

TARTU ÜLIKOOL

LOODUS- JA TEHNOLOOGIATEADUSKOND

Tehnoloogiainstituut

Jevgeni Savostkin

**MITMEKANALILINE PROGRAMMEERITAV  
SIGNAALIGENERAATOR**

Bakalaureusetöö (12 EAP)

Juhendaja: Andres Punning

Tartu 2013

## Sisukord

1. Sissejuhatus .....	3
2. Kasutatud lühendid ja definitsioonid .....	4
3. Ülevaade.....	5
3.1. Diskreetimine .....	5
3.2. DAC-i arendamise ajalugu .....	7
3.3. DAC tüübid .....	8
4. Töö eesmärk ja nõuded .....	10
4.1. Töö eesmärk ja sellest tulenevad ülesanded.....	10
4.2. Mittefunktsionaalsed nõuded.....	10
4.3. Funktsionaalsed nõuded .....	12
5. Generaatori projekteerimine.....	13
5.1. Kasutatud abitöövahendid .....	13
5.2. Riistvara valik.....	14
5.2.1. ATSAM4S seeria mikrokontroller .....	14
5.2.2. Generaator .....	15
5.2.3. Võimsusvõimendi .....	16
5.3. Tarkvara .....	20
5.3.1. Algoritm .....	20
5.3.2. Loetavate failide struktuur .....	25
6. Katsetamine ja tulemused .....	27
6.1. Generaatori testid .....	27
6.2. Võimendi testid .....	31
Kokkuvõte.....	33
Summary .....	34
Kasutatud kirjanduse loetelu .....	35
Lisa 1 .....	36
Lisa 2 .....	37

## 1. Sissejuhatus

Igas valdkonnas uue projekti välja arendamiseks on vaja läbi viia testimiskatsete seeriaid, et saada teada selle töövõime praktikas ning võrrelda tulemusi teoreetilise mudeliga. Kui tegu on riistvaralise projektiga, või seadmega, siis mõnikord peab testimisele selle käitumist vastavalt etteantud sisendsignaalidele. Selleks on kasutusel signaaligeneraatorid, mis erinevad väljundkanalite arvu, väljundsignaali resolutsiooni, ehk täpsuse, genereeritavate signaalide sageduste vahemiku jne poolest. Kuigi tänapäeval on kättesaadavad universaalsed generaatorid, mis sobivad erinevate testide korraldamise jaoks, siis nende suurimaks puuduseks on kõrge hind või piiratud funktsionaalsus.

Käesoleva bakalaureusetöö teema on programmeeritava signaaligeneraatori projekteerimine. See generaator peab väljastama sünkroonselt kaks erinevat ettemääratud kujuga analoogsignaali ja kaks digitaalsignaali kummagi kanali kohta. Generaatorit peab saama juhtida nii füüsilise kasutajaliidese kaudu, kui ka arvutiga, seega seade peab toetama ka arvutiühendust. Signaale määravad andmed on eelnevalt salvestatud generaatori mälusse. Projekteeritava seadme eelised on universaalsus, suhteliselt madal hind ning mitme signaali sünkroonse genereerimise võimalus.

Seda signaaligeneraatorit võib kasutada erinevate projektide raames, kus peab lisaks genereeritud signaalile väljastama sünkroonselt digitaalseid signaale mõõteriistadele ettemääratud ajahetkedel. Näiteks elektroonika seadmete testimisel antud analoogsignaalidega saab teha pinge või voolutugevuse mõõtmisi täpselt ettemääratud ajahetkedel.

Alljärgnevalt kirjeldab töö digitaal-analoogmuundurite tööpõhimõtet, projekti nõudeid, realiseerimismetoodikat ja saadud tulemusi.

## 2. Kasutatud lühendid ja definitsioonid

DAC (ingl *digital-to-analog converter*) – digitaalanalooomuundur. Elektroonikaseade, mis muudab digitaalsignaali analoogsignaaliks.

PDC (ingl *peripheral direct memory access controller*) – välisseadmeline otsemällupöörduskontroller. Kontroller, mis võimaldab välisseadmete plokkidevahelist andmevahetust ilma protsessorit rakendamata.

DSP (ingl *digital signal processing*) – digitaalne signaalitöötlus.

JTAG (ingl *joint test action group*) – ühendatud testimisrühm. Üks konkreetne mikrokiipide silumisposodi standard.

PCM (ingl *pulse code modulation*) – impulsskoodmodulatsioon. Meetod analoogsignaali kadudeta digiteerimiseks.

PLL (ingl *phase lock loop*) – faasisünkrosüsteem. Süsteem, mis väljastab signaali, mille faas on seotud võrdluspinge faasiga. Seda kasutatakse mürase signaali taastamiseks, pideva taktsageduse genereerimiseks või taktsageduse korrutamiseks.

RISC (ingl *reduced instruction set computer*) – piiratud käsustikuga protsessor.

SD (ingl *secure digital*) kaart – mälukaart andmete turvaliseks talletamiseks. [1]

SDHC (ingl *secure digital high capacity*) – SD kaartide laiendus mahtuvusega kuni 32GB. [1]

SDIO (ingl *secured digital input output*) – SD sisend-väljundkaart. Mälupessa sobiv liidesekaart, mis võimaldab näit. Pihuarvutile lisada mitmesuguseid funktsioone. [1]

Diskreetimine – ajas pidevalt muutuva signaali teisendamine selle üksikväärtuste (diskreetide) jadaks. [1]

Ülediskreetimine – signaali diskreetimissageduse kordistamine, nt digiteerimismoonutuse vähendamiseks. [1]

Servis – tarkvaraline rakenduskiht, mis on draiveritest kõrgemal kuid põhiprogrammist madalamal. [6]

### **3. Ülevaade**

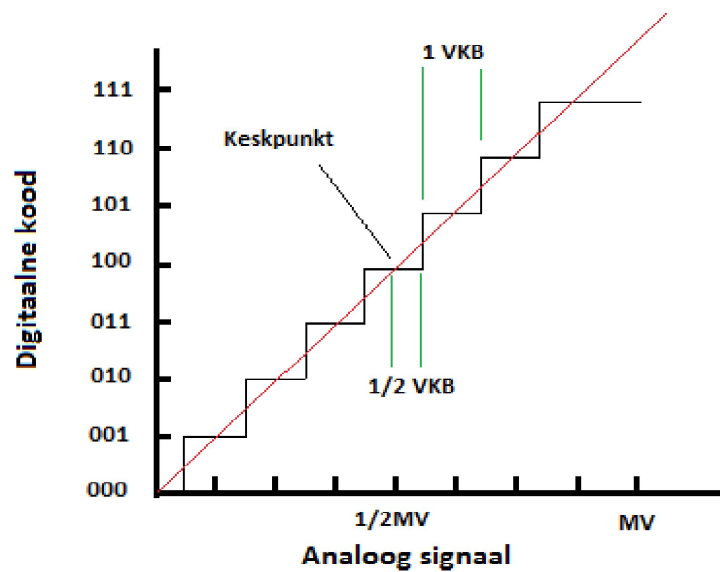
Signaali määravat mällusalvestatud andmejada peab olema võimalik „mängida ette“, see tähendab et peab toimuma andmejada numbrite konverteerimine vastavaks analoogsignaaliiks. Peaaegu tervet seda tööd teeb DAC (digitaal-analoogmuundur). Käesolev peatükk annab lühikese ülevaate, kuidas analoogsignaali töödeldakse digitaalseks, milline oli DAC-i arendamiskäigu ajalugu ning käsitletakse DAC-ide omadusi.

#### **3.1. Diskreetimine**

Fundamentaalselt nõuavad DSP (digitaalse signaalitöötuse) meetodid, et signaalid oleksid diskreeditud (jagatud) ajavahemikeks ja esitatud bitijadadena.

Tavaliselt ei ole signaalid looduses diskreeditud ning nad pidevalt varieeruvad ajas. Looduslikud signaalid, näiteks nagu kõne tulemusel tekkivad õhuvõnkumised, muundatakse anduriga proportsionaalseteks elektroonilisteks analoogsignaalideks. Töötlemiseks on vaja esitada saadud analoogsignaali digitaalselt ning vastupidi (kui eeldatakse selle väljastamist analoogkujul). Signaali täpsust, ribalaiust ja süsteemi väärtust näitavad:

- kvantimistasemete arv, mis määrab, kui mitmeks osaks saab jagada signaali amplituudi;
- diskreetimissagedus, mis omakorda määrab mitmeks osaks (sämplik) jagatakse signaal ühe sekundi jooksul. [2]



Joonis 1: Ideaalse 3-bitilise ADC karakteristikud [2]

Joonisel 1 on näidatud ideaalse 3-bitilise ADC töökarakteristikud. Muunduri väljundiks on  $n$ -bitine digitaalne kood:

$$D = \frac{A(\text{sig})}{MV} = \frac{b(n)}{2^n} + \frac{b(n-1)}{2^{n-1}} + \dots + \frac{b(1)}{2^1},$$

kus  $A(\text{sig})$  on analoogsignaali amplituudi maksimaalne väärtus,  $MV$  on analoogsignaali amplituudi maksimaalne väärtus ja  $b(n)$  on digitaalne väärtus (0 või 1). Jooniselt 1 on näha, et igale digitaalsele koodile vastab erinev pingeväärtus. Diskreeditud regiooni laius on üks vähima kaaluga bitt (VKB).

