.2 Mikrokontrolleriga liikumise mõõtmine

Arendatava värinaplaadi liikumist soovitakse mõõta kiirendusanduri abil. Selleks oli vaja luua programm, mis loeks laiendusplaadil X-NUCLEO-IKS01A2 asuvalt kiirendusandurilt LSM6DSL andmed. Programmi põhiosa kood on toodud lisas 2. Mõõtetulemused, mis on tekitatud plaadi liigutamise käes, on kuvatud joonisel 12. Nende tulemustega ei ole värinaplaadi valmimiseni enamat teha.

```
--- Starting new run ---
LSM6DSL accelerometer sensitivity = 0.061000
LSM6DSL [acc/mg]:      -29,      2,    1033
LSM6DSL [acc/mg]:       26,    203,    1182
LSM6DSL [acc/mg]:    496,    464,   -495
LSM6DSL [acc/mg]:    209,    391,   -810
LSM6DSL [acc/mg]:    236,    666,   -807
LSM6DSL [acc/mg]:    331,    849,      1
LSM6DSL [acc/mg]:     83,   -459, -1070
LSM6DSL [acc/mg]:    277,   -347,   1136
LSM6DSL [acc/mg]:   -708,    109,    674
LSM6DSL [acc/mg]:    914,    -46,    405
LSM6DSL [acc/mg]:    248,     47, -1222
LSM6DSL [acc/mg]:   -582,   -105,    625
LSM6DSL [acc/mg]:    473,    149,    232
LSM6DSL [acc/mg]:   -664,    -40,   1309
LSM6DSL [acc/mg]:    355,    493,   -664
LSM6DSL [acc/mg]:    334,    587,    480
LSM6DSL [acc/mg]:   -210,   -991,    546
LSM6DSL [acc/mg]:    917,   -410,   -618
LSM6DSL [acc/mg]:   -126,    260,   1255
LSM6DSL [acc/mg]:    -36,     -4,   1007
```

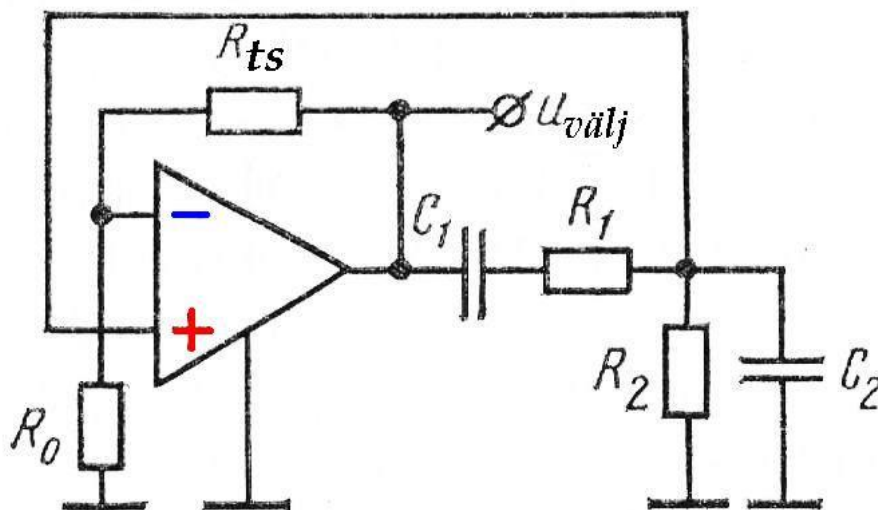
Joonis 12. Kiirendusanduri mõõtetulemused.

Mõõtetulemuste jooniselt on näha, et kiirendusanduri tundlikkus on 0,061, mis tähendab, et kasutaja poolt valitav dünaamiline kiirendusvahemik on  $\pm 2g$  täisvahemikust. Mõõtetulemusteks on muutuste mõõtmine x-, y- ja z-teljel ühikus mg. Tulemustelt on näha, et muutusi tuvastatakse alates 1 mg.

## 5 Siinusvõnkumise genereerimine

Siinusvõnkumise generaator ehk ostsillaator muundab toiteallika alalispinge harmooniliseks võnkumiseks ehk kindla kuju, amplituudi ja sagedusega elektrivõnkumiseks. Positiivse tagasisidega võimendil muutub teatud sagedustel võimendustegur lõpmata suureks, mis tingib võimendi iseergutamise, mille tagajärjel tekib isegi sisendsignaali puudumisel väljundpinge. Iseergutuvates harmoonilise võnkumise generaatorites just seda nähtust kasutatakse. Harmoonilise võnkumise tekkimiseks peab olema täidetud kaks tingimust: üks neist faaside tasakaal, teine amplituudide tasakaal [15].

Olemas on erinevaid ostsillaatoreid, nagu näiteks LC-ostsillaatoritest Colpittsi (mahtuvuslik kolmpunktskeem) ja Hartley (induktiivne kolmpunktskeem), aga ka Meissneri skeem (trafosidestuses generaator – rakendatakse raadiosagedustel). Madalsageduslikes generaatorites, mis on vibreeriva plaadi juures oluline, kasutatakse sagedusest sõltuvaid RC-lülisid, millest klassikaliseim on Wieneri sild, mille kasutamine RC-generaatoris on kujutatud joonisel 13. [15]



Joonis 13. Wieneri sillaga RC-generaator [15].

Kõige lihtsamal Wieni sillaga generaatoril on ka omad puudused, näiteks temperatuuritaluvus. Siinusvõnkumise genereerimiseks on lahendusi veel teisigi. Tabel 1 on Texas Instrumentsi [16] loodud tabel siinusvõnkumise genereerimise võimaluste kohta.

Tabel 1. Siinusvõnkumise genereerimise tüübid [16].

Type	Typical Frequency Range	Typical Distortion (%)	Typical Amplitude Stability (%)	Comments
Phase Shift	10 Hz–1 MHz	1–3	3 (Tighter with Servo Control)	Simple, inexpensive technique. Easily amplitude servo controlled. Resistively tunable over 2:1 range with little trouble. Good choice for cost-sensitive, moderate-performance applications. Quick starting and settling.
Wein Bridge	1 Hz–1 MHz	0.01	1	Extremely low distortion. Excellent for high-grade instrumentation and audio applications. Relatively difficult to tune—requires dual variable resistor with good tracking. Take considerable time to settle after a step change in frequency or amplitude.
LC Negative Resistance Tuning Fork	1 kHz–10 MHz	1–3	3	Difficult to tune over wide ranges. Higher Q than RC types. Quick starting and easy to operate in high frequency ranges.
Crystal	60 Hz–3 kHz	0.25	0.01	Frequency-stable over wide ranges of temperature and supply voltage. Relatively unaffected by severe shock or vibration. Basically untunable.
Triangle-Driven Break-Point Shaper	30 kHz–200 MHz	0.1	1	Highest frequency stability. Only slight (ppm) tuning possible. Fragile.
Triangle-Driven Logarithmic Shaper	< 1 Hz–500 kHz	1–2	1	Wide tuning range possible with quick settling to new frequency or amplitude.
Triangle-Driven Logarithmic Shaper	< 1 Hz–500 kHz	0.3	0.25	Wide tuning range possible with quick settling to new frequency or amplitude. Triangle and square wave also available. Excellent choice for general-purpose requirements needing frequency-sweep capability with low-distortion output.
DAC-Driven Logarithmic Shaper	<1 Hz–500 kHz	0.3	0.25	Similar to above but DAC-generated triangle wave generally easier to amplitude-stabilize or vary. Also, DAC can be addressed by counters synchronized to a master system clock.
ROM-Driven DAC	1 Hz–20 MHz	0.1	0.01	Powerful digital technique that yields fast amplitude and frequency slewing with little dynamic error. Chief detriments are requirements for high-speed clock (e.g., 8-bit DAC requires a clock that is 256 x output sine wave frequency) and DAC glitching and settling, which will introduce significant distortion as output frequency increases.

