EESTI MAAÜLIKOOL

Metsanduse ja inseneeria instituut

Rene Lelov

VÄIKESE VÕIMSUSEGA MOOTORI KOORMUSSTENDI ESKIISPROJEKT

SKETCH PROJECT OF LOW POWER ENGINE LOAD BENCH

Bakalaureusetöö

Tehnika ja tehnoloogia õppekava

Juhendajad: Janar Kalder, *PhD*

Roland Allmägi, *MSc*

Risto Ilves, *PhD*

Tartu 2023

LÜHIKOKKUVÕTE

www.emu.ee
Eesti Maaülikool
Estonian University of Life Sciences

Eesti Maaülikool Fr. R. Kreutzwaldi 1, Tartu 51006		Bakalaureusetöö lühikokkuvõte	
Autor: Rene Lelov		Õppekava: Tehnika ja tehnoloogia	
Pealkiri: Väikese võimsusega mootori koormusstendi eskiisprojekt			
Lehekülgi: 46	Jooniseid: 21	Tabeleid: 2	Lisasid: 2
Osakond / Õppetool: Energiakasutuse õppetool ETIS-e teadusvaldkond ja CERC S-i kood: 4. Loodusteadused ja tehnika 4.8. Elektrotehnika ja elektroonika T190 Elektrotehnika Juhendaja(d): Janar Kalder PhD, Roland Allmägi MsC ja Risto Ilves Phd Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu 2023			

Mootorite koormusstendid on auto- ja masinatööstuses väga tähtsa rolliga. Nende abil saab hinnata mootori karakteristikuid erinevates töötingimustes. Enamik tööstuses olevad koormusstendid on võimsad ja kulukad. Suure võimsusega kaasneb mõõteviga, mis väiksemate mootorite testimisel võib ületada mootori enda võimsust.

Lõputöö eesmärk on projekteerida võimalikult kättesaadavate vahenditega väikese võimsusega mootori koormusstend. Stend peab olema suuteline koormata mistahes testitavat katsemootorit, mille võimsus ei ületa stendi võimsust ja pöörlemissagedust 6000 min^{-1}. Töö raames loodi koormusstendi tööks vajalikud süsteemid ja seletati lahti nende tööpõhimõtted. Lõputöö tulemusena loodi tehnilised lahendused koormusstendi konstrueerimiseks. Töö viimases osas kontrolliti arvutuste paikapidavust ning loodi kättesaadavate vahenditega üks koormusstendi lihtsustatud süsteem.

Märksõnad: koormamine, katsetamine, elektrimootor, mikrokontroller

ABSTRACT

www.emu.ee
Eesti Maaülikool
Estonian University of Life Sciences

Estonian University of Life Sciences Fr. R. Kreutzwaldi 1, Tartu 51006		Abstract of Bachelor's Thesis	
Author: Rene Lelov		Curriculum: Engineering	
Title: Sketch Project of Low Power Engine Load Bench			
Pages: 46	Figures: 21	Tables: 2	Appendixes: 2
Department / Chair: Chair of Energy Application Engineering Field of research and (CERC S) code: 4. Natural Sciences and Engineering 4.8. Electrical Engineering and Electronics T190 Electrical engineering Supervisors: Janar Kalder PhD, Roland Allmägi MsC ja Risto Ilves PhD Place and date: Tartu 2023			
Engine load benches play a very important role in the automotive and machinery industry. They can be used to evaluate the characteristics of the engine in different operating conditions. Most load benches in the industry are powerful and costly. High power comes with measurement error, which can exceed the power of the engine itself when testing smaller engines. The aim of the thesis is to design a load bench for a low power engine with the most available means. The load bench must be capable of loading any test engine whose power does not exceed the power of the bench and RPM of 6000. As part of the work, the systems necessary for the operation of the load bench are created and their working principles are explained. As a result of the thesis, technical solutions were created for the construction of the load bench. In the last part of the work, the validity of the calculations was tested and a simplified load bench system was created with the available tools.			
Keywords: loading, testing, electric motor, microcontroller			

SISUKORD

LÜHIKOKKUVÕTE 2

ABSTRACT 3

SISSEJUHATUS 6

1. KOORMUSSTENDIDE ÜLEVAADE 7

1.1. Koormusstendid sisepõlemismootoritele 7

1.2. Sõidukite koormusstendid 8

1.3. Koormusstendide liigitamine koormuse tüübi järgi 9

1.3.1. Prony piduri dünamomeeter 9

1.3.2. Pöörisvoolu dünamomeeter 10

1.3.3. Hüdrauliline dünamomeeter 11

1.3.4. Vahelduvvoolu dünamomeeter 12

2. KOORMUSSTENDI PROJEKTEERIMINE 14

2.1. Katsemootori kirjeldus ning tehnilised tingimused 14

2.2. Nõuded koormusstendile 14

2.3. Dünamomeetri valik 14

2.4. Koormusstendi süsteemid 22

2.4.1. Väikepinge süsteem 22

2.4.2. Madalpinge süsteem 23

2.4.3. Juhtimissignaalide süsteem 28

3. KOORMUSSTENDI KATSETAMINE 30

3.1. Koormussüsteemi konstrueerimine 30

3.2. Koormussüsteemi katsetamine 33

3.3. Katse analüüs 36

KOKKUVÕTE 37

KASUTATUD KIRJANDUS 38

LISAD 40

Lisa A tehnilised joonised 41

Lisa B. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta……..46

SISSEJUHATUS

Mootorite koormusstendid mängivad väga tähtsat rolli mootorite karakteristikute hindamisel nii auto- kui ka masinatööstuses. Koormusstendid on süsteemid, mis võimaldavad testida mootoreid erinevates tingimustes ja hinnata nende võimsuslikke ning ökonoomsuslikke omadusi. Tänu koormusstendidele on võimalik simuleerida tegelikke tööolusid, millega mootor võib oma eluea jooksul kokku puutuda. Testimisega on võimalik ennetada potentsiaalseid vigu või defekte, mis võivad reaalsetes rakendustes esineda.

Lõputöö eesmärgiks on projekteerida katsestend, mis võimaldab läbi viia mootori katseid väikese võimsusega mootoritel. Eraisikuna võib mootori koormusstendi hankimine olla üsnagi raske või kulukas. Seetõttu on lisaeesmärgiks projekteerida stend võimalikult kättesaadavate vahenditega.

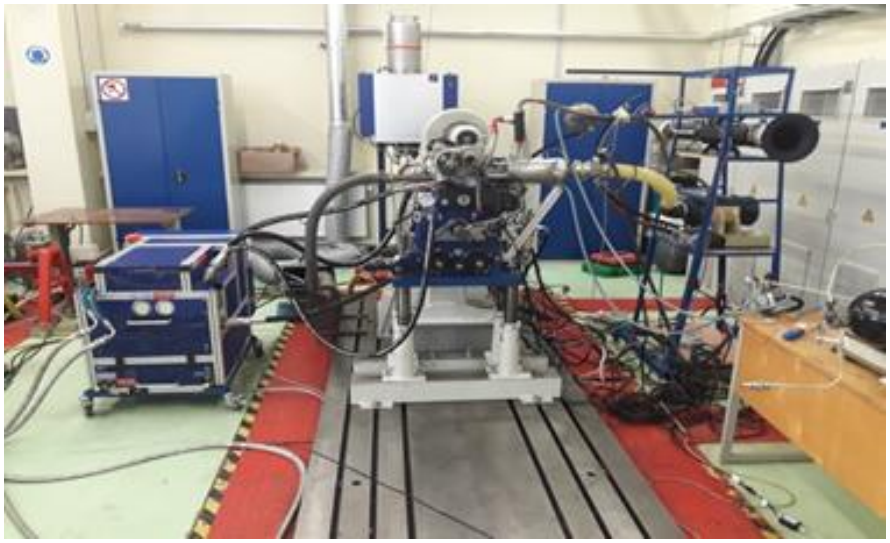
Katsestende võib katse kestuse põhjal jaotada kaheks, on lühiajalisteks katseteks ja pikemaajalisteks katseteks mõeldud stende. Lühiajaliseks katsetamiseks mõeldud stendidega saab kiirkorras teada mootori võimsuslikud näitajad. Pikemaajalisteks katseteks mõeldud stendide korral simuleeritakse mootorile pikaajalist kasutust. Pikemaajaline koormus sisepõlemismootoritel on näiteks veorattad, mida mootor peab ringi ajama. Võimsuse ja pöördemomendi leidmiseks peab stend suutma mootorit piisavalt koormata ja osutatud koormust mõõta. Võimsate koormusstendide puhul on nende võime suurt koormust esitada ka nende negatiivseks omaduseks. Nimelt suure pidurdusvõimsusega kaasneb ka suurem mõõteviga, mis väiksemate mootorite koormamisel võib ületada mootori enese võimsust.

Lõputöö teoreetilise osa raames antakse ülevaade erinevatest koormusstendidest ja nende tüüpidest. Praktilises osas projekteeritakse koormusstendi erinevad süsteemid ning osaliselt ka katsetatakse neid.

1. KOORMUSSTENDIDE ÜLEVAADE

1.1. Koormusstendid sisepõlemismootoritele

Sisepõlemismootorite koormusstendid (vt ***Joonis 1***) on seadmed, mis võimaldavad mõõta ja analüüsida mootorite tööd erinevate koormuste all. Koormusstendid koosnevad tavaliselt dünamomeetrist, erinevatest sensoritest ja juhtimisseadmetest ning jahutussüsteemist. Dünamomeetri ülesanne on mõõta mootori pöördemomenti ja pöörlemissagedust. Lisaks mõõdetakse anduritega mootori kütusekulu, heitgaaside koostist, temperatuuri ning õhurõhku.. Juhtimisseadmetega simuleeritakse mootoritele erinevaid võimalikke koormusi, milleks võivad olla näiteks kiirendamine, pidurdamine ja lisaks temperatuuri muutused Mootori testimine koormusstendi peal on vajalik, kuna see annab aimu võimalikest probleemidest ja piirangutest, mis mootoril võib töö käigus esineda. Karakteristikuid hinnates saab valida sobiva ülesande jaoks sobiva mootori.[1, 2]



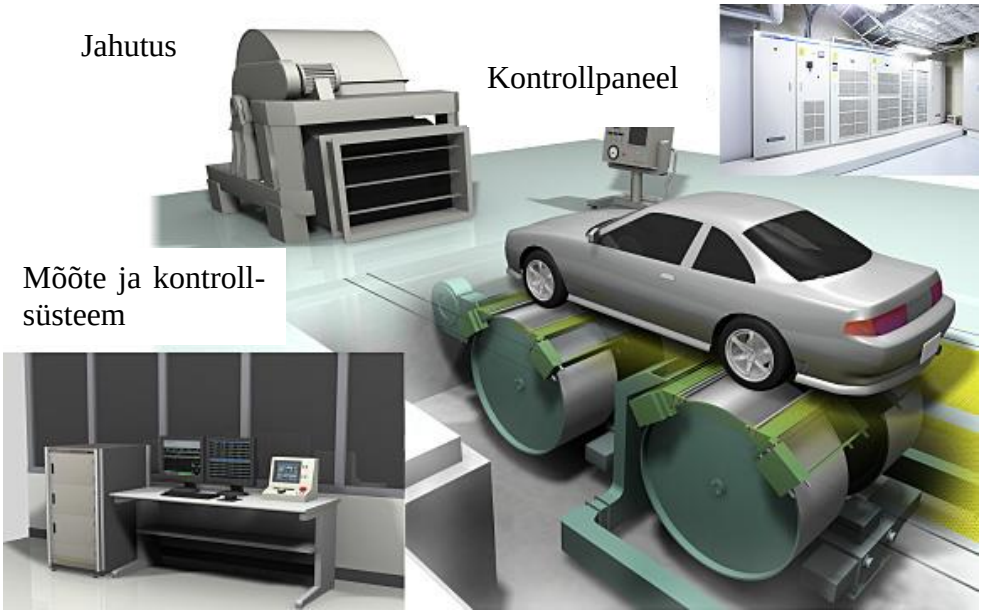
Joonis 1. Sisepõlemismootori koormusstend. [3]

Dünamomeetrid on kõik ehitatud erinevalt, kuid kõik sisaldavad samu põhikomponente [2]:

- Ühendusmuhv (ingl *coupling*) ühendab kahte võlli, et nende jõudu oleks võimalik edasi kanda. Ühendused ühendavad kaks pöörlevat komponenti võimaldades samal ajal teatud nihet ja/või otsa liikumist;
- Tahhomeeter mõõdab pöörleva võlli külge ühendatuna mootori pöörlemissagedust;
- Andmete kogumise süsteem koosneb kahest osast, juhtarvutist ja tööjaamast. Juhtarvuti ja tööjaam omavahel ühendatud andmesidekaabliga. Tööjaamaga juhitakse mootori kiirendust, pidurdamist ja koormust, lisaks saadetakse mõõdetud andmed juhtarvutisse hoiustamiseks ja analüüsimiseks.