Digitaal-analoogmuundamise võrrand on järgmine:

$$A(\text{sig}) = MV \times \left( \frac{b(n)}{2^n} + \frac{b(n-1)}{2^{n-1}} + \dots + \frac{b(1)}{2^1} \right),$$

kus  $A(\text{sig})$  on väljastatav analoogsignaali amplituudi maksimaalne väärtus ja  $b(n)$  on binaarne koefitsient. [2]

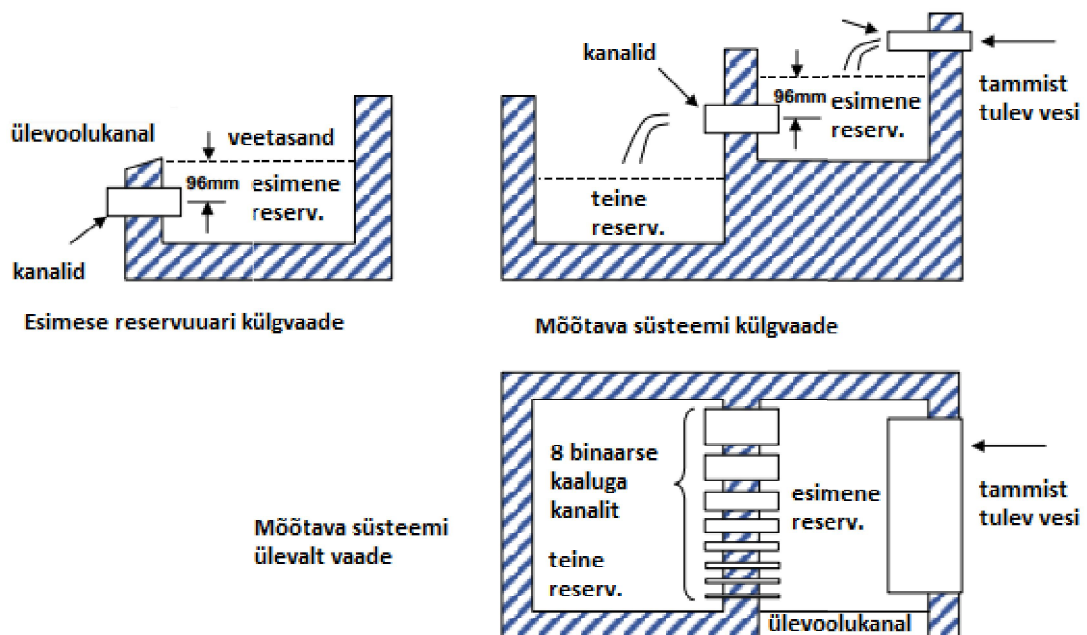
Muunduri resolutsioon on defineeritud võimalikult väikese muutusena analoogsignaalis ja seda väljendatakse järgmiselt:

$$\Delta A(\text{sig}) = \frac{MV}{2^N},$$

kus  $\Delta A(\text{sig})$  on väikseim genereeritav signaal  $N$ -bitilise muunduri jaoks maksimaalse amplituudi väärtusega  $MV$ . [2]

### 3.2. DAC-i arendamise ajalugu

On raske määrata, millal esimene DAC oli väljamõeldud ja missugune see oli. Üks esimestest DAC-idest oli mitte elektronseade, vaid hoopis vee hulka mõõtev süsteem. XVIII sajandil oli Türgis häda ühiskonna veevaruga ja selleks ehitati erinevaid vee hulka mõõtvaid süsteeme. Üks selliseid (joonis 2) oli Istanbuli lähedale sultan Mahmud II ajal ehitatud tamm. Mõõtev süsteem kasutas kaht reservuaari. Ühest reservuaarist võis vesi sattuda teise läbi kaheksa kanali.[3]



Joonis 2: Vee hulka mõõtava süsteemi skeem. [3]

Iga kanal oli erineva läbilaskevõimega ja seda sai sulgeda või avada. Sellisel moel sai reguleerida veevoolu ühest reservuaarist teise, kasutades kaheksat reguleeritavat kanalit.

Funktsionaalselt süsteem täitis DAC-i ülesandeid, ehk kanalite avamise kombinatsiooniga (binaararvuga) sai reguleerida veevoolu (väljundit). [3]

Üht esimestest elektroonilistest DAC-idest oli edukalt kasutatud Paul M.Rainey poolt loodud PCM-is. Eesmärgiga edastada andmeid telegraafiliiniga kodeeritud vormil, kasutas Roney 5-bitilist PCM-i. Seade oli disainitud nii, et valguskiir valgustas stendi pinda. Stendi teisele küljele olid paigaldatud fotoelemendid, mis sõltuvalt valguse intensiivsusest said genereerida voolu ja sellel moel juhtida järgnevaid releesid. Releede abil oli saadud digitaalne signaal (ehk toimus analoog-digitaalmuundumine), mida edastati jadamisi sideliiniga. Signaali vastuvõtmisel teises otsas, muudeti see paralleelsele kujule, et oleks selge, millised olid releede olekud saatmisel. Nende olekute järgi juhiti juba teisel pool olevaid releesid, mis olid ühendatud vastavate takistitega ja nii tekkis lõpuks väljundist analoogsignaali, mida rakendati valgusallikale. [3]

### **3.3. DAC tüübid**

Eksisteerib mitu DAC-i arhitektuuri, igal nendest on oma unikaalsed omadused ja piirangud.

Poolt diskreetimissagedusest nimetatakse Nyquisti sageduseks ja selle suhet (1:2) nimetatakse Nyquisti suhteks. [4]

Iga DAC kuulub ühte antud kategooriatest:

- Nyquisti suhtega DAC;
- ülediskreetimisega DAC.

Nyquisti suhtega DAC-il on sisendsignaali ribalaius võrdne Nyquisti sagedusega. Nyquisti sagedus on võrdne poole DAC diskreetimissagedusega (mis ongi Nyquisti suhe). [5]

Ülediskreetimisega DAC-i puhul on muunduri uuendussagedus palju suurem kui

Nyquisti suhe. Tüüpilised ülediskreetimise suhted on 64, 128 ja 256. Ülediskreetimissuhet arvutatakse järgmiselt:

$$\text{OSR} = \left( \frac{f_s}{2 \times f_N} \right),$$

kus  $f_s$  on DAC-i uuendussagedus ja  $f_N$  on Nyquisti sagedus.

Nyquisti suhe kehtib, kuna diskreetimissagedus võrdub kahekordse ülediskreeditud signaali ribalaiusega. Kui signaal oli muundatud digitaalseks kasutades Nyquisti suhet, siis selle tagasi kodeerimisel analoogseks peab DAC-i värskendussagedus olema võrdne Nyquisti sagedusega. [5]

## **4. Töö eesmärk ja nõuded**

### **4.1. Töö eesmärk ja sellest tulenevad ülesanded**

Projekti eesmärgiks on luua signaaligeneraator, mis genereerib signaale, lugedes sisendandmeid oma mälust. See võimaldab kasutajal määrata genereeritava signaali pinge kuju antud ajaintervalli jaoks. Ehkki generaator oli esialgselt planeeritud ühe konkreetse autonoomse mõõtekompleksi osaks, on ta täiesti universaalne.

Projekteerimise protsess on jagatud alljärgnevateks alamülesanneteks:

1. projekteerida ja luua mikroprotsessoril põhinev süsteem koos DAC-iga;
2. korraldada süsteemi ja mälu vaheline suhtlemine;
3. arendada välja kasutajaliides;
4. korraldada ettemääratud sagedusega signaali väljastamine;
5. projekteerida ja luua võimendi, mis tõstab väljundsignaali võimsust ning annab võimaluse muuta selle amplituudi väärtust;
6. ehitada süsteemi jaoks toiteallikas;
7. varustada kogu süsteem kasutajaliidesega.

### **4.2. Mittefunktsionaalsed nõuded**

Esialgne töö planeerimine toimus järgnevate oluliste mittefunktsionaalsete nõuete järgi:

1. Seadme toetav maksimaalne diskreetimissagedus peab olema vähemalt 40 kHz, selle sageduse rakendamisel saab genereerida analoogsignaali sagedusega kuni 20 kHz ( $\frac{40000 \text{ Hz}}{2} = 20000 \text{ Hz}$ ).
2. DAC-i resolutsioon peab olema vähemalt 12 bitti, see tähendab, et signaali pingeväärtust kirjeldab vähemalt 12-bitine digitaalne arv (kümneksüsteemis arv

vahemikus [0...4095]). Väljastatava signaali pinget sõltuvalt antud digitaalsest väärtusest ja DAC-i resolutsioonist arvutatakse järgmise valemi abil:

$$U(v) = \frac{U(\max) - U(\min)}{N} \times S,$$

kus:

$U(\max)$  on maksimaalne väljastatav pinge,

$U(\min)$  on minimaalselt väljastatav pinge,

$N$  on antud resolutsiooniga maksimaalne arv,

$S$  on antud digitaalne väärtus.

3. Seade peab olema suuteline väljastama samaaegselt kaks erinevat analoogsignaali korraga. Selle tõttu peab rakendama mitmekanalilist DAC-i või kaks erinevat DAC-i eraldi, jõudes lugeda ja väljastada andmejadasi iga kanali kohta.

4. Lisaks genereeritavatele signaalidele peab seade väljastama kaks digitaalset signaali kummagi kanali kohta, mis on defineeritud samuti sisendandmetes. Nende signaalide abil saab määrata ajahetki genereerimise ajal, näiteks täita erinevaid abiülesandeid muundamise ajal (saata käsk pinge mõõtmiseks, jooksva mõõdetava staatuse salvestamine jne).

5. Mäluku peab olema mälukaart, mida saab operatiivselt vahetada. Nõuetest 1, 2 ja 3 järeldub, et signaali andmejada iga sekundi jaoks kulub vähemalt 70000 baiti või ~68,4 kB ( $\frac{40000 \times 14}{8} = 70000B$ ). Lisaks peab olema võimalus salvestada rohkem kui kaks erinevat andmejada pikkusega rohkem kui 5 minutit, seega mälukaardil peab olema vähemalt ~60,1 MB vaba ruumi. Signaaligeneraatoril puudub võimalus saada sisendandmeid teistest allikatest (näiteks arvutilt), sest selline lahendus nõuab liiga palju ressursse andmeteallikate seadmetest.

6. Seadme väljastatava signaali amplituud peab olema bipolaarne ja vahemikus [-4V...+4V]. Samuti peaks ka olema võimalus kasutada tugipingeid, millega saab nihutada signaali alla- või ülespoole iga väljundkanali jaoks eraldi.

### **4.3. Funktsionaalsed nõuded**

Seadme funktsionaalsed nõuded on järgmised:

1. Peab olema võimalik käivitada ja peatada signaalide genereerimist.
2. Sisendsignaalide andmejada iga kanali kohta saab valida kasutajaliidese abil.
3. Sisestatud loetava mälukaardi korral peab süttima vastav valgusdiod.
4. Signaalide genereerimise ajal peab süttima vastav valgusdiod.
5. Süsteemi peaks olema võimalik alglaadida vastava nupuga.
6. Lisaks füüsilisele kasutajaliidesele peab saama juhtida seadet (valida andmejadasid, käivitada ja peatada genereerimist ning teha alglaadimist) vastava sisendpordi kaudu.

## 5. Generaatori projekteerimine

Seade koosneb kahest iseseisvast blokidest:

1. generaator Atmeli poolt toodetava mikrokontrolleri ATSAM4S8B baasil,
2. võimsusvõimendi, millel on väljastatava signaali amplituudi regulaatorid.

Komponentide juurde kuulub esipaneel kasutajaliidesega. Kasutajaliidesel on lülitid „ON“ seadme sisse lülitamiseks ja „Start“ signaali genereerimise alustamiseks ning nupp mikrokontrolleri taaskäivitamiseks. Sisendandmete valiku jaoks on iga kanali kohta 16 olekuga lüliti, millest esimene olek tähendab kanali välja lülitamist ja ülejäänud 15 määravad sisendandmejadasiid.