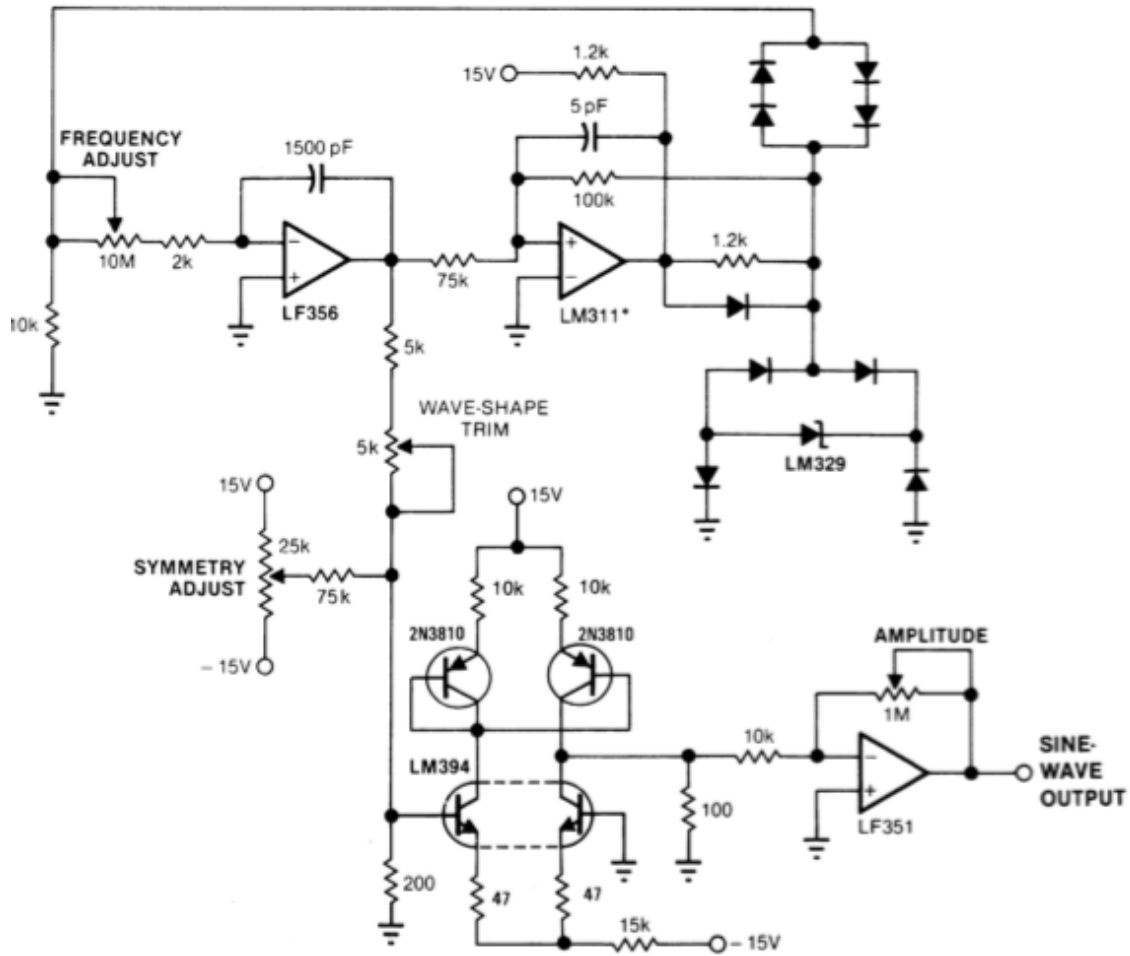
Meeldivaks ja positiivse mõjuga vibratsiooniks on pigem madalad sagedused. Seega käesolevas lõputöös on soovitud sagedusvahemik ligikaudu <1 Hz kuni 432 hertsini. Muutus peaks toimuma pigem kiiresti, mitte väga suure viivitusega. Seega võiks tabeli alusel sobida hästi Wieni sillaga mõni keerulisem lahendus või pingega tüüritav meetod.

Wieni sillaga siinusvõnkumise generaatori tüüpiline sagedusvahemik on ühest hertsist kuni megahertsini. Sellisel tüübil on väga väike moonutus (0,01%), seega ta sobib hästi kõrge kvaliteediga mõõteriistades ja heliseadmetes kasutamiseks. Negatiivseks pooleks on, et Wieneri sillaga generaatorit on raske häälestada, nõuab kaht muuttakistit ning määratud sageduse või amplituudi saavutamiseks läheb aega. [16]

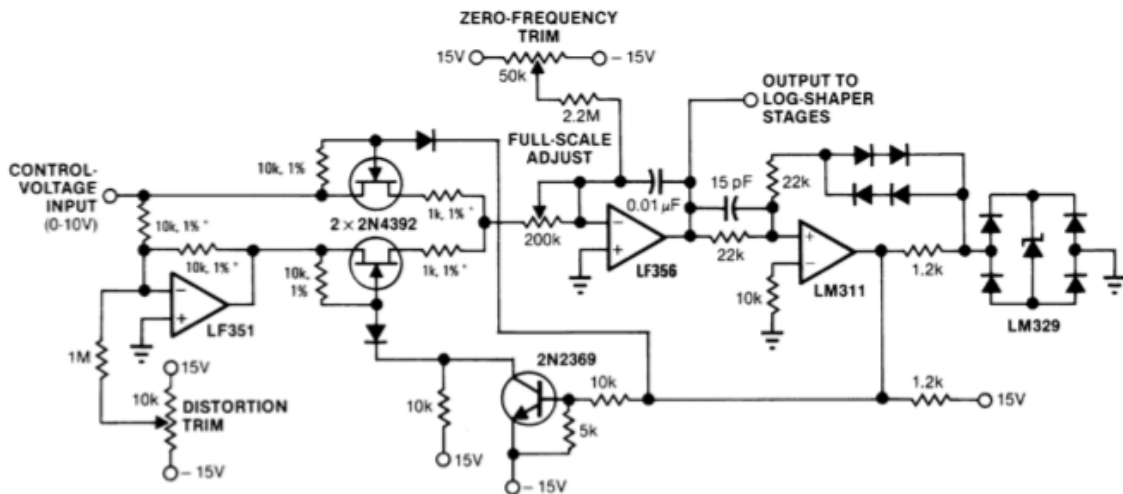
Siinuse genereerimiseks on kasutusel ka lähendusmeetodid ehk esmalt genereeritakse kolmnurk või muu sarnane signaal ning seejärel kasutatakse erinevaid meetodeid, mille tagajärjeks on siinusele vähem või rohkem sarnane signaal. Selline meetod soosib väga kiiret sageduse muutmist (<1 Hz–500 kHz), kuid moonutused on alati suuremad (0,3% või isegi 1–2%), kui Wieneri sillaga generaatoritel. [16]

Kolmnurksignaalist on võimalik logaritmiliselt vormida siinus (skeem joonisel 14). Kuna kontrollkontuuri ajakonstante pole kasutusel, siis on võimalik soovitud sagedusele jõuda kohe. Sagedusi saab valida vahemikust 1 Hz kuni 10 kHz. Kui logaritmilise skeemi modifitseerida, saab võimsama versiooni ehk pingega tüüritava ostsillaatori (joonis 15). Vastava skeemi sagedusvahemik on 1 Hz–30 Hz sisendpingega 0V–10V. [16]