1.2. Sõidukite koormusstendid

Sõidukite koormusstendid (vt ***Joonis 2***) on seadmed, mis võimaldavad testida sõidukite tööd erinevates kontrollitud tingimustes. Selliste koormusstendidega on kõik autoomanikud tuttavad, kuna tehnoülevaatuse ajal testitakse mitmeid auto karakteristikuid selle peal. Koormusstendiga on võimalik simuleerida erinevaid tee- ning ilmastikuolusid. Stendi ülesehitus on üsna sarnare mootori koormusstendile, kuid dünamomeeter on asetatud sõiduki alla ning mõõdab hoopis sõiduki ratastest tulevat pöördemomenti. Sõidukite koormusstendiga mõõdetakse auto kiirendamist, tippkiirust, pidurdamist ja kütusekulu.[4, 5]



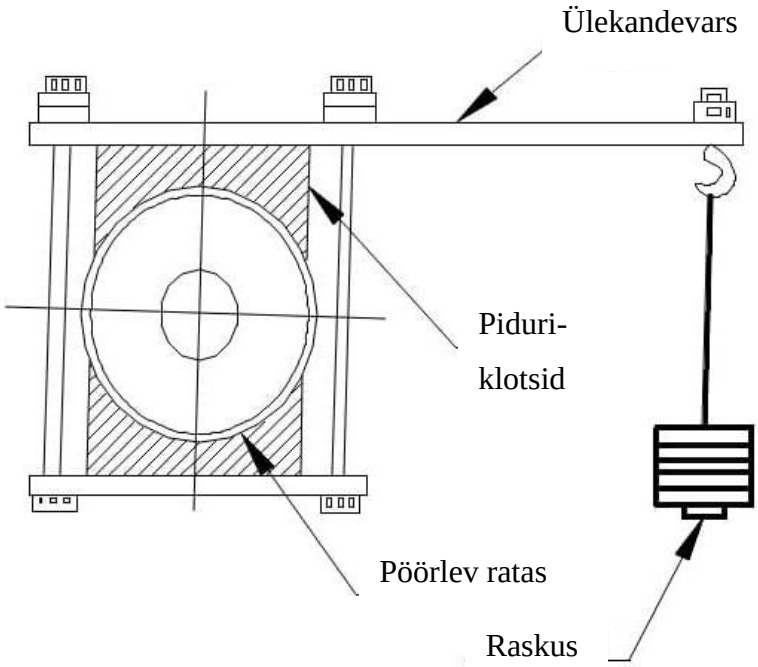
Joonis 2. Sõiduki koormusstend.[4]

1.3. Koormusstendide liigitamine koormuse tüübi järgi

Koormusstendide üks tähtsaim osa on nende nimest tulenev koormus. Koormus tekitatakse dünamomeetriga ja olenevalt kasutusest, esineb mitmeid liiki dünamomeetreid. Selle lõputöö raames on keskendutud mootorite dünamomeetritele.

1.3.1. Prony piduri dünamomeeter

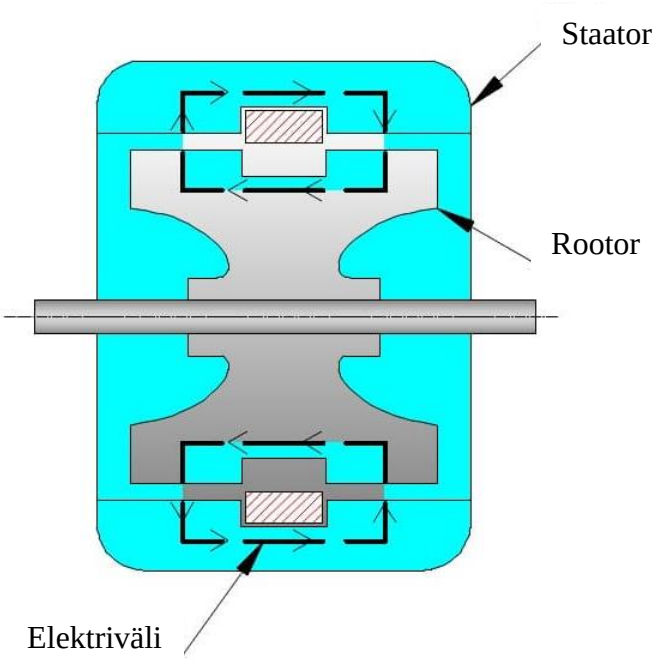
Prony pidur (ingl *Prony brake*) on leiutatud Gaspard de Prony poolt esimese tööstus-revolutsiooni alguses ja on üks esimesi ning lihtsamaid dünamomeetreid(vt ***Joonis 3***). See koosneb piduriklotsidest, mis suruvad mootori külge ühendatud pöörlevat ratast. Pidurdusjõud avaldub, kui mõõdetakse piduriklotsidele survestatud jõudu. [5, 6]



Joonis 3. Prony pidur.[5]

1.3.2. Pöörisvoolu dünamomeeter

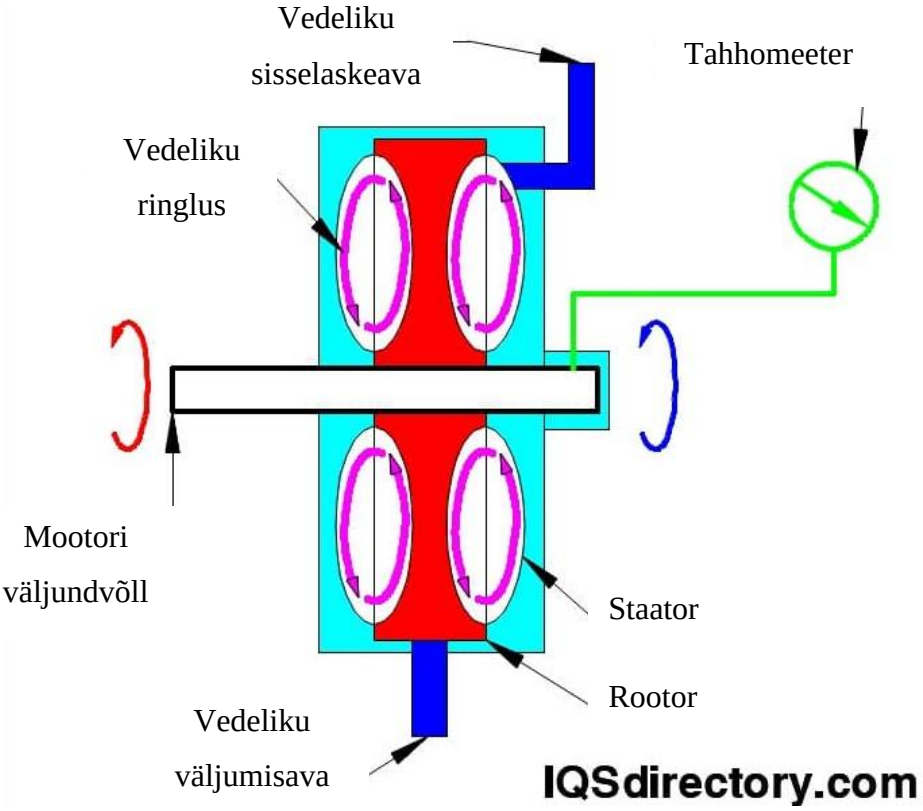
Pöörisvoolu dünamomeeter (ingl *Eddy Current dynamometer*) tekitab mootorile elektriliselt koormust. Dünamomeetri rootori külge (vt ***Joonis 4***) on ühendatud mootorist tulev väljundvõll. Võlli ja rootori pöörlemisel rakendatakse staatorile pinget. Tekkiv magnetvoog katkestatakse rootori poolt. Rootoris tekib pöörisvool, mis on vastupidine magnetvoo muutusele. Rootor üritab piirata ning vähendada pöörlemiskiirust, samal ajal kui mootor hoiab oma pöörlemiskiirust pöördemomendi abil. Kuna pidurdamine toimub elektriliselt, siis eraldub selle käigus palju soojust. Selle tõttu vajab see dünamomeeter head jahutussüsteemi. Tekkivat pöördemomenti mõõdab pöörisvoolu dünamomeeter.[2, 5]



Joonis 4. Pöörisvoolu dünamomeeter.[5]

