



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

VAHELDUVVOOLUSUURUSTE MÕÕTMINE JA VÕIMSUSE ARVUTAMINE MÕÕTEANDMETEST

Measurement of Alternative Current Parameters and Calculating Power from
the Measurement Data

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Heigo-Elmar Vahesaar

Üliõpilaskood: 142690AAAB

Juhendaja: Lauri Kütt, professor

Tallinn, 2019

(Tiitellehe pöördel)

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.

“.....” 201.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“.....” 201.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

Autor: Heigo-Elmar Vahesaar

Lõputöö liik: Bakalaureusetöö

Töö pealkiri: Vahelduvvoolusuuruste mõõtmine ja võimsuse arvutamine mõõteandmetest

Kuupäev: 24.05. 2019

50 lk (lõputöö lehekülgede arv koos lisadega)

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendaja(d): professor Lauri Kütt

Töö konsultant (konsultandid): -

Sisu kirjeldus:

Käesoleva töö eesmärgiks on arendada välja mikrokontrolleril põhinev vahelduvvoolu mõõtesüsteem. Töö annab ülevaate, kuidas koostada soovitud eesmärki täitev elektriskeem, millised on võtmekomponendid ja milliste vahenditega tagada nende toimivus.

Töös uuritakse vahelduvvoolusuuruste mõõtmise põhimõtteid, järjestatakse nende mõõtmise etapid ja vajalikud toimingud, lähtudes seejuures Arduino mikrokontrolleri kasutusvõimalustest.

Töö tulemuseks on välja töötatud süsteem, mis mõõdab kõiki enamlevinud vahelduvvoolu parameetreid ja arvutab mõõtetulemustest vajalikke suurusi. Süsteemi tähtsaks osaks on atraktiivsel puutetundlikul ekraanil olev kasutajaliides, mis võimaldab kasutajal valida, milliseid mõõteandmeid ja arvutustulemusi kuvada.

Seadme skeemiosade toimivust on edukalt testitud simulatsioonides. Simulatsioonide tulemustest saab ka järeldada, et seadme mõõtetulemused on üsna täpsed ning mõõteviga on väike.

Seadme töökindluse tagavad: hoolikalt valitud komponendid elektriskeemis, lahendused ülepinge ja -vooluga toimetulekuks, hoiatusmärguanded kasutajale ohuolukordades ja seadme aku pingetaseme monitoorimine.

Märksõnad: vahelduvvool, alalisvool, pinge, voolutugevus, võimsus, energia, faasinihe, võimsustegur, reaktiivvõimsus, mikrokontroller, analoog- ja digitaalsisendid, operatsioonvõimendi, programmeerimine

ABSTRACT

<i>Author:</i> Heigo-Elmar Vahesaar	<i>Type of the work:</i> Bachelor Thesis
<i>Title:</i> Measurement of Alternative Current Parameters and Calculating Power from the Measurement Data	
<i>Date:</i> 24.05.2019	<i>50 pages (the number of thesis pages including appendices)</i>
<i>University:</i> Tallinn University of Technology	
<i>School:</i> School of Engineering	
<i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Supervisor(s) of the thesis:</i> Professor Lauri Kütt	
<i>Consultant(s):</i> -	
<p><i>Abstract:</i></p> <p>The aim of this work is to develop a microcontroller based AC measuring system. The work provides an overview of how to design an electrical scheme that fulfills the desired purpose, what are the key parts of the system and how to ensure their performance.</p> <p>The work examines the principles of measuring the AC current parameters, the sequence of the steps of the measurements and the necessary operations, taking into account the capabilities of the Arduino microcontroller.</p> <p>The result of this work is a system that measures all the most common AC parameters and calculates the required values from the measurement results. An important part of the system is the user interface on an attractive touchscreen, which allows the user to choose which measurement data and calculation results to display.</p> <p>The performance of the device has been successfully tested in simulations. The results of the simulations can also be used to conclude that the measurement results of the device are quite accurate and the measurement error is small. The reliability of the device is ensured by the following: carefully selected components in the electric circuit, solutions for overvoltage and overcurrent situations, warning signals to the user and monitoring of the battery voltage.</p>	
<i>Keywords:</i> alternating current, direct current, voltage, current, power, energy, phase shift, power factor, reactive power, microcontroller, analog and digital inputs, operational amplifier, programming	

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	Vahelduvvoolusuuruste mõõtmine ja võimsuse arvutamine mõõteandmetest
Lõputöö teema inglise keeles:	Measurement of Alternative Current Parameters and Calculating Power from the Measurement Data
Üliõpilane:	Heigo-Elmar Vahesaar, 142690AAAB
Eriala:	Elektrotehnika
Lõputöö liik:	bakalaureusetöö
Lõputöö juhendaja:	Lauri Kütt
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	kehtivusaja annab juhendaja
Lõputöö esitamise tähtaeg:	24.05.2019

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

1. Teema põhjendus

Vahelduvvoolusuuruste mõõtmine ei ole triviaalne protseduur, kui allikaks on suures vahemikus muutuva väljundvõimsusega kolmefaasiline sünkroongeneraator. Mõõtmise jaoks tuleb koostada programm ja töötada välja ka seade, mis pinget, voolu ja võimsuse suurusi mõõdab ja kalkuleerib ning esitab tulemused ekraanil.

Mõõteseadet kasutatakse edaspidi õppemakett-generaatori juures, kus iga huviline saab generaatoriga laadida näiteks mobiiltelefoni ja samal ajal jälgida toodetud elektrienergia hulka ning väljundparameetreid. Makett saab olema tõmbenumbriks näiteks Avatud uste päeval, Teadlaste ööl ja muudel avalikel üritustel.

2. Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on koostada mõõteseadet vahelduvvoolusuuruste mõõtmiseks.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

Vahelduvvoolusuuruste mõõtmise põhimõtted;
Mõõteseadme struktuur ja vajalikud komponendid;
Mõõteseadme tööalgoritmid, mõõtevea hinnang;
Järeldused.

4. Lähteandmed

Lähteandmetena on kasutatud vahelduvvoolusuuruste mõõtmise põhimõtteid, Arduino mikrokontrolleri platvormil baseeruvate lahenduste juhendeid, generaatori nimiandmeid.

5. Uurimismeetodid

Vahelduvvoolusuuruste mõõtmise printsiipide rakendamine programmis, mis juhib koostatud mõõteseadet. Mõõteseadme koostamise aluseks on elektriskeem ja vajalike elektroonikakomponentide valimine ning mõõteseadme katsetamine.

6. Graafiline osa

Olulisemad joonised on elektriskeemid, algoritm- ja plokk skeemid, seadme põhimõtteskeem, juhtprogrammi koodid.

7. Töö struktuur

Ülevaade vahelduvvoolusuurustest ja nende mõõtmisest

Ülevaade generaatoritest ja nende tööpõhimõtetest

Vahelduvvoolusuuruste mõõtmise protseduuride plokk skeem

Arduino mikrokontrolleri kasutusvõimalused

Juhtprogramm

Elektriskeem sünkroongeneraatori väljundparameetrite mõõtmiseks

Trükkplaat

Mõõteseadme vea hindamine

8. Kasutatud kirjanduse allikad

Allikatena kasutan raamatuid, teadusartikleid, komponentide tootjate infolehti, varasemaid lõputöid:

Kallaste, A. Püsimagnetiga (PM) väljatöötamine; bakalaureusetöö, Tallinna Tehnikaülikool, 2004.

Janson, K. , Kallaste, A. Elektrimasinate alused. Tallinna Tehnikaülikool, 2017.

<https://www.arduino.cc/>

Leiburi, K. Kolmefaasilise aksiaalvooga sünkroongeneraatori õppemaketi väljatöötamine, Tallinna Tehnikaülikool, 2017

10. Töö etapid ja ajakava

Kirjanduse läbitöötamine (märts 2019)

Põhimõtteskeemide koostamine (märts 2019)

Elektriskeemide koostamine (aprill 2019)

Arduino juhtprogrammi koostamine (aprill 2019)

Töö teoreetilise osa kirjutamine (aprill 2019)

Mõõteseadme vea hindamine (aprill 2019)

Töö vormistamine ja esmane esitamine juhendajale (26.04.19)

Paranduste sisseviimine ja töö lõplik versioon (17.05.19).

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE.....	3
ABSTRACT.....	4
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	5
EESSÕNA.....	10
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU	11
SISSEJUHATUS	12
1. ÜLEVAADE VAHELDUVVOOLUSUURUSTEST.....	14
1.1 Vahelduvvoolu ajalugu ja ülevaade	14
1.2 Vahelduvvoolu teke	14
1.3 Vahelduvvoolu parameetrid	15
1.4 Vahelduvvooluahela komponendid	16
2. VAHELDUVVOOLUSUURUSTE MÕÕTMINE	20
2.1 Ülevaade mõõteseadmetest.....	20
2.2 Vahelduvvoolusuuruste mõõtmise etappide põhimõtteskeem	21
2.3 Mõõteseadme põhimõtteskeem	23
3. ÜLEVAADE GENERAATORITEST JA NENDE TÖÖPÕHIMÕTETEST.....	27
4. ARDUINO MIKROKONTROLLERI ARENDUSPLATVORM	29
4.1 Arduino arendusplatvormi kasutusvõimalused	29
4.2 Juhtprogramm.....	30
4.2.1 Sisselülitus	30
4.2.2 Ahela parameetrite mõõtmine	31
4.2.3 Mõõteandmete kuvamine ja kasutajaliides	32
5. ELEKTRISKEEM SÜNKROONGENERAATORI VÄLJUNDPARAMEETRITE MÕÕTMISEKS.....	34
5.1 Elektriskeem.....	34
5.1.1 Lülitamine.....	34
5.1.2 Seadme toide ja laadimine.....	35
5.1.3 Sisendskeem.....	36
5.1.4 Mõõtmine.....	37
5.1.5 Väljundid	39
5.2 Trükkplaat	40
6. MÕÕTESEADME VEA- JA TOIMIVUSE HINNANG.....	41
6.1 Veahinnang	41

6.1.1 Viga pinge mõõtmisel.....	41
6.1.2 Viga voolu mõõtmisel.....	41
6.2 Seadme funktsionaalsuse kinnitamine	42
KOKKUVÕTE	45
SUMMARY	46
KASUTATUD KIRJANDUS.....	47
LISAD	48
Lisa 1 Juhtprogrammi kood vahelduvvooluparameetrite määramiseks	49
Lisa 2 Juhtprogrammi kood alalisvooluparameetrite määramiseks	50

EESSÕNA

Käesoleva bakalaureusetöö teema tekkis vajadusest täiustada Tallinna Tehnikaülikooli elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudis koostatud elektrigeneraator-õppemaketti arvesti ja atraktiivse kasutajaliidesega, et maketti saaks kasutada eriala tutvustamiseks avalikel üritustel. Töö autoril oli juba varasemalt huvi samalaadi generaatorile arvesti valmistamise ja ka praktilist laadi lõputöö vastu ning tänu juhendajale, kelleks oli elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi professor Lauri Kütt, tekkis võimalus need kaks huvi ühildada. Ühtlasi oli võimalik töö eesmärgi saavutamiseks kasutada instituudi ruume, juhendaja konsultatsioone ja rahastust.

Käesoleva töö autor tänab professor Lauri Kütti koostöö ja pakutud võimaluste eest.

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

ARD_D	Arduino mikrokontrolleri digitaalsisend
C	mahtuvus
f	sagedus
φ	faasinihe
I	voolutugevus
I_m	voolutugevuse amplituudväärtus
I ² C	Arduino andmete saatmise ja vastuvõtmise liides
P	aktiivvõimsus
Q	reaktiivvõimsus
R	takistus
RX	Arduino ja ekraani vahel andmete edastamise liin
S	näivvõimsus
SCL	Arduino taktliin
SDA	Arduino andmeliin
z	näivtakistus
t	aeg
T	periood
TX	Arduino ja ekraani vahel andmete edastamise liin
U	pinge
X	reaktiivtakistus
x_c	mahtuvuslik reaktiivtakistus
x_L	induktiivne reaktiivtakistus

SISSEJUHATUS

Käesoleva bakalaureusetöö „Vahelduvvoolusuuruste mõõtmine ja võimsuse arvutamine mõõteandmetest“ eesmärk on uurida vahelduvvoolusuuruste mõõtmise protsessi ja töötada välja mikrokontrolleril põhinev mõõtesüsteem vahelduvvoolusuuruste mõõtmiseks generaatori väljundist. Teema valikul on lähtunud vajadusest luua generaatorile arvesti, mis suudab mõõta suuresti muutuvate väljundparameetritega kolmefaasilise sünkroongeneraatori väljundvõimsust ja -energiat. Olemasolevad samalaadsed tooted toimivad üldiselt kitsas pinge- ja sagedusvahemikus ning on võrdlemisi kõrge hinnaga. Samuti on kitsendavaks asjaoluks kolmefaasilise ahela parameetrite mõõtmise vajadus – suurem osa müügilolevatest arvestitest on ühefaasilised.

Mõõteseadet kasutatakse edaspidi õppemakett-generaatori juures, kus iga huviline saab generaatoriga laadida näiteks mobiiltelefoni ja samal ajal jälgida toodetud elektrienergia hulka ning generaatori väljundparameetreid ekraanilt. Maketi eesmärk on olla visuaalselt kui ka kasutamisevõimalustelt atraktiivne tõmbenumber Avatud uste päeval, Teadlaste ööl ja muudel avalikel üritustel. Positiivse kasutamiskogemuse tagamiseks on seadmel lai puutetundlik ekraan, lisaks on sisseehitatud aku, et võimaldada ilma toitetat tööd ning seadmel on mitu väljundit, et pakkuda huvilistele erinevaid kasutusfunktsioone.

Käesoleva töö käigus analüüsitakse vahelduvvoolusuuruste nagu voolutugevus, pinge, aktiiv-, reaktiiv- ja näivvõimsus, aktiiv- ja reaktiivenergia ning faasinihke mõõtmise ja määramise põhimõtteid. Põhiliselt uuritakse nende parameetrite määramise võimalusi mikrokontrolleril põhineva seadmega. Mõõteseadme koostamisel valitakse komponendid ja tööalgoritmid ning mõõteseadme katsetamisel hinnatakse mõõteviga ja tehakse järeldused.

Käesoleva töö käigus arendatakse edasi 2017.aastal Karl Leiburi bakalaureusetöös esitatud algset lahendust digitaalse mõõteseadme koostamiseks. Nimetatud lahenduses esines puudujääke elektriskeemis, juhtprogramm oli koostatud vaid seadme sisselülitamise kohta ja kasutajaliidest ei töötatud lõplikult välja.

Käesolev töö koosneb kuuest peatükist. Esimeses peatükis tutvustatakse vahelduvvoolu rakendamise üldisi põhimõtteid ja printsiipe. Teises peatükis kirjeldatakse vahelduvvoolusuuruste mõõtmist ja käesoleva töö lõppeesmärgi saavutamiseks vajalikku protseduuride jada põhimõtteskeemi abil. Kolmandas peatükis käsitletakse lühidalt kolmefaasiliste ahelate ja generaatorite tööpõhimõtteid. Neljandas peatükis kirjeldatakse Arduino mikrokontrolleri kasutusvõimalusi ja rakendust käesolevas töös. Viienda peatüki sisuks on elektriskeemi komponentide valiku ja skeemi osade detailne lahtiseletus kirjeldamiseks nende otstarvet antud

mõõteseadme koosluses ning tehakse ülevaade trükkplaadi koostamisest. Kuuendas peatükis tuuakse välja mõõteseadme katsetulemused ja järeldused.