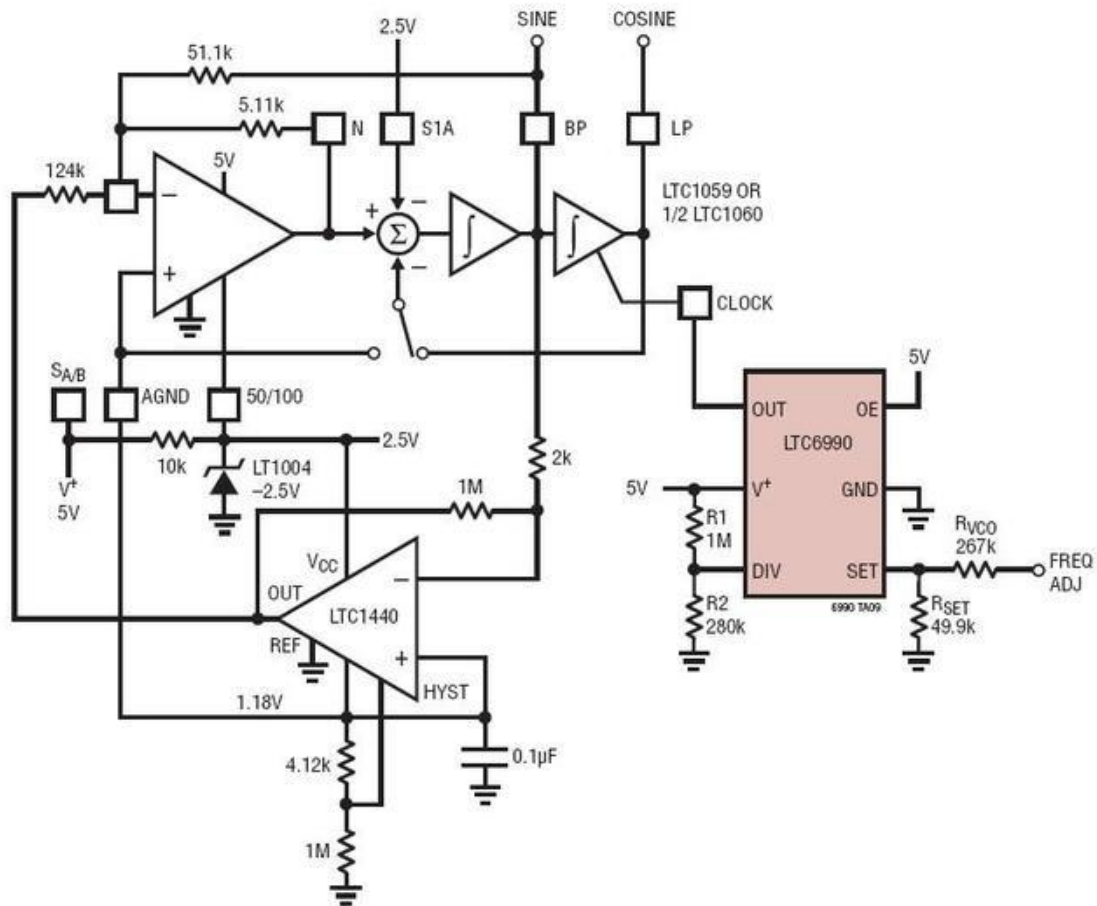
Joonis 14. Logaritmiliselt siinuse saamine [16].



Joonis 15. Pingega tüüritav ostillaator [16].

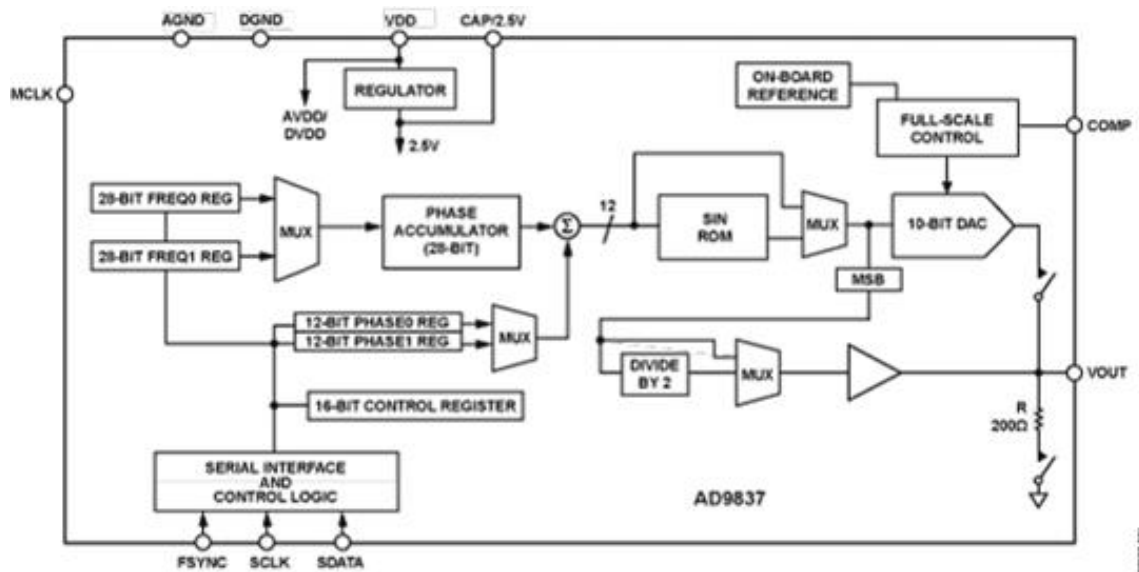
Pingega reguleeritava kvadratuurse siinuse võnkumise ostillaatori, mille sagedusvahemik on 2Hz–18kHz, mis on sobiv ka käesolevas töös kasutatava vibreeriva plaadi

juhtimiseks, skeem on kujutatud joonisel 16. Selle ostsillaatori väljundsignaalil, milleks võib olla nii siinus kui ka koosinus, on konstante tipust tipuni amplituud 1V. [17]



Joonis 16. Siinusvõnkumise generaator [17].

Variandiks on ka programmeeritav generaator. Näiteks joonisel 17 kujutatud madala võimsusega lainekuju generaatori plokskeem. Selle skeemi väljundiks võib olla nii siinus, kolmnurksignaali kui ka nelinurksignaali. Sellise lahendusega on võimalik genereerida kuni 8 MHz sagedusega siinust. Peamiselt kasutatakse sellist skeemi digitaalsignaali moduleerimiseks. Tänu programmeeritavusele on skeem väga mitmekülgne, kuid ka võrdlemisi keeruline. [18]



Joonis 17. Programmeeritav lainekuju generaator [18].

Sagedusvahemiku ja keerukuse alusel osutus edasiseks uurimiseks valituks joonisel 16 kujutatud siinusvõnkumise generaator. Programmeeritav lainekuju generaator oleks samuti sobinud, kuid puudus kindlus, et tekib võimekus mikrokontrolleri programmeerimisel.