1.3.3. Hüdrauliline dünamomeeter

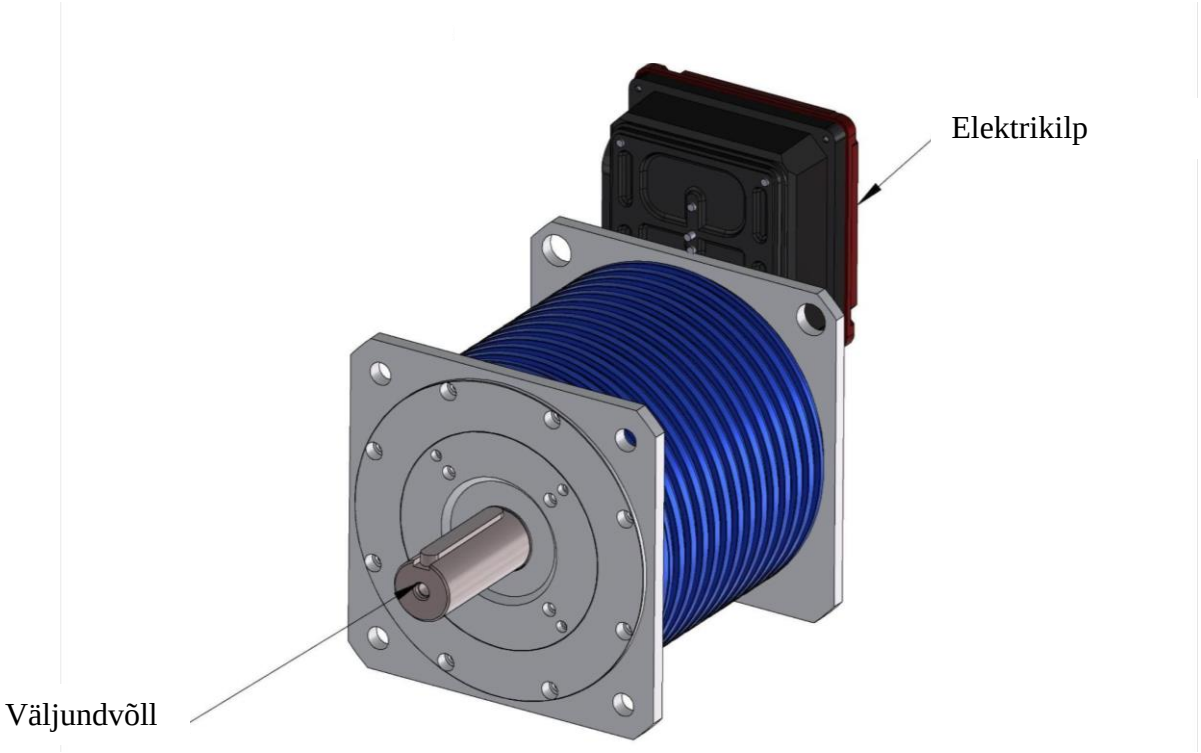
Hüdrauliline dünamomeeter (vt ***Joonis 5***) koosneb poolringikujulistest labadest, mis on rootori ja staatori küljes. Sarnaselt pöörisvoolu dünamomeetrile on mootori väljundvõll ühendatud hüdraulilise dünamomeetri rootori külge. Vedelik voolab läbi labade keerises ning tekitab korpuses pöördemomenti. Tekkivat pöördemomenti mõõdetakse koormusanduriga. Kuna koormuse osutamine toimub vedelikuga, milleks standardselt on vesi, siis vajab dünamomeeter pidevat veevarustust, kuid selle tulemusena ei vaja see eraldi jahutussüsteemi.[2, 5, 6]



Joonis 5. Hüdrauliline dünamomeeter.[5]

1.3.4. Vahelduvvoolu dünamomeeter

Vahelduvvoolu dünamomeeter (ingl *Alternating Current dynamometer*) kasutab vahelduvvoolu mootorile koormuse osutamiseks(vt ***Joonis 6***). Enamasti kasutatakse koormamiseks elektrimootorit, mille väljundvõll ühendatakse testitava mootori väljundvõlliga, läbi mille osutatakse ja mõõdetakse kasutatavat jõudu. Osutatavat pidurdusjõudu juhitakse vahelduvvoolu sageduse muutmisega läbi sagedusmuunduri, . Olenevalt konfiguratsioonist on võimalik elektrimootorit kasutada ka generaatorina, mille tulemusena on vahelduvvoolu dünamomeeter väga mitmekülgsete kasutusvõimalustega. [5, 7]



Joonis 6. Vahelduvvoolu dünamomeeter. [5]

2. KOORMUSSTENDI PROJEKTEERIMINE

2.1. Katsemootori kirjeldus ning tehnilised tingimused

Katsemootoriks on ette nähtud mistahes energiaallikaga mootor, olgu see sisepõlemismootor, elektrimootor, hüdro- või pneumomootor, millel on jõu edastamiseks olemas pöörlev võll. Katsemootori nimivõimsus ei tohi ületada stendi enda võimsust.

2.2. Nõuded koormusstendile

Koormusstend peab suutma:

1) vedada ringi katsemootorit katseplaanis etteantud pöörlemissagedusel;
2) osutama katsemootorile koormust;
3) mõõta koormamisele kuluvat energiat, et seeläbi oleks võimalik leida katsemootori pöördemoment ja võimsus.

2.3. Dünamomeetri valik

Konstrueeritava koormusstendi eesmärgiks on väiksemate mootorite testimine ning seetõttu on vaja valida selleks sobiv dünamomeeter. Antud töö jaoks otsustati kasutada vahelduvvoolu dünamomeetrit, kuna seda on võrreldes teiste dünamomeetritega lihtsam ja odavam konstrueerida. Vahelduvvoolu dünamomeetri võimsus sõltub sinna paigaldatavast elektrimootorist ja sellele ühendatud koormusest. Elektrimootor on hea valik, kuna seda saab iseseisvalt käitada ning kasutada katsetatava mootori ringivedamiseks. See on oluline sisepõlemismootorite testimisel, kuna sisepõlemismootor peab esmalt töötama tühikäigul ja alles pärast seda saab sellele osutada koormust. Eesti Maaülikooli Tehnikamaja mootorite

katselaboris oli paar elektrimootorit kasutuseta jäänud ning selle töö raames otsustati neid rakendada.

Mootorilaboris oli olemas üks vana venekeelse tekstiga kolmefaasiline asünkroonmootor. Selle mootori kohta ei olnud olemas muud infot peale selle, mis spetsifikatsioonisildi peal kirjas oli (vt ***Joonis 7***).

Joonis 7. Vana venekeelse tekstiga kolmefaasiline asünkroonmootor.

Spetsifikatsioonisildi pealt saab välja lugeda:

- Mootori võimsus on 5.5 kW
- Mootori IP kaitseaste on 44
- Mootor on mõeldud töötama sagedusega 50 Hz
- Mootori mähised on tähtühenduses
- Mootori nimipinge on 380 V
- Mootori täiskoormuse vool on 11 A
- Mootori pöörlemissagedus täiskoormusel on 1425 1/min
- Mootori kasutegur on 85.5 %
- Mootori võimsustegur on 0.86

Mootori korrasoleku hindamiseks ühendati see Mitsubishi FR-F700 sagedusmuunduri külge (vt ***Joonis 8***), mille kaudu sai muuta mootori pöörlemissagedust.

Joonis 8. Mitsubishi FR-F700 sagedusmuundur.

Pöörlemissagedust mõõdeti UNI-T UT372 tahhomeetriga erinevatel sagedustel nii päri- kui vastupäeva (vt ***Joonis 9***). Mõõtmisi alustati 5 hertsist ja liiguti edasi viieste intervallidega kuni 100 hertsini.

Joonis 9. UNI-T UT372 tahhomeeter.

Mõõdetud tulemused on välja toodud Tabel 1.

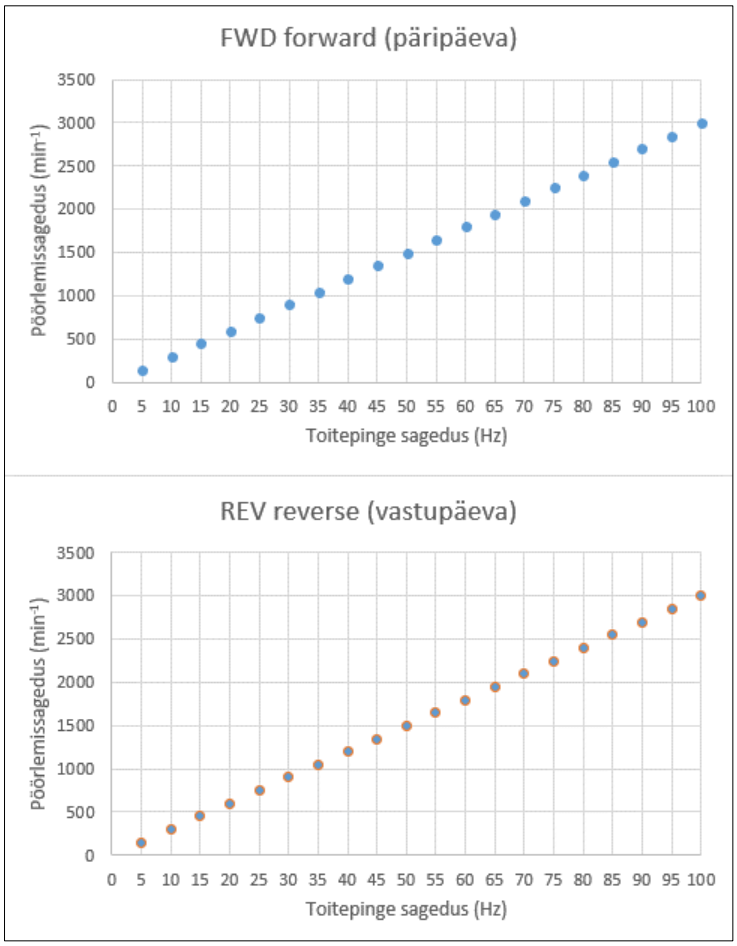
Tabel 1. Vana asünkroonmootori pöörlemissagedus erinevatel sagedustel

1	2	3
Sagedus Hz	Pöörlemissagedus FWD päripäeva min^{-1}	Pöörlemissagedus REV vastupäeva min^{-1}
5	149	149
10	298	299
15	449	449
20	599	599
25	750	749
30	899	899
35	1049	1049
40	1199	1199
45	1349	1349
50	1499	1499
55	1649	1649
60	1799	1799
65	1949	1949
70	2099	2098
75	2249	2248
80	2398	2398
85	2549	2548

Tabeli 1. järg

1	2	3
Sagedus Hz	Pöörlemissagedus FWD päripäeva min^{-1}	Pöörlemissagedus REV vastupäeva min^{-1}
90	2698	2698
95	2848	2847
100	2997	2997

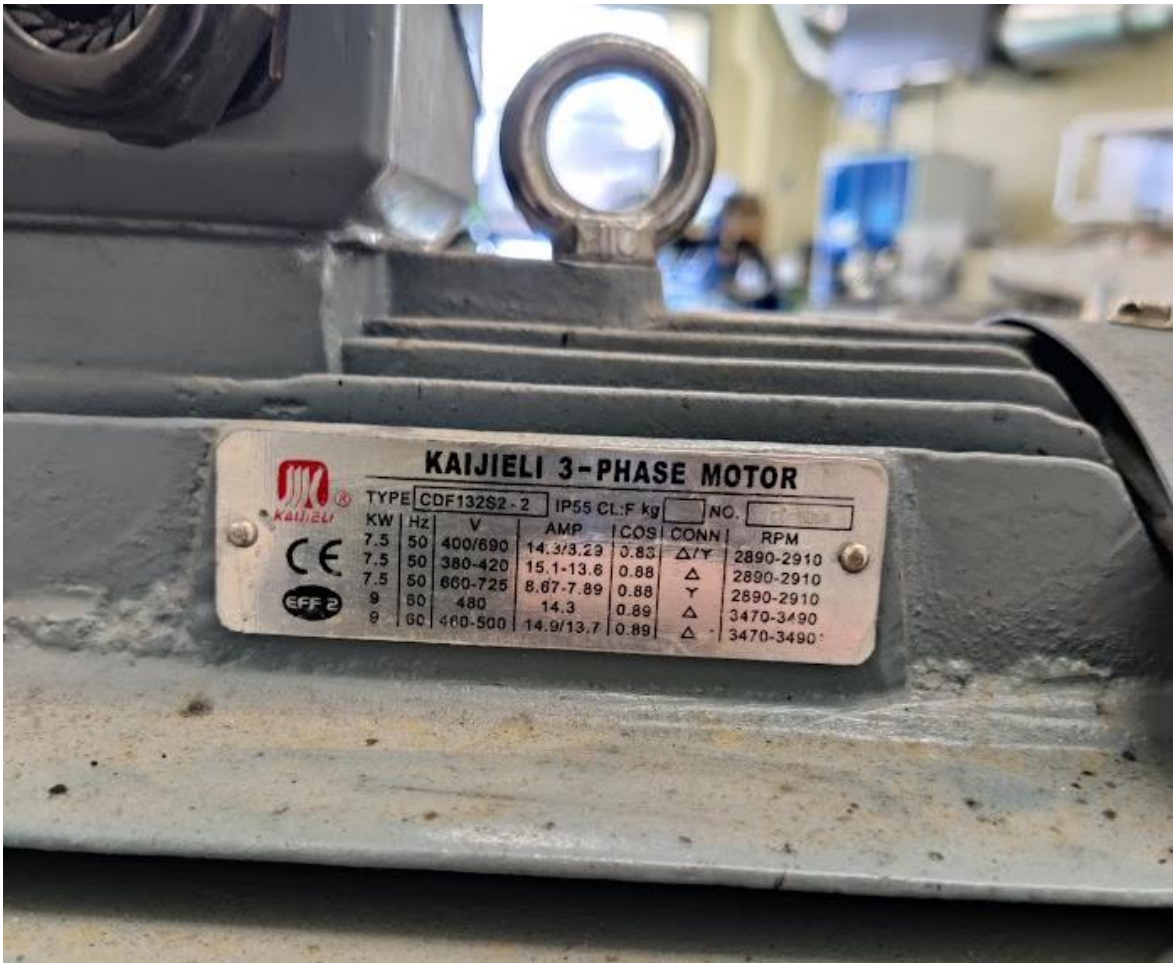
Analüüsides mõõdetud tulemusi selgub, et iga 5 hertsi kohta tõuseb pöörlemissagedus lineaarselt umbes 150 min^{-1}. Mõõdetud pöörlemissagedus 50 hertsi juures on kõrgem, kui spetsifikatsioonis on antud. Vastupäeva pööreldes tekib kõrvalekalle umbes 10 hertsi võrra varem kui päripäeva pööreldes. Parema visuaalse ülevaate saamiseks on mõõtetulemused esitatud graafiliselt **Joonis *10***.



