



**Andreas Lünekund**

# **Turbiinmootor-generaator**

**LÕPUTÖÖ**

Tehnikainstituut  
Elektritehnika eriala

Tallinn 2022

## **Autori deklaratsioon ja lihtlitsents**

Mina,

Andreas Lünekund,

tõendan, et lõputöö on minu kirjutatud. Töö koostamisel kasutatud teiste autorite, sh juhendaja teostele on viidatud õiguspäraselt.

Kõik isiklikud ja varalised autoriõigused käesoleva lõputöö osas kuuluvad autorite ainuisikuliselt ning need on kaitstud autoriõiguse seadusega.

Juhendaja: Kristo Vaher

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

Mina, Andreas Lünekund

sünnikuupäev: 17.06.1995

annan Tallinna Tehnikakõrgkoolile (edaspidi kõrgkool) tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

Turbiinmootor-generaator

1. elektroonseks avaldamiseks kõrgkooli repositooriumi kaudu;
2. kui lõputöö avaldamisele on instituudi direktori korraldusega kehtestatud tähtajaline piirang, lõputöö avaldada pärast piirangu lõppemist.

Olen teadlik, et nimetatud õigused jäävad alles ka autorile ja kinnitan, et:

1. lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid ega muid õigusi;
2. PDF-failina esitatud töö vastab täielikult kirjalikult esitatud tööle.

Tallinnas, allkirjastatud digitaalselt.

# Sisukord

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| LÜHENDID .....                       | 4  |
| SISSEJUHATUS.....                    | 5  |
| 1. TURBIINMOOTOR .....               | 6  |
| 1.1 Turbiinmootor GTD-350 .....      | 6  |
| 1.2 Hooldus.....                     | 9  |
| 1.2.1 Temperatuuriandurid .....      | 9  |
| 1.2.2 Starter-generaator STG-3 ..... | 11 |
| 1.2.3 Süüteküüнал .....              | 13 |
| 1.2.4 Tahhomeeter .....              | 14 |
| 1.3 Mootori seisukord.....           | 15 |
| 2. GENERAATOR.....                   | 17 |
| 2.1 Cascadia Motion DS-250-115 ..... | 17 |
| 2.2 Emrax 348.....                   | 20 |
| 2.3 Inverterid.....                  | 21 |
| 2.4 Võrdlusanalüüs .....             | 24 |
| 3. JUHTPANEEL TURBIINMOOTORILE ..... | 25 |
| 3.1 Juhtpaneeli iseloomustus .....   | 25 |
| 3.2 Juhtpaneeli kontrollerr .....    | 26 |
| 3.3 Juhtpaneeli kodeerimine .....    | 30 |
| 3.4 Juhtpaneeli elektriskeem.....    | 32 |
| 3.5 Toiteallikas .....               | 34 |
| 4. ANALÜÜS.....                      | 35 |
| 5. KOKKUVÕTE.....                    | 39 |
| 6. SUMMARY .....                     | 40 |
| 7. KASUTATUD KIRJANDUS .....         | 41 |
| LISA 1.....                          | 44 |

## Lühendid

mV – millivolt

kV – kilovolt

V – volt

kW – kilowatt

MW – megawatt

W – watt

Nm – njuutonmeeter

RPM – pöörlemissagedus minutis

p/min – pööret minutis

DC – alalisvool

AC – vahelduvvool

$U_n$  – nimipinge

Mm – millimeeter

VDC – alalisvoolu pinge

VAC – vahelduvvoolu pinge

A – amper

KG – kilogramm

°C - temperatuurikraad Celsiuses

Ah - ampertund

## Sissejuhatus

Tallinna Tehnikakõrgkool uurib erinevate tehnoloogiate kasutamist ning kombineerimist uute lahenduste kasutusele võtmist laialdasemalt kui meie ühiskonnas hetkel kasutusel on. Selleks ongi hetkel ette võetud turbiinmootori ja generaatori kooslus.

Lõputöö eesmärgiks on turbiinmootor ja sobiv generaator omavahel ühendada, välja mõelda lihtsalt kontrollitav juhtimispaneel turbiinmootori jaoks, teostada elektrilised seotud ühendused ja analüüsida antud kompleksi ära tasuvus praeguste kütuse- ja elektrihindadega.