## 6 Siinusgeneraatori variantlahenduse testimine

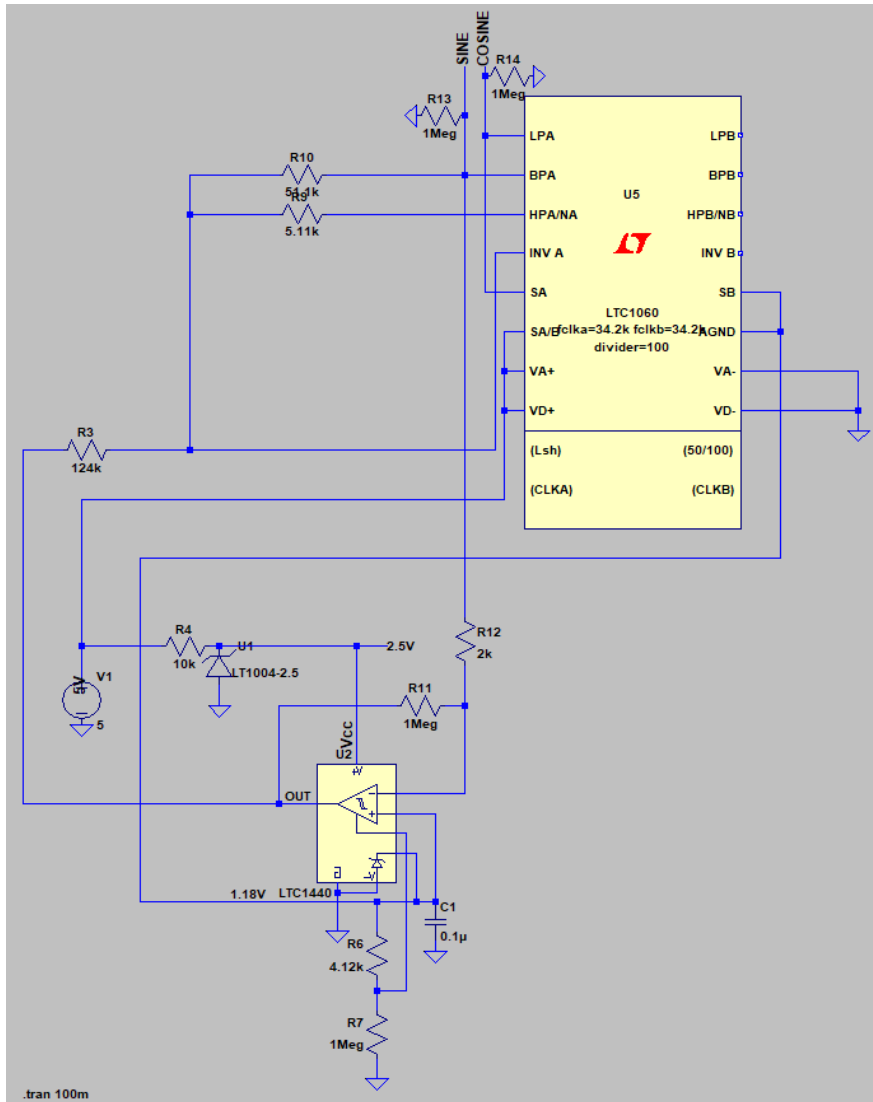
Testimise esimeseks etapiks oli siinusgeneraator simuleerimine tarkvaraga LTspice XVII. Seejärel juba elektriskeemi joonistamine tarkvaras Altium Designer ning selle alusel trükkplaadi disainimine. Teiseks etapiks oli prototüüpimine makettplaadil.

### 6.1 Arvutisimulatsioon

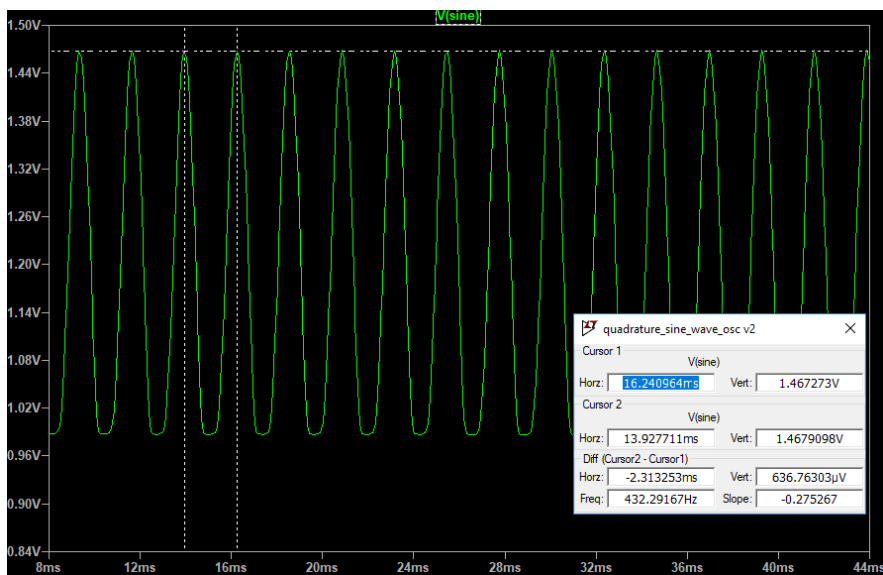
Simulatsiooni osas on skeem võetud kaheks osaks: kella sageduse valimine (pulsigeneraator) ja siinusgeneraator ise. Põhjuseks on, et kasutatavas vabavaras LTspice XVII on komponendil LTC1060 vastavad parameetrid (CLK – fclka, fclkb) vaid manuaalselt muudetavad ehk jalad 9-12 sellel komponendil puuduvad. Seega tuli simulatsiooni puhul eraldi testida pulsigeneraatori toimimist, et anda pulsigeneraatorilt saadud väärtus siinusgeneraatorisse, millest saab vajaliku sagedusega harmoonilise signaali.

Komponendil LTC1060 jäid kasutamata neli viiku (LPB, BPB, HPB/NB ja INV B), sest tegu on kahe filtriga, mis on ühes komponendis, kuid käesolevas skeemis on vaja kasutada vaid ühte filtrit. Komponenti andmelehel oli märgitud, et kui viiku SB ei kasutata, siis tuleb see ühendada viiguga AGND [20]. SA ja LPA ühendus on samuti tehtud teabelehel olevate näidete alusel [20]. Joonisel 18 on kujutatud signaaligeneraatori simulatsiooniskeem.

Soovitud sageduseks valiti 432 Hz, mille saavutamiseks olid komponendi LTC1060 parameetriteks fclka = 34.2k, fclkb = 34.2k ja divider = 100. Kasutades simuleerimist „tran 100m“, tuli joonisel 19 kujutatud siinussignaali väljund. Väljundit uurides ilmneb, et amplituud jõuab maksimumini võrdlemisi ruttu ning sagedus on ühtlane. Simulatsiooni käigus kinnitati, et valitud siinusgeneraatori väljundsagedust saab lihtsalt muuta.

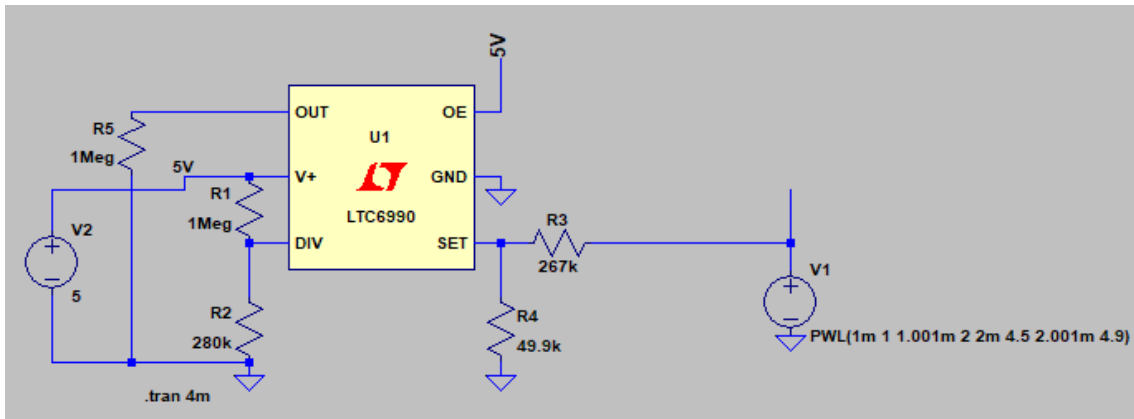


Joonis 18. Signaaligeneraatori simulatsiooniskeem.