Joonis 10. Pöörlemissagedus erinevatel toitepinge sagedustel.

Selle mootori pöörlemissagedus kasvab lineaarselt, mis ütleb et see on töökorras. Küll aga on kontrollitud mootoril mõned miinused. Nimelt on see mootor tähtühenduses ja seda ei saa muuta, kuna osad mähiste on mootori korpuse sees. Lisaks on mootor on vanemapoolne ning selle elueas ja töökindluses ei saa kindel olla.

Mootorilaboris oli kasutuseta ka teine kolmefaasiline asünkroonmootor. See mootor on uuem ja võimsam KAIJIELI mootor (vt ***Joonis 11***).



Joonis 11. KAIJIELI kolmefaasiline asünkroonmootor.

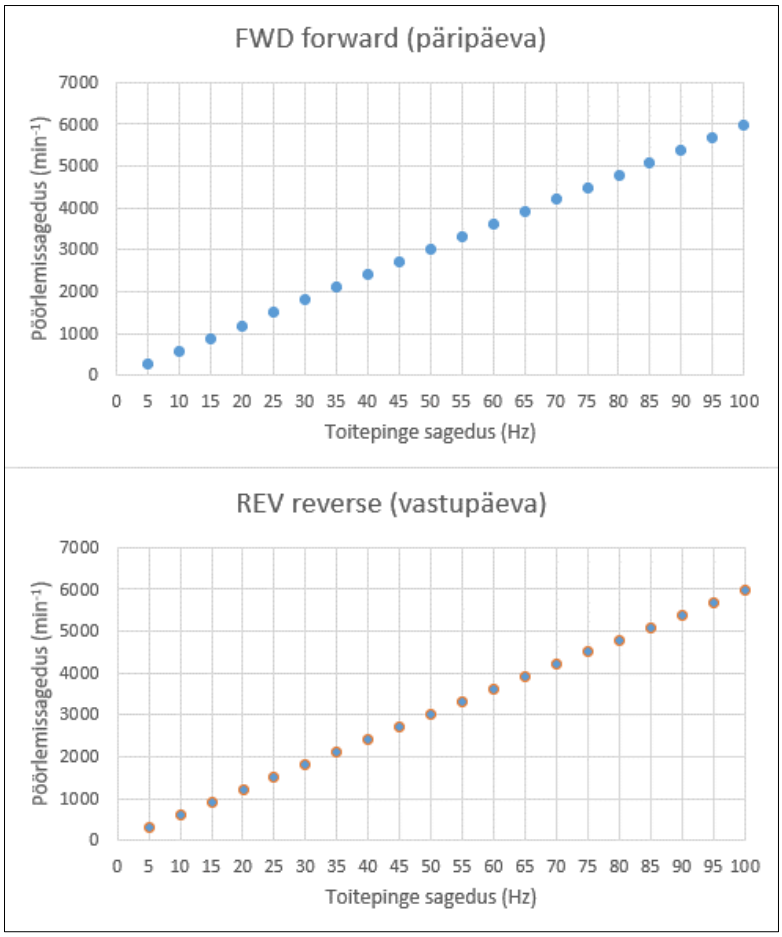
Selle mootori info piirdus samuti kahjuks ainult spetsifikatsioonisildiga, aga selle pealt on näha, et sellel on palju rohkem seadistamise võimalusi. Seda mootorit saab ühendada nii täht- kui ka kolmnurkühendusse, mis on suureks eeliseks. Samuti on võimalik seadistada mootori nimipöörlemissagedust vastavalt ühenduse tüübile. Kuna eesmärgiks on saada võimalikult võimas mootor, siis on see ühendatud kolmnurkühendusse 480 voldise nimipingega.

Mootori testimiseks kasutati sama sagedusmuundurit ja tahhomeetrit, mida kasutati eelneva mootori puhul. Mõõtmised teostati samadel sagedustel ja pöörlemissuundadel ning on välja toodud Tabelis 2.

Tabel 2. Uuema asünkroonmootori pöörlemissagedus erinevatel sagedustel

Sagedus Hz	Pöörlemissagedus FWD forward min^{-1}	Pöörlemissagedus REV reverse min^{-1}
5	282	294
10	574	590
15	884	892
20	1189	1194
25	1493	1495
30	1795	1796
35	2096	2097
40	2397	2397
45	2697	2697
50	2997	2998
55	3297	3297
60	3596	3596
65	3895	3895
70	4193	4194
75	4489	4493
80	4787	4791
85	5085	5087
90	5383	5385
95	5679	5681
100	5976	5978

Analüüsides saadud tulemusi on näha, et iga 5 hertsi kohta tõuseb pöörlemissagedus umbes 300 pööret/min. Sellest trendist hakkab suurem kõrvalekalle tekkima umbes 50 hertsi juures. Mõõdetud pöörlemissagedus on 60 hertsi juures kõrgem, kui on mootori nimipöörlemissagedus etteantud ühendustüübi ja toitepinge korral. Toitepinge sageduse ja mootori pöörlemissageduse omavahelise lineaarsuse hindamiseks on mõõdetud tulemused kuvatud **Joonis *12*Joonis *12***.



Joonis 12. Pöörlemissagedus erinevatel toitepinge sagedustel.

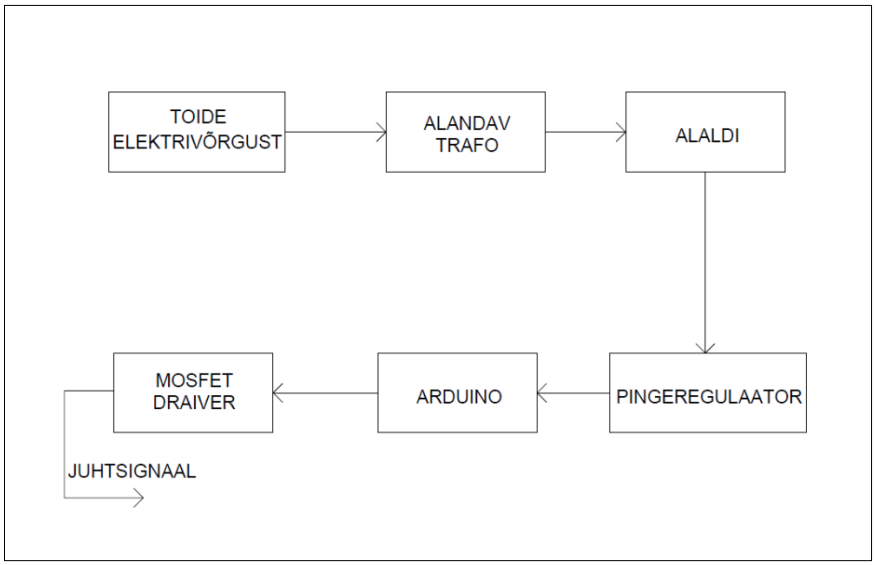
Nagu jooniselt välja tuleb, kasvab pöörlemissagedus lineaarselt. See tähendab et mootor on töökorras ja sobib kasutamiseks. Koormusstendi jaoks hakkab olema see mootor koormuseks, sest suudab umbes sama suuruse ja kaalu juures osutada rohkem koormust kui teine elektrimootor. Lisaks on nimipöörlemissagedus sama toitepinge sageduse korral suurem.

2.4. Koormusstendi süsteemid

Projekteeritava koormusstendi ülesanne on osutada koormust väikese võimsusega mootorile. Ülesande täitmiseks peab stendil olema võimekus lugeda andmeid ja saadud andmetest sõltuvalt korrigeerida osutatavat koormust. Kogu süsteemi tööks on tarvis mitmeid erinevaid alasüsteeme. Eraldi tuuakse välja madalpinge, väikepinge, juhtimissignaalide süsteemid, kuna see annab parema ülevaate ja arusaamise seadme tööpõhimõttest.

2.4.1. Väikepinge süsteem

Stendi juhtseadmeks valiti Arduino, sest autor on selle mikrokontrolleriga varasemalt kokku puutunud ja seda on lihtne programmeerida. Arduino loeb pöörlemissagedust, pinget, voolu ja läbi selle juhib koormuse osutamist. Kõiki juhtimiseks vajalikke komponente toidetakse väikepingega ja hoitakse madalpinge süsteemist eraldatuna. Juhtimisskeem on välja toodud ***Joonis 13***.



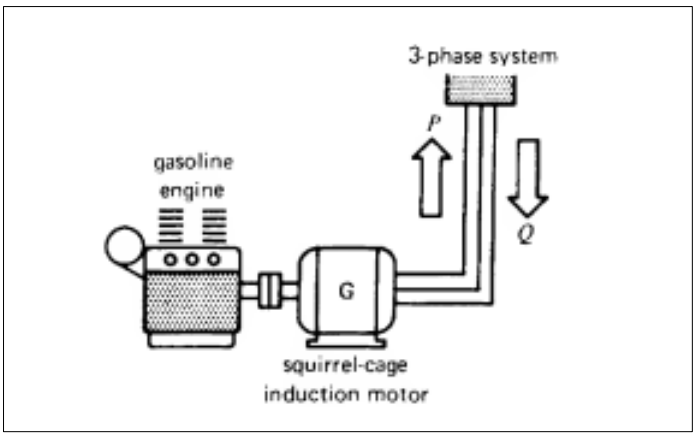
Joonis 13. Juhtimisskeem.