Käesoleva töö käigus välja pakutud lahendusteni on jõutud töö autori ja juhendaja vaheliste arutelude tulemusel, lähtudes elektrooniliste komponentide omadustest, vahelduvvoolu mõõtmise protsessist ning Arduino mikrokontrolleri ja selle tarkvara kasutusvõimalustest.

Töö lisa on toodud juhtprogrammi koodiosad mõõtmiste läbiviimiseks.

Töös on kasutatud põhimõtte- ja plokk skeemide koostamiseks draw.io rakendust, elektriskeemi ja trükkplaadi koostamiseks DipTrace tarkvara, elektriskeemi simulatsiooniks programmi LTSpice, Arduino mikrokontrolleri tarkvara ja programmeerimiskeelt seadme juhtprogrammi koostamisel ning Nextion Editor programmi puuetundliku ekraani kasutajaliidese koostamisel.

1. ÜLEVAADE VAHELDUVVOOLUSUURUSTEST

1.1 Vahelduvvoolu ajalugu ja ülevaade

Vahelduvvooluks nimetatakse elektrivoolu, mille suurus ja suund muutuvad perioodiliselt. Voolu perioodilise muutumise põhjuseks on allikas, mille elektromotoorjõu väärtus ja polaarsus perioodiliselt muutub, näiteks generaator. Vahelduvvoolu kasutatakse elektri tootmisel, jaotusel, tööstuses ja ka kodumajapidamises. [1]

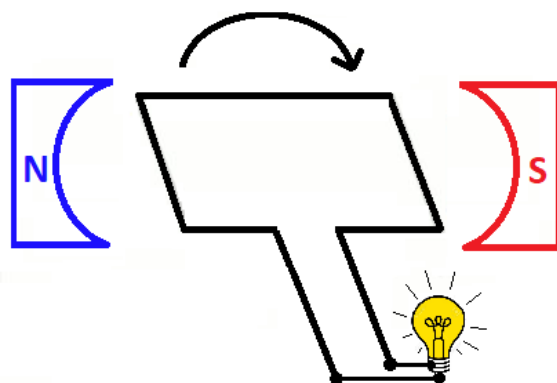
Vahelduvvoolurakenduste arenduse algusaeg jääb 19. sajandi esimesse poole, kui Michael Faraday avastas elektromagnetilise induktiooni, mis võimaldab mehaanilise energia muundada elektrienergiaks. Prantsuse mehaanik Hippolyte Pixii koostas Faraday seaduse järgi esimese vahelduvpinge-generaatori. [1]

Elektrienergia tootmise ja jaotamise seisukohalt eelistatakse vahelduvvoolu alalisvoolu ehk muutumatu suunaga voolu asemel, sest vahelduvpinge väärtust saab muundada lihtsalt ja töökindlalt trafodega kõrgemaks või madalamaks ja seeläbi oluliselt vähendada elektrivõrgus suurte vahemaade juures ülekandekadusid. Lisaks on vahelduvvoolumasinad lihtsama ehitusega, parema töökindlusega ja soodsamad kui alalisvoolumasinad.

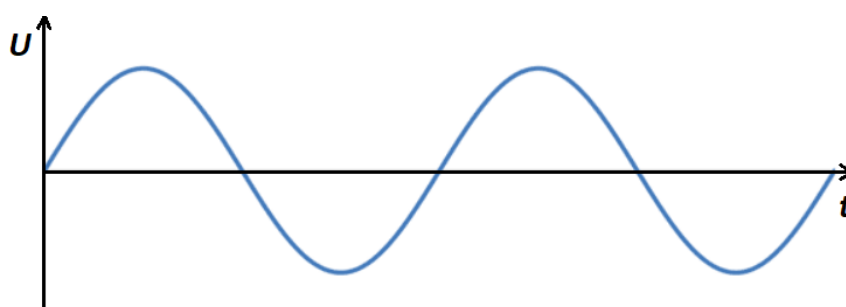
Vahelduvvoolu hetkväärtuste ajaline kujutis võib muutuda kolmnurkse, nelinurkse või siinuselise seaduspära järgi. Kõige olulisemal kohal ja laialdasema kasutusega on neist siinuseline vahelduvvool, sh sellise kujuga on vahelduvvoolugeneraatorite väljundvool.

1.2 Vahelduvvoolu teke

Käesolevas töös vaadeldakse siinuselist vahelduvvoolu, mille teket kirjeldab alljärgnev illustratsioon (joonis 1.1), kus juhtmekeerud pöörleb püsिमagnetite vahelises magnetväljas. Juhtmekeerus indutseeritakse pinget, mille suurus ja suund muutuvad pöörlemise käigus, sest juhtmekeeru asend magnetvälja jõujoonte suhtes muutub perioodiliselt. Kui juhtmekeeru otstesse ühendada tarbija ehk sulgeda vooluahel, siis läbib tarbijat vahelduvvool. [1]



Joonis 1.1. Vahelduvpingeallikas – lihtsaim generaator ahelas, kus on tarbijaks hõõglamp. N – püsिमagnetmaterjali põhjapoolus, S – püsिमagnetmaterjali lõunapoolus



Joonis 1.2. Siinuselise seaduspäraga muutuva vahelduvpinge graafik, mis on jälgitav joonisel 1.1 esitatud lambi klemmidel. U – pinge, t – aeg

1.3 Vahelduvvoolu parameetrid

Sagedus ja periood. Jooniselt 1.2 ning Oomi seadust kasutades saame järeldada, et juhtmekeeru pöörlemisel on lambis esinev vool teatud ajahetkedel nullväärtusega. Seega lamp põleb ja kustub vaheldumisi. Kui aga mõelda reaalse olukorra peale, kui majapidamises põleb laes vahelduvpinge toitel valgusti, siis ei tähelda inimsilm selle hõõgumist ja kustumist, sest voolu vaheldumise sagedus on märkimisväärne ning lamp ei jõua nii kiiresti jahtuda ega kustuda. Suur sagedus tähendab, et vool muudab suunda mitmekümneid kordi sekundis. Ühe perioodi pikkust ehk ajavahemiku, mil vool on läbib nii positiivse kui negatiivse osatsükli, pikkust saab võrgusagedusel mõõta millisekundites. Perioodi ja sageduse vahelist sõltuvust saab kirjeldada valemiga:

$$f = \frac{1}{T} \quad (1.1)$$

kus f – sagedus, Hz,

T – perioodi pikkus, s.

Avalikes elektrivõrkudes, sh kodukasutuses olevas võrgus, kasutatav sagedus Euroopas on 50 Hz.

Amplituud-, hetk- ja efektiivväärtus. Jooniselt 1.2 selgub ka, et lambis tekkinud vahelduvvool on teatud ajahetkedel maksimaalse väärtusega – seda nimetatakse amplituudi hetkeks ning sel hetkel esinevat väärtust amplituudväärtuseks. Igal erineval ajahetkel elektriahelas oleva voolu väärtust nimetatakse aga hetkväärtuseks. Kuna hetkväärtus muutub igal ajahetkel, siis selle parameetri rakendamine on sageli ebaotstarbekalt keeruline ning vahelduvvoolu tugevust hinnatakse sagedamini efektiivväärtuse järgi. Viimase all mõistetakse sellist alalisvoolu väärtust, mis ahelat läbides eraldab teatud aja kestel ahelas sama suure energiahulga kui nimetatud vahelduvvooluga ahelas. [1]

Vahelduvvoolu efektiivväärtust saab leida amplituudväärtuse kaudu, rakendades alljärgnevat valemit:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad (1.2)$$

kus I – vahelduvvoolu efektiivväärtus, A,

I_m – vahelduvvoolu amplituudväärtus, A.

Sarnane seos esineb ka vahelduvpinge amplituud- ja efektiivväärtuse vahel, ehk amplituudväärtuse jagamisel ruutjuurega kahest saab leida pinge efektiivväärtuse. Praktikas kasutatakse peamiselt efektiivväärtuseid ehk kui avaliku võrgu pinge väärtuse kohta öeldakse 230 V, siis peetakse silmas just efektiivväärtust, mitte amplituudväärtust.

1.4 Vahelduvvooluahela komponendid

Vahelduvvoolu pidev perioodiline suunamuutus ahelas põhjustab mõningaid uusi protsesse, mida alalisvooluahelas ei täheldata. Üheks erisuseks on energia ajutine salvestamine ahelas, mis tuleneb induktiivsetest ja mahtuvuslikest komponentidest nagu induktiivpool ja kondensaator. Nendel komponentidel on omadus säilitada ahela parameetrite nagu vool ja pinge väärtust, kui ahelas on toimunud teatud muudatus. Induktiivpool ei lase voolutugevusel hetkeliselt muutuda ja kondensaator hoiab ära pinge hetkelise muutuse. Mida suuremad on vastavalt induktiivsus ja mahtuvus, seda kauem suudavad need komponendid säilitada pinge ja voolu väärtust. Energia salvestamine ja vastutoime muutusele avaldub reaktiivvõimsuse- ja energiana.

Viimaste kirjeldamiseks võib induktiivpool ja kondensaatori juures vaadelda suurusi induktiivtakistus ja mahtuvuslik takistus, mis on mõlemad reaktiivtakistused, aga vastupidiste

suundadega. Seega saab antud komponente rakendada teineteise mõjude neutraliseerimiseks. Induktiivtakistuse saab leida valemiga:

$$x_L = 2\pi fL \quad (1.3)$$

kus x_L – induktiivtakistus, Ω ,

f – sagedus, Hz,

L – induktiivsus, H.

Mahtuvusliku takistuse valem on:

$$x_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad (1.4)$$

kus x_C – mahtuvuslik takistus, Ω ,

f – sagedus, Hz,

C – mahtuvus, F.

Reaktiivtakistus koosmõjus aktiivtakistusega ehk tavalise soojusliku toimega takistusega annab kokku näivtakistuse, mis avaldub järgmiselt:

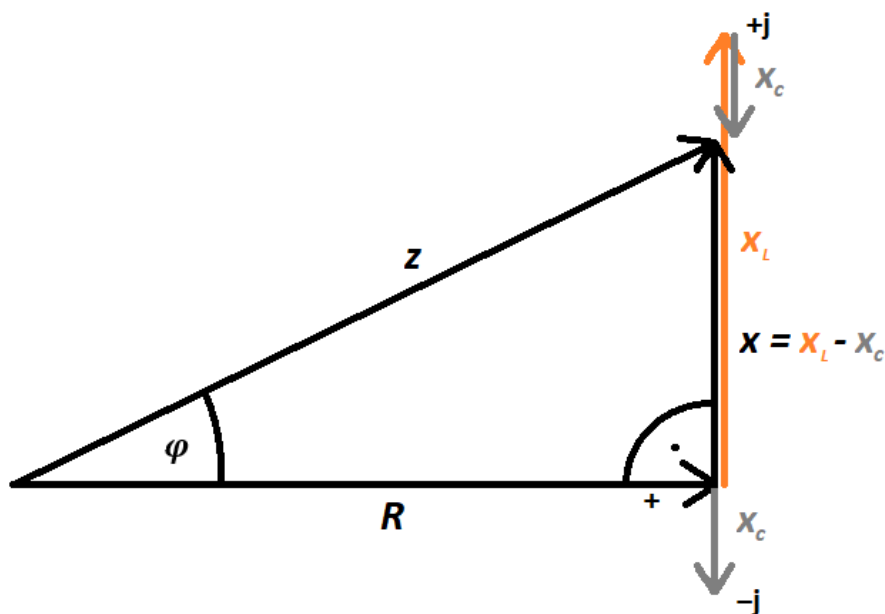
$$z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (1.5)$$

kus z – näivtakistus, Ω ,

R – aktiivtakistus, Ω ,

X – reaktiivtakistus, Ω .

Erinevat liiki takistuste sõltuvust teineteisest saab avaldada täisnurkse kolmnurga abil nagu joonisel 1.3.



Joonis 1.3. Takistuse liigid täisnurkses kolmnurgas

Erinevat liiki takistused põhjustavad erinevat liiki võimsuse eraldumist: lisaks aktiivtakistuse poolt rakendatavale aktiivvõimsusele esineb ahelas reaktiivne võimsus, mis on vastavalt induktiivse või mahtuvusliku iseloomuga. Kokku moodustavad aktiivvõimsus ja reaktiivne võimsus näivvõimsuse. Reaktiivne võimsus on oma loomult selline, mis ei jõua tarbijani nagu aktiivvõimsus, vaid võngub allika ja tarbija vahel edasi-tagasi. Selle tunnuseks on induktiivpooli ja kondensaatori põhjustus pingele ja voolu vaheline faasinihe siinuspingel. Faasinihe tähendab, et ühesuguse sagedusega pingele ja voolu vaheline faasinihe, seda suurem on ahelas tekkiva reaktiivvõimsuse osakaal. Alljärgnevalt on toodud aktiivvõimsuse arvutamise valem ahelas, milles on ka reaktiivsed komponendid:

$$P = UI \cos \varphi \quad (1.6)$$

kus P – aktiivvõimsus, W,

U – pingele, V,

I – voolutugevus, A,

$\cos \varphi$ – võimsustegur, ühikuta suurus.

Võimsustegur kujutab endast koosinust faasinihkest, mis on sisuliselt aktiivvõimsuse ja näivvõimsuse suhe. Mida väiksem on faasinihe, seda suurem on $\cos \varphi$ ja omakorda seda suurem on aktiivvõimsuse osakaal näivvõimsusest. Võimsusteguri valem on järgmine:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (1.7)$$

kus P – aktiivvõimsus, W,

S – näivvõimsus, VA.

Näivvõimsus avaldub valemist:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (1.8)$$

kus S – näivvõimsus, VA,

P – aktiivvõimsus, W,

Q – reaktiivvõimsus, var.

Kui ahelas pole induktiivseid ega mahtuvuslikke komponente, siis näivvõimsus on võrdne aktiivvõimsusega ehk võimsustegur on 1. Seega saab näivvõimsuse leida ka ainult pinge ja voolu korrutisest. Reaktiivvõimsus avaldatakse kas ülaltoodud näivvõimsuse valemist või korrutatakse näivvõimsus läbi siinusega faasinihkest.

Nagu näha, on takistuste ja võimsuste valemid sarnased ja muutuvad proportsionaalselt teineteisega, seega saab ka erinevate võimsuste illustreerimiseks kasutada sarnast täisnurkset kolmnurka nagu takistuste puhul. [2]

2. VAHELDUVVOOLUSUURUSTE MÕÕTMINE

2.1 Ülevaade mõõteseadmetest

Vahelduvvoolusuurusi mõõdetatakse samade seadmetega, millega alalisvooluahela parameetreid. Pinget ehk potentsiaalide vahet mõõdetakse voltmeetriga ja voolutugevust ampermeetriga, mis võivad olla nii analoog- kui ka digitaalsed mõõteseadmed. Ajalises esituses mõõtmiseks saab kasutada ostsilloskoopi, mille tööpõhimõte on koguda tihedalt mõõteandmeid mõõdetava ahela erinevate parameetrite kohta ning kuvada tulemustest vastavaid graafikuid mh ajatelje suhtes.