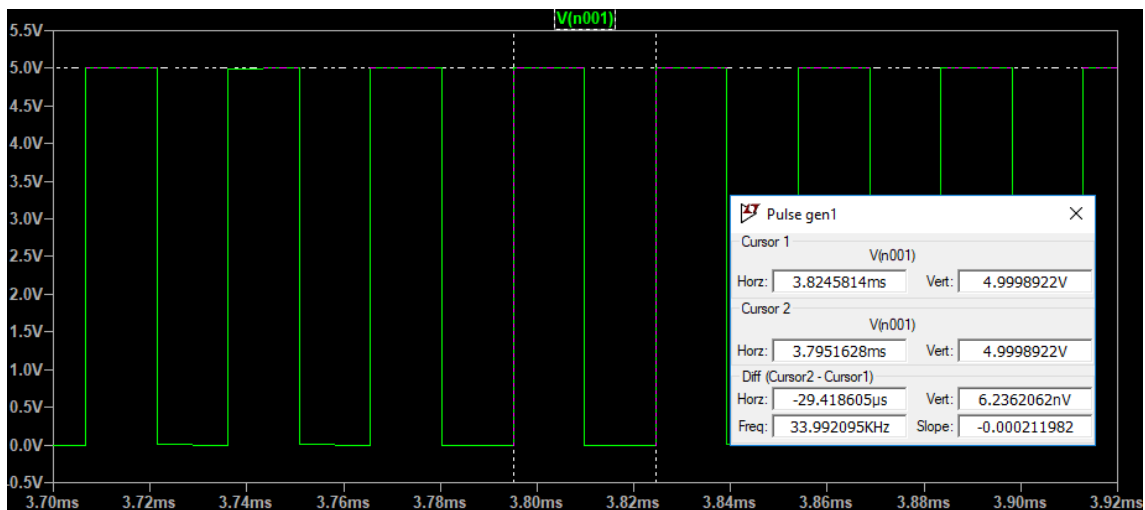


Joonis 19. Simulatsiooniskeemi väljund.

Sageduse sujuvamaks muutmiseks, tuleks komponendile LTC1060 parameetrid CLKA ja CLKB sisse anda pulsatsioonigeneraatoriga ehk skeemi teise osaga. Pulsatsioonigeneraatori simulatsiooniskeem tarkvaras LTspice on kujutatud joonisel 20. Määrates simuleerimiseks pinge 4,9 V, siis väljund tuleb ligikaudselt sagedusega 34 kHz, mis on lähedal skeemi teises osas muutuja CLK soovitud väärtusele. Väljundpulsatsioon sagedusega 34 kHz on kujutatud joonisel 21.

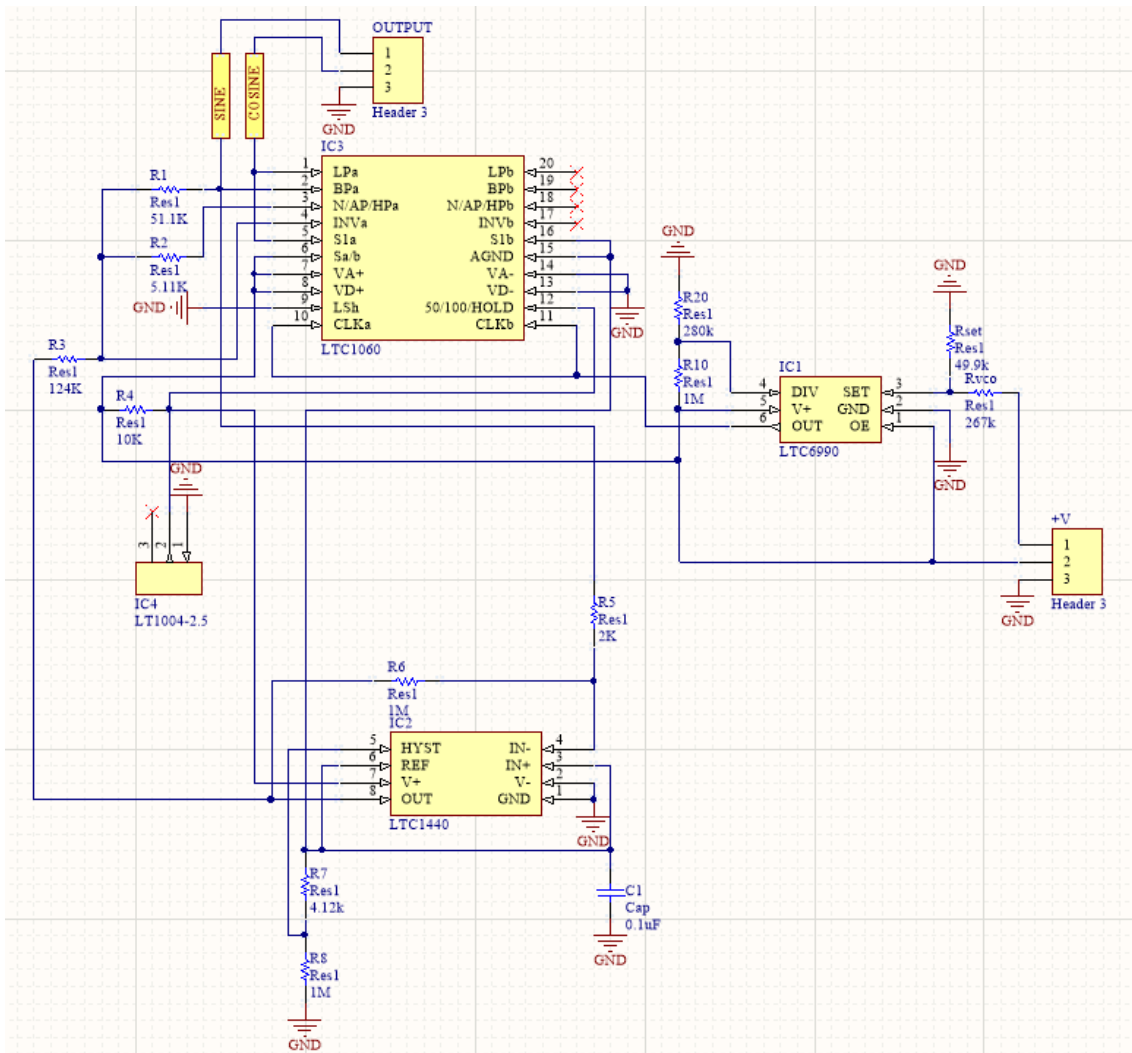


Joonis 20. Pulsatsioonigeneraatori simulatsiooniskeem.