### 5.1. Kasutatud abitöövahendid

Elektroonika skeemide projekteerimisel oli kasutatud CadSofti poolt väljaarendatud EAGLE tarkvara, mille abil saab koostada elektroonikaskeemi mikrokontrolleritega ning korraldada nende skeemide järgi komponentide paigutamist. EAGLE pakub mitmeid komponentide raamatukogusid kuigi mõned komponendid nagu kasutatud mikrokontroller ATSAM4S (64 LQFP pakendis) oli tehtud minu enda poolt.

Lähtekoodi loomiseks oli kasutatud Atmeli arendamiskeskonnas Atmel Studio 6.0 ja programmeerimise keeleks oli C keel. Atmel Studio 6.0 pakub võimalust kasutada C keele teeke (koodi raamatukogu) paljude Atmeli mikrokiipide jaoks. Lisaks oli kasutatud ASF (*Atmel Software Framework*). ASF on vabavaraline koodiraamistik, mis pakub mooduleid (draiverid, komponendid, servised) programmeerimiseks valitud Atmeli protsessoritele. Samuti ASF sisaldab näiteid erinevate modulite kasutamisest. [6]

Seadme programmeerimiseks oli kasutatud õppelitsentsiga JTAG emulaatorit Segger J-Link EDU, millega saab programmeerida mikrokontrollereid JTAG toetusega ning siluda protsessori tööd sammhaaval.

Väljastatava signaali sageduse ja pinget mõõtmiseks kasutati neljakanalist ostsilloskoopi Tektronix TDS2024, mis diskreetimissagedusega 2 GHz.

## 5.2. Riistvara valik

Oli otsustatud valida kiire mikrokontroller sisseehitatud kahekanalise DAC-iga, selleks, et lahendus oleks odavam ning DAC-i moodulile andmete saatmise kiirus suurem (sisseehitatud ploki ning PDC rakenduse pärast). Mikrokontrolleri teiseks oluliseks omaduseks peab olema liides mälukaardiga suhtlemiseks.

Võimsusvõimendiks peab olema skeem, millel on operatsioonivõimendi, et sellega saaks summeerida DAC-ist saadud signaali ning võimendada. Operatsioonivõimendi peab olema suuteline väljastama vähemalt 8 V amplituudiga signaale. Skeemil peaksid samuti olema potentsiomeetrid või muud regulaatorid, et saaks muuta signaali võimendust ning nihutada seda bipolaarseks (signaaligeneraator väljastab positiivse pingega signaali).

### 5.2.1. ATSAM4S seeria mikrokontroller

Kõige olulisem osa süsteemist on selle mikrokontroller, milleks oli valitud Atmeli ARM tuumaga ATSAM4S8B (plokk skeem vt lisa 1.) 32-bitine RISC mikrokontroller maksimaalse töösagedusega 120 MHz. [7]

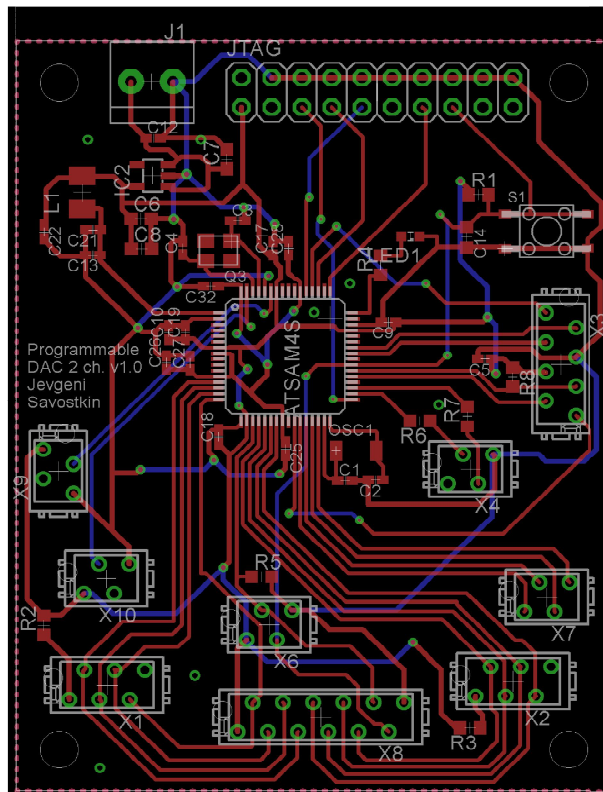
See mikrokontroller sobib antud projekti jaoks nii oma töökiiruse ja 32-bitilise arhitektuuri tõttu, mis toetab kiiret opereerimist andmetega, kuid ka sisseehitatud välisseadmete ja võimaluste tõttu. Kasutusele on võetud järgmised olulised funktsioonid :

1. Kahekanaline 12-bitine DAC, mis võimaldab signaali genereerimist diskreetimissagedusega kuni 2 MHz (ühe kanali kasutamisel). Iga kanali jaoks on rakendatud eraldi PDC.
2. HSMCI (*High Speed Multimedia Card Interface*) liides, mis toetab SD ja MMC kaartide ühendust ja nendega andmevahetust. SD kaardi ühenduseks kasutatakse 9-viigulist liidestamist. Moodul toetab andmevahetust ka SD v2.0, SDHC ja SDIO v1.1 kaartidega. Võimaldab PDC kasutamist.
3. PDC kontroller, mis võimaldab andmevahetust kiibi sisseehitatud välisseadmete ja sellelt väljaspool olevate seadmetega. PDC kontrolleri kasutamine vähendab

koormust protsessorile andmevahetuse jooksul.

4. JTAG silumise port. Port mille kaudu saab programmeerida mikrokontrolleri ning siluda programmi tööd.

### 5.2.2. Generaator



Joonis 3: Peaplaadi trasseering

Seadmel peab olema kasutajaliides, seetõttu otsustati teha peaplaadis sisendväljund pistikupesad kasutajaliidese elementide ning mälukaartipesa jaoks (skeemi vt Lisa 2). Selline lahendus võimaldab ka kiiret plaadi demonteerimist kogu süsteemist (tuleb ainult kaablid lahti ühendada).

Kuna kahekanaline DAC on juba olemas mikrokontrolleris, siis peaplaat koosneb peamiselt mikrokontrollerist ja sisendväljund pistikupesadest. Pistikupesade tüübiks oli otsustatud kasutada Micro-Match tüüpi, millisesse on võimalik panna sisse pistikut

ainult õigetpidi. JTAG-i jaoks on mõeldud 2x10 viikude grupp. Pistikupesade ülesanded vastavalt nimedele on järgmised:

- DAC0, DAC1 on DAC-i 0 ja 1 kanalite väljundite pistikupesad;
- SELECT0, SELECT1 on 0 ja 1 kanalite andmejadade valikuks mõeldud 16 olekutega pistikupesad;
- BUTTONs on taaskäivitamise nupu ja „Start“ lüliti jaoks pistikupesa;
- DIGITALs on nelja digitaalsete väljundite jaoks mõeldud pistikupesa;
- LEDs on kahe valgusdiodide väljundite mõeldud pistikupesa;
- SDI on SD kaardi suhtlemiseks mõeldud pistikupesa;
- EXTERNAL on välise kasutajaliidese pistikupesa, millega saab kaugselt alustada genereerimist (kui „Start“ lüliti on väljas), valida sisendandmejadasi kanalite jaoks (kui vastava kanali lüliti olek on esimene).

Plaadi mõõtmed on 50x65 mm. Selle toiteks on +5V alalispinge, mis muundatakse eraldi komponendiga XC6222D331MR-G +3.3V pingeks mikrokontrolleri toetamiseks.

Mikrokontrolleri taktsageduse genereerimiseks plaadil on olemas kaks kvartsostsillaatorit sagedustega 12 MHz ja 32.768 kHz. Antud projekti raames on kasutusel 12 MHz kvartsostsillaator, mida korrutatakse PLL abil 10-ga, seega on protsessori töösagedus 120 MHz. Teine ostsillaator on käesoleva projektis kasutamata.

### **5.2.3. Võimsusvõimendi**

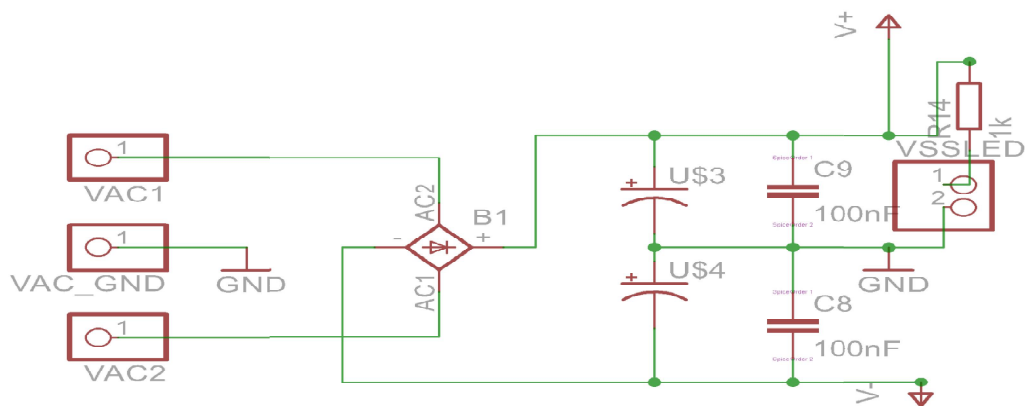
Väljastatud DAC-i signaal peab olema võimendatud ning selle amplituud peab olema vahemikus [-4V ... +4V].

Oma ülesannete järgi võib võimendi plaadi komponente jagada järgmisteks gruppideks, mida käsitletakse järgmiselt koos nende skeemidega:

1. toitealaldi,
2. 2x pinge nihutaja potentsiomeetriga ja tugipinge toiteallika valikuga,
3. 2x võimendi potentsiomeetriga,

4. 2x võimendi tööoleku tagastus,
5. pingemuundur +5V.

Alaldi (vt. Joonis 4) on ühendatud trafoga, mis väljastab sellele 9V vahelduvpinget. Alaldi ning kondenssaatorite abil muundatakse vahelduvpinge +9V ja -9V alalispingeteks. Ette on nähtud ka viigid valgusdiodile, mis näitab toiteallika sisselülitamist.