Juhtimissüsteem on ette nähtud olema pideva toitega. Toiteallikaks on valitud elektrivõrgust võetav vahelduvvool, mis alandatakse trafoga madalamaks. Alandatud vool muundatakse alaldiga seejärel alalisvooluks, et oleks võimalik seda kasutada elektroonikakomponentide toitena. Pärast alaldit on paigutatud pingeregulaator, mis tagab komponentidele vajaliku toitepinge 8 V. Arduino mikrokontroller hakkab sisendist tulenevalt genereerima pulsilaius-modulatsioon (PLM) signaali, mis edastatakse isoleeritud paisuga väljatransistori (MOSFET) draiverile. MOSFET draiveri sisendiks on PLM signaal, kuhu on lisaks ühendatud pingenivoo tõstmise (Pull-up) takisti. Takisti tagab MOSFET draiverile pideva signaali juhuks, kui PLM signaali ei genereerita. MOSFET draiveri väljundiks on juhtsignaal, millega juhitakse koormuse osutamist. Täpsustavad joonised juhtimissüsteemi kohta on leitavad **Lisa A** alt.

2.4.2. Madalpinge süsteem

Ühes eelnevas peatükis sai valitud koormuse osutajaks KAIJIELI elektrimootor. Selleks, et elektrimootor osutaks katsemootorile koormust, peab seda kasutama generaatorina. Elektrimootorit saab kasutada generaatorina, kui kasutada seda nii-öelda tagurpidi. See tähendab, et katsemootor veab elektrimootori rootorit ringi, selle tulemusena indutseeritakse staatoris pinge ja elektrimootor genereerib elektrit. Koormuse osutamiseks peab mingi tarbija seda elektrit kulutama. Tarbijateks võivad näiteks olla lambid, energiasalvestid või soojusvahetid. Koormussüsteemis on pinged võrreldes juhtimissüsteemiga palju kõrgemad, mistõttu võetakse seda eraldi madalpinge süsteemina.

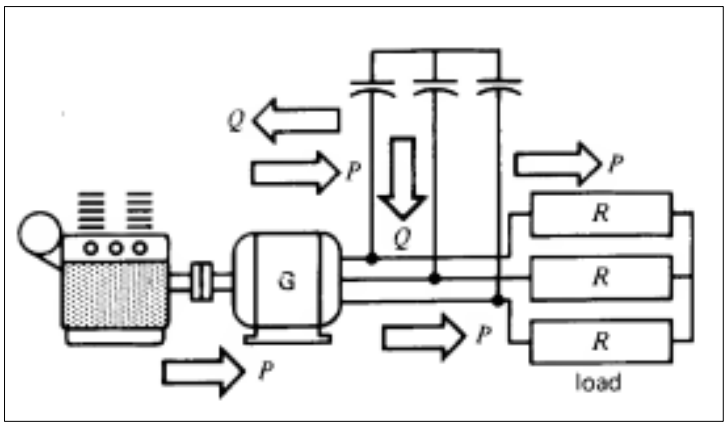
Elektrimootor saab generaatorrežiimis genereerida elektrit mitmel moel. Esiteks võib generaator olla ühendatud elektrivõrku ning genereerib sinna elektrienergiat (vt ***Joonis 14***) [8, 9].



Joonis 14. Generaatori ühendamine võrku.[8]

Antud näidiskonfiguratsiooni puhul on vedavaks jõumasinaks sisepõlemismootor, mis on ühendatud generaatori rootori külge. Elektri genereerimiseks peab sisepõlemismootor pöörlema minimaalselt libistuse võrra kiiremini, kui on elektrimootori sünkroonkiirus. Selle tingimuse täitmisel genereerib elektrimootor sõltuvalt libistuse suurusest läbi kolmefaasilise liini elektrivõrku aktiivvõimsust P. Enda töös hoidmiseks tarbib elektrimootor elektrivõrgust reaktiivvõimsust Q. Sarnast lahendust kasutatakse hüdroelektrijaamades, kus sisepõlemismootori asemel on turbiin. Kui turbiini pöörlemiskiirus ületab mootori sünkroonkiirust, siis hakatakse genereerima elektrivõrku elektrit. See süsteem on hea elektrienergia tootmiseks, kuid koormusstendi raames pole seda mõistlik kasutada. Nimelt ei saa selle süsteemi puhul valida koormuse tüüpi ja suurust ning lisaks sõltub elektrimootor välisest elektrivõrgust. [8, 9]

Koormusstendi jaoks parema süsteemi saab luua, kui kasutada kondensaatoripanka (vt ***Joonis 15***).[8, 9]



Joonis 15. Generaatori ühendamine koormusega kasutades kondensaatoripanka. [8]

Tehniline nimetus antud süsteemile on eneseergutusega asünkroongeneraator (ing *Self Excited Induction Generator*). Selle süsteemi tööpõhimõte on sarnane eelmisega. Vedavaks mootoriks on samuti sisepõlemismootor, kuid erinevus tekib kondensaatoripanga ja koormuse näol. Kui eelnevas konfiguratsioonis andis generaator elektrivõrku aktiivvõimsust ja tarbis sealt reaktiivvõimsust, siis selles võtab generaator reaktiivvõimsust kondensaatoritest ja osutab aktiivvõimsust koormusele. Kondensaatoritest moodustatakse kondensaatoripank, mis ühendatakse iga generaatorist väljuva liinijuhtme külge. Generaatori töötamisega tekib magnetväli ja toimub reaktiivenergia tootmine, kondensaatorid salvestavad selle energia ja tagastavad generaatorile. Toodetud aktiivvõimsus tarbitakse välise koormuse poolt. Generaatori klemmipinge suureneb koos kondensaatorite mahtuvuse suurenemisega. Kui kondensaatorite mahtuvus pole piisav, siis tekkiva pinge suurus on madal. Kondensaatoripank peab olema võimeline andma generaatorile vähemalt sama palju reaktiivvõimsust, kui see tarbis mootorirežiimis olles. [8, 9]

Kondensaatorite mahtuvuse vajadus on seotud elektrimootori parameetritega. Mahtuvuse vajadust saab välja arvutada järgneval viisil:

Elektrimootori nimiparameetrid on 9 kW, 60 Hz, 480 V, täiskoormuse nimivool on 14.3 A ja võimsustegur on 0.89.

Mootori poolt tarbitav näivvõimsus on arvutatav valemiga[8]:

$$S = \sqrt{3} \cdot E \cdot I \qquad (2.1.)$$

kus S - näivvõimsus, kVA;

E - nimipinge, V;

I - nimivool, A.

Näivvõimsuseks on arvutatud $S = 11.9\ kVA$.

Mootori poolt tarbitav aktiivvõimsus on arvutatav valemiga[8]:

$$P = S \cdot \cos\theta \tag{2.2.}$$

kus P - aktiivvõimsus, kW;

S - näivvõimsus, kVA;

θ - võimsustegur.

Aktiivvõimsuseks on arvutatud $P = 10.6\ kW$.

Mootori poolt tarbitav reaktiivvõimsus on arvutatav valemiga[8]:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \tag{2.3.}$$

kus Q - reaktiivvõimsus, kvar;

S - näivvõimsus, kVA;

P - aktiivvõimsus, kW.

Reaktiivvõimsuseks on arvutatud $Q = 5.4\ kvar$.

Kui mootorit kasutatakse generaatorina, siis peavad kondensaatorid olema võimelised tagama vähemalt $\frac{5.4}{3} = 1.8\ kvar$ faasi kohta. Iga faasi pinge on 480 V, kuna kondensaatorid on ühendatud kolmnurkühendusse. Kolmnurkühendusest tulenevalt on iga kondensaatori vool faasi kohta arvutatav valemiga[8]:

$$I_C = \frac{Q}{E} \tag{2.4.}$$

kus I_C - kondensaatori vool, A;

Q - faasi reaktiivvõimsus, var;

E - nimipinge, V.

Iga kondensaatori vooluks on arvutatud $I_C = 3.75\ A$.

Mahtuvustakistus iga faasi kohta on arvutatav valemiga[8]:

$$X_C = \frac{E}{I_C} \tag{2.5.}$$

kus X_C - mahtuvustakistus, Ω;

E - nimipinge, V

I_C - kondensaatori vool, A.

Iga faasi mahtuvustakistuseks on arvutatud $X_C = 128\ \Omega$.

Iga kondensaatori minimaalne mahtuvus on arvutatav valemiga[8]:

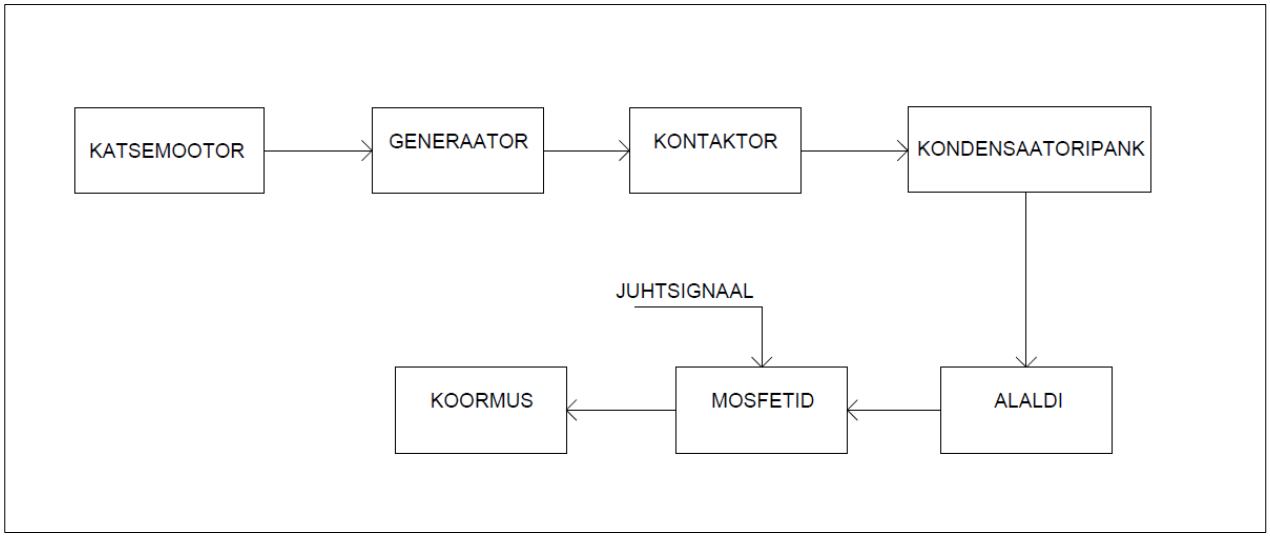
$$C = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_C)} \tag{2.6.}$$

kus f - sagedus, Hz;

X_C - mahtuvustakistus, Ω.

Iga kondensaatori minimaalseks mahtuvuseks on arvutatud $C = 25\ \mu F$.

Arvutustega tuleb välja, et generaator vajab nimiparameetritel täiskoormuse puhul töötamise jaoks igale faasile 25 μF suurust kondensaatorit. Kõikide faaside peale kokku läheb tarvis $3 \cdot 25 = 75\ \mu F$. Koormusstendi puhul ei osutata katsemootorile pidevalt ühesugust koormust, vaid muudetakse seda vastavalt vajadusele. Koormusskeem on välja toodud **Joonis *16***.