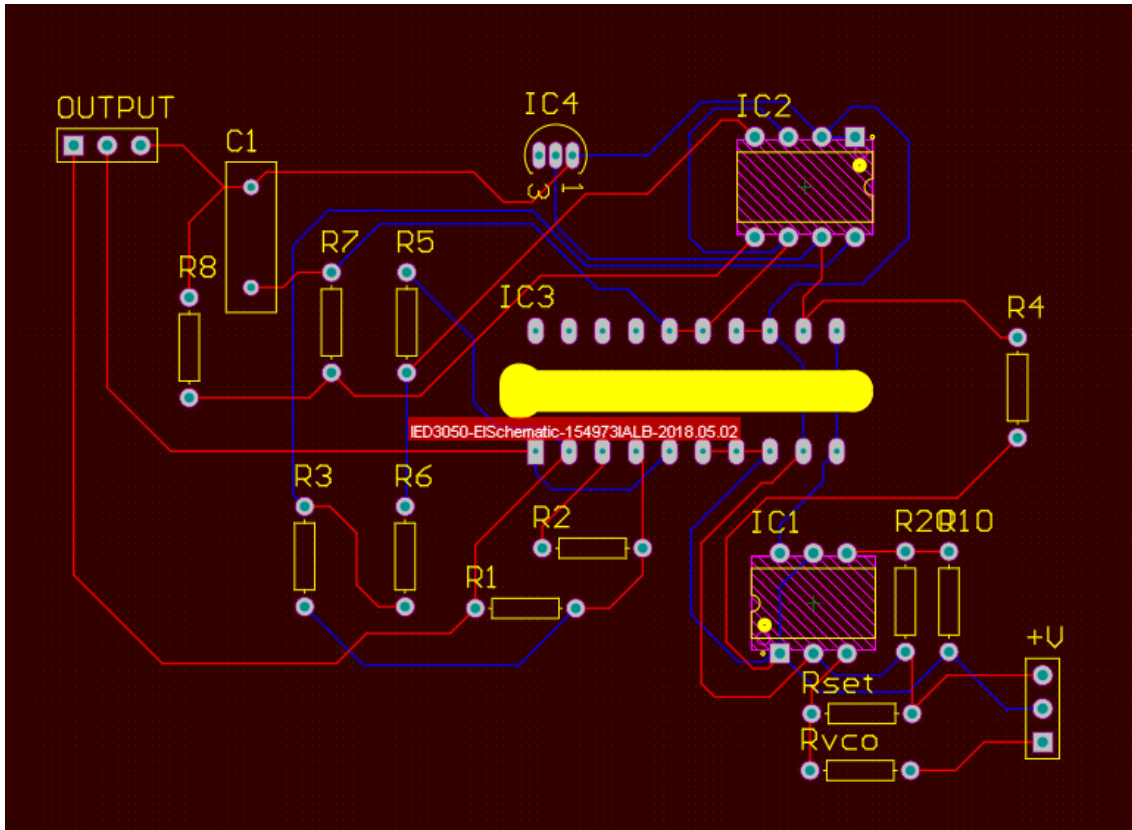
Joonis 21. Pulsatsioonigeneraatori väljund.

Elektriskeemis ja trükkplaadi disainis sai kasutada juba kogu skeemi korraga. Siinusgeneraatori elektriskeem, mis on joonisel 22, on koostatud tarkvaraga Altium Designer.



Joonis 22. Siinusgeneraatori elektriskeem.

Arvutisimulatsiooni lõpetuseks tehti elektriskeemi alusel ka trükkplaadi disain, mille jaoks valiti kõik läbiviikudega komponendid, püüti vältida 90-kraadiseid nurki ning kõik komponendid võimalikult kompaktselt mahutada. Kuna kõige rohkem ühendusi oli komponendiga LTC1060 (IC3), siis paigutati see võrdlemisi keskele ning komponendid IC2 ja IC1 (vastavalt LTC1440 ja LTC6990) selle kõrvale võimalikult sümmeetriliselt. Toiteühendus on toodud paremale alla äärde ning väljund vasakule üles. Trükkplaadi disain on kujutatud joonisel 23.



Joonis 23. Trükkplaadi disain.

## 6.2 Prototüüpimine

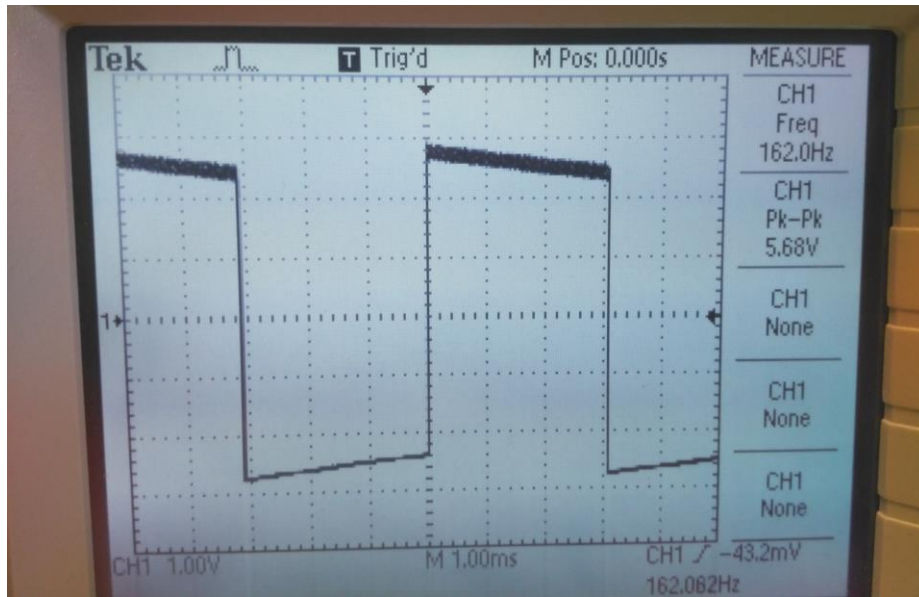
Esmalt pandi makettplaadil kokku eelnevalt arvutisimulatsiooni käigus loodud elektriskeemi alusel kogu siinusgeneraatori skeem. Makettplaadil oleva skeemi pilt on lisas 3. Kuna kogu skeemi tulemus ei olnud rahuldav, siis hakati eraldi analüüsima pulsigenaatori tööd.

Pingega tüüritava sagedusgeneraatori andmelehes [19] on kirjas, et väljundsagedus on mõjutatud kahest komponendist. Üks neist on viigule DIV ühendatud pingejagur takistitega R1 ja R2 ja teiseks on R<sub>SET</sub>, mis on ühendatud viigule SET. Parim tulemus saadi, kui jagamiskoeffitsient N<sub>DIV</sub> valiti 128 ehk suurim lubatud väljundsagedus (sisendpinge ligikaudu 0 V) oli 7,8 kHz. Valetati R1 = R2 = 1 MΩ ja R<sub>SET</sub> = 797 kΩ ja vähim väljundsagedus saadi umbes 162 Hz. Väljundsageduse arvutamiseks on aga andmelehes antud valem (1):