Lõputöö eesmärk on turbiinmootorile välja mõelda ja ehitada tulevaste katsetuste läbiviimiseks juhtpaneel ja juhtautomaatika. Samuti leida alternatiivseid jõuelektroonika lahendusi turult.

Tööülesanded sooritatakse Tallinna Tehnikakõrgkoolis.

Töö on jaotatud viide erinevasse peatükki, mis kirjeldavad antud töö sisu. Esimeses peatükis kirjeldatakse väljavalitud turbiinmootorit GTD-350 ja selle hooldust peale konserveerimise väljatoomist. Teises peatüki kirjeldatakse väljavalitud generaatoreid ning valitakse välja generaator ja miks just need generaatorid sai valitud. Kolmandas peatükis kirjeldatakse turbiinmootori jaoks ehitatavat juhtimispaneeli ja selle täpsemat funktsionaalsust. Neljandas peatükis kirjeldatakse turbiinmootori ja generaatori koosluse ära tasuvust, mis siis koosneb paljudest aspektidest, kuid peamised näitajad näiteks on soetuskulu, hoolduskulu ja kütusekulu.

# 1. Turbiinmootor

## 1.1 Turbiinmootor GTD-350

Turbiinmootor Klimov GTD-350 disainiti 1950 ja 1960 aastate vahel Klimov Disaini Büroos Peterburis (endine Leningrad) Sergei Petrovitš Isotovi poolt.

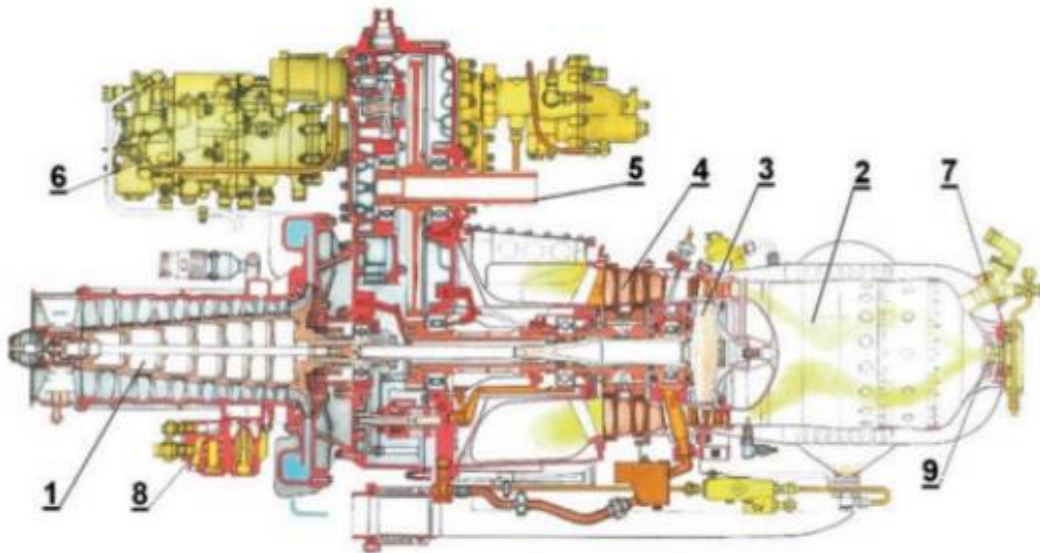


Fig. 2.4 Schematic diagram of the GTD-350 gas turbine engine. 1 compressor, 2 combustion chamber, 3 compressor turbine, 4 power turbine, 5 power shaft, 6 pump-regulator, 7 ignition device, 8 air bleeding valve, 9 main injector

Pilt 1. GTD-350 skeem [1]