Klassikalised mõõteriistad töötavad magnetoelektrilisel põhimõttel ehk vool läbib mõõteseadet ja tekitab magnetvälja, mis põhjustab osutimehhanismi pöörlemist skaala ulatuses. Skaala ulatust saab suurendada, muutes mõõtepiirkonda pingejaguri printsiibiga. Nii volt-kui ampermeeter mõõdavad voolutugevust, kuna voolutugevus on see, mis paneb osutimehhanismi pöörlema, ent voltmeetri mõõtemehhanism teisendab tulemuse Oomi seaduse abil pingenäiduks, võttes arvesse pingejaguri takistuste suhet seadme sees. Täpset klassikalist mõõteseadet on iseseisvalt väga keeruline koostada, kuna osutimehhanismi juures tuleb arvestada mitmete mõjutavate teguritega nagu moment ja hõõrdekaod. [3]

Digitaalsed mõõteseadmed põhinevad seadmesisestel voolu- ja pingemuunduritel, analoog-digitaal muunduritel, võimenditel, loogikalülitustel ja digitaalsel väljundil nagu ekraan. Pinge mõõtmiseks mikrokontrolleriga piisab kasutajal vaid pingejagurist ja analoogsisendist. Voolu mõõtmisel kasutatakse šunttakistit ja analoogsisendit. [3]

Vahelduvvoolu mõõtmisel seisneb erinevus alalisvoolumõõtmisest selles, et mõõteseadmes kasutatakse kas alaldit, kus kõigepealt alaldatakse siinuseline vool ja seejärel mõõdetakse saadud alalisvoolu parameetreid, või kasutatakse ostsilloskoobi põhimõttel toimivat mõõteahelat. Vahelduvvoolu mõõtmisel on oluline teada, missugust parameetrit on konkreetne digitaalne mõõteseadete ette nähtud mõõtma ja millest tuleb esitada tulemuse – kas mõõdab otseselt efektiivväärtust või tuleb efektiivväärtuse alaldatud voolust – mõõteseadme täpsus on eri juhtudel väga erinev. Alaldamisel kasutatakse täisperioodalaldit ja seejärel mõõdetakse alalisvoolu väärtust, mis vastab vahelduvvoolu efektiivväärtusele ning millest saab tuletada amplituudväärtuse. Alaldamise meetodil mõõtmine toimib siinuselise vahelduvvoolu korral ning mõõtetulemus ei pruugi olla väga täpne, kui voolu kuju pole ideaalselt siinuseline. Lisaks on võimalik mõõta vahelduvvoolu sagedust, loendades teatud pikkusega aja jooksul signaali impulsse. Võimsusteguri ja faasinihke mõõtmiseks kasutatakse loogikalülitust, kus võrreldakse pinge ja voolu faasis oleku aega. [4]

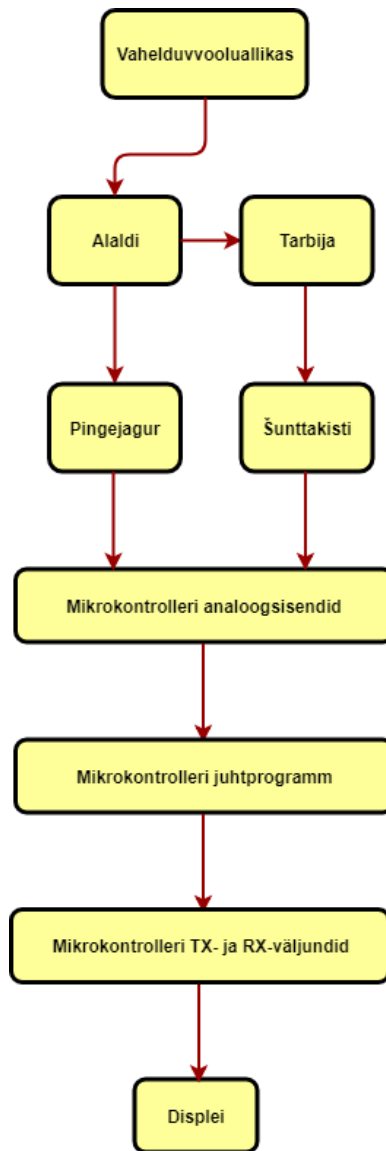
Kui ahelas on vaid aktiivtakistus, siis võimsuse mõõtmine käib mõlema pingetüübi korral ühtemoodi: võimsus on pinge ja voolu korrutis. Vahelduvvooluahela võimsuse mõõtmine muutub keerulisemaks, kui ahelas on reaktiivseid elemente ehk kondensaatoreid või induktiivpoole. Nende elementide mõjul tekib ahelas reaktiivvõimsus, mida tuleb võimsuse mõõtmisel arvestada, lähtudes valemist 1.6 – 1.8. Reaktiivvõimsuse allikateks on generaatorid, kuna mähised kujutavad endast induktiivseid elemente, seega ka käesoleva töö käigus koostatav mõõteseade peab olema võimeline eristama näiv-, aktiiv- ja reaktiivvõimsusi.

Vahelduvvoolusuuruste mõõtmine on keeruline protsess, kui allikaks on suuresti muutuvate väljundparameetritega generaator. Kui generaatorit ajada käsitsi ringi madalatel pöoretel ja ebaühtlase pöörlemiskiirusega, siis väljundis tekkiv pinge ei ole enam siinuseline, vaid sisaldab suurel hulgal harmoonikuid ehk põhisagedusest (näiteks 50 Hz) kõrgema sagedusega, ent väiksema amplituudiga pingevõnkumisi, mis on liidetud põhisageduse siinuselise seaduspäraga muutuvale hetkväärtuste profiilile. Samuti võivad generaatori väljundis muutuda pidevalt ahela kõik ülejäänud parameetrid nagu sagedus, pinge, voolutugevus ja võimsus. [1]

2.2 Vahelduvvoolusuuruste mõõtmise etappide põhimõtteskeem

Klassikalist elektromehaanilist mõõteriista on keeruline koostada ja seega lähtutakse käesolevas töös kavandatava seadme puhul mikrokontrolleril põhinevast seadmest. Sellise juhul kasutatakse kõige lihtsamal juhul pinge mõõtmisel pingejagurit ja mikrokontrolleri analoogsisendit, kuhu suunatakse alaldatud pinge. Pingejaguri eesmärk on muuta sisendpinge madalamaks, et tagada mõõdetava pinge püsimine nimi-sisendvahemikus ning vältida liigpinget analoogsisendile. Seejärel teisendab juhtprogramm mõõdetud väärtuse tagasi pinge tegelikuks väärtuseks, lähtudes pingejaguri takistuste suhtest. Voolutugevuse mõõtmisel kasutatakse šunttakistit, mis on väga väikese takistusega takisti, mille otstelt mõõdetakse pingelangu. Teades takistuse väärtust ja mõõdetava pingelangu suurust, tuletatakse Oomi seaduse abil ahela voolutugevus, kuna šunttakisti on ahelas jadamisi ning teda läbib sama suur voolutugevus nagu ülejäänud ahelat.

Järgnevalt on toodud põhimõtteskeem (joonis 2.1), mille alusel mõõteseade registreerib allika pinge ja ahela voolutugevuse, arvutab vajaminevad suurused, teisendab ja ümardab ning kuvab vastava parameetri väärtuse ekraanil.



Joonis 2.1. Vahelduvvoolusuuruste mõõtmise etappide põhimõtteskeem

Järgnevalt on näitena toodud mikrokontrolleeril rakendatud kood (joonis 2.2), mille abil saab mõõta analoogsisendi kaudu pinget ahelas.

```

int analogPin = A3; // sisendina määratakse analoogsisend 3
const float jaotis=0.0025; // 2.5 mV ühe jaotise väärtus, tulenevalt bittide arvust ja referentspingest
int pingejagur=5; // pingejaguri suhe, kui kasutatakse 5k ja 1K takisteid
int value = 0; // muutuja mõõtetulemuse salvestamiseks
float pinge; // tulemus, arvestades jaotiste väärtust, mõõtetulemuse muutujat ning pingejaguri suhet

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  analogReference(INTERNAL2V56); // referentspinge määramine 2.56 V peale
}

void loop() {
  value = analogRead(analogPin); // analoogsisendi mõõtetulemuse lugemine
  pinge=(value*jaotis)*pingejagur; // lõplik tulemus, pinge väärtus
  Serial.println(pinge); // näitab pinge väärtust
  delay(200); // viivitus tulemuste kuvamise vahel
}

```

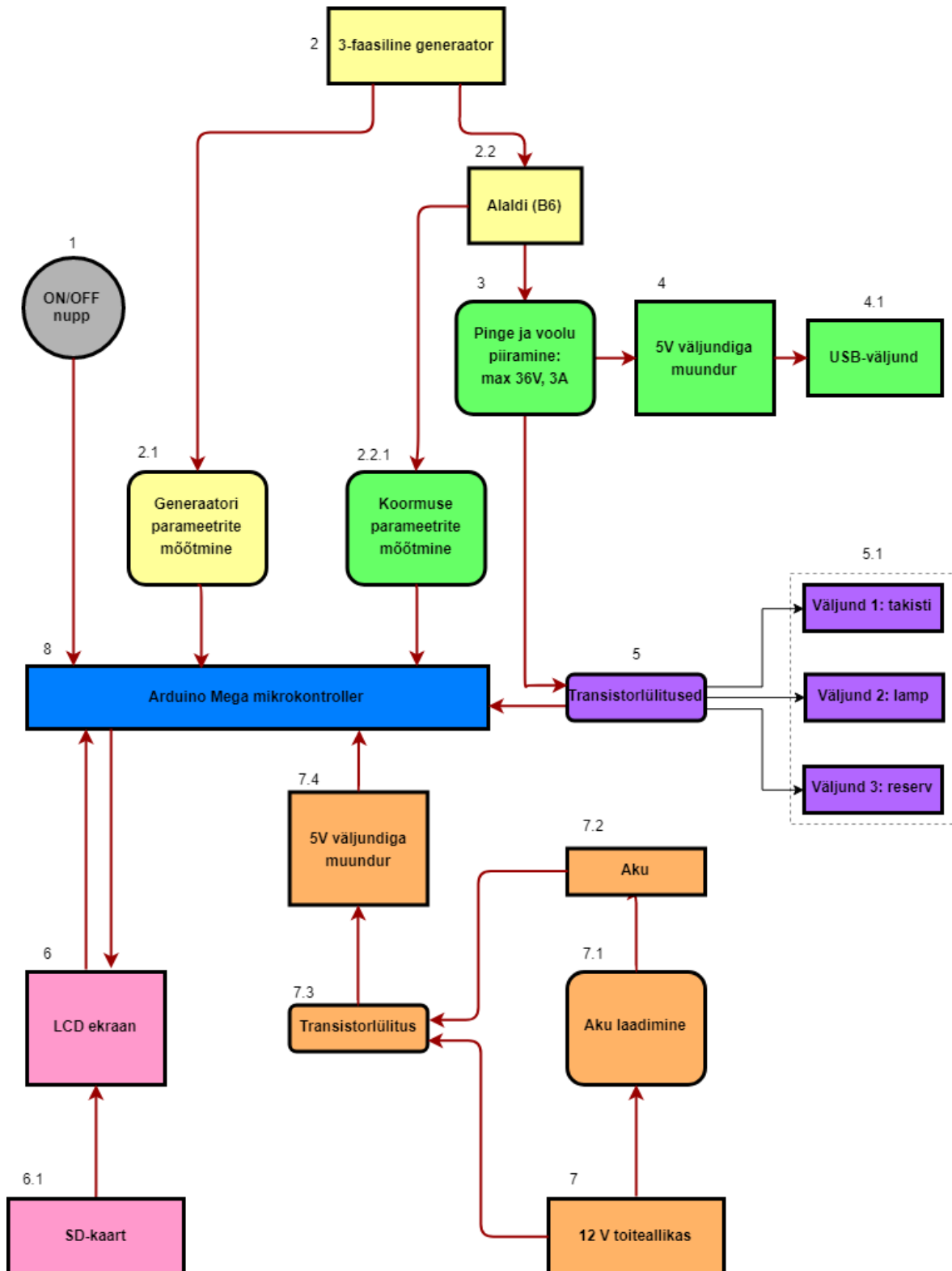
Joonis 2.2. Analooisendi abil pinget mõõtmine

Vahelduvpinge korral esineva reaktiivvõimsuse määramiseks on tarvis teada faasinihet ja võimsustegurit. Kui mõõteseade mõõdaks igal ajahetkel ja väga tiheda intervalliga pinget ja voolu, siis oleks võimalik pinge ja voolu faasinihet määrata, aga käesolevas töös koostatakse mõõteseade mikrokontrolleriga, millel pole võimekust piisavalt tiheda ajaintervalli tagant mõõtmisi teostada. Seega on tarvis koostada mõõteskeem, mis eristaks ajahetki pinge ja voolu samade faasihetkede vahel ja võrrelda selle aja kestust perioodi pikkusega. Selleks kasutatakse mõõteskeemi keskse komponendina operatsioonvõimendeid, mille positiivse ja negatiivse sisendi pingeerinevuse tõttu langeb väljundi pinge nulli pärast amplituudväärtuse saavutamist. Väljundi nulli langemine fikseeritakse digitaalsisendi abil ja seeläbi leitakse vahelduvpinge tipuhetked. Sarnasel meetodil määratakse alaldatud voolu impulsside tipuhetked. Seda tehakse šunttakisti pingelangu tipuhetkede alusel, sest sellise takisti pingelang muutub proportsionaalselt ahelas esineva voolutugevusega, sh ahelas esineva pulseeriva voolutugevusega. Leitud andmete põhjal saab määrata täisperioodi pikkuse ning kahe parameetri tipuväärtuste vahelise aja võrdlemisel võimsusteguri ja faasinihke.

2.3 Mõõteseadme põhimõtteskeem

Käesolevas töös on koostatud seade vahelduvvoolugeneraatori väljundparameetrite mõõtmiseks. Seadme keskseks juhtimiseks on valitud Arduino Mega mikrokontrolleri arendusmoodul, millel on mitmeid analoog- ja digitaalsisendeid, samuti digitaalväljundid. Arduino arendusmooduli täpsem kirjeldus on 4.peatükis.

Seadme funktsioonide ja mõõtmisetappide kirjeldamiseks on koostatud seadmestiku põhimõtteskeem draw.io rakenduse abil. Põhimõtteskeemi abil saab anda ülevaatliku kirjelduse seadmestiku iga osa funktsioonide kohta, kusjuures iga erineva funktsiooniga mõõteseadme osa on kujutatud eri värviga. Samuti on põhimõtteskeemi eri plokid nummerdatud. Põhimõtteskeemil on protsessid ja tööetapid kujutatud kumerate nelinurkadega, mõõteseadme osad on näidatud kandiliste nelinurkadega ja seadme ON/OFF nupp on ringiga kujutatud. Elektroonikaseadmestiku ja komponentide täpsem kirjeldus on 5. peatükis.



Joonis 2.3. Vahelduvvoolusuuruste mõõtmise seadme terviklik põhimõtteskeem. Värvide seletus: hall – sisselülitusnupp, kollane – sisendskeemi osad, roheline – koormuse osa, lilla – alternatiivsed väljundid, oranž – laadimine ja toide, roosa – ekraan ja selle osad.

Seadme tööpõhimõte on kirjeldatud järgnevalt punktide kaupa:

1 – Sisselülitus käib ON/OFF nupust.