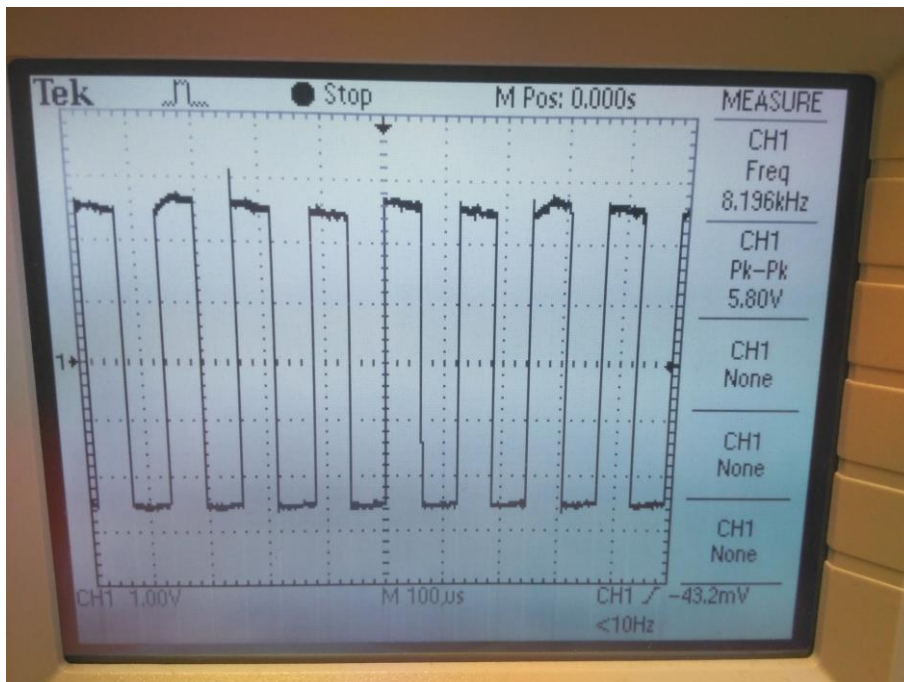
$$(1) f_{\text{OUT}} = \frac{1}{t_{\text{OUT}}} = \frac{1 \text{ MHz} \cdot 50k}{N_{\text{DIV}} \cdot R_{\text{SET}}} [19].$$



Kasutades valemit (1) on väljundsagedus eelnevalt kirjeldatud juhul  $f_{OUT} = 490 \text{ Hz}$ . Andmelehel garanteeritud sagedusvahemik on 488.3 Hz kuni 7.813 kHz [19]. Erinevus (garanteeritust madalam väikseim sagedus) on seletatav komponendi LTC6990 sisendi SET sisendvoolu tundlikkusega. Garanteeritud  $I_{SET}$  tööpiirkond on  $1.25\mu\text{A}$ - $40\mu\text{A}$ , väljundsageduse genereerimine katkeb kui vastav vool langeb alla umbkaudu  $500\text{nA}$ . Tulemus vähima sagedusega on näha joonisel 24 ning suurima sagedusega joonisel 25.



Joonis 24. Pulsigeneraatori väljundi väikseim võimalik sagedus.



Joonis 25. Pulsigeneraatori väljundi suurim võimalik sagedus.

Pärast veendumist, et pulsigeneraator töötab ning sellega saab mõningaid soovitud sagedusi genereerida, tuli lähemalt uurida ka skeemi teist poolt – siinusgeneraatorit. Selle paremaks testimiseks ühendati pulsigeneraator lahti ning anti komponendile LTC1060 kellasignaali peale nelinurkpingegeneraatoriga. Katsetatud sai mitut moodi, kuid kahjuks ei õnnestunud sealt adekvaatset tulemust saada. Täpse veakoha leidmiseks on vaja süvitsi minna filtri ehk komponendi LTC1060 tööpõhimõttesse.

## 7 Kokkuvõte

Bakalaureusetöö põhieesmärgiks oli arendatava värinaplaadi sisendsignaali tekitamine siinusgeneraatori abil ning Nucleo-64 arendusplaadil liikumisandurilt liikumise kohta info kogumine.

Selgus, et on olemas mitmeid lahendusi, kuidas vibratsiooni abil inimkeha seisundit, kuid peamiselt mõningaid parameetreid hinnatakse. Olulisemateks eelnevalt arendatud tehnoloogiateks on elektromüograafia, millega saab mõõta lihaspinget ja elastsust, ning ballistokardiograafia, mille abil saab analüüsida südame tööd. Patenteeritud on ka erinevaid vibreerivaid toole, mis on loodud eelkõige massaaži eesmärgil.

Arendatava värinaplaadi liikumise kohta saab infot hakata koguma Nucleo-64 arendusplaadile paigaldatava laiendusplaadil asuva kiirendusanduri abil. Selleks kirjutati valmis kood, mis kuvab kiirendusandurilt saadud kolme koordinaadi info.

Käesoleva töö aluseks võetud arendatava värinaplaadi liigutamiseks soovitud sagedusel uuriti erinevaid siinuse genereerimise viise ning valiti neist välja kaks, mis hästi sobisid. Ühte neist kirjeldati ja uuriti ka lähemalt. Simulatsiooni käigus kinnitati, et valitud siinusgeneraatori väljundsagedust saab lihtsalt valida. Elektriskeemi alusel tehti ka trükkplaadi disain. Trükkplaat on tootmises, kuid ei valmi töö kirjutamise tähtjaks.