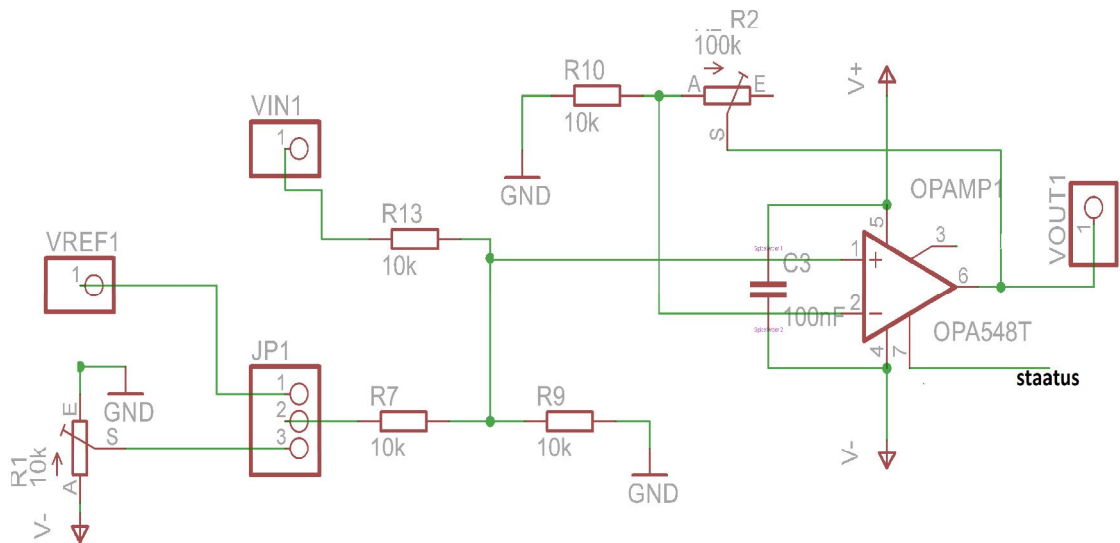
Joonis 4: Alaldi skeem

Nagu eespool mainitud, signaali amplituudi määramiseks saab kasutada ka tugipinget, selle jaoks peab vastav sillus JP (vt Joonis 5) ühendama 1 ja 2 viike. Kui on soov kasutada alaldiga silendatud pinget, siis peab ühendama viigid 2 ja 3. Alaldist tuleva pinge saab jagada 10 kOhm potentsiomeetri R1 abil.

Operatsioonivõimendiks oli valitud OPA548T, mille maksimaalne signaali väljastatav amplituud on 60 V ning võimendustegur 90 dB. [8]

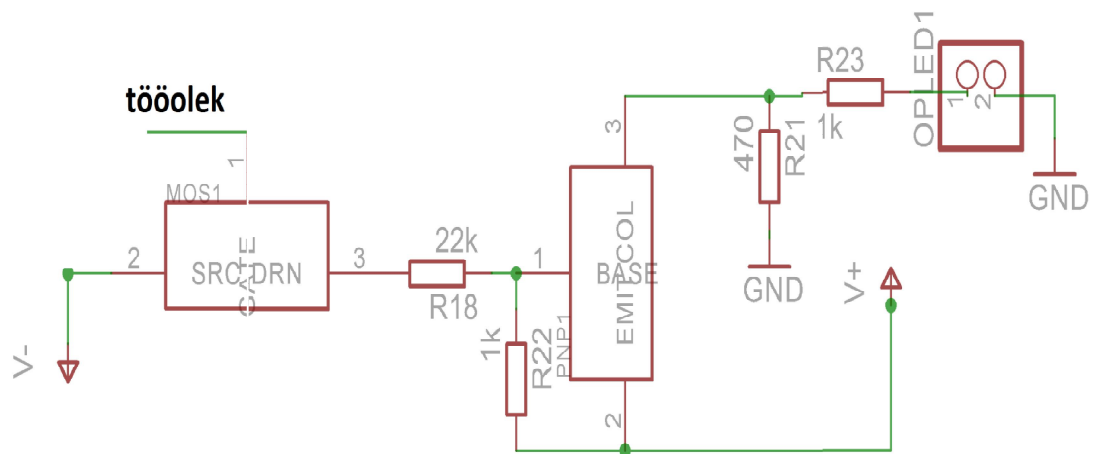
Operatsioonivõimendi täidab nii pinge võimendamise kui ka pingete summeerimise ülesannet. Nimelt, see summeerib generaatorist tuleneva signaali (VIN1) ja sillusest JP1 valitud pingesallikat, et nihutada signaali pinge teljel.

Potentsiomeetriga R2 jagatakse pinget millega võrreldakse V+ signaali ning sõltuvalt nende vahest seadistatakse väljundsignaali VOUT1 võimendust.



Joonis 5: Võimendi skeem.

Sellel operatsioonivõimendil on lisaks väljundviik, mis näitab võimendi tööolekut. Töötamise korral tööoleku signaali pinge on summa  $V(-) + 2.4V$ . Kuna tööoleku signaali väljundvool on liiga väike ( $-65 \mu A$ ), on tehtud loogika skeem välja- ja bipolaartransistoriga, mille abil saab juhtida üldist voolu viikudele OPLED. OPLED viikudele on ühendatud valgusdiod, mis põleb, kui võimendi ei tööta ja selle väljundvool on null. [8]



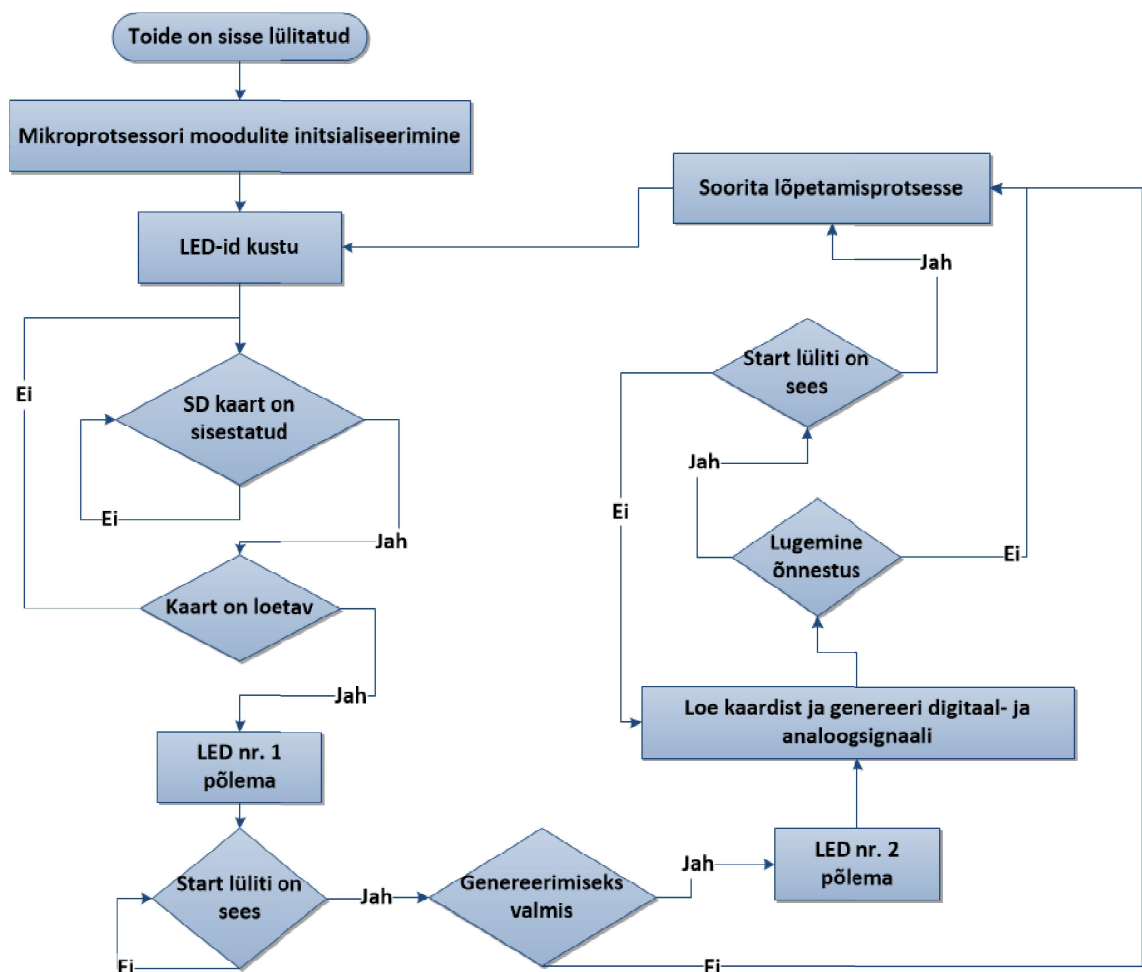
Joonis 6: Tööoleku signaali rakendamise skeem

Samuti peaplaadi toiteks on rakendatud LDO (*low-dropout*), mis muundab üldist pinget +5V.

### 5.3. Tarkvara

#### 5.3.1. Algoritm

Programmi töökaik algab kohe kui mikrokontroller saab toidet. Algoritmi töökaigu plokkskeem on esitatud joonisel 7.



Joonis 7: Loodud algoritmi üldine plokkskeem

Esiteks initsialiseeritakse kasutatavad moodulid:

1. Seadistatakse kasutatavaid mikrokontrolleri PIO (*Parallel Input/Output*) viike kas väljunditeks, sisenditeks või mikrokontrolleri moodulitega kasutamiseks (antud projekti raames seda nõuab ainult HSMCI liides). Vaikimisi antakse kasutatud

väljundviikudele madal signaali. HSMCI sisendväljundviikude puhul kasutatakse avatud neeluga väljundeid.

2. Seadistatakse taktsageduse väärtus ning taktsageduse signaali allikas ja taktsageduse jagamistegur. Taktsageduse generaatoriks valitakse 12 MHz väliselt ostsillaatorilt ning PLL abil korrutatakse seda kümnega, mille tulemus on 120 MHz. Sagedusjagaja väärtuseks on 1.

3. Initsialiseeritakse DAC-i draiver ja SD MMC servis. Antakse taktsagedus DAC moodulile. Konverteerimise režiimiks valitakse „paindlik“, mis tähendab, et genereerimiseks DAC-ile saadakse 16-bitiline väärtus, kus määratakse 12-13 vähima kaaluga bittidega, mis kanalile 0-11 bitijada väärtust edastada. Sellisel moel, ei pea alati valima vastavaid DAC-i kanaleid aktiivseks.