2 – Generaatorilt tuleb mõõteseadmesse kas ühe- või kolmefaasiline vahelduvvool.

2.1 – Mõõteseadmesse siseneva kolmefaasilise vahelduvvoolu ühelt faasilt mõõdetakse operatsioonvõimenditel põhineva mõõteskeemiga pinget, voolutugevust, sagedust ja faasinihet.

2.2 – Mõõteseadmesse sisenev kolmefaasiline vahelduvvool muundatakse kolmefaasilises täis-perioodalaldis (B6-alaldi) alalisvooluks.

2.2.1 – Alaldatud voolult mõõdetakse tarbijaahela pinget ja voolu, kasutades INA219 kiipi ning Arduino arendusmooduli vastavaid andme- ja taktiliine. Mõõdetud andmetest arvutatakse võimsus ja energia.

3 – Maksimaalse pinge piiramine toimub operatsioonvõimendi ja transistori abil. Kui pinge on kõrgem kui 36 V, siis hakkab süsteem suunama osa voolu maha. Koormuse ja koormusvoolu piiramine toimub INA219 voolutugevuse mõõtetulemuse põhjal. Kui voolutugevus ületab 3A, siis lülitatakse koormus ahelast välja.

4 – 5 V *step-down* muundur, mis alandab kuni 17 V sisendpinge 5 V väljundpingeks, tagades konstantse 1 A voolutugevuse, mis suunatakse USB-väljundisse.

4.1 – USB-väljund, mida saab kasutada telefoni, akupanga või muu seadme aku laadimiseks.

5 – Transistorlülitid, mille abil toimuvad alternatiivsete väljundite ühendamised koormusesse. Lülitamine toimub, kui generaatori võimsus on piisavalt suur ja lülitust juhib Arduino arendusmoodulil töötav juhtprogramm.

5.1 – Alternatiivsed väljundid, nt valgusallikas, takisti või mõni muu alalisvoolu toitel toimiv seade.

6 – Puutetundlik LCD-ekraan, mille ekraanimenüüd vahetuvad kasutaja puudutusel.

6.1 – SD-kaart, mille ülesandeks on LCD-ekraani ekraanimenüüde alusmaterjaliks olevate taustade ja piltide hoiustamine.

7 – 12 V toiteallikas, mida kasutatakse mõõteseadme aku laadimiseks. Toiteallikas on ühendatud avaliku vahelduvvooluvõrgu pistikupessa ehk on 230 V toitega ning kujutab endast toitemuundurit, mis alandab ja alaldab 230 V vahelduvpinge 12 V alalispingeks.

7.1 – Aku laadimine toimub kiibi LT3652 abil, mis reguleerib ja juhib protsessi. Aku laetakse kuni 8,4 V pingeni.

7.2 – Aku on mõõteseadme toiteks olukordades, kus välises elektrivõrgust toidet ei ole võimalik võtta.

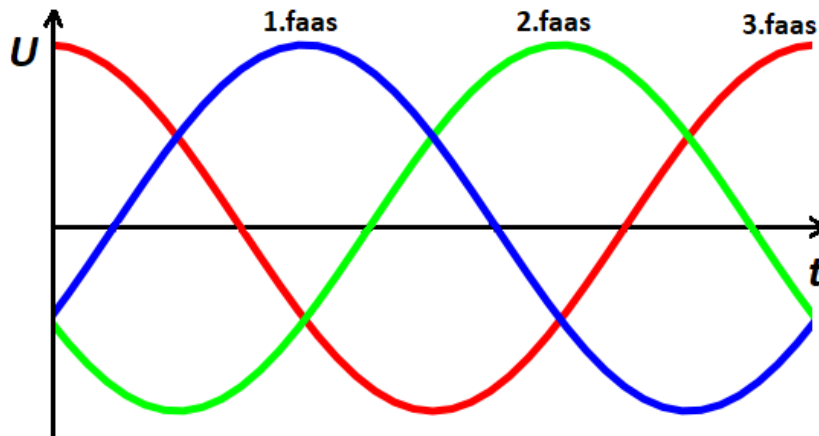
7.3 – Transistorlülitite sisselülituse läbiviimiseks kas akutoitelt või toiteallikalt.

7.4 – 5 V *step-down* muundur, mis alandab 8,4 V aku pinget või 12 V toiteallika pinget 5 V pingeks Arduino arendusplatvormi toiteks.

8 – Arduino Mega arendusmoodulil paiknev mikrokontroller, mis juhib mõõteseadet.

3. ÜLEVAADE GENERAATORITEST JA NENDE TÖÖPÕHIMÕTETEST

Elmises peatükis kirjeldatud kolmefaasiline ahel saab toite kolmefaasilisest allikast, mis erineb lihtsaimast ühefaasilisest vahelduvpingeallikast üsna vähe. Selles on ühe juhtmekontuuri asemel kolm ühesugust mähist, mis on teineteise suhtes 120° võrra nihkes ja kui mähiste komplekt pöörleb püsिमagnetite vahel ühtlase kiirusega, siis indutseeritakse igas mähises ühesugune siinuseline pinge, ent teineteise suhtes 120° nihkega (joonis 3.1). [8]



Joonis 3.1. Kolmefaasilise vahelduvpinge graafik

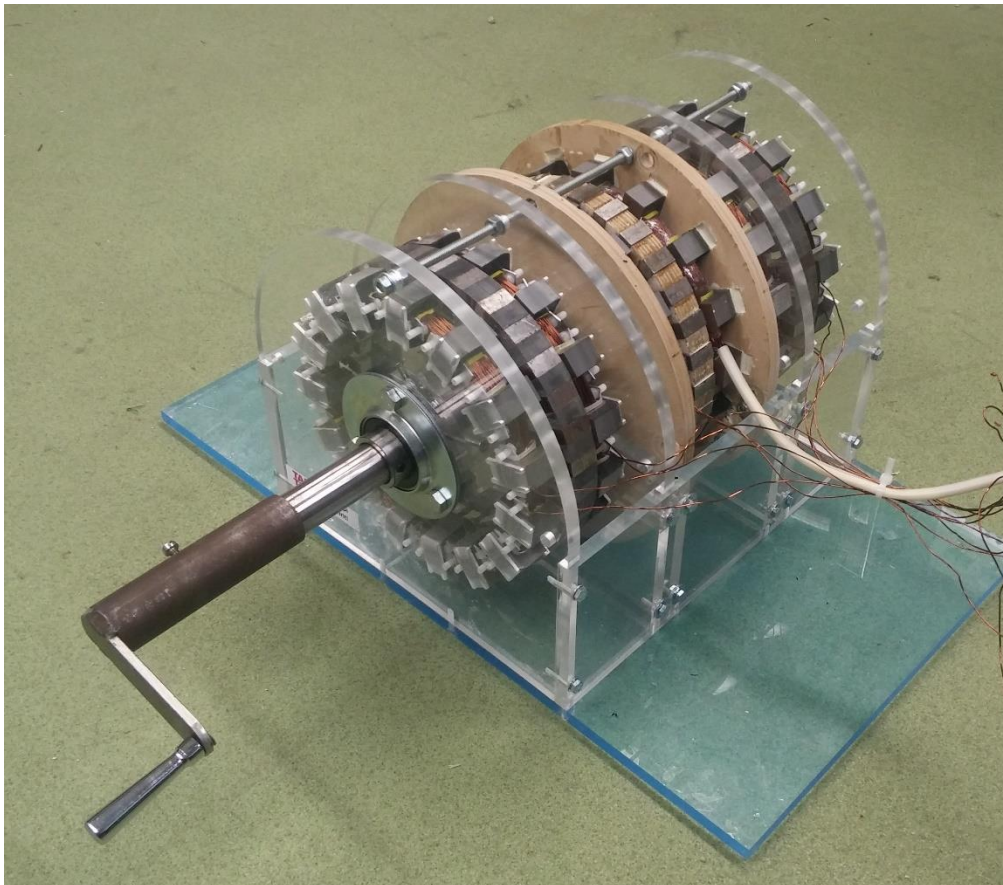
Kolmefaasilise ahela võimsus on kolme teineteisega faasinihkes oleva vahelduvvoolu võimsuste summaarne võimsus. Kui kolmefaasilises ahelas on sümmeetriline koormus, siis mõõtmise seisukohast on tegemist põhimõtteliselt ühe faasi olukorra kordamisega kõikides faasides. Kui koormus on ebasümmeetriline, siis on igas faasis erinev voolutugevus ja/või pinge ja/või faasinihe pinge ja voolu vahel. Mõõtmiste seisukohast on siis tarvis mõõta iga faasi võimsust eraldi ja võimsused liita. Käesolevas töös rakendatav koormus on sümmeetriline.

Reaalsetes tänapäevastes elektrimasinates ehk seadmetes, mis muundavad mehaanilist energiat elektriliseks energiaks ja vastupidi (mootor ja generaator), on ülesehitus keerulisem. Elektrimasinate põhiosadeks on rootor, staator, hulgaliselt mähiseid ja/või püsिमagneteid. Kolmefaasilise mootori puhul pingestatakse staatori mähised kolmefaasilise voolude komplektiga ja see tekitab pöörleva magnetvälja. Pöörlev magnetväli indutseerib rootoris voolu ja see tekitab staatori magnetväljaga kombineerumise läbi omakorda pöördemomendi rootori jaoks. Generaatori puhul on olukord täpselt vastupidi ehk kõigepealt rakendatakse mehaaniline jõud ja pöördemoment rootorile, mille mähiste või püsिमagnetite tekitatud magnetväli indutseerib elektromotoorjõudu staatorimähistes. [5]

Kõige enam levinud on kahte tüüpi vahelduvvoolugeneraatorid: asünkroongeneraatorid ja sünkroongeneraatorid. Asünkroongeneraator töötab kõigepealt kui mootor – staator

pingestatakse ja rootoris indutseeritakse vool. Kui rootori pöörlemiskiirust suurendada nii palju, et see ületab staatorimähiste magnetvälja pöörlemiskiirust, hakkab asünkroonmasin toimima kui generaator, sest rootor hakkab staatori mähistesse indutseerima lisaelektromotoorjõudu. Sünkroongeneraatori magnetväli on rootoril tekitatud alalisvoolu toitel elektromagnetitega või püsिमagnetitega ja pöörlemisel indutseeritakse staatorimähisesse elektromotoorjõudu. Sünkroongeneraatorist saadava pinge sagedus on sünkroonis rootori pöörlemisega. [6]

Käesolevas töös koostatavat mõõteseadet kasutatakse peamiselt sünkroongeneraatori juures (joonis 3.2), aga seade on võimeline töötama ka muud tüüpi generaatorite juures, sest generaatori väljundpinge muundatakse alalisvooluks. Samuti on võimalik kasutada toitenäidena vaid ühte faasi kolmefaasilise generaatori väljundist.



Joonis 3.2. Õppemakett-generaator, mille juures mõõteseadet peamiselt kasutatakse

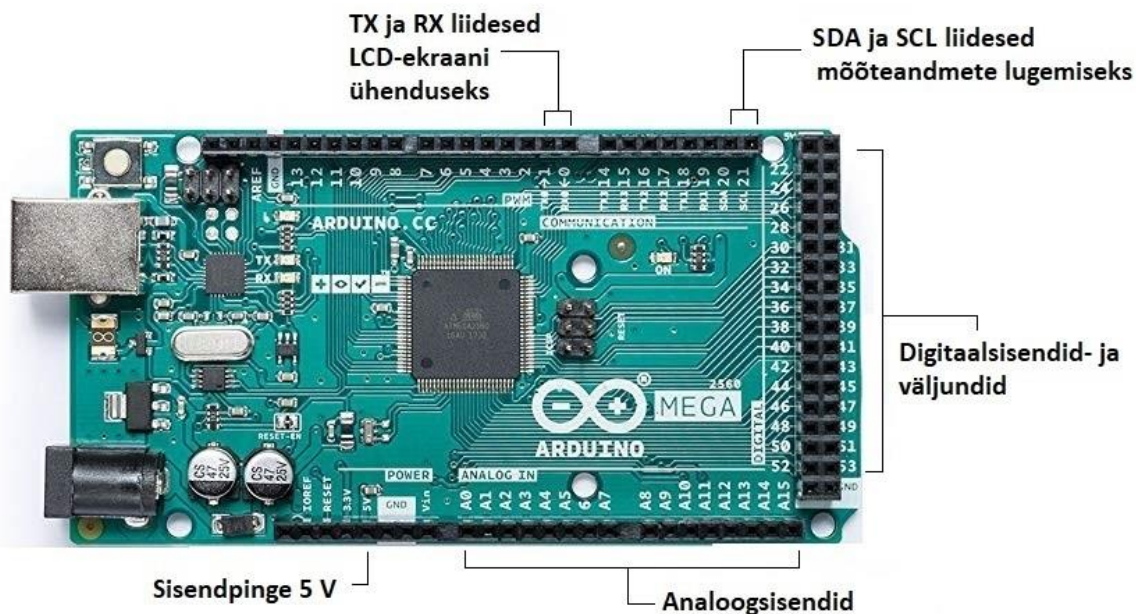
4. ARDUINO MIKROKONTROLLERI ARENDUSPLATVORM

4.1 Arduino arendusplatvormi kasutusvõimalused

Arduino arendusplatvorm on väga laialt levinud, seda saab kasutada loetlemata hulgal erinevates rakendustes tänu tema võimekale kontrolleriikiibile, suurele hulgale analoog- ja digitaalsisenditele ja väljunditele ning tarkvarale, mida saab programmeerida vastavalt vajadusele. Arduino arendusplatvorme on mitmeid eri tüüpe, et võimaldada vastavalt funktsioonide vajadusele valikut erineva hinna ja suurusega platvorme. Lisaks on tegemist *open-source* platvormiga ehk igaüks võib koostada isikliku Arduino ja seda arendada oma rakendustes nõutavatele tingimustele vastavaks. [7]

Käesolevas töös kasutatakse Arduino arendusplatvormi, sest sellel on mugav kasutajaliides ja piisav võimekus töös koostatava mõõteseadme juhtimiseks. Antud mõõteseadme juures kasutatakse Arduino Mega tüüpi arendusplatvormi (joonis 4.1), kuna tegemist on mõõtmetelt väikse, ent suure võimekusega Arduino tüübiga, lisaks on tema hind soodne. Heaks omaduseks sellel Arduino tüübil on võrdluspinge analoogsisendite mõõtmiseks, milleks on 2,56 V. See teeb 10-bitise analoog-digitaalmuunduri puhul jaotise väärtuseks 2,5 mV, mida on mugav kasutada.