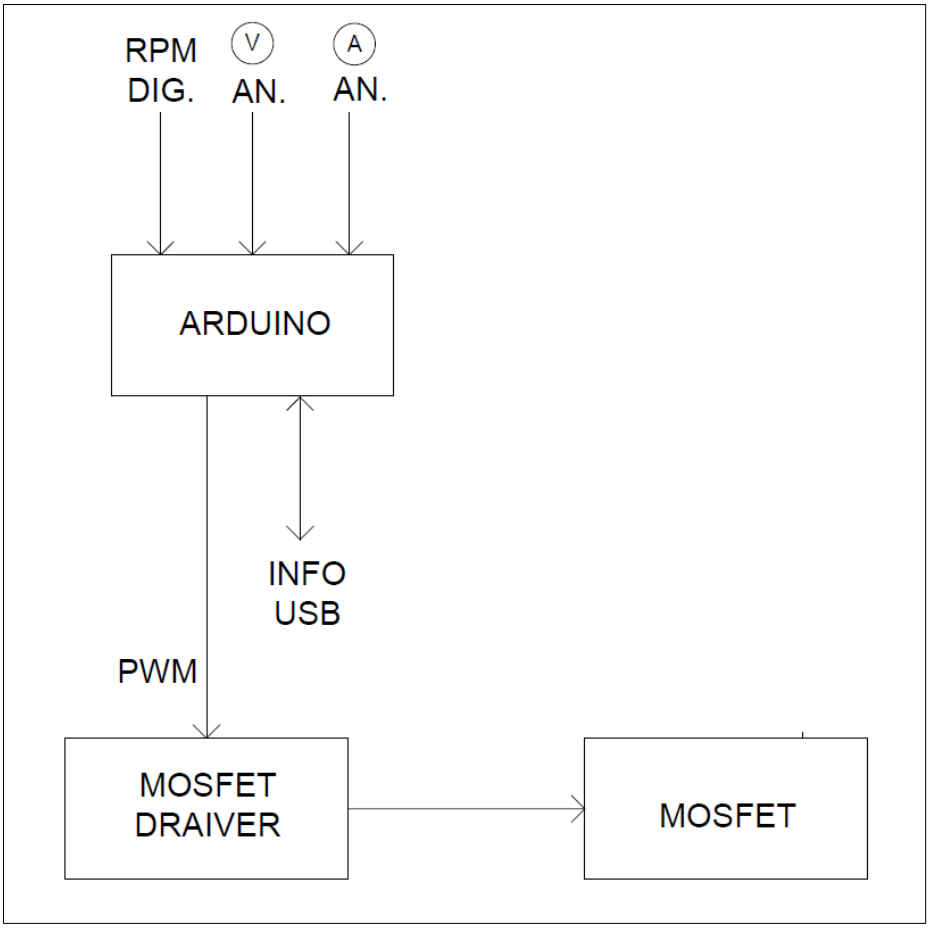


Joonis 16. Koormusskeem.

Katsemootoriks võib olla mis tahes pöörleva võlliga mootor tingimusel, et selle võimsus ei ületa koormuse osutamiseks kasutatava elektrimootori võimsust. Katsemootori võlli pöörlemise tulemusena genereeritakse generaatorrežiimis oleva elektrimootoriga elektrienergiat. Kohe pärast generaatorit on paigutatud kolmefaasiline kontaktor, mis võimaldab sobival hetkel generaatorile ühendada külge kondensaatoripanga ning lisaks kaitseb süsteemi lühise eest. Kolmefaasilise alaldiga alaldatakse genereeritud vahelduvvool alalisvooluks. Alaldamine on vajalik, sest MOSFET-id töötavad alalisvooluga ja lisaks on alalisvoolu kergem mõõteseadmetega mõõta. MOSFET-ide tööd juhib juhtimissüsteemist tulev juhtsignaal, mille täitetegur määrab MOSFET-ide ja koormuse vahelise lülituse. Täpsustavad joonised koormussüsteemi kohta on leitavad **Lisa A** alt.

2.4.3. Juhtimissignaalide süsteem

Kogu süsteemis liigub samaaegselt mitmesuguseid signaale, millel igaühel on oma eesmärk. Süsteemis toimuvast saab parema ülevaate, kui need kanda joonisele (vt **Joonis *17***).



Joonis 17. Signaalide skeem.

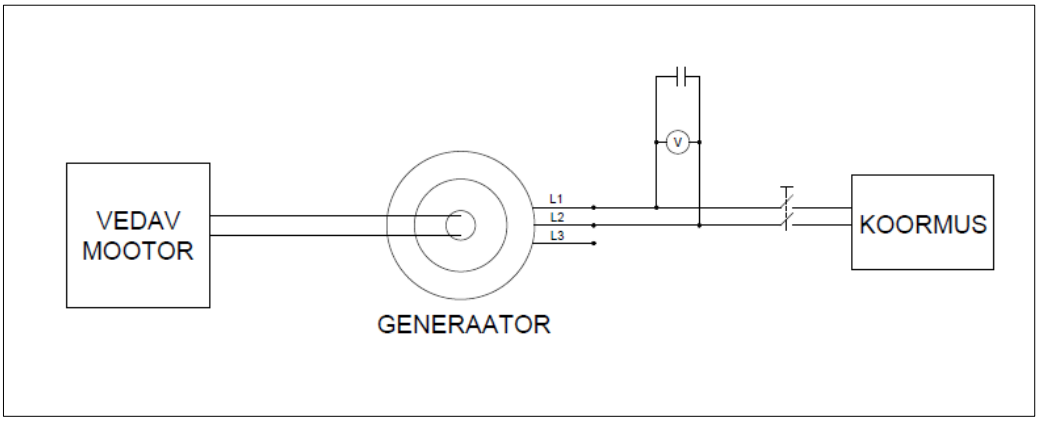
Generaatori töötamisel mõõdab pöörlemissageduse andur pöörleva võlli kiirust. Saadud väärtus edastatakse digitaalse signaalina Arduinole. Samaaegselt mõõdetakse koormussüsteemi alalispinget ja -voolu ning edastatakse see analoogsignaalina Arduinole. Mõõdetud väärtused edastatakse USB-liidese kaudu arvutisse. Arvuti kaudu antakse tagasi Arduinosse sisendparameetrite põhjal sisend, millist PWM signaali genereerida. Genereeritud signaaliga juhitakse MOSFET draiverit, mis omakorda juhib MOSFET-ide tööd, kas siis lubatakse ühendus koormuse ja generaatori vahel, või mitte.

3. KOORMUSSTENDI KATSETAMINE

3.1. Koormussüsteemi konstrueerimine

Olles kokku pannud koormusstendi teoreetilise osa, tuleks hakata seda ka praktiliselt konstrueerima. Kõige mõistlikum on alustada koormuse osaga, kuna selle ehitamiseks vajalikud komponendid on käepärast võtta, või siis lihtne saada.

Lõpplahenduse eesmärgiks on kasutada varieeruvat koormust ja sellest tulenevalt erinevaid kondensaatoreid. Muutuvate suuruste tõttu on vaja kokku panna süsteem, kus saaks vastavalt vajadusele muuta kondensaatoreid ja koormust. Teooriast lähtudes on tarvis vedavat mootorit, elektrimootorit, kondensaatoreid ja koormust. Kasutuseta sisepõlemismootorit ei ole kuskilt võtta, kuid õnneks on olemas kaks asünkroonmootorit. Ühest mootorist saab vedav mootor, ning teisest saab generaator, mis hakkab osutama koormust. Vedavat mootorit kontrollitakse sagedusmuunduriga. Teooria testimise jaoks sobivad need elektrimootorid väga hästi. Vedavaks mootoriks on valitud vanem ja generaatoriks uuem elektrimootor. Kolmefaasilist koormust ei ole lihtne leida, mistõttu otsustati testimise raames kasutada laboris leiduvat lambistendi. Testimiseks kasutati laboris olemasolevaid kondensaatoreid, ning lisaks sai soetatud erinevate mahtuvuste ja parameetritega kondensaatoreid. Erinevate kondensaatorite ja koormuste testimiseks on kokku pandud katseskeem (vt **Joonis *18***).



Joonis 18. Koormuse katseskeem.

Eelnevas peatükis sai välja arvutatud, et iga faasi kohta peaks elektriahelasse maksimaalse koormuse puhul olema ühendatud 25 µF-ne kondensaator. Katse läbiviimise hetkel ei olnud võimalik läbi viia kolmefaasilist täiskoormusel katset, et saavutada generaatori nimivõimsus. Selle tõttu arvestati teistsuguste väärtustega. Katsetamise jaoks arvestati, et generaator on 10 % tema tegelikust võimsusest (48 V, 1.43 A) ja pöörlemissagedus on 600 min^{-1} ehk ümber teisendatuna 10 hertsi. Nende parameetritega saab arvutada ühe faasi kondensaatori minimaalse vajaduse.

Kasutades valemit 2.1. sai näivvõimsuseks arvutatud $S = 0.119\ kVA$.

Kasutades valemit 2.2. sai aktiivvõimsuseks arvutatud $P = 0.106\ kW$.

Kasutades valemit 2.3. sai reaktiivvõimsuseks arvutatud $Q = 0.054\ kvar$.

Tegemist on kolmefaasilise mootoriga, seega peab kondensaator olema võimeline tagama vähemalt 0.054/3 = 0.018 $kvar$ faasi kohta.

Kasutades valemit 2.4. sai kondensaatori vooluks arvutatud $I_C = 0.375\ A$.

Kasutades valemit 2.5. sai faasi mahtuvustakistuseks arvutatud $X_C = 128\ \Omega$.

Kasutades valemit 2.6. sai kondensaatori mahtuvuseks arvutatud $C = 125\ \mu F$.

Arvutustest selgub, et nimipinge ja voolu võrdsel vähendamisel 90 % võrra ei muutu mahtuvustakistus. Kõige määravam roll on pöörlemissagedusel, selle viiekordsel vähendamisel suurenes mahtuvuse vajadus viiekordselt. Sellest saab järeldada, et väiksema koormuse ja mootori võimsuse korral peab kondensaatorite mahtuvus suurenema.