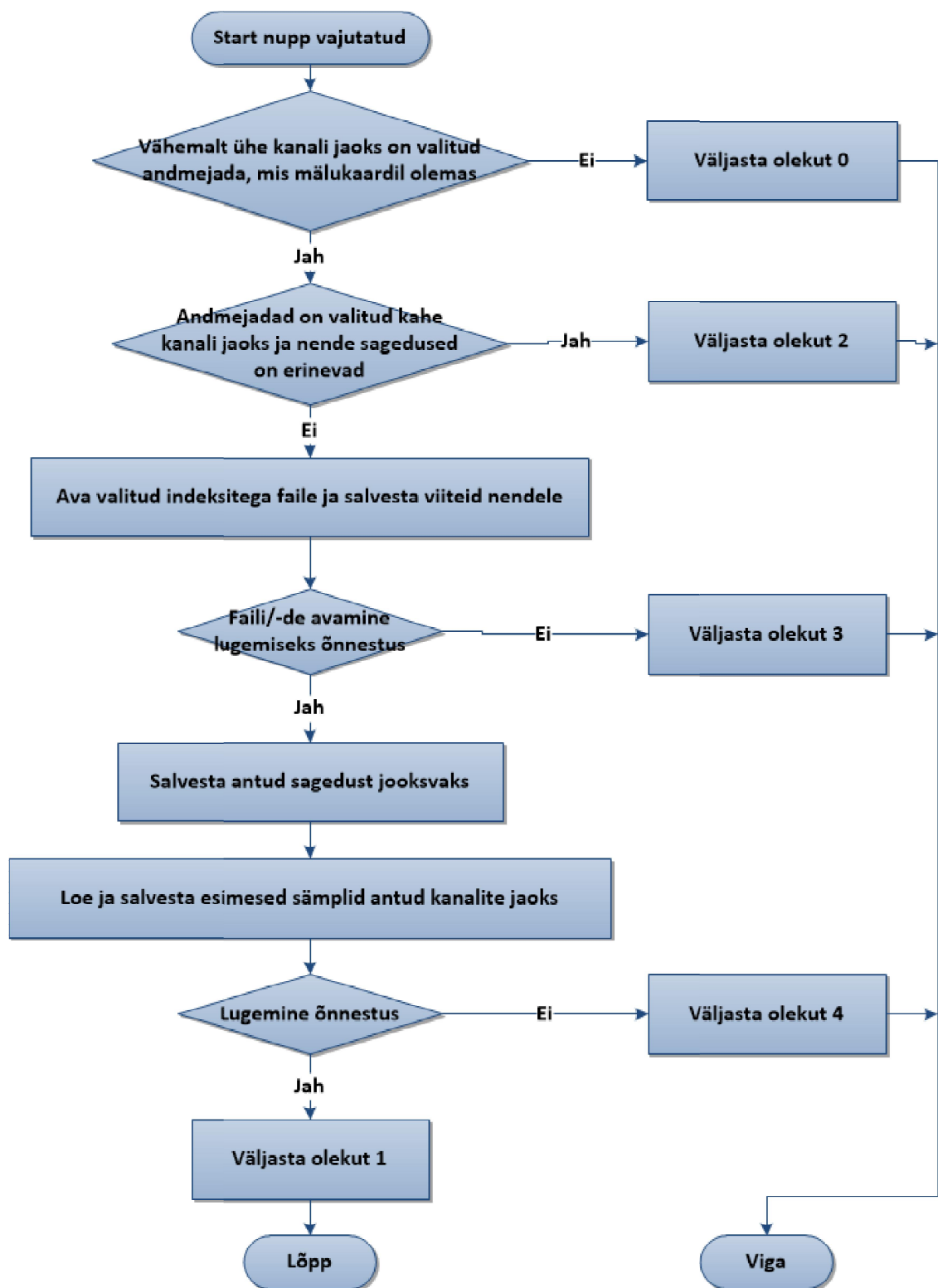
SD MMC on ASF raamistiku servis (rakenduskiht, mis on draiveritest kõrgemal), mille seadistatakse vastavalt eraldi failis konfiguratsioonidega, mis määravad liidest mida kasutatakse (SPI või HSMCI) ja kaartide tüüpide toetust (SDIO, SD või SDHC).

Initsialiseerimise järel kontrollitakse tsüklis mälukaardi olemasolu mälukaardipesas ning selle tingimuse täitmisel kontrollitakse mälukaardi sobivust. Kui kontroll on edukalt läbitud, siis käivitatakse otsimisfunktsioon. See vaatab läbi kõik failid mälukaardi juurkaustas. Juhul kui failinimi vastab nõutavale kujule, siis salvestatakse failinimi ja sagedus (sageduse väärtus on defineeritud failinime sees). Salvestamine toimub vastavate massiividesse vastava indeksiga (indeks on defineeritud samuti failinime sees). Seejärel minnakse tsükklisse, kus oodatakse „Start“ nupu vajutamist.

„Start“ nupu vajutamisel, programm satub funktsiooni, mis kontrollib kasutajaga valitud seadistusi (sisendandmete indeksi valikut) ja sisendandmeid (antud failide lugemisvõimet) ning valmistab ette signaali genereerimise protsessi. Eduka tulemuse korral tagastab väärtuse 1, vastasel korral veakoodi. Veakoodide tähendused on järgmised:

- 0: Kasutajaga sisendandmete valikud kanalitele puuduvad või võrduvad 0 olekutele.

- 2: Valitud andmejadade sagedused on erinevad. Katkestuste üheaegne toimumine on lubamatu, kuna erinevate sagedustega väljastatavad signaalid võivad nõuda katkestuserutiini väljakutset samal ajal. Nende olukordade tõttu ei ole signaali väljastatav sagedus stabiilne.
- 3: Tekkis viga ühe või enama faili avamisel lugemiseks.
- 4: Tekkis viga ühe või enama faili lugemisel.



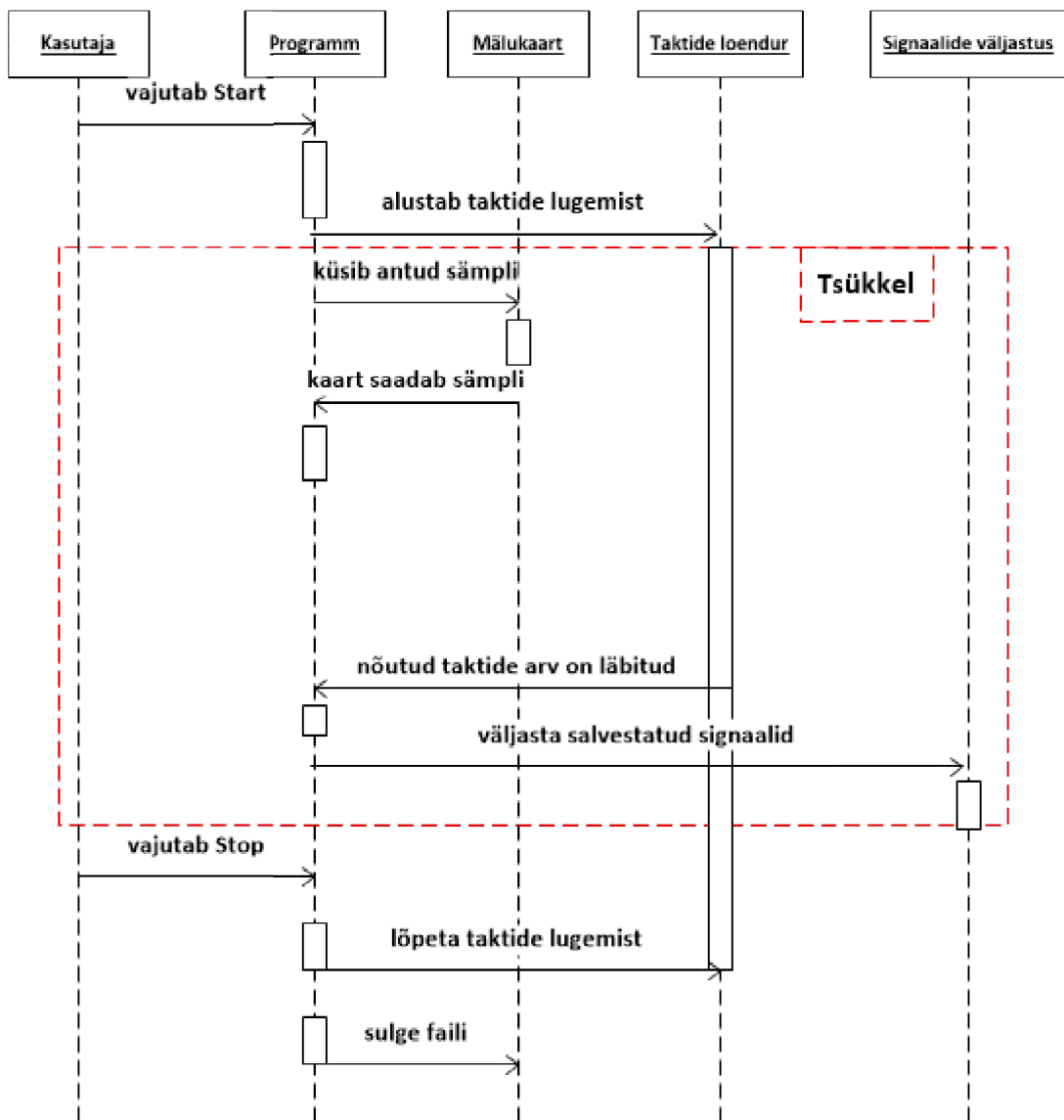
Joonis 8: Ette valmistuse funktsiooni algoritmi plokk skeem

Kui on saadud väärtus 1, siis seadistatakse SysTick taimer, mis on antud protsessori süsteemne 24-bitine taimer ja on mõeldud reaajalisteks operatsioonideks. Taimeri ülesandeks on toetada õige sagedusega signaali väljastamist. SysTick taimeri bitilisuse ning mikroprotsessori töösageduse tõttu (120 MHz) on minimaalne võimalik sagedus millega väljastatakse signaale  $\sim 7.2 \text{ Hz} \left( \frac{12000000 \text{ Hz}}{2^{24}} \right)$ . Selle seadistamisel antakse võrdlusväärtust mis on võrdne protsessori töösagedusele jagatud diskreetimissagedusega. Kui valitud diskreetimissagedus on suurem kui maksimaalne (maksimaalsed sagedused on kirjeldatud tulemuste osas), kasutatakse maksimaalset sagedust. Taimer tekitab katkestuse ja nullib jooksva väärtuse kui jooksev väärtus jõudis võrdlusväärtuseni. Taimeri katkestuse programmilõigul väljastatakse kõigepealt salvestatud väärtused DAC-ile, digitaalsed signaalid vastavate väljundviikudele ja laetakse uusi väärtused lugedes neid mälukaardilt.

Programmi peatsükli kontrollitakse „Start“ nupu signaali ja kui see saab loogiliseks nulliks, siis peatakse SysTick taimeri töö ja pannakse kinni kasutatud failid.