Arduino Mega arendusplatvormil on digitaalsisendeid ja -väljundeid kokku 54 ning 16 analoogsisendit, mis on piisavalt suur arv, et mõõteseadme juures saaks nimetatud tüüpi Arduinot kasutada. Arduino Mega arendusplatvormi tüübi heaks omaduseks on ka võimalus osadel digitaalsisenditel kasutada *interrupt*'e ehk kui mõni oluline protsess toimub ülejäänud toimingute vahel, siis ei pöörduta olulise protsessi täitmise juurde käskluste järjekorras, vaid peatatakse hetkeks ülejäänud toimingud. [7]



Joonis 4.1. Arduino Mega mikrokontrolleri arendusplatvormi ühenduskeemi pealtvaade

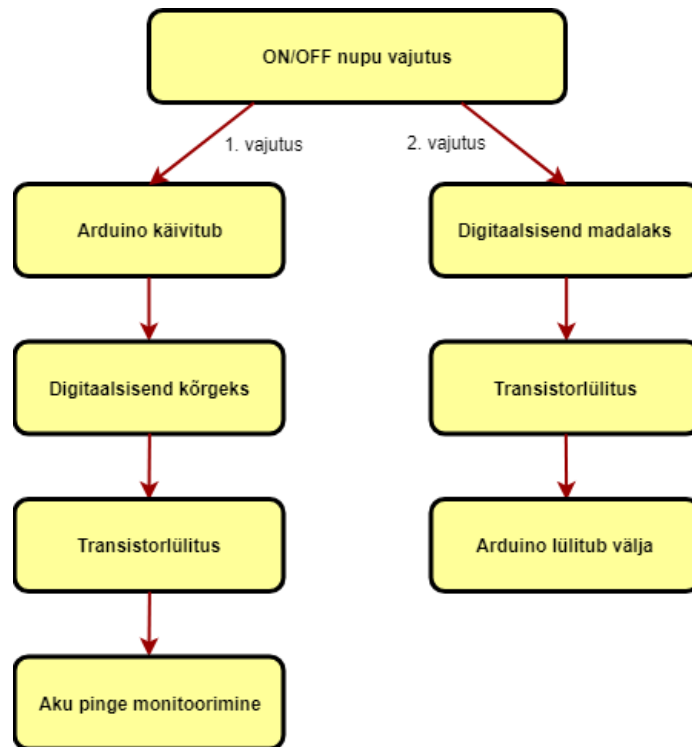
4.2 Juhtprogramm

Arduino Mega juhib mõõteseadme juures kogu elektroonikaskeemi vastavalt juhtprogrammile, mis on koostatud Arduino programmeerimistarkvaraga. Juhtprogramm on jaotatud osadeks, millest esimene on mõõteseadme ja Arduino kontrolleri sisselülituseks ning töös hoidmiseks, teine osa on ahela parameetrite mõõtmiseks ja vajalike arvutustehete sooritamiseks ning kolmas osa on mõõteandmete kuvamiseks ekraanil ja kasutajaliidese juhtimiseks. Alljärgnevates peatükkides on toodud programmiosade toimingud põhimõtteskeemide kujul.

4.2.1 Sisselülitus

Kui mõõteseadme lülitatakse ON/OFF-nupust sisse, siis suunatakse pinge 5 V muundurisse. Seejärel käivitub Arduino arendusplatvormi ja ühtlasi antakse nupuvajutusega signaal digitaalväljundisse, mille kaudu toimub transistorlülitus ja salvestub digitaalväljundi olek. ON/OFF nupu lahti laskmisel säilib toitepinge läbi transistoride. Teistkordne nupuvajutus lülitab seadme välja.

Sisselülituse järgselt hakkab Arduino arendusplatvorm monitoorima akude laetust. Programm võrdleb analoogsisendist saadava info alusel, kas süsteemi akud on piisavalt täis ning annab ekraanil selle kohta märku, et 12 V toiteallika võib soovi korral eemaldada. Kui akud tühjenevad, siis hoiatatakse märguandega ekraanil. Kui akude pinge langeb alla lubatu, siis lülitub mõõteseadme välja (joonis 4.2).



Joonis 4.2. Sisselülitustoimingute järjestus

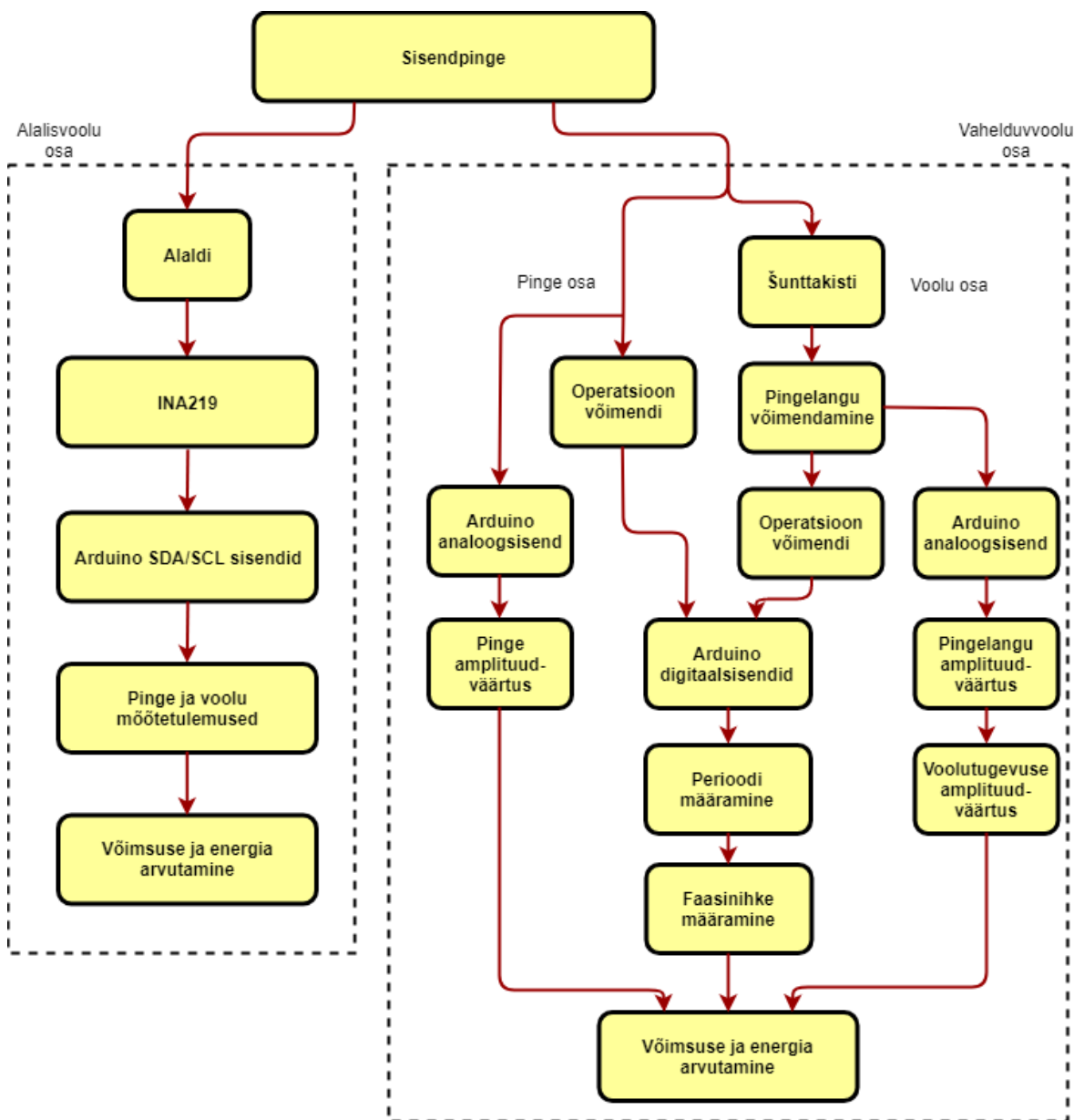
4.2.2 Ahela parameetrite mõõtmine

Mõõteseade mõõdab pinget ja voolu nii ahela alalis- kui ka vahelduvvoolu osas. Alalisvoolu osas kasutatakse INA219 mõõtekiipi, mis on mõõteandmete lugemiseks ühendatud Arduinoga SCL ja SDA liinide kaudu, mida nimetatakse I²C liideseks. SDA puhul on tegu kahe-suunalise andmeliiniga ja SCL on taktiliin. Andmevahetust Arduinoga arendusplatvormiga saab korruga sooritada mitu seadet, sest igal seadmel on isiklik bittidega määratud aadress. [8]

Koodi kirjutamisel kasutatakse olemasolevat *teeki* INA219 kiibi kohta, mis defineeritakse programmi alguses. Seeläbi saab lühikese koodiga, mille aluseks on Adafruit INA219 kasutajatoe pakutud standardne kood, ühildada kiibi Arduinoga ja lugeda mõõteandmed, millest arvutada koormusel eralduv võimsus ja tarbitav energia. [9]

Vahelduvvooluosa mõõtmiste teostamiseks kasutatakse operatsioonvõimendeid, mis annavad väljundisse langeva frondi, kui siinuspinge või -vool on amplituudväärtuse saavutanud. Langeva frondi registreerimiseks kasutatakse Arduino digitaalsisendeid, millel on *interrupt*-funktsioon ehk digitaalsisendid registreerivad langevad frondid ükskõik millisel ajahetkel. Nimetatud funktsioon on väga oluline, sest teine võimalus langevat fronti lugeda on Arduino koodis *loop*-programmiosas, mis aga täidab käsklusi kindlas järjekorras ehk langeva frondi registreerimisel toimuks ajaline viivitus ja tulemus oleks ebatäpne.

Alljärgnev diagramm joonisel 4.3 iseloomustab toimingute järjestust alalisvoolu osa pinge ja voolu mõtmisel, vahelduvvooluosa pinge- ja voolugraafikute tippude määramisel ning sageduse ja faasinihke arvutamisel. Viimaks arvutatakse aktiiv-, reaktiiv- ja näivvõimsused ning aktiiv- ja reaktiivenergia. Arduino programmi koodid parameetrite mõõtmise kohta on toodud töö Lisades 1 ja 2.



Joonis 4.3. Ahela parameetrite mõõtmine ja tulemuste arvutamine

4.2.3 Mõõteandmete kuvamine ja kasutajaliides

Kui Arduino on edukalt kätte saanud mõõteandmed kiipidest, siis edastatakse andmed Nextion LCD-ekraanile (joonis 4.4), kasutades TX ja RX sisendeid. LCD-ekraani ühildamiseks Arduinoga on vaja määrata ekraani suurus ning kasutada *teeki*, mida pakub Arduino platvorm.

Kasutamise seisukohalt on oluline, et ekraanilt saaks kasutaja valida sobivaid funktsioone ja milliseid mõõteandmeid kuvada. Lisaks tuleb Arduino programmis koodina kirjeldada alternatiivsete väljundite transistorlülitite juhtimine, et generaatorilt tulev vool suunataks teistesse tarbijatesse, kui kasutaja seda soovib. Kasutaja saab vajutada puutetundlikult ekraanilt nuppude ikoonidele, mis on taustpildina salvestatud välisele mälukaardile. Arduino vahetab infot ekraaniga, mis laeb mälukaardilt pärast kasutaja puudutust vastava pildi, uue menüü või muud andmed.

Ekraanil on kuvatud menüü, kust saab valida enamlevinud telefonitootjate hulgast enda telefoni mudeli ja seade võtab arvesse vastava telefoni aku parameetrid. Seejärel võrreldakse generaatori väljundenergiat telefoni aku kogumahutavusega ja kuvatakse kasutajale generaatori ringi ajamisest saavutatud energiahulk ning aku protsentuaalne laetus.



Joonis 4.4. Nextion ekraani menüü

5. ELEKTRISKEEM SÜNKROONGENERAATORI VÄLJUNDPARAMEETRITE MÕÕTMISEKS

5.1 Elektriskeem

Generaatori nimiaandmetest tulenevalt on elektriskeemi valitud komponendid, mis on ette nähtud tööks vastaval pinget ja voolutugevusel. Arvutuslikult on generaatori maksimaalne väljundpinge 30 V ühe faasi kohta 30 Hz korral, reaalselt katsetades 13,2 V 30 Hz korral. [8]

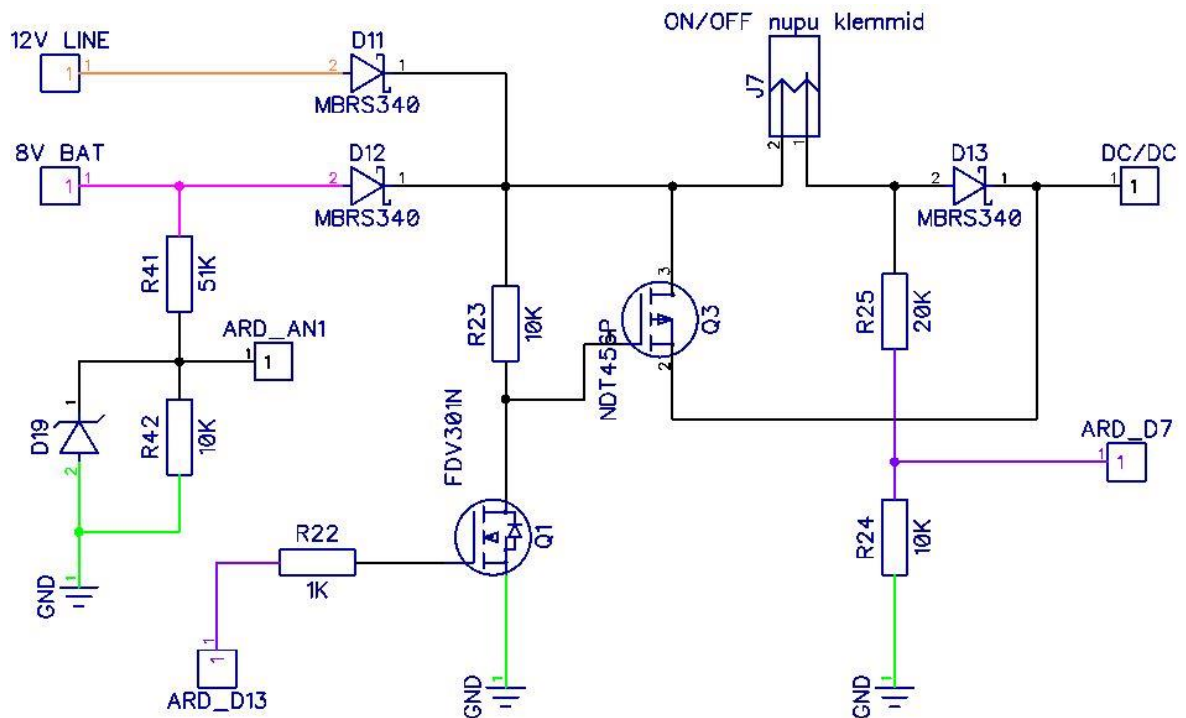
Arvestades, et maketti ajab käsitsi ringi inimene, pole väljundis üldiselt ohtlikult kõrget pinget, aga siiski peab mõõteseade olema disainitud töötama ka kõrgemal pöörlemissagedusel saavutatava pingega. Seega on valitud seadmesse elektroonikakomponendid LT3652, LTC3621 ja INA219 nii, et nende lubatud sisendpinged oleksid suuremad kui 13,2 V. Komponentide täpsem kirjeldus on järgnevates alapeatükkides.

Arduino sisendite lubatud maksimaalne pinge on 5 V. Seega ei tohi otse Arduino sisenditesse pinget rakendada, vaid parameetrite mõõtmine peab toimuma läbi pingejagurite.

5.1.1 Lülitamine

Mõõteseadme sisselülitamine (joonis 5.1) käib ON/OFF-nupust, mis on sõrmega vajutatav mittefikseeruv lüliti seadme korpuses. Lülitusprotsess toimub järgmiselt:

1. Kui seadmega on ühendatud väline toiteallikas ehk laadija, käivitub seade sisselülituse järgselt ja hakkab monitoorima sisseehitatud aku pinget läbi analoogsisendi AN1:
 - a. Kui aku on tühi, siis töötab seade edasi toiteallika abil;
 - b. Kui aku on laetud vähemalt minimaalse lubatud tasemeni, siis on võimalik toiteallikas eemaldada ja seade jätkab tööd aku toitel.
2. Kui välist toiteallikat pole ühendatud, siis pärast nupule vajutust:
 - a. Mõõteseade ei lülitu sisse, kui aku pole piisavalt täis;
 - b. Piisava laetuse korral käivitub seade akutoitel.