Vahelduvvoolu elektrimootorite puhul on tähtis eristada erinevaid tüüpi mootori kondensaatoreid. Kondensaatorite tüüpe on kolm, käivituskondensaator (ingl *Start capacitor*), käituskondensaator (ingl *Run capacitor*) ja topeltkäituskondensaator (ingl *Dual Run capacitor*). [10]

Käivituskondensaatoreid (vt **Joonis *19***) kasutatakse mootori käivitusmomendi suurendamiseks, mis omakorda lülitavad mootorit kiiresti sisse ja välja. Käivituskondensaatorid on vooluringis tavaliselt nii kaua, kuni mootori kiirus on umbes 75 % täisvõimsusest, misjärel

käivituskondensaatorid eemaldatakse vooluringist. Pärast mootori käivitusprotsessi ühendatakse vooluringi käituskondensaatorid, mis on mõeldud pikemaajaliseks ühenduseks. Käivituskondensaatorid on oma tüübilt elektrolüütkondensaatorid, mis tegelikult on mõeldud töötama alalisvooluahelates. Mootori käivitamise protsessi alguses on mootori kiirus madal ja nagu varasemates arvutustes välja tuli, peab mahtuvus olema selle võrra suurem. Käivituskondensaatorid on tavaliselt vähemalt 70 µF mahtuvusega just selle põhjusel. [10]

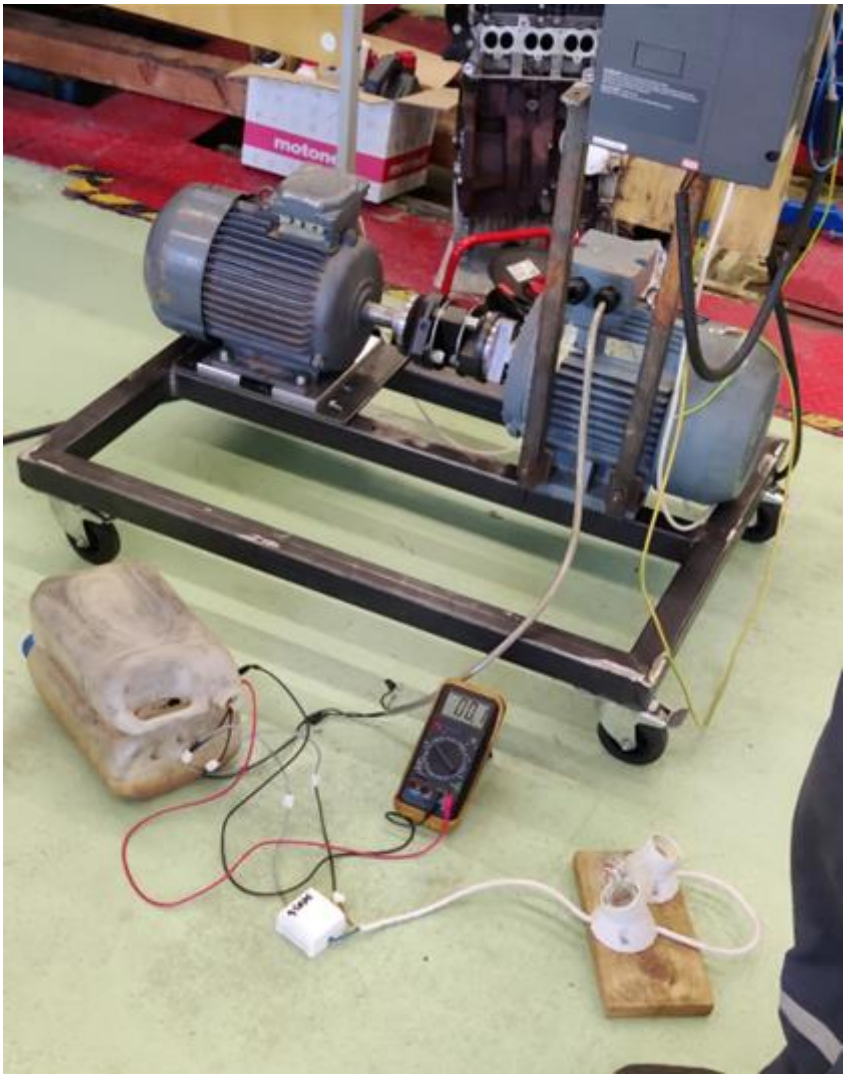
Joonis 19. Mootori käivituskondensaator. [11]

Kui käivituskondensaatorid aitavad elektrimootoril jõuda töökiiruseni, siis käitus-kondensaatorid aitavad sellel töös püsida. Tüübilt on käituskondensaatorid polümeerkondensaatorid, mis on võrreldes elektrolüütkondensaatoritega pikema eluea ja väikese voolukaoga. Käivitus- ja käituskondensaatorite vooluringis olemise ajad on väga erinevad. Kuna ühed on ette nähtud käivitamise jaoks, siis võib neid vooluringis hoida maksimaalselt paar minutit. Teisi võib aga kasutada vooluringis tuhandeid tunde. Käituskondensaatoreid saab liigitada kaheks, ühe ja kahe mootori käitamiseks mõeldud. Topeltkäituskondensaator (vt **Joonis *20***) on oma ehituselt lihtsalt kaks käituskondensaatorit ühe kesta sees, mis on hea, kui on vaja ruumi kokku hoida. Neid kasutatakse tihti kliimaseadmetes, kus on kasutusel mitu erinevat mootorit. [10]

Joonis 20. Mootori topeltkäituskondensaator. [12]

3.2. Koormussüsteemi katsetamine

Teooria kinnitamiseks sai eelnevalt konstrueeritud skeem ka füüsiliselt valmis ehitatud (vt **Joonis *21***). Kasutati kahte eelnevalt katsetatud asünkroonmootorit, millest ühte kasutati generaatorina. Vedavat mootorit juhiti sagedusmuunduriga. Generaatorist välja tulevate liinijuhtmetega moodustati ühendus, kuhu sai ühendada vahele erinevaid kondensaatoreid. Koormuseks kasutati lambistendi, kuhu sai ühendada erinevaid hõõglampe. Pinge ja voolu mõõtmiseks kasutati mootorilaboris leiduvat MASTECH MY64 multimeetrit. Katsetamist alustati madala kiirusega, mida järjest suurendati.



Joonis 21. Kondensaatorite ja koormuse katsetamine.

Esimene katse toimus ühe 22 µF suuruse elektrolüütkondensaatoriga. Eelduste kohaselt ei tohiks tekkiv pinge väga suur olla. Katse seda tõestaski, sest pingeks sai vedava mootori 50 hertsise nimipinge sageduse juures mõõdetud 2.7 V. Huvi pärast eemaldati kondensaator süsteemist ja mõõdeti seejärel tekkivat pinget. Mõõdetud pingeks saadi 2.5 V. Kondensaator andis pingele juurde ainult 0.2 V, mis on peaaegu olematu.

Teine katse toimus ühe 33µF suuruse elektrolüütkondensaatoriga. Eelnevale kondensaatorile sarnaselt ei olnud pinge väga suur. Pingeks mõõdeti 2.83 V. Nii selle, kui ka esimese katsega ei hakanud lamp põlema.

Kuna kaks esimest katset ei andnud suuri tulemusi, siis otsustati mahtuvust mitmekordistada. Kolmas katse toimus kahe 100 µF suuruse elektrolüütkondensaatori ühendamisel rööbiti

vooluahelasse. Kahe kondensaatori ühendamisel rööbiti liidetakse nende mahtuvus kokku, seega tulemuseks on 200 μF mahtuvus. Sellise mahtuvusega võib eeldada kõrgemat pinget. Muutes vedava elektrimootorisse sageduse 60 hertsiks, mis peaks **Tabeli 1** põhjal olema umbes 1800 min^{-1}, tõusis pinge 65 voldini ning seejärel hakkas samm-sammult langema kuni jõudis 35 voldini. Tol hetkel koormuseks olev 100 vatine hõõglamp ei hakanud põlema, mistõttu vahetati see välja 60 vatise hõõglambi vastu ja korrati katset. Katse pidi katkestama, kuna üks kondensaator hävines.

Esmased katsed olid oluliste tulemustena. See on tõenäoliselt põhjustatud sellest, et kasutatud on tavalisi kondensaatoreid, mitte spetsiaalselt mootorite jaoks mõeldud kondensaatoreid. Kõige parema tulemuse on siiani andnud 200 μF suurune mahtuvus, mis ei ole üllatav. Arvutuste kohaselt peaks mahtuvus olema vähemalt 125 μF. Sellise mahtuvusega mootori käituskondensaatorit ei olnud katsetamise ajaks võimalik hankida, seega pidi hakkama improviseerima. Kasutades laboris olemasolevaid mootori kondensaatoreid ja internetist tellituid kondensaatoreid, sai nende rööbiti ühendamisel kokku mahtuvuseks 103 μF. Rööbiti sai ühendatud üks 60 μF-ne käivituskondensaator, üks 25 μF-ne käivituskondensaator ning kolm 6 μF-st käituskondensaatorit. Eelnevatele arvutustele ja teooriale toetudes peab mootori kiirus selle võrra suurem olema, mida madalam on mahtuvus. Selline katsetingimus ei ole ideaalne, kuna kasutusel on käivituskondensaatorid. Selle tõttu ei saa koormust osutada pikemalt kui mõni minut.

Neljas katse algas samamoodi nagu kõik eelnevad, ehk alustati madala kiirusega ja mindi suuremaks. Päris pikka aega oli tekkiv pinge väga madal. Ühel hetkel sai vedavasse mootorisse sisse antud 80 hertsi, mis on **Tabel 1** põhjal umbes 2400 min^{-1}. Sellel hetkel ei olnud koormus taha ühendatud ja pinge tõusis 800 voldini. See oli liiga kõrge ja mootor jäeti seisma. Katse aga tõestas, et süsteem on võimeline elektrit tootma, nüüd on vaid vaja leida pöörlemissagedus, mis toodab seda soovitud määral. Katsetamist alustati uuesti madalalt kiiruselt, mida suurendati samm-sammult. Kõige paremaks sageduseks osutus 60 hertsi, mis on vedavalt mootorilt umbes 1800 min^{-1}. Selle pöörlemissagedusega suutis generaator toota 160 voldist pinget. Ühendades süsteemile taha 60 vatise hõõglambi langes pinge 150 vati peale ja lambipirn hakkas eredalt hõõguma. Hõõglambi põlemisel mõõdeti ka esmakordselt voolu ja selleks saadi 0.35 milliamprit. Antud pöörlemissagedus on ümardatuna umbes pool generaatori nimipöörlemissagedusest. Vähendades vedava mootori pöörlemissagedust alla 1800 min^{-1}, hakkas pinge langema ja püsivat väärtust ei olnud võimalik hoida.

3.3. Katse analüüs

Teostatud katse annab kinnituse, et projekteeritud süsteem on võimeline osutama katsemootorile koormust. Katsemootorile ei osutatud küll maksimaalset ega varieeruvat koormust, vaid pigem oli katse teooria kinnitamiseks. Kogu koormusstendi terviklikust süsteemist sai katsetatud käepäraste vahenditega selle ühte osa. Osaline katsetamine oli kasulik, kuna see annab väärtuslikku infot lõpplahenduse jaoks vajalike komponentide soetamiseks.

KOKKUVÕTE

Käesoleva lõputöö raames projekteeriti ja osaliselt katsetati väikese võimsusega mootori koormusstendi. Töö sisuline osa algab ülevaatega erinevatest koormusstendidest ja nende koormuse osutamise eri liikidest. Eraldi on liigitatud mootori ja sõiduki koormusstendid. Lähemalt uuritakse erinevaid mootori koormusstende, et teha sobiv otsus projekteeritava koormusstendi jaoks.

Praktilise osa raames projekteeriti koormusstendi erinevad süsteemid ning seletati lahti nende tööpõhimõte. Süsteemidena on eraldi välja toodud väikepinge, madalpinge ja juhtimissignaalide süsteemid. Süsteeme käsitletakse eraldi, sest see teeb kogu koormusstendi tööpõhimõttest arusaamise lihtsamaks ja annab parema ülevaate, kuidas kõik süsteemid omavahel lõpplahenduses koos töötavad.

Lõputöö viimases osas konstrueeriti eelnevalt koostatud koormusstendi lihtsustatud koormusahel ühele faasile ja kontrolliti arvutuste paikapidavust. Katse raames koostati lihtsustatud prototüüp Eesti Maaülikooli Tehnikamajas leiduvate käepäraste vahenditega. Katse kinnitas, et mootorit on võimalik testida käepäraste vahenditega.