Programmi peamine kood on kättesaadav aadressilt:

[https://ims.ut.ee/mediawiki/index.php/Mitmekanaliline\\_programmeeritav\\_signaali\\_generator](https://ims.ut.ee/mediawiki/index.php/Mitmekanaliline_programmeeritav_signaali_generator)



Joonis 9: Signaali genereerimise jadadiagramm

### 5.3.2. Loetavate failide struktuur

Kasutatud failid andmejadadega peavad vastama mitmetele nõuetele. Esiteks failinimi peaks olema antud struktuuriga:

*s<sub>N</sub>F<sub>F</sub>failinimi*

kus *N* asemel tuleb kirjutada number (indeks) vahemikus [1..15], ning *F* asemel diskreetimissagedust antud andmejada jaoks Hz ühikutes. Failinimi peab olema ilma

laiendita ja algama tähega „s“, „failinimi“ asemel saab kirjutada ükskõik millist nime (võib jätta ka tühjaks).

Näiteks fail „s\_1\_10\_test“ tähendab et esimese andmejada diskreetimissagedus on 10 Hz.

Failides peavad olema toorandmed, mida saab lugeda või näha näiteks HEX tekstiredaktorit kasutades. Ühe signaali väljastatava punkti kirjeldamiseks on rakendatud 16 bitti. Vähima kaaluga bitid 0-11 moodustavad 12-bitilise arvu, mida väljastatakse DAC-ile. Vähima kaaluga bitt 12 määrab loogilist signaali esimesele digitaalsele kanalile, bitt 13 teisele. Ülejäänud kaks bitti ei oma tähtsust ja on lisatud selleks, et lõpuks bittidest tekiks 16-bitiline arv, sest lugemine mälukaardist käib baitide kaupa.

Näiteks 0x1FA1 kahe biti korral, väljastatakse DAC-ile väärtus 0x0FA1, esimesele digitaalsele kanalile 1 ja teisele 0.

Sinusoidsignaali väljastamiseks andmefaili sisu oleks järgmine (16 pingeteväärtuste kasutamisel, eeldusega, et digitaalväljundid on 1 nullpunktides):

```
0x37FF 0x0ABB 0x0D23 0x0EED 0x0FE0 0x0FE0 0x0EED 0x0D23
0x0ABB 0x37FF 0x0543 0x02DB 0x0111 0x001E 0x001E 0x0111
0x02DB 0x0543
```

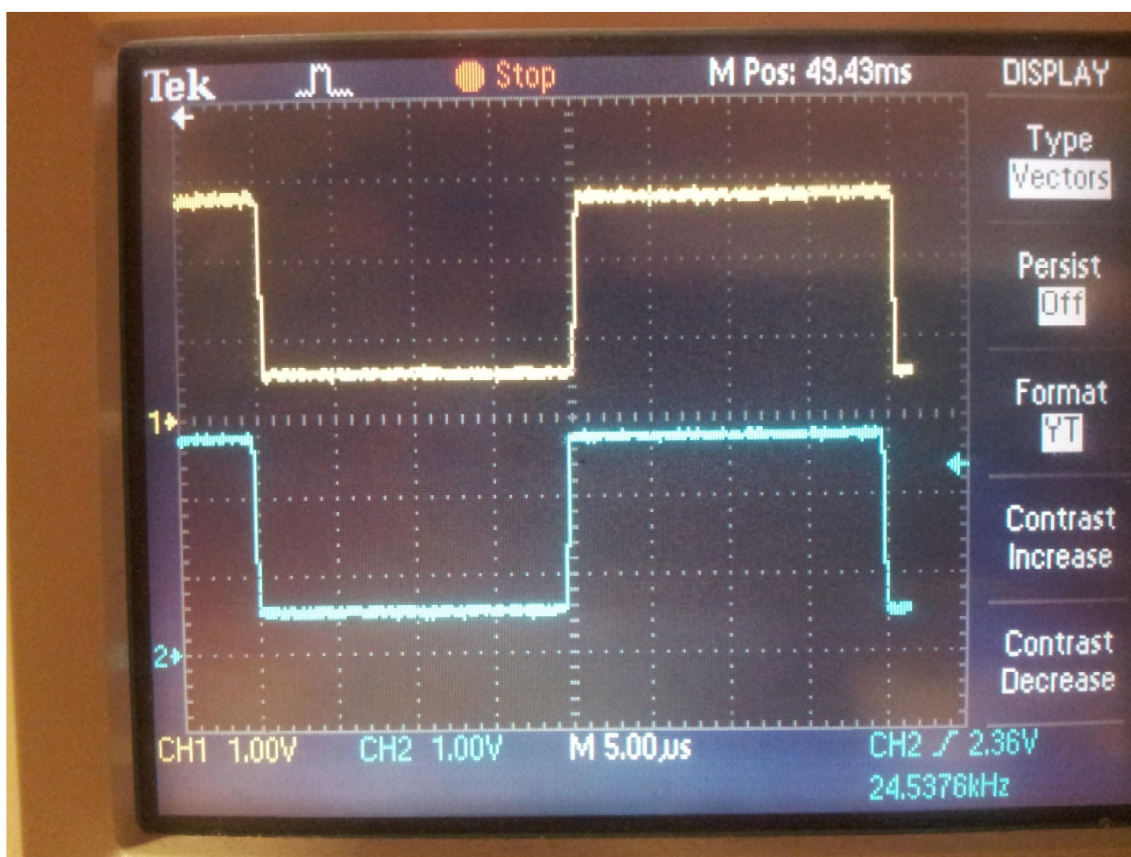
Vaikimisi faili lõpuni jõudmisel, seda loetakse otsast peale. Selleks, et vältida aega nõudvaid faili avamisi ja sulgemisi ASF poolt, kontrollitakse peale iga sümpli lugemist kui kaugel asub faili lugemise viit (*pointer*) e. aadress. Kui see on võrdne või ühe võrra väiksem kui faili lõpu viit, siis pannakse see nulliks, nii et järgmise katkestuse korral loetakse faili juba otsast peale.

## 6. Katsetamine ja tulemused

### 6.1. Generaatori testid

Generaatoriga oli läbi viidud mitu testi, selleks, et näidata, kuidas see töötab erinevate tingimuste korral. Generaatori testide peamine eesmärk on uurida, kuidas diskreetimissagedused mõjuvad tulemustele, signaalide amplituudide sõltuvusi vaatakse läbi järgmises alampeatükis.

Generaatoriga toetav diskreetimissagedus sõltub eelkõige mälukaartilt lugemise kiirusest.

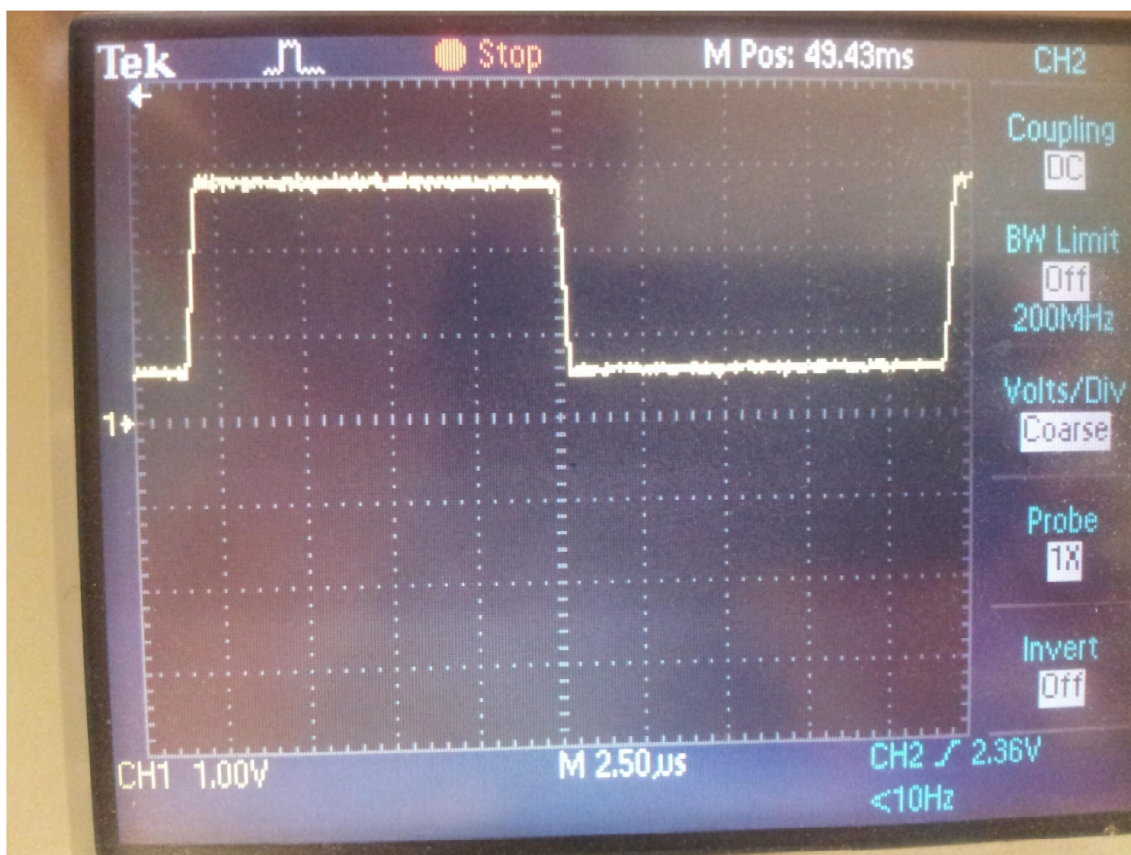


Joonis 10: Maksimaalse kiiruse leidmine kahe faili lugemisel

Jooniselt 10 on näha, mis tulemusi näitab ostsiloskoop kahe erinevate failide lugemisel diskreetimissagedusega 100 kHz. Failide sisud on identsed: 0x0000 0x0FFF.

Ajatelje järgi tuleb välja, et üks sämpel kestab umbes 20  $\mu\text{s}$ , seega diskreetimissagedus on umbes  $\frac{1}{0.00002} = 50 \text{ kHz}$ , mis on 100 kHz sagedusest väiksem, seega see on maksimaalne diskreetimissagedus, millega seade suudab töötada kahe faili korral.

Ühe faili lugemise korral ostsiloskoobi tulemust on näha jooniselt 11.



Joonis 11: Maksimaalse sageduse leidmine ühe faili lugemisel

Tingimused on samad mis eelmise katse korral (va failide arv): diskreetimissagedus on 100 kHz ja faili sisu: 0x0000 0x0FFF. Ajateljest on näha, et sümpli väljastamise aeg on umbes 11  $\mu\text{s}$ . Seega diskreetimissagedus on umbes  $\frac{1}{0.000011} = 91 \text{ kHz}$ , mis on samuti väiksem kui ette antud 100 kHz, millest järeldub, et see ongi maksimaalne.