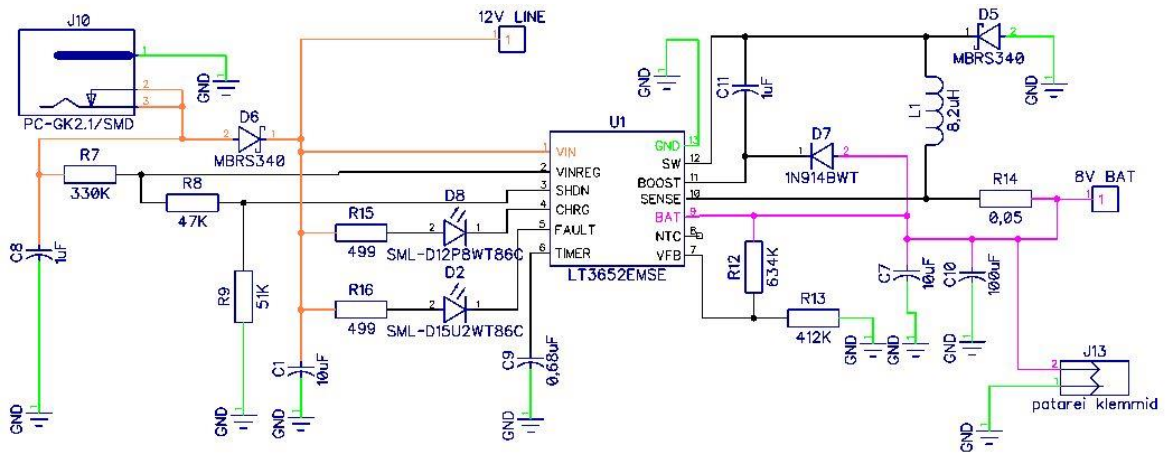
Joonis 5.1. Seadme lülitusskeem

Akutoitel töö on juhitud transistorlülituse abil, kus N-tüüpi ja P-tüüpi transistorid on omavahel ühendatud kaskaadi ning Arduino toiteklemmi on ühendatud *step-down* muundur LTC3621, mis 12 V välise toiteallika pingest või 8,4 V aku toitepingest muundab 5 V toiteks Arduinole.

Seadme väljalülitamine käib ON/OFF-nupu teistkordsel vajutamisel. Kuna Arduino digitaalsisendi, mis on joonisel 5.1 tähistatud ARD_D7, vajutamisel salvestub Arduino juhtprogrammis antud digitaalsisendi olek „kõrge“, siis teistkordsel vajutusel saab sisendi olekuks „madal“ ning see annab omakorda signaali ARD_D3 digitaalväljundile, mis N-tüüpi transistori baasile antava pingest 0-ks muudab. See omakorda sulgeb toiteahela ja Arduino lülitub välja.

5.1.2 Seadme toide ja laadimine

Seadme toiteks kasutatakse vastavalt ülalkirjeldatud kas 12 V välise toiteallika või sisseehitatud 8,4 V akut. Väline toiteallikas on võimeline ka sisseehitatud akut laadima.

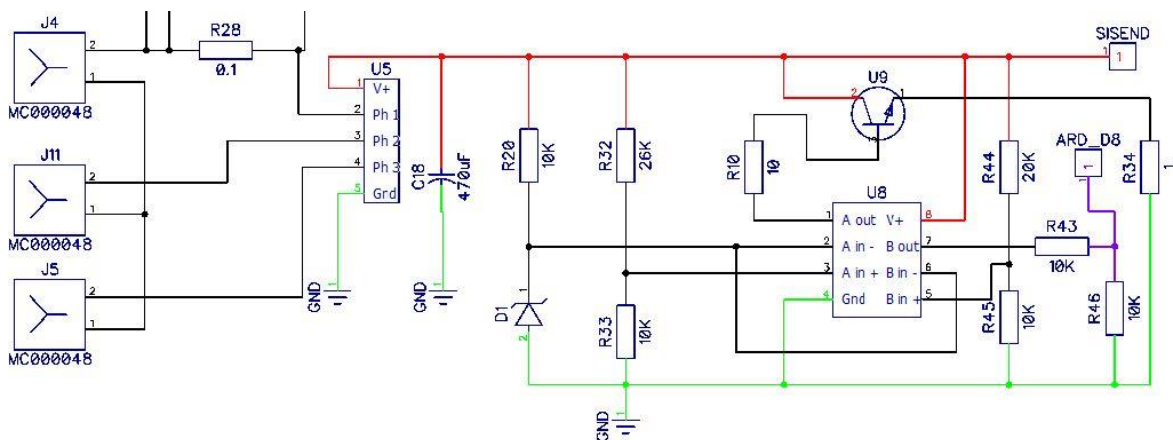


Joonis 5.2. Seadme laadimisskeem

Laadimisskeemilt joonisel 5.2 näeme, et kasutatakse komponenti LT3652, mille näol on tegemist akude laadimiseks mõeldud *step-down* muunduriga, mida põhiliselt kasutatakse päikesepaneelide süsteemides, aga ka kaasaskantavates ja kaugjuhitavates mõõteseadmetes. Tänu tema laiale sisendpinge vahemikule (4,95 V kuni 32 V) sobib ta käesoleva töö käigus koostatava mõõteseadme laadimisskeemi. Takistid, kondensaatorid ja poolid on valitud vastavalt arvutustele tootelehel. [10]

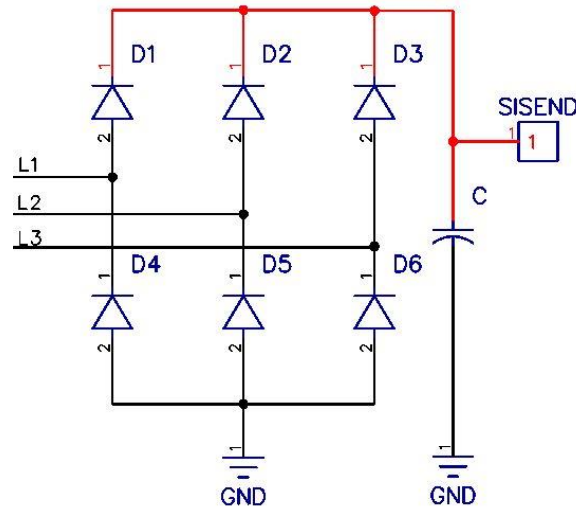
5.1.3 Sisendskeem

Sisendiks on kolmefaasilise generaatori väljundpinge. Generaatorit saab soovi korral ka ühefaasilisena kasutada, kui ühendada vaid esimese faasi kaks juhet vastavatele sisendklemmidele. Ühel faasil on ka šunttakisti, millel toimub sisendi ehk vahelduvvooluosa voolu mõõtmine ning samale faasile on ühendatud ka pinge mõõteskeem, mille kirjeldus on alapeatükis 5.1.4. Sisendosa skeem on välja toodud joonisel 5.3.



Joonis 5.3. Sisendskeem

Generaatorilt pärinev vahelduvpinge tuleb tarbija jaoks ja tarbija parameetrite mõõtmiseks muuta alalisvooluks. Vahelduvvoolugeneraatori kõigi 3 faasi pinged muundatakse alalispingeks, kasutades kolmefaasilist täisperioodalaldi (joonis 5.4).



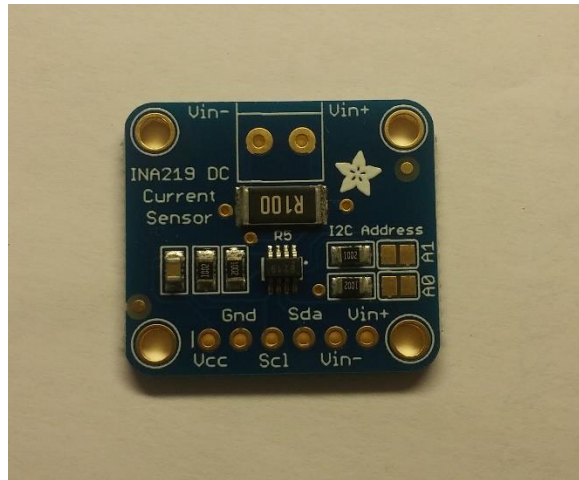
Joonis 5.4. B6 alaldi ehk kolmefaasilise täisperioodalaldi skeem

Alaldite tööpõhimõte seisneb diodide omaduses lasta läbi ainult ühesuunalist voolu. Alaldites on diodid paigutatud nii, et mõni diod juhib positiivse poolperioodi jooksul ja mõni juhib negatiivse poolperioodi vältel. Väljundisse jõuab aga ainult positiivne pinge, mis pulseerib nullist kuni amplituudväärtuseni. Pulseerimise silumiseks on paigutatud väljundiga rööbiti kondensaator, mis hoiab väljundpinget ühtlasemana. [11]

Sisendskeemi olulised komponendid on operatsioonvõimendi U8 ja transistor U9, mis hakkab voolu maha juhtima, kui pinge ületab lubatud 36 V piiri. Kui pinge hakkab lähenema 36 V-le, siis kuvatakse ekraanil ka sellekohane hoiatus. Kui generaatorilt tuleb ahelasse aga liiga palju voolu, siis piirab juhtprogramm väljundite kasutust ja annab samuti ekraanile hoiatuse.

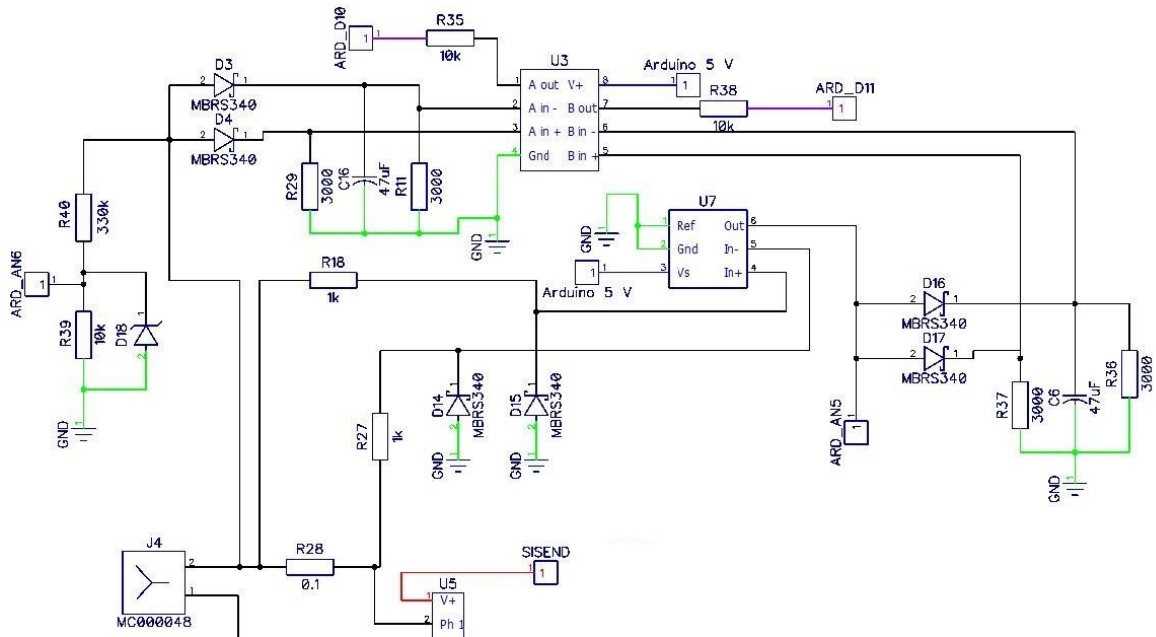
5.1.4 Mõõtmine

Voolu ja pinge mõõtmisel kasutatakse 4. peatükis mainitud INA219 kiipi, mille juurde kuulub šunttakisti, voolu piiravad takistid ning pinge kõikumist siluv kondensaator. Alljärgneval joonisel 5.5 on toodud kiibi trükkplaat, mille olemasolevatele klemmidele on ühendatud elektriskeemi ja Arduino vastavad osad.



Joonis 5.5. INA219 kiibi trükkplaat

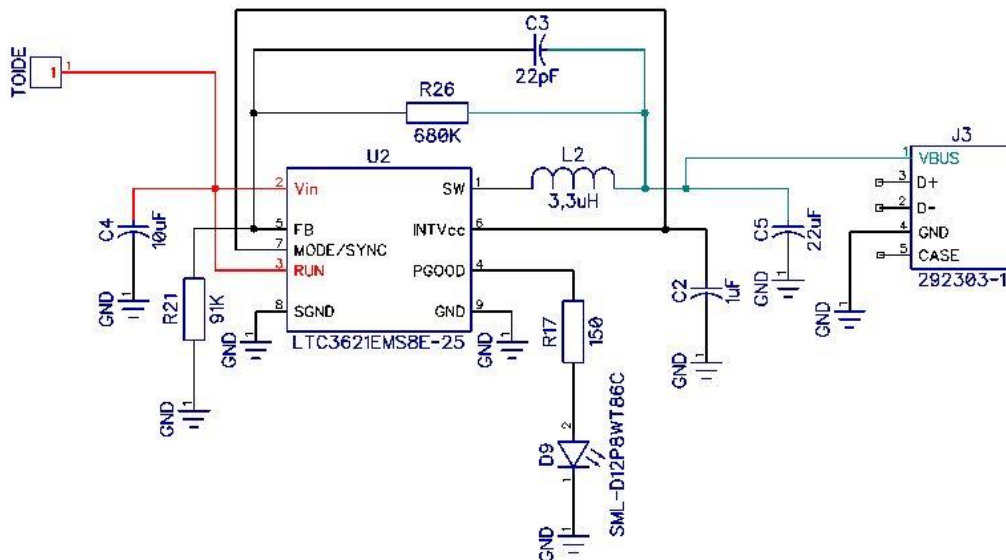
Lisaks on eraldi mõõteskeem (joonis 5.6) faasinihke ja perioodi ning sageduse mõõtmiseks. Skeemis on operatsioonvõimendi, INA180 kiip ja vastavalt simulatsioonidele programmis LTSpice valitud takistid ning kondensaatorid. Pingetipu määramiseks suunatakse pinge generaatorilt operatsioonvõimendi U3 A-sisenditesse ning A-väljund Arduino D10 digitaalsisendile, et määrata pingetipu ajahetk langeva frondi kaudu. Langev front tekib, kui sisendpinge hakkab amplituudväärtuse järgselt langema, sest operatsioonvõimendi negatiivse sisendi pinge jääb kondensaatori tõttu suuremaks kui positiivse sisendi pinge, misjärel langeb väljundis pinge hetkega nulli. Voolutugevuse pingetipu määramiseks on šunttakisti jadamisi esimese faasiga ning šundi klemmid on ühendatud INA180 kiibi sisenditesse, kus määratakse pingelang šundil. Pingelang pulseerib täpselt neil hetkedel, mil ahelas pulseerib voolutugevus ehk niiviisi saab määrata voolutugevuse tipuväärtuse hetke taaskord digitaalsisendi ja langeva frondi kaudu. Lisaks mõõdetakse analoogsisendite abil ka generaatori pinge ja voolu amplituudväärtused.