## Kasutatud kirjandus

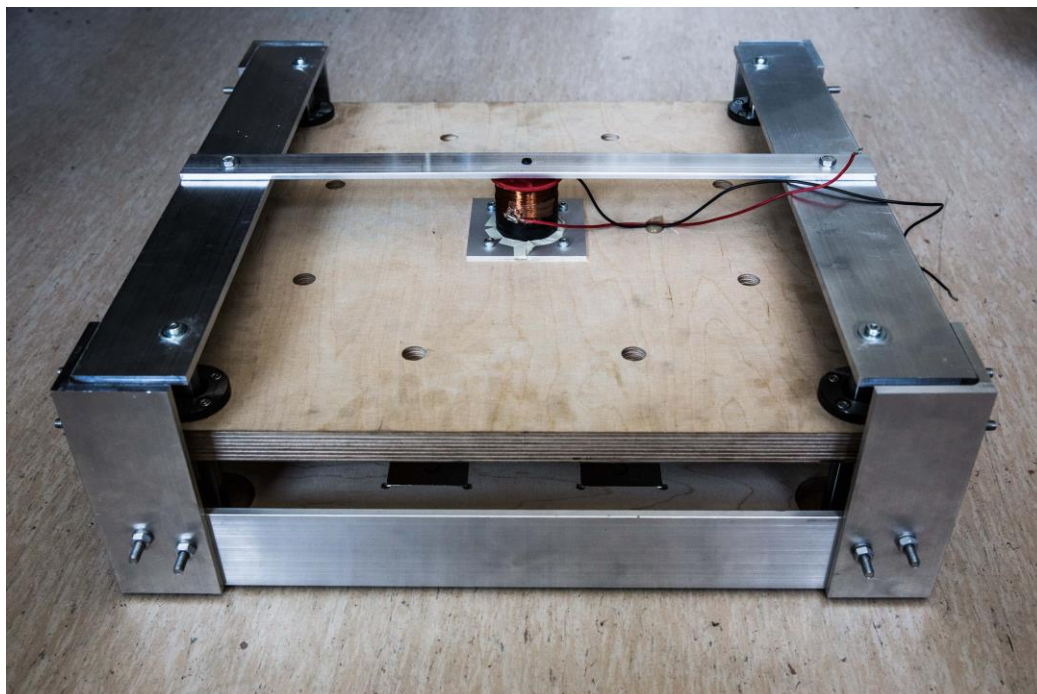
- [1] Safe Work Australia, „Implementation and Effectiveness of the European Directive Relating to Vibration in the Workplace,“ [Võrgumaterjal].  
[https://www.safeworkaustralia.gov.au/system/files/documents/1702/implementation\\_eff ectiveness\\_european\\_directive\\_vibration\\_workplace.pdf](https://www.safeworkaustralia.gov.au/system/files/documents/1702/implementation_eff ectiveness_european_directive_vibration_workplace.pdf) [Kasutatud 10.03.2018]
- [2] Seismology Research Centre, „What is an Earthquake?“ [Võrgumaterjal].  
<http://www.src.com.au/earthquakes/seismology-101/what-is-an-earthquake/> [Kasutatud 10.03.2018]
- [3] M. Kanda, O. Suzuki, S. Ishiwata, M. Hayashi „Apparatus for Measuring Viscosity”. US460205A patent, [Võrgumaterjal]. <https://patents.google.com/patent/US4602505A/> [Kasutatud 17.03.2018]
- [4] A. Vain, „Müomeetria. Skeletilihaste funktsionaalse seisundi biomehaaniline diagnostika”. Tartu Ülikool. Füüsika-keemiateaduskond. Biomeditsiini ja meditsiinifüüsika teadus- ja koolituskeskus. Tartu 2002
- [5] E. Pinheiro, O. Postolache, P. Girao, „Theory and Developments in an Unobtrusive Cardiovascular System Representation: Ballistocardiography,“ [Võrgumaterjal].  
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3111731/> [Kasutatud 12.03.2018]
- [6] D. M. Harrison, „The Ballistocardiogram”. Dept. of Physics, University of Toronto, [Võrgumaterjal]. July 2003.  
<https://faraday.physics.utoronto.ca/GeneralInterest/Harrison/BCG/BCG.html> [Kasutatud 12.03.2018]
- [7] D. Cohen, D. Cohen, T. Lewis, „Chair and System for Trasmitting Sound and Vibration”. US20100320819A1 patent, [Võrgumaterjal].  
<https://patents.google.com/patent/US20100320819A1/> [Kasutatud 13.03.2018]
- [8] D. E. Cohen, „Sound and Vibration Trasmmission Pad and System”. US7553288B2 patent, [Võrgumaterjal]. <https://patents.google.com/patent/US7553288B2/> [Kasutatud 13.03.2018]
- [9] S. Schwartz, D. Harris, „Massaging Bed Rest Cushion with Light”. US6814709B2 patent, [Võrgumaterjal]. <https://patents.google.com/patent/US6814709B2/> [Kasutatud 13.03.2018]
- [10] N. Perez, „Massage Therapy Chair” US6273865B1 patent, [Võrgumaterjal].  
<https://patents.google.com/patent/US6273865B1/> [Kasutatud 13.03.2018]
- [11] K.-S. Leung, W.-H. Cheung, K.-F. Tam, W.-K. NG, „Magnetic levitation vibration systems and methods for treating or preventing musculoskeletal indications using the same”. US8360999B2 patent, [Võrgumaterjal].  
<https://patents.google.com/patent/US8360999> [Kasutatud 13.03.2018]
- [12] G. der Meer, „Body Vibration Apparatus”. US 20050131319A1 patent, [Võrgumaterjal]. <https://patents.google.com/patent/US20050131319A1/> [Kasutatud 19.03.2018]

- [13] STM32F070CB, STM32F070RB, STM32F070C6, STM32F070F6 Datasheet, [Võrgumaterjal].  
<http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/31/4f/10/5f/a5/32/46/42/DM00141386.pdf/files/DM00141386.pdf/jcr:content/translations/en.DM00141386.pdf>  
 [Kasutatud 19.03.2018]
- [14] X-NUCLEO-IKS01A2 Motion MEMS and environmental sensor expansion board for STM32 Nucleo Data brief, [Võrgumaterjal].  
[http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/data\\_brief/group0/71/1d/6c/2e/d9/bc/4d/fa/DM00319800/files/DM00319800.pdf/jcr:content/translations/en.DM00319800.pdf](http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/data_brief/group0/71/1d/6c/2e/d9/bc/4d/fa/DM00319800/files/DM00319800.pdf/jcr:content/translations/en.DM00319800.pdf) [Kasutatud 20.03.2018]
- [15] Elektroonika (IED0150, IED0160) loengumaterjal. Tallinna Tehnikaülikool, [Võrgumaterjal]. Allikas: <http://www.ttu.ee/public/i/infotehnoloogia-teaduskond/Instituudid/Elektroonikainstituut/Loengud/Elektroonika.pdf> . [Kasutatud 6.03.2018]
- [16] Texas Instruments, „AN-263 Sine Wave Generation Techniques,“ [Võrgumaterjal].  
<http://www.ti.com/lit/an/snoa665c/snoa665c.pdf> [Kasutatud 19.03.2018]
- [17] Linear Technology, „LTC6990/LTC1440/LTC1059 Quadrature Sine Wave Oscillator”.  
<http://www.linear.com/solutions/1471> [Kasutatud 26.03.2018]
- [18] Analog Devices, „Low Power, 8.5 mW, 2.3 V to 5.5 V, Programmable Waveform Generator”. <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9837.PDF> [Kasutatud 26.03.2018]
- [19] Analog Devices, „TimerBlox: Voltage Controlled Silicon Oscillator,“ [Võrgumaterjal].  
 Allikas: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/6990fc.pdf>  
 [Kasutatud 18.05.2018]
- [20] Analog Devices, „Universal Dual Filter Building Block,“ [Võrgumaterjal]. Available:  
<http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/1060fb.pdf>  
 [Kasutatud 18.05.2018]

## Lisa 1 – Arendatava värinaplaadi prototüübi pilt



Vedrudega prototüüp osutus liiga jäigaks.



Magnetlevitatsiooni plaadi lineaarmootor ei suutnud tekitada märgatavat värinaefekti.

## Lisa 2 – Anduri mõõtetulemuste programmi kood

```
/* Includes */
#include "mbed.h"
#include "x_nucleo_iks01a2.h"

/* Instantiate the expansion board */
static X_NUCLEO_IKS01A2 *mems_expansion_board =
X_NUCLEO_IKS01A2::Instance(D14, D15, D4, D5);

/* Retrieve the composing elements of the expansion board */
static LSM6DSL_Sensor *acc_gyro = mems_expansion_board->acc_gyro;
int Get_X_Sensitivity(float *pfData);

/* Simple main function */
int main()
{
    float val;
    int32_t axes[3];
    int i=0;

    printf("\r\n--- Starting new run ---\r\n");

    /* Enable sensors */
    acc_gyro->Enable_X();
    acc_gyro->Enable_G();

    /*LSM6DSL_ACC_SENSITIVITY_FOR_FS_2G*/
    // #define LSM6DSL_ACC_SENSITIVITY_FOR_FS_2G 0.061 /**< Sensitivity
value for 2 g full scale [mg/LSB] */
    // #define LSM6DSL_ACC_SENSITIVITY_FOR_FS_4G 0.122 /**< Sensitivity
value for 4 g full scale [mg/LSB] */
    // #define LSM6DSL_ACC_SENSITIVITY_FOR_FS_8G 0.244 /**< Sensitivity
value for 8 g full scale [mg/LSB] */
    // #define LSM6DSL_ACC_SENSITIVITY_FOR_FS_16G 0.488 /**< Sensitivity
value for 16 g full scale [mg/LSB] */
    acc_gyro->Get_X_Sensitivity(&val);
    printf("LSM6DSL accelerometer sensitivity = %f\r\n", val);

    while(1)
    {
        printf("\r\n");
        acc_gyro->Get_X_Axes(axes);
        printf("LSM6DSL [acc/mg]: %6ld, %6ld, %6ld\r\n", axes[0], axes[1],
axes[2]);
        wait(1.0);
        i++;
    }

    return 0;
}
```



### Lisa 3 – Siinusvõnkumise generaator makettplaadil