Järgmine katse (joonis 12) näitab kahe faili lugemist diskreetimissagedusega 48 kHz ning sisendandmejad as määratud digitaalsete signaalide väljastamist.

Esimese kanali faili sisu on järgmine (treppkujuline signaal):

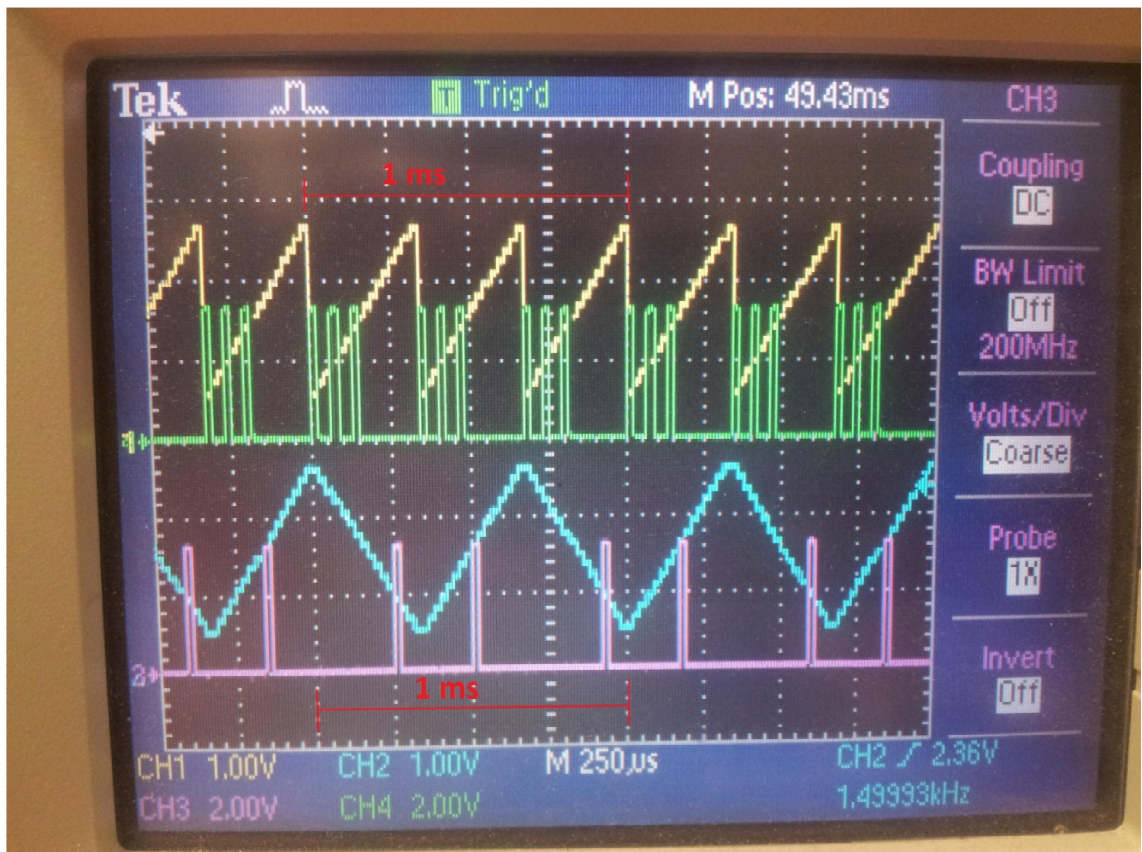
```
0x3000 0x0100 0x0200 0x3300 0x0400 0x0500 0x3600 0x0700
0x0800 0x0900 0x0A00 0x0B00 0x0C00 0x0D00 0x0E00 0x0F00
```

Teise kanali faili sisu on järgmine (püramiidikujuline signaal):

```
0x0000 0x0100 0x0200 0x0300 0x0400 0x0500 0x0600 0x0700
0x3800 0x0900 0x0A00 0x0B00 0x0C00 0x0D00 0x0E00 0x0F00
0x0F00 0x0E00 0x0D00 0x0C00 0x0B00 0x0A00 0x0900 0x0800
0x0700 0x0600 0x0500 0x0400 0x3300 0x0200 0x0100 0x0000
0x3000 0x0100 0x0200 0x3300 0x0400 0x0500 0x3600 0x0700
0x0800 0x0900 0x0A00 0x0B00 0x0C00 0x0D00 0x0E00 0x0F00
```

Ostiloskoobi väljundist on näha, et kolme treppkujulise (1. kanali analoogsignaali) signaali kestvus on 1 ms, mis on sama poolteist püramiidikujulise signaali (2. kanali analoogsignaali) korral.

Teades, et see on 48 sammu (failide sisudest), saame diskreetimissageduseks  $\frac{48}{0.001} = 48000$  kHz, mis vastab ette antud tingimustele. Jooniselt 12 on samuti näha, et väljastatud digitaalsignaalid vastavad ette antud andmetele failides.



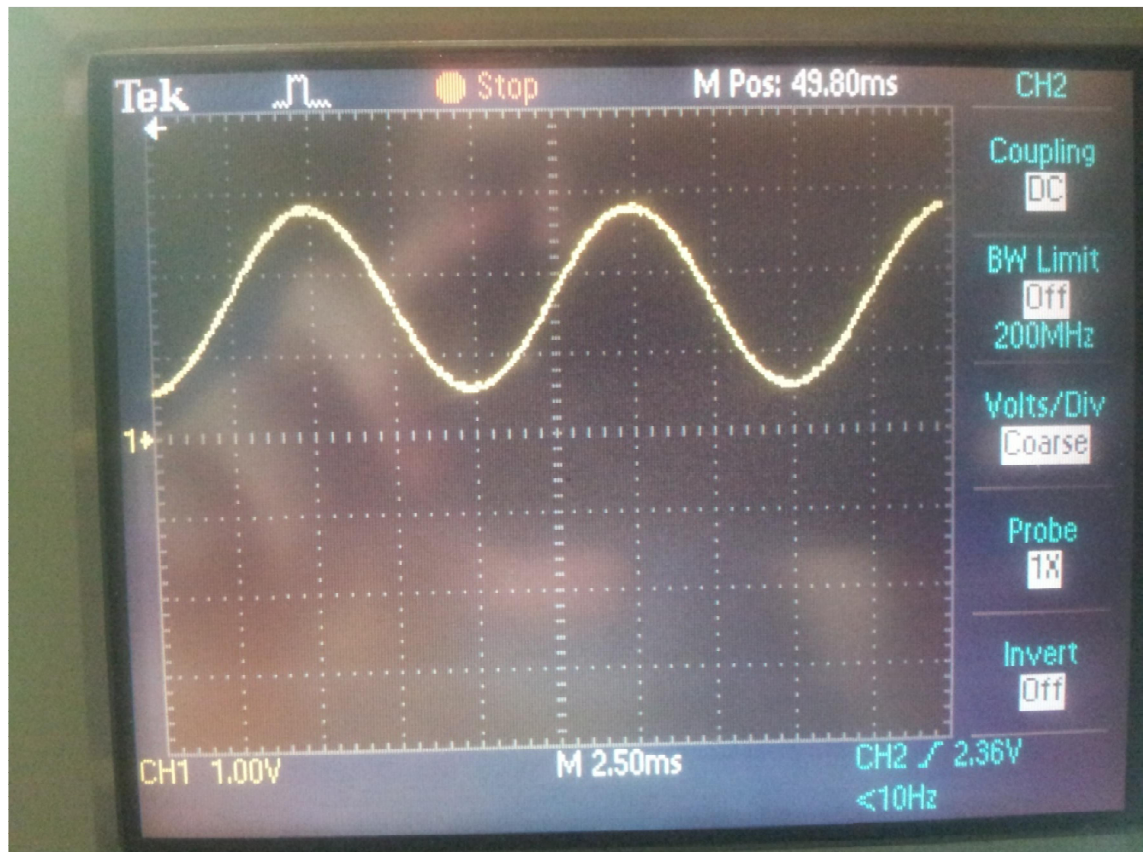
Joonis 12: Kahe faili lugemine ja nende signaale väljastamine. Kollane joon: 1. kanali analoogsignaali. Roheline joon: 1. kanali digitaalsignaali. Helesinine joon: 2. kanali analoogsignaali. Lilla joon: 2. kanali digitaalsignaali.

Generaatoriga väljastatud signaali pingeminiimum (0x000 väärtuse korral) on ~0.54 V ja maksimum (0xFF väärtuse korral) ~2.76V.

## 6.2. Võimendi testid

Järgmiselt näidakse kuidas saab võimendiga reguleerida signaali amplituudi ning nihutada signaali allapoole, et sellest sai bipolaarne signaal.

Võrdlemiseks on antud sinusoidsignaali kuva (määratud 180 sãmplitega) joonisel 13.



Joonis 13: Sinusoidsignaali enne võimendamist.

Pärast signaali võimendamist ja nihutamist allapoole tekis järgmine tulemus (vt joonis 14).



Joonis 14: Sinusoidsignaali pärast võimendust.

Tulemuseks on signaal amplituudiga -4V kuni 4V, mis vastab nõuetele.

## Kokkuvõte

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärk oli autonoomse mõõtekompleksi kahekanalist signaaligeneraatorit sisaldava osa disainimine. Generaatori ülesanne on signaalide väljastamine salvestatud sisemälus sisendandmete põhjal. Olulisemad eesmärgid on etteantud diskreetimissageduse järgimine ning väljastatava signaali kuju muutmise võimaluse loomine.

Töö käigus oli disainitud generaatori plaadi skeem, mis sisaldas sisseehitatud DAC-iga mikrokontrollerit. Oli kirjutatud tarkvara, mis võimaldab valida sisendandmeid iga kanali kohta kasutaja liidese abil ning alustada signaali genereerimist antud diskreetimissagedustega. Samuti oli disainitud võimendi plaat koos väljundsignaali regulaatoritega.

Katsete tulemused vastavad püstitatud nõuetele. Diskreetimissageduse maksimumiks ühe faili lugemisel sain ~91 kHz ja kahe faili lugemisel ~50 kHz. Signaalide genereerimine kahe kanalile koos digitaalsete signaalide väljastamisega määratud intervalidel õnnestus.

Antud signaaligeneraatori funktsionaalsust võib rakendada erinevates projektides, kus lisaks genereeritud signaalile peab väljastama sünkroonselt digitaalseid signaale nt mõõteriistadele ettemääratud ajahetkedel. Näiteks elektroonikaseadmete testimisel antud signaaliga saab manipuleerida pinget ja voolutugevuse mõõtmisi, materjali testimisel vaadelda selle käitumist.