Joonis 5.6. Sageduse ja faasinihke mõõtmise skeem

5.1.5 Väljundid

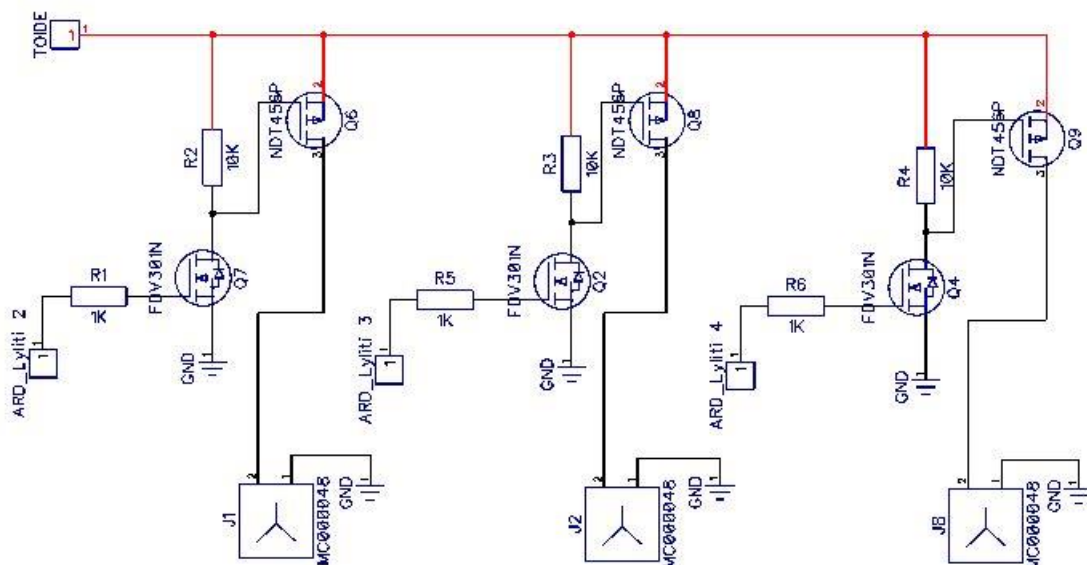
Mõõteseadme väljundite osas on kaks erinevat haru: USB-väljund ja alternatiivsed väljundid. Alljärgneval joonisel 5.7 on toodud USB-väljundiga haru skeem, kus keskne seade on 5 V *step-down* muundur LTC3621, mille sisendpingevahemik on 2,7 kuni 17 V. Väljundvool on 1 A. Komponentid muunduri sisendite ja väljundite juurde on valitud tootelehel toodud arvutuste kohaselt. [12]



Joonis 5.7. USB-väljundi skeem

Alternatiivsete väljundite skeem on toodud joonisel 5.8, kus on 3 ühesugust väljundit, mida juhitakse Arduino digitaalväljundite ja transistoride abil. Transistoridena kasutatakse N- ja P-tüüpi

transistore, mis on ühendatud omavahel nii, et kui digitaalväljundist tuleb signaal N-tüüpi transistori baasile, siis P-tüüpi transistori baasipingeks saab 0 V ning transistor muutub juhtivaks ning pinge jõuab väljundisse.



Joonis 5.8. Alternatiivsete väljundite skeem

5.2 Trükkplaat

Trükkplaadi projekteerimisel on kasutatud programmi Diptrace. Trükkplaat on projekteeritud kahepoolseks ning selle koostamisel on kasutatud 18 µm paksuse vaskkattega ja jootemaskiga kaetud klaasfiibrilist plaati. Trükkplaadi ühel poolel on aku laadimise skeemi juurde kuuluvad komponendid ja sisselülitusnupp ning teisel poolel sisendid generaatorist, alaldid, mõõtmise harud, väljundid ja Arduino sisenditesse ühendatavad klemmid. [8]

Trükkplaadi projekteerimisel on lähtunud järgmistest aspektidest:

1. Kasutatud on kahepoolset trükkplaati ning pindmontaaži komponente, et vähendada seadme mõõtmeid.
2. Hoida ühendusradade pikkusi minimaalsetena, paigutades komponendid ligistikku.
3. Paigutada sisendid ja väljundid trükkplaadi erinevatesse otstesse, et neid selgelt teineteisest eraldada.
4. Määrata radade laiused vastavalt voolutugevustele. [8]

6. MÕÕTESEADME VEA- JA TOIMIVUSE HINNANG

6.1 Veahinnang

6.1.1 Viga pinge mõõtmisel

Seadmes rakendatakse pingejaguri meetodit aku pinge ja generaatori pinge mõõtmisel. Kuna analoogsisendite abil pinge mõõtmisel pole volutugevust sisenditesse vaja, siis kasutatakse pingejagurites kümnetesse tuhandetesse oomidesse ulatuva takistusega takisteid, et piirata volutugevus minimaalseks ja vältida võimsuskadusid nende mõõteharude kaudu.

Kui seade on arvestatud töötama maksimaalselt 36 V sisendpinge korral, siis teoreetiline suurim võimsuskadu pingejaguris oleks 10 mW. Reaalselt rakendub 36 V sisendpinge korral juba seadet kaitsev transistor ja juhib kogu voolu maha. Nimiolukorras, milleks on arvestatud 12 V sisendpingega töötamine, on kaod pingejaguris väiksemad kui 3 mW. Sellised kaod on nimivõimsusega võrreldes kaduvväikesed ja nendega ei pea arvestama seadme mõõtevea hindamisel. Ka aku pinge mõõtmisel ehk nimiolukorras 8,4 V pingelanguga pingejaguril eraldub võimsust kaduvväike osa võrreldes ülejäänud ahelasse jõudva võimsusega.

6.1.2 Viga voolu mõõtmisel

Voolu mõõtmisel ühendatakse šunttakisti mõõdetava ahelaga jadamisi ja sellise ühenduse korral peab takistus olema võimalikult väike, et mitte mõjutada ahela parameetreid ja seeläbi mõõtetulemust. Peale šunttakisti jadaühendust saab volutugevust ahelas leida järgmiselt:

$$I_A = \frac{U}{R+R_A} \quad (6.1)$$

kus I_A – volutugevus ahelas, A,

U – pingelang ahela mõõdetavas osas, V,

R – aktiivtakistus ahelas, Ω ,

R_A – šundi takistus, Ω . [1]

Šunttakistitega voolu mõõtmisel on pingekadu šundil suurema osatähtsusega kui olid kaod pingejagurites. Nimitööolukorras 1 A koormusvoolu juures on pingelang 0,1 Ω šunttakistitel 0,1 V, mis moodustab nimipingest 1 %. Selliste kadude vältimiseks on mõõteseadmes kasutatav volutugevuse mõõtmise kiip INA219 disainitud selliselt, et kiibi tootjapoolsel kalibreerimisel on

mõõtetulemustesse sisse arvestatud veaparandustegur ja seega ei pea ülalmainitud pingekadudest tekkiva võimsuskaoga mõõteseadme mõõtetulemuste täpsuse hindamisel arvestama.

6.2 Seadme funktsionaalsuse kinnitamine

Seadme toimivuse hindamisel on lähtutud simulatsioonidest LTSpice keskkonnas, kuhu saab lisada Analog Devices (end Linear Technology) nimelise mikroskeemide tootja komponente ja ka teisi üldlevinud komponente nagu operatsioonvõimendid ja transistorid. Simulatsioonide läbiviimisel kasutati LTSpice programmi seetõttu, et seadme koostamisel on kasutatud mitut ülalnimetatud tootja komponenti, lisaks on programm tasuta ja lihtne kasutada.

Simulatsioonides katsetati laadimiskeemi keskse komponendi LT3652 toimivust 12 V alalistoitteallikaga. Voolutugevus läbi akude langes nulli kui 8,4 V pinge ehk maksimaalne soovitud aku pinge oli saavutatud. Kuni selle hetkeni laeti akut 2 A voolutugevusega.

Simulatsioonides katsetati LTC3621 ehk 5 V muundurite toimivust 12 V toiteallika toitel või 8,4 V aku toitel, samuti muunduri lubatud 17 V sisendpinget ületava 36 V ülepingega. *Step-down* muundurid andsid 12 V ja 8,4 V sisendpinge olukorras väljundisse 5 V pinge. Ülepinge korral muundur väljundisse pinget ei andnud. Väljundi pinge ja voolutugevuse nõutud tase saavutati 0,7 ms pärast sisendpinge soovitud taseme saavutamist. 12 V sisendpinge korral annab muundur väljundisse 5 V pinge juures 400 mA voolutugevuse.

Lisaks katsetati simulatsioonides mõõteskeemi toimivust, kus operatsioonvõimendite väljundpinge pidi vahelduva sisendpinge amplituudväärtuse hetkel langema nulli, et Arduino digitaalsisendid saaksid lugeda seda kui signaali langevat fronti ja seda nii generaatori pinge kui šunttakisti pingelangu graafiku alusel. Simulatsioonis määrati generaatori pinge ja šundi pingelangu sagedus ja nendevaheline faasinihe ning määrates graafikutelt langevate frontide ajahetked ja nende vahe, sai määratud tulemustest arvutada faasinihke järgmise valemi põhjal:

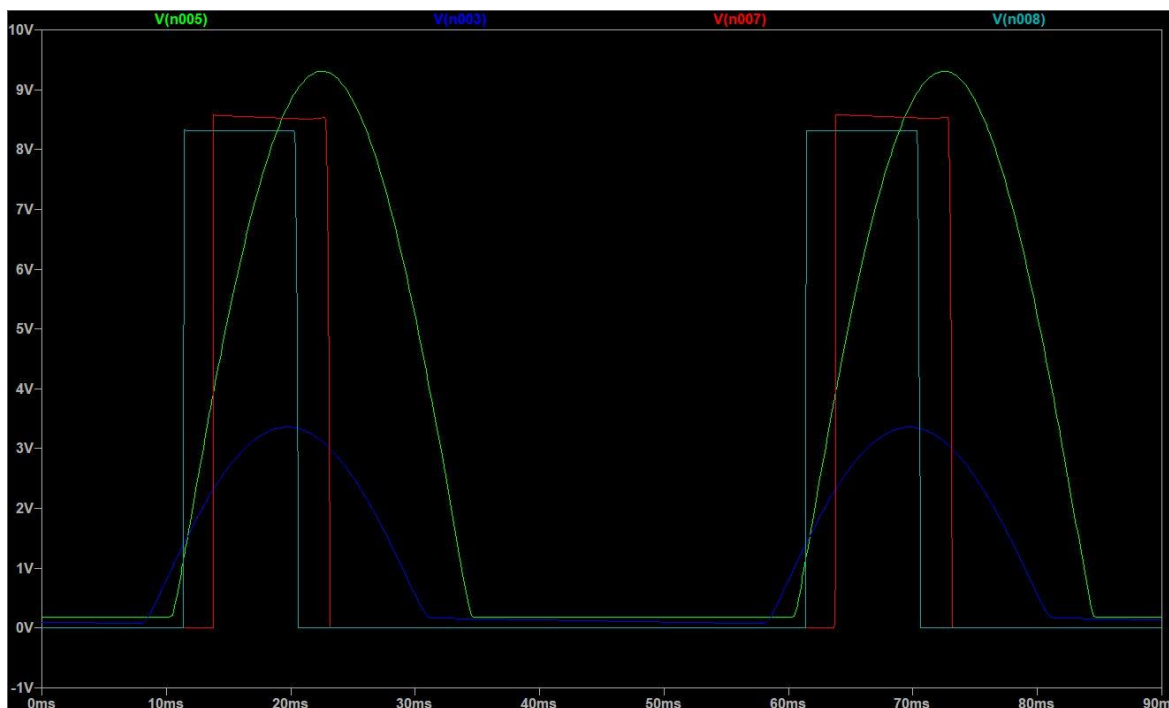
$$\varphi = \frac{360 \cdot t_v}{T} \quad (6.2)$$

kus φ – faasinihe, kraad,

t_v – generaatori pinge ja šunttakisti pingelangu graafikute ajavahe, ms,

T – periood, ms.

Sisendpinge ja šundi pingelangu graafikud on esitletud joonisel 6.1. Sisendpinge oli 10 V, sagedus 20 Hz ja faasinihe 20 kraadi.



Joonis 6.1. Sisendpinge ja šundi pingelangu simulatsiooni graafikud. $V(n005)$ – generaatori pinge, $V(n003)$ – šundi pingelang, $V(n007)$ – generaatori pinget jälgiva operatsioonvõimendi väljundpinge, $V(n008)$ – šundi pingelangu jälgiva operatsioonvõimendi väljundpinge

Simulatsioonis katsetati skeemi toimivust erinevate etteantud sisendpingete ja sageduste korral. Samuti anti ette kontrollitulemusena faasinihe. Simulatsiooni tulemused olid järgmised:

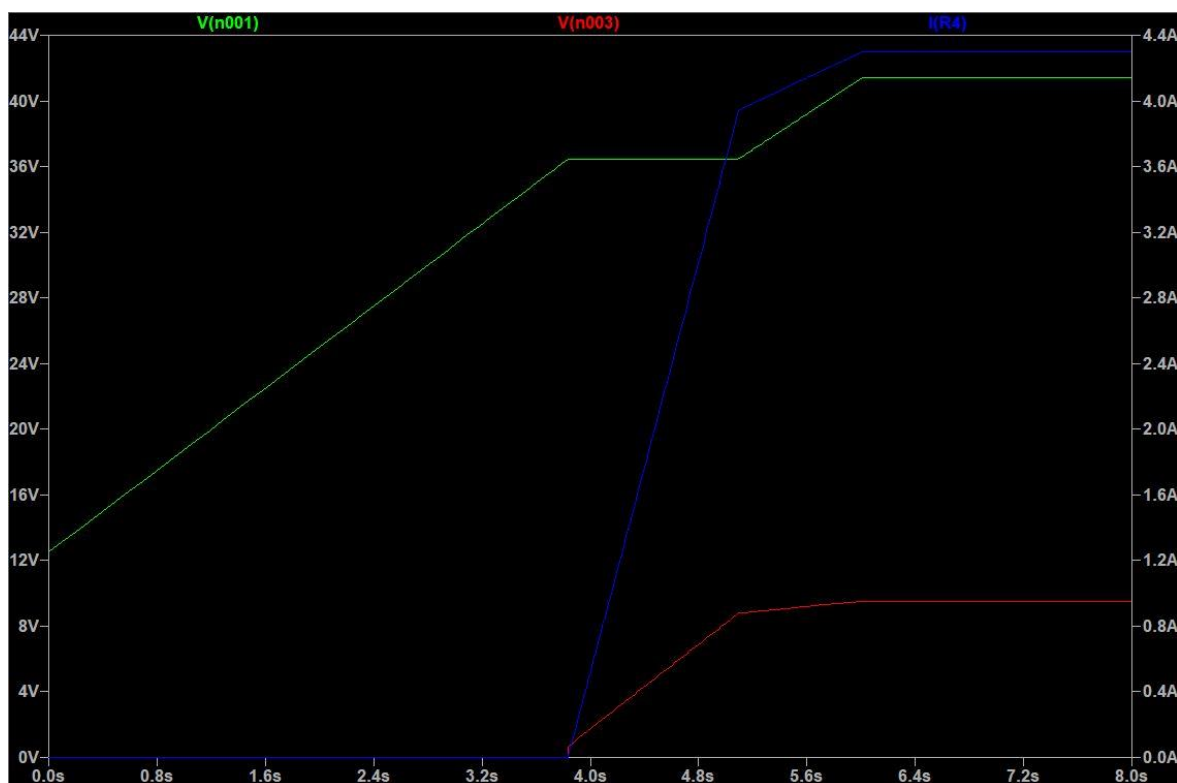
Tabel 6.1. Mõõteskeemi simulatsiooni tulemused erinevate sisendpingete- ja sagedustega