Lõputöö eesmärgiks oli projekteerida koormusstend, mis oleks võimalik valmistada võimalikult käepäraste vahenditega. Seda lõputööga ka saavutati, kuna eraisikuna on lihtne hankida kõik projektis kasutatud komponendid ja projekteeritud seade konstrueerida. Koostatud projekt ei ole kindlasti lõplik ja edasiarendus on palju ruumi. Antud projekti arendamist on plaanis jätkata magistriastmes.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. What is an Engine Test Bench? [online]. [Accessed 30 April 2023]. Available from: https://www.wingflyingtech.com/newss/engine-test-bench.html

2. Engine Dynos: Types, Applications, Benefits, and Maintenance. [online]. [Accessed 30 April 2023]. Available from: https://www.iqsdirectory.com/articles/dynamometers/engine-dynamometer.html

3. Mootorite katselabor - Tehnikainstituut (vana). [online]. [Accessed 29 May 2023]. Available from: https://te.emu.ee/et/struktuur/biomajandustehnoloogiate-oppetool-bt/teadustoo/laborid-ja-teenused/mootorite-katselabor/

4. Chassis dynamometer system | Testing systems | MEIDENSHA CORPORATION. [online]. [Accessed 30 April 2023]. Available from: https://www.meidensha.com/products/automobile/prod_01/prod_01_02/prod_01_02_03/index.html

5. Dynamometer: What Is It? How Does It Work? Types, Uses. [online]. [Accessed 30 April 2023]. Available from: https://www.iqsdirectory.com/articles/dynamometers.html

6. IC ENGINE TESTING. [online]. [Accessed 30 April 2023]. Available from: http://www.ignou.ac.in/upload/unit-7.pdf

7. AC dynamometer working principle, AC dyno | DynoEquip. [online]. [Accessed 16 May 2023]. Available from: https://www.dynoequip.com/ac-dynamometer-en/

8. WILDI THEODORE. *Electrical Machines, Drives, and Power Systems* [online]. 5. [no date]. [Accessed 23 May 2023]. Available from: https://ia600901.us.archive.org/9/items/ElectricalMachinesDrivesAndPowerSystems5ETheodoreWildi/Electrical%20Machines,%20Drives,%20and%20Power%20Systems%205E%20(Theodore%20Wildi)_text.pdf

9. Induction Generator working theory | electricaleasy.com. [online]. [Accessed 23 May 2023]. Available from: https://www.electricaleasy.com/2014/12/induction-generator-working.html

10. Motor Start and Run Capacitors. [online]. [Accessed 24 May 2023]. Available from: https://www.tedss.com/LearnMore/Motor-Start-Run-Capacitors

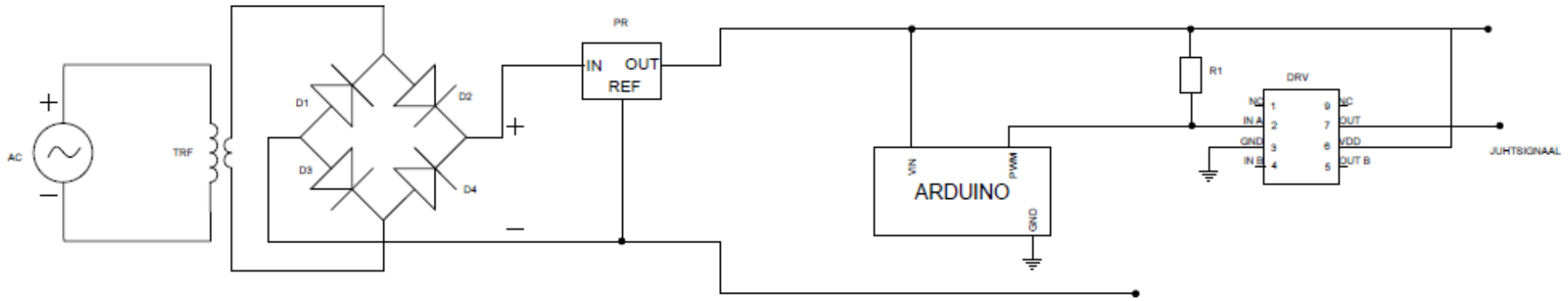
11. Motor capacitor - Wikipedia. [online]. [Accessed 24 May 2023]. Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Motor_capacitor

12. TITAN HD, Round, 440/370V AC, Motor Dual Run Capacitor - 20UD80|PRCFD453A - Grainger. [online]. [Accessed 24 May 2023]. Available from: https://www.grainger.com/product/TITAN-HD-Motor-Dual-Run-Capacitor-Round-20UD80

LISAD

Lisa A tehnilised joonised

Lisa A jätk



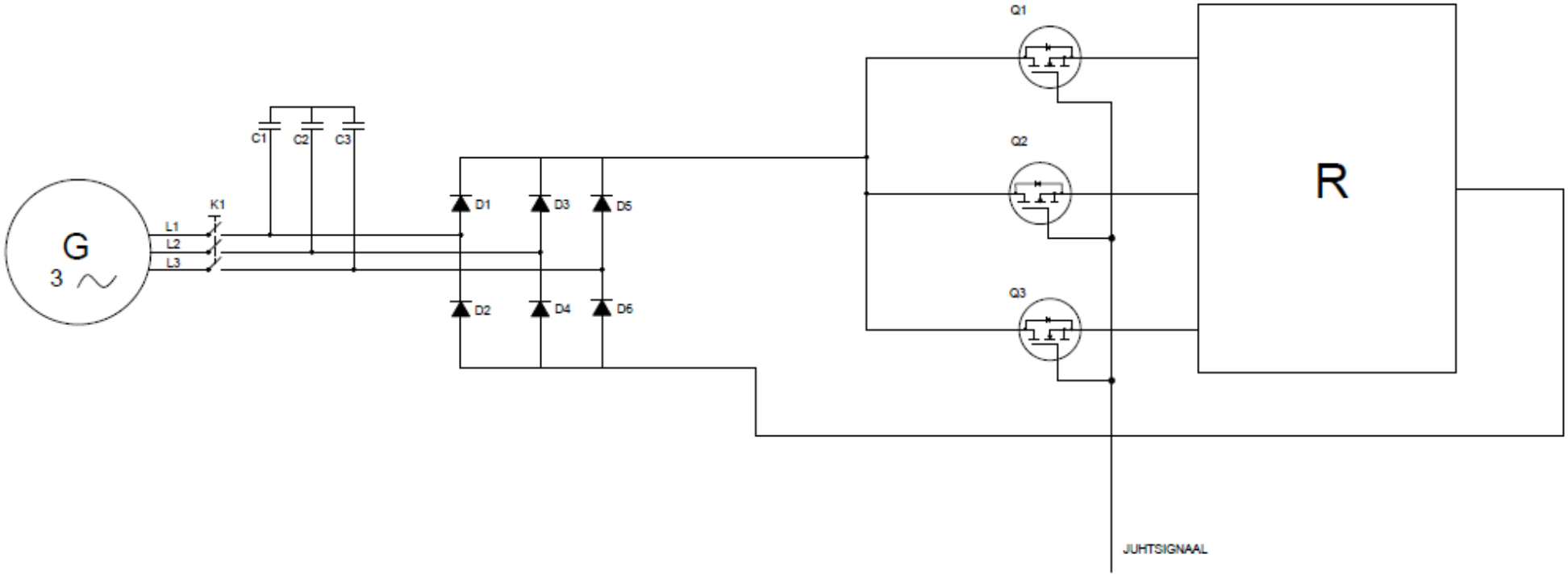
Teostas	Rene Lelov	Nimetus:	
Kontrollis	Janar Kalder	Juhtimise elektriskeem	
Kinnitas	Janar Kalder		
Eesti Maaülikool, Estonian University of Life Sciences, Metsanduse ja inseneeria instituut, Institute of Forestry and Engineering		Leht: 1/2	Tähis: TT 23/190158 A 01 01 S

Lisa A jätk

Tähis	Nimetus	Märkus
AC	Toiteallikas	Elektrivõrgust võetav toide
TRF	Trafo	Alandav trafo
D1	Diood	Alaldi diood
D2	Diood	Alaldi diood
D3	Diood	Alaldi diood
D4	Diood	Alaldi diood
PR	Pingeregulaator	7808 pingeregulaator
ARDUINO	Arduino	Arduino mikrokontroller
R1	Takisti	Pingenivoo tõstmise takisti
DRV	MOSFET draiver	MOSFET draiver
JUHTSIGNAAL	Juhtsignaal	MOSFET-e juhtiv PLM signaal

Teostas	Rene Lelov	Nimetus: Juhtimise elektriskeem	
Kontrollis	Janar Kalder		
Kinnitas	Janar Kalder		
Eesti Maaülikool, Estonian University of Life Sciences, Metsanduse ja inseneerie instituut, Institute of Forestry and Engineering		Leht: 2/2	Tähis: TT 23/190158 A 01 01 S

Lisa A jätk



Teostas	Rene Lelov	Nimetus:	
Kontrollis	Janar Kalder	Koormuse elektriskeem	
Kinnitas	Janar Kalder		
Eesti Maaülikool Estonian University of Life Sciences Metsanduse ja inseneerie instituut Institute of Forestry and Engineering		Leht: 1/2	Tähis: TT 23/190158 A 01 02 S

Lisa A jätk

Tähis	Nimetus	Märkus
G	Generaator	Generaatorina töötav asünkroonmootor
K1	Kontaktor	Kolmefaasiline kontaktor
C1	Kondensaator	Mootori kondensaator
C2	Kondensaator	Mootori kondensaator
C3	Kondensaator	Mootori kondensaator
D1	Diood	Kolmefaasilise alaldi diood
D2	Diood	Kolmefaasilise alaldi diood
D3	Diood	Kolmefaasilise alaldi diood
D4	Diood	Kolmefaasilise alaldi diood
D5	Diood	Kolmefaasilise alaldi diood
D6	Diood	Kolmefaasilise alaldi diood
Q1	MOSFET	MOSFET
Q2	MOSFET	MOSFET
Q3	MOSFET	MOSFET
R	Koormus	Valituks osutuv koormus
JUHTSIGNAAL	Juhtsignaal	MOSFET-e juhtiv PLM signaal

Teostas	Rene Lelov	Nimetus: Koormuse elektriskeem	
Kontrollis	Janar Kalder		
Kinnitas	Janar Kalder		
Eesti Maaülikool, Estonian University of Life Sciences, Metsanduse ja inseneerie instituut, Institute of Forestry and Engineering		Leht: 2/2	Tähis: TT 23/190158 A 01 02 S

Lisa B. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina, _____Rene Lelov_____,

(autori nimi)

sünniaeg 26.09.2000,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud lõputöö _____Väikese võimsusega mootori koormusstendi eskiisprojekt_____ _____ _____,

(lõputöö pealkiri)

mille juhendaja(d) on____Janar Kalder, Roland Allmägi, Risto Ilves_____,

(juhendaja(te) nimi)

1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,

1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja

1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

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.

Lõputöö autor ___-allkirjastatud digitaalselt-_____

(allkiri)

Tartu, ___02.06.2023____

(kuupäev)

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

___Janar Kalder -*allkirjastatud digitaalselt-* _____02.06.2023_____

(juhendaja nimi ja allkiri) *(kuupäev)*

___Roland Allmägi -*allkirjastatud digitaalselt-* _____02.06.2023_____

(juhendaja nimi ja allkiri) *(kuupäev)*

___Risto Ilves -*allkirjastatud digitaalselt-* _____02.06.2023_____

(juhendaja nimi ja allkiri) *(kuupäev)*