# MULTICHANNEL PROGRAMMABLE SIGNAL GENERATOR

Jevgeni Savostkin

## Summary

Basically, each new developed project needs to be tested out. In case of hardware or material research projects, behavioral observations are done when passing varying data (signals) as input. Universal signal generators which output random signals defined by user (not only function signals) are used for this. Nowadays, there are a lot of universal signal generators available for purchase. They are often very expensive and have restricted functionality, which is the biggest drawback.

The goal of this Bachelor's thesis is to design a component of one exact measuring system, which contains a two-channel signal generator. The signal generator's goal is to output signals, defined in generator's memory (SD card) as input data. In addition, the input data defines the output signals on the extra digital pins during specified samples. The main requirements for the device are to generate signals with specified sampling rate and the possibility to change output signal's amplitude.

As part of the project I have designed a circuit board which contained a microcontroller (with an embedded DAC) and have written software, which allows to select input data for each channel and to specify generated signal sample rate. I also designed an amplifier circuit board with regulators, which is used to amplify and shift the output signal wave.

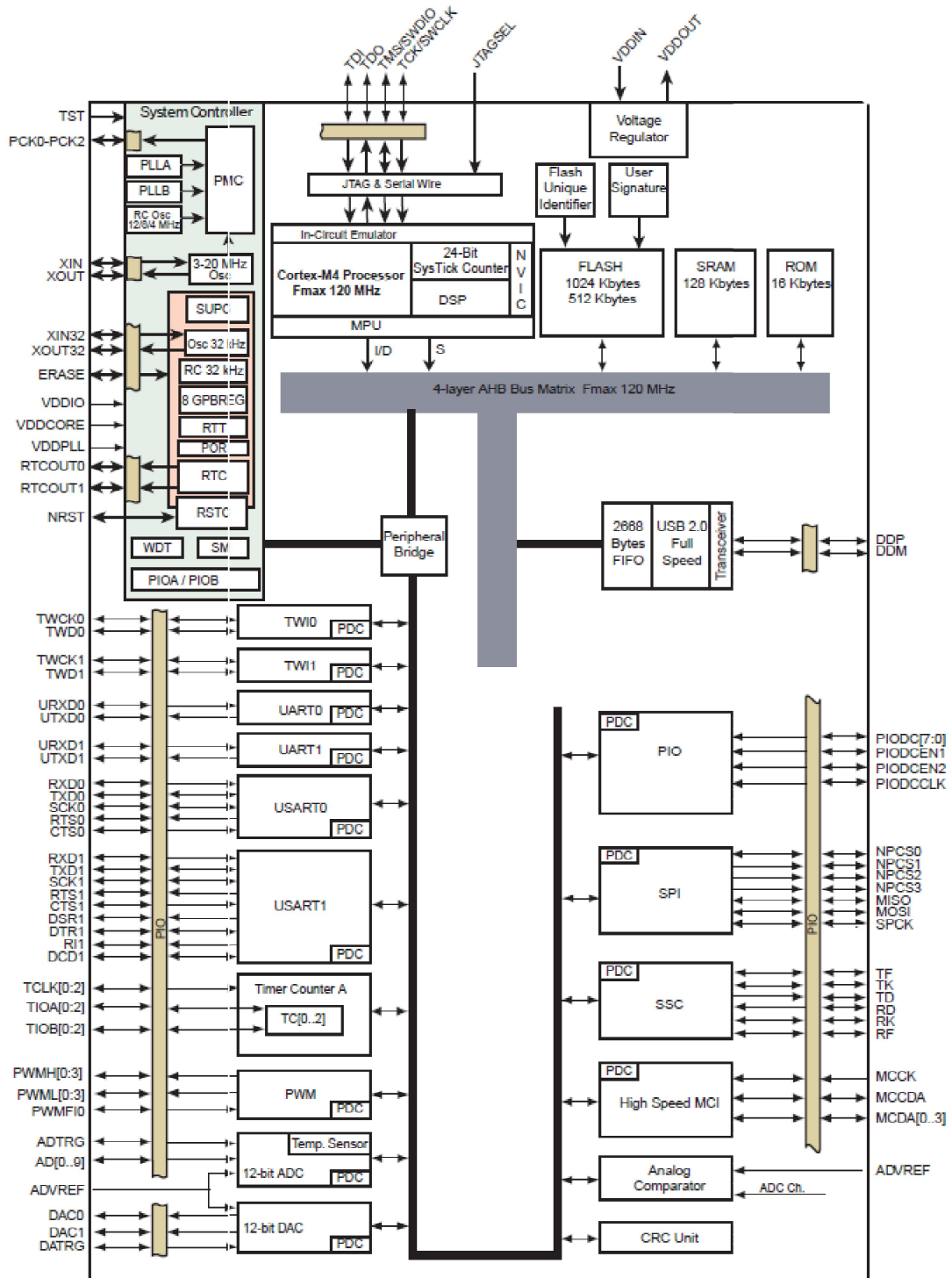
The test results showed that the maximum sampling rate for reading one file was ~91 kHz and reading two files was ~50 kHz. Two signals and a digital output were simultaneously generated successfully, which satisfies the project's requirements.

The given signal generator's functionality may be applied in many different projects, where in addition to generated analog signals synchronized digital signals should be outputted. For example, in case of hardware testing, these digital signals can manipulate current or voltage measurements or, in case of material testing, used to research the behaviour of the exposed material.

## Kasutatud kirjanduse loetelu

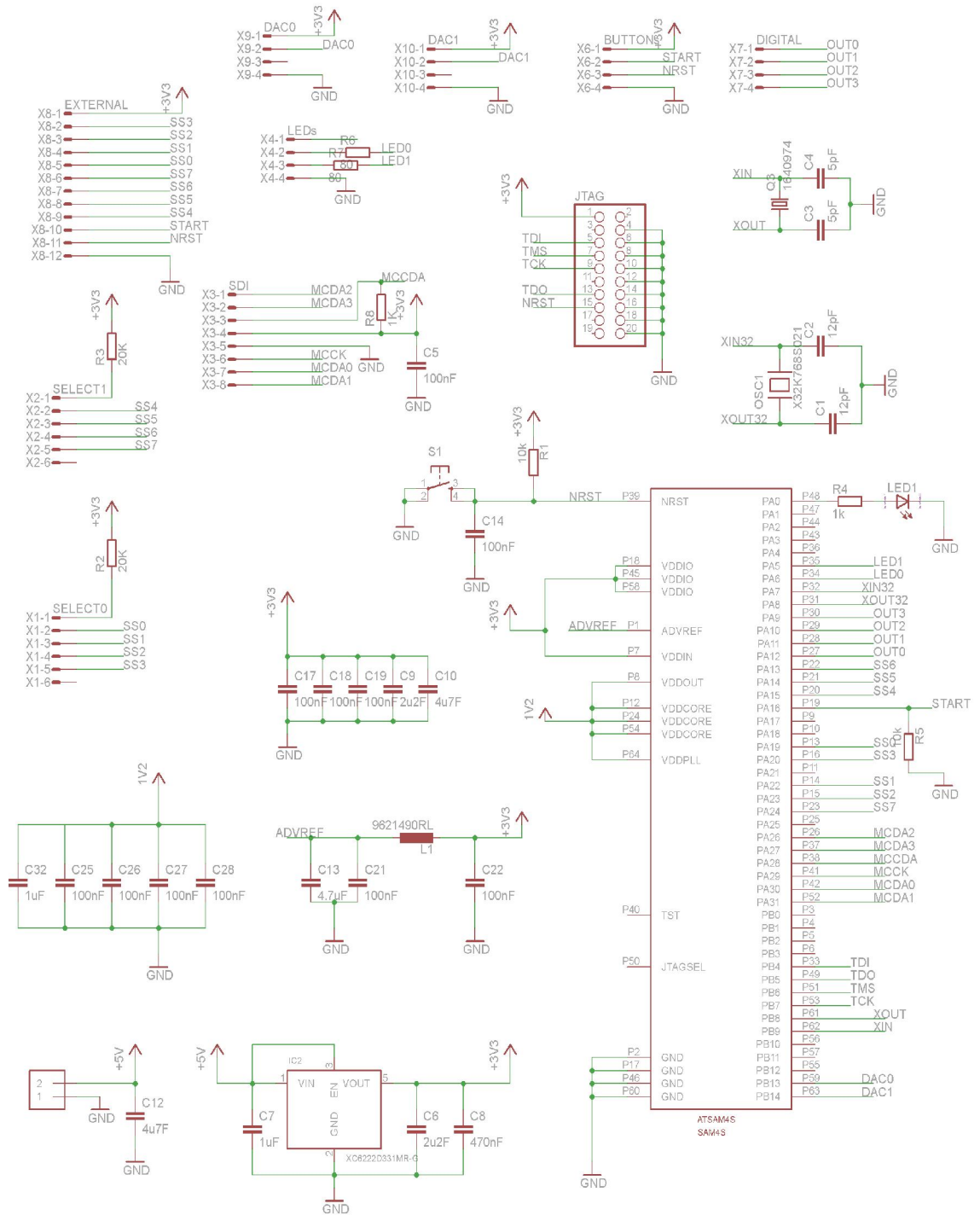
- [1] Lembit Abo „Elektroonika ja infotehnika leksikon“
  
- [2] Li Tan „Digital Signal Processing Fundamentals and Processing“  
p 19.
  
- [3] Walt Kester „The Data Conversion Handbook“  
Section 1.1
  
- [4] Vijay K. Madisetti, Douglas B. Williams „The Digital Signal Processing  
Handbook“ ch. 1.4.2
  
- [5] Ian Grout „Digital Systems Design With FPGAs And CPLDs“  
pp 555-556.
  
- [6] Atmel AVR4030: Atmel Software Framework - Reference Manual  
<http://www.atmel.com/Images/doc8432.pdf>
  
- [7] SAM4S Series Complete Atmel Corporation  
[http://www.atmel.com/Images/Atmel\\_11100\\_32-bit-Cortex-M4-Microcontroller\\_SAM4S\\_Datasheet.pdf](http://www.atmel.com/Images/Atmel_11100_32-bit-Cortex-M4-Microcontroller_SAM4S_Datasheet.pdf)
  
- [8] OPA548 Technical Datasheet Texas Instruments  
<http://www.farnell.com/datasheets/1670630.pdf>

# Lisa 1



Allikas: Atmel ATSAM4S Series andmeleht . [7]

# Lisa 2



## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks**

Mina

Jevgeni Savostkin

13.03.1990

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

„Mitmekanaliline programmeeritav signaaligeneraator“,

mille juhendaja on

Andres Punning

- 1.1.reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
  - 1.2.üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i 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 teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, **22.05.2013**