Sisendpinge (V)	Sagedus (Hz)	Faasinihe (°)	Graafikute ajavahe (ms)	Arvutuslik faasinihe (°)
5	10	20	5,1	18,36
5	15	20	3,2	17,28
5	20	20	2,4	17,28
10	10	20	5,5	19,8
10	15	20	3,7	19,98
10	20	20	2,8	20,16
15	15	20	3,7	19,98
15	20	20	3,0	21,6
15	25	20	2,2	19,8

Tabelist võib näha, et tulemused olid etteantud faasinihkest kuni 15% erinevad. Graafikult loetud tulemused on mõnevõrra ebatäpsed ja ümardatud, ent annavad siiski ülevaate skeemi edukast toimivusest. Võime järeldada, et skeemi valitud kondensaatorid ja takistid on õiges suurusjärgus

ning operatsioonvõimendi on piisavalt heade omadustega, et sõltumata sagedusest ja sisendpinge väärtusest suudab väljundpinget muuta kiirelt ja täpselt, nii et mikrokontrolleri digitaalsisend saab lugeda koheselt langeva frondi ajahetke mõlema graafiku kohta. Siiski võib graafikult täheldada, et operatsioonvõimendi väljund muutub nulliks kuni 0,5 ms hiljem kui pinge amplituudväärtuse hetk. Kuna viivitus on ühesugune mõlema väljundi graafiku puhul, siis see faasinihke määramist negatiivselt ei mõjuta. Küll aga tähendab see, et vahelduvvoolu osas pinge ja voolu amplituudväärtuse mõõdetulemused ei ole väga täpsed. Alalisvoolu osas mõõdetud pinge ja vool, mida saab teisendada vahelduvvoolu osasse ja avaldada efektiiv- ja amplituudväärtused, kompenseerivad nimetatud ebatäpsuse.

Simuleeriti ka sisendpinget piirava ahela osa toimivust ja allpool on sellekohase simulatsiooni pinge- ning voolugraafikud (joonis 6.2). Skeemi on valitud takistid ja zener diood selliselt, et 36 V korral hakkaks transistor voolu maha juhtima ja simulatsiooni tulemustest on näha, et skeem toimib.



Joonis 6.2. Sisendpinget piirava ahela osa simulatsiooni tulemus. $V(n001)$ – generaatori väljundpinge, $I(R4)$ – voolutugevus voolu maha juhtival takistil, $V(n003)$ – pingelang voolu mahajuhtival takistil

KOKKUVÕTE

Käesoleva töö eesmärgiks oli välja töötada mikrokontrolleril põhinev vahelduvvoolu mõõtesüsteem, mille alusel koostada mõõteseade vahelduvvoolusuuruste mõõtmiseks generaatori väljundis. Teema valikul lähtuti vajadusest luua generaatorile arvesti, mis suudaks mõõta suuresti muutuvate parameetritega vahelduvvoolu. Töö eesmärgi püstitamisel lähtuti sellest, et müügilolevad kvaliteetsed arvestid on liiga kallid.

Töös uuriti lähedalt vahelduvvoolusuuruste mõõtmise põhimõtteid ja reastati vajalikud mõõtmise toimingud, lähtudes Arduino arendusplatvormi kasutusvõimalustest. Töö keskseks seadmeks olevale arendusplatvormile koostati programm vahelduvvoolu mõõtmiseks ja tulemuste arvutamiseks ning seadme ülejäänud osade funktsioonide ja kasutajaliidese juhtimiseks.

Vahelduvvoolu mõõtmise printsiipe järgides arendati välja elektriskeem, mis toimib suures pinge- ja sagedusvahemikus. Koostatud elektriskeem hõlmab lisaks mõõtesale ka seadme toite, akude laadimise, väljundite juhtimise ja ülepingete maha juhtimise ehk seadme kaitse skeeme. Komponentide hulka valiti mitmeid mikroskeeme nagu muundurid, operatsioonvõimendid ja mõõtekiibid, erinevat tüüpi transistore transistorlülituste jaoks ja kolmafaasiline täisperioodalaldi.

Töö käigus töötati edukalt välja süsteem, mis on võimeline mõõtma kõiki enamlevinud vahelduvvoolu parameetreid ja mõõtetulemustest arvutama vajalikke suurusi. Süsteemi skeemiosade toimivust testiti simulatsioonides ja tulemustest nähtus, et seade toimib ja on mõõtmistes täpne.

Välja töötatud süsteemi alusel ei jõutud ajapuuduse tõttu koostada reaalselt mõõteseadet, sest arendustöö käigus tekkis mitmeid tagasilööke. Erinevate komponentide tootelehtedega tutvumine ja komponentide sobivuse hindamine võttis arvatust kauem aega, planeeritud lahendus ei toimunud simulatsioonis või soovitud komponendid polnud kättesaadavad.

Käesoleva töö tulemusi rakendatakse mõõteseadme jätkuval välja töötamisel. Kui mõõteseadme trükkplaat on koostatud ja komponendid joodetud, saab seadet katsetada ja mõõtesüsteemi vastavalt vajadusele täiustada. Seadme edasiarenduse tulemusel võiks seade olla võimeline vahelduvpinget- ja voolu tiheda ajaintervalli tagant mõõtma, et olla mõõtmistes veelgi täpsem kui praegustes simulatsioonides. Lisaks peaks seade salvestama mõõteandmed mälukaardile, et koguda pikaajalist infot seadme kasutamise kohta. Perspektiivse tootearenduse käigus on tarvis luua seadmele ka korpus ja disain.

SUMMARY

The objective of this work was to develop a microcontroller based AC measuring system, that would be used as a basis for making a device for measuring AC parameters from the output of a generator. The choice of the topic was based on the need to create a power monitor for a generator that would be able to measure an AC with highly variable parameters. The objective of the work was based on the fact that the high quality power monitors on the market are too expensive.

To obtain the desired result of the development, principles of AC measurements were closely studied and the required measurement operations were sequenced, based on the capabilities of the Arduino microcontroller. A program was designed for the Arduino to measure and calculate the AC parameters and to control the other parts of the device, including user interface.

Following the principles of AC measurement, an electrical circuit was developed that operates in a wide voltage and frequency range. In addition to the measuring part, the designed circuit also includes power supply, battery charging, output control and overvoltage control schemes. A number of microcircuits, such as converters, operational amplifiers and measuring chips, different types of transistors for switching and a three-phase full-wave rectifier were selected as components.

As a result of the work, a system was developed that is capable of measuring all the most common AC parameters and calculating the required values from the measurement results. The performance of the system was tested in simulations and the results showed that the device is functioning and the measurements are accurate.

Unfortunately, no real measurement device could be created based on the developed system due to lack of time caused by several setbacks in the development process. Analyzing the product sheets of various components and evaluating the suitability of the components took longer than expected, the planned solutions often did not work in the simulations or the desired components simply were not available in the stores.

The results of this work will be applied to the continuous development of the measuring device. When the printed circuit board of the device is designed and the components soldered to the plate, the device can be tested and the system can be improved if necessary. In the future, the device should be able to measure voltage and current at a very fast rate in order to be even more accurate in the measurements than in the current simulations. In addition, the device must store the measurement data on an external memory card to collect long-term information about the use of the device. It is also necessary to design a housing for the device.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] J. Järvik, ÜIdelektrotehnika. Tallinn: TalTech kirjastus, 2014.
- [2] J. M. Paschal, Jr., EC&M's Electrical Calculations Handbook, The McGraw-Hill Companies, Inc., 2001.
- [3] TalTech, "Mõõtmine - kuues loeng," [2013]. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.martinjott.ee/ttu/iss0050/m66tmine2013-6.pdf>. [Kasutatud 20.03.2019].
- [4] Keysight Technologies, "Make Better AC RMS Measurements with your Digital Multimeter," 2018. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5988-6916EN.pdf>. [Kasutatud 22.03.2019].
- [5] K. Janson, A. Kallaste, Elektrimasinate alused, Tallinn: TalTech kirjastus, 2017.
- [6] A. Kallaste, Aksiaalvooga püsimagnetitega toroidmähisega generaator, magistritöö, Tallinna Tehnikaülikool, 2006.
- [7] Arduino, "Arduino Mega 2560 REV3 tooteleht," 2019. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://store.arduino.cc/mega-2560-r3>. [Kasutatud 15.03.2019].
- [8] K. Leibur, Kolmefaasilise aksiaalvooga sünkroongeneraatori õppemaketi väljatöötamine, bakalaureusetöö, Tallinna Tehnikaülikool, 2017.
- [9] Adafruit, "Adafruit INA219 Current Sensor Breakout," 2019. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://learn.adafruit.com/adafruit-ina219-current-sensor-breakout/arduino-code>. [Kasutatud 15.04.2019].
- [10] Analog Devices, "Power Tracking 2A Battery Charger for Solar Panel," 2010. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/3652fe.pdf>. [Kasutatud 10.03.2019].
- [11] TalTech, "4. Jõupooljuhtmuundurid," 2003. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.ene.ttu.ee/elektriamid/CURENGCOL/4Joupooljuhtmuundurid.pdf>. [Kasutatud 14.04.2019].
- [12] Analog Devices, "17V, 1A Synchronous Step-Down Regulator with 3.5ua Quiescent Current," 2013. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/3621fc.pdf>. [Kasutatud 10.03.2019].

LISAD

Lisa 1 Juhtprogrammi kood vahelduvvooluparameetrite määramiseks

```
const int analogPin6 = A6; // sisendite määramine
const int analogPin5 = A5;
const int opamppingePin=2;
const int opampvooluPin=3;
const float jaotis = 0.0025; // 2.5mV ühe jaotis väärtus, oleneb bittide arvust ja ref.väärtusest
int pingejagur = 0.0294; // pingejaguri suhe
int sisendpingevalue = 0; // muutujad
int suntvalue = 0;
float cosfi; // arvutuste tulemused
float sagedus;
float vool;
float faasinihe;
float pinge;
unsigned long last_interrupt, periood, tvool, tpinge, t_faas; //muutujad

void setup() {
  pinMode(opamppingePin, INPUT); //sisendina digitaalsisend 2
  pinMode(opampvooluPin, INPUT); //sisendina digitaalsisend 3
  Serial.begin(9600);
  analogReference(INTERNAL2V56); // referentspinge määramine 2.56 V peale
  //järgnevad funktsioonid toimuvad langeva frondi korral, ei sõltu toimingute järjestusest
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(opamppingePin), pinge_funkts, FALLING);
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(opampvooluPin), voolu_funkts, FALLING);
}

void loop() {}

void voolu_funkts() {
  tvool = micros(); // mõõdab frondi toimumise aja absoluutväärtuse
  suntvalue = analogRead(analogPin5); // sundi pingelang 20X võimendatuna, bittidena
  vool = (suntvalue * jaotis) / 20 / 0.1 * 0.707; // loetud digitaalväärtuse teisendus voolutugevuseks
}

void pinge_funkts() {
  tpinge = micros(); // mõõdab frondi toimumise aja absoluutväärtuse
  t_faas = tpinge - tvool; // faaside ajaline vahe
  periood = (tpinge - last_interrupt) / 100000; // määrab perioodi pikkuse eelmise frondi alusel
  last_interrupt = tpinge; // uueks perioodiks ettevalmistus
  sagedus = 1 / periood; // arvutab sageduse
  faasinihe = 360 * t_faas / periood; // arvutab faasinihke
  cosfi = cos(faasinihe); // arvutab võimsusteguri
  sisendpingevalue = analogRead(analogPin6); // analoogsisendi mõõtetulemuse lugemine
  pinge = (sisendpingevalue * jaotis) / pingejagur * 0.707; // pinge väärtuse arvutamine
  Serial.print("Pinge: "); Serial.print(pinge); Serial.println(" V"); // kuvab tulemused
  Serial.print("Voolutugevus: "); Serial.print(vool); Serial.println(" A");
  Serial.print("Periood: "); Serial.print((float)periood * 1000, 2); Serial.println(" ms");
  Serial.print("Sagedus: "); Serial.print(sagedus); Serial.println(" Hz");
  Serial.print("Võimsustegur: "); Serial.print(cosfi); Serial.println(" ");
  Serial.print("Faasinihe: "); Serial.print((float)faasinihe, 2); Serial.println(" kraadi");
}
```

Lisa 2 Juhtprogrammi kood alalisvooluparameetrite määramiseks

```
#include <Wire.h> //kasutatakse olemasolevat library't SCL ja SDA liideste kohta
#include <Adafruit_INA219.h> //kasutatakse olemasolevat library't INA219 kiibi kohta
Adafruit_INA219 ina219;

void setup(void)
{
  Serial.begin(9600);
  while (!Serial) {
    // ootab kuni Serial Monitor on avatud
    delay(1);
  }
  uint32_t currentFrequency;
  // Automaatselt on kasutusel kõige laiem mõõtepiirkond (32V, 2A)
  ina219.begin();
  // Täpsema voolutugevuse piirkonna saab valida (32V, 1A) järgmise käsklusega:
  //ina219.setCalibration_32V_1A();
  // Veelgi täpsema mõõtepiirkonna nii pinget kui voolu osas (16V, 400mA) saab:
  //ina219.setCalibration_16V_400mA();
  Serial.println("Mõõdetakse pinget ja voolu INA219 kiibiga ...");
}

void loop(void)
{
  float shuntvoltage = 0;
  float busvoltage = 0;
  float current_mA = 0;
  float loadvoltage = 0;
  float power_mW = 0;
  float energy_Wh = 0;
  unsigned long intervall;

  //järgmiste käsklustega tuuakse INA219 library'st mõõteandmed Arduinosse
  shuntvoltage = ina219.getShuntVoltage_mV();
  busvoltage = ina219.getBusVoltage_V();
  current_mA = ina219.getCurrent_mA();
  power_mW = ina219.getPower_mW();

  //arvutatakse pingelang koormusel ja koormusel tarbitav energia
  loadvoltage = busvoltage + (shuntvoltage / 1000);
  intervall=micros();
  energy_Wh = energy_Wh+(power_mW/1000)*(intervall/1000000/60/60); //iga 20ms tagant arvutatakse energia

  // järgmiste käsklustega kuvatakse Serial Monitoris mõõtetulemused
  Serial.print("Pinget: "); Serial.print(busvoltage); Serial.println(" V");
  Serial.print("Pingelang sundil: "); Serial.print(shuntvoltage); Serial.println(" mV");
  Serial.print("Pingelang koormusel: "); Serial.print(loadvoltage); Serial.println(" V");
  Serial.print("Voolutugevus: "); Serial.print(current_mA); Serial.println(" mA");
  Serial.print("Võimsus: "); Serial.print(power_mW); Serial.println(" mW");
  Serial.print("Energia: "); Serial.print(energy_Wh); Serial.println(" mWh");
  Serial.println("");
  delay(2000); //mõõtetulemuste kuvamise vaheline viide
}
```