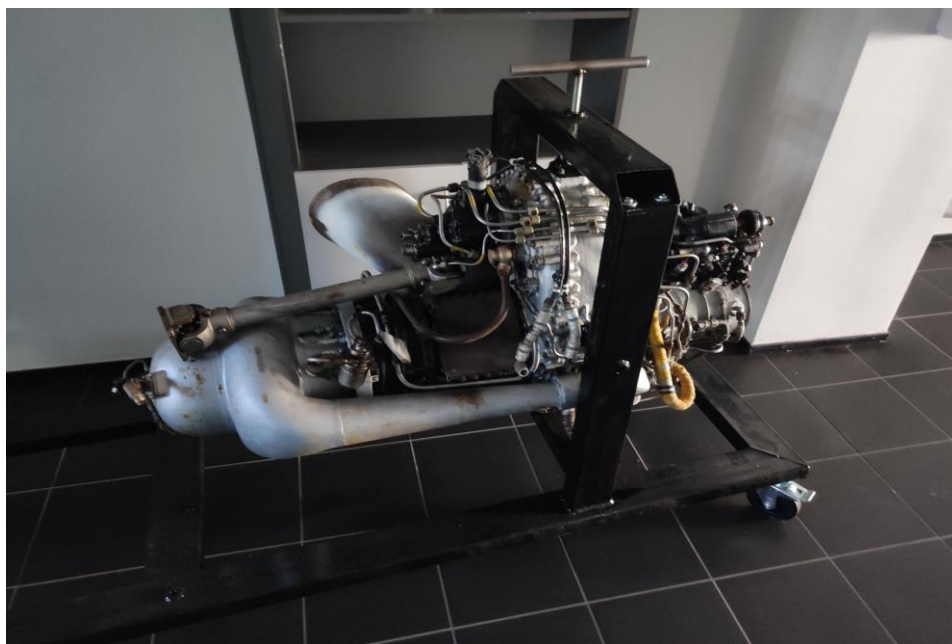
Mootor on kahekordse võlliga helikopteri mootor, turbiin nr. 1 on sama võlliga ühendatud mis kompressor ja turbiin nr. 2, mida kutsutakse „vabaks“ turbiiniks, on ühendatud eraldi võlliga, millega anti edasi jõud mootori kardaanile läbi reduktori. Esimesed prototüübid tegid esimese lennu Mi Mil-2 kerge helikopteriga aastal 1961. 1964 aastal ostis Poola Nõukogude Liidult GTD-350 tootmisloa ja alustas tootmist 1966 WSK Rzeszowis, kus üle 11000 eksemplari on toodetud. [2]

Tabel 1. Turbiinmootori versioonid [3]

| Nimetus                       | Võimsus (nominaalne/maksimaalne) kW |
|-------------------------------|-------------------------------------|
| GTD-350                       | 235/290                             |
| GTD-350 2. seeria             | 235/290                             |
| GTD-350 3. seeria             | 235/290                             |
| GTD-350 4. seeria             | 235/290                             |
| GTD-350 3. seeria W versioon  | 235/313                             |
| GTD-350 4. seeria W versioon  | 235/313                             |
| GTD-350 3. seeria W2 versioon | 235/320                             |
| GTD-350 4. seeria W2 versioon | 235/320                             |

Viimased W seeria mootorid on võimsamad ja modernsemad kui varasemad versioonid. Kui varasemad mootorid aretasid õhkutõusu jaoks 290 kW, siis uuemad W2 versioonid aretavad 320 kW [3].

Mootori sai ametliku lennundus sertifikaadi 8 juulil 1968 JAA (Joint Aviation Authorities) nüüdne ESEA (European Union Aviation Safety Agency). Edasistele versioonidele tulid sertifikaadid aastatel 1972, 1978, 1993 ja 2003 [3].



Pilt 2. GTD-350 Tallinna Tehnikakõrgkoolis rakisel

Mootori nimiaandmed:

Tabel 2. GTD-350 andmed [2]

|                                   |                          |
|-----------------------------------|--------------------------|
| Pikkus                            | 1385 mm                  |
| Laius                             | 626 mm                   |
| Kaal                              | 139 ±2 %                 |
| Väljundvõimsus völlil @cruise     | 235 kW                   |
| Väljundvõimsus völlil @takeoff    | 313 kW                   |
| Jöuturbiini RPM @cruise           | 24000 p/min              |
| Väljundvölli RPM @cruise          | 5904 p/min               |
| Moment jõu turbiini väljundvöllil | 380 Nm                   |
| Väljundvölli pöörlemissuund       | Clockwise<br>(päripäeva) |

Mootori moment väljundvõllil saadakse järgneva valemi (1) abil:

$$Nm = \frac{9,5488 \times P}{RPM (p/min)} \quad (1)$$

kus 9,5488 – konstant, mis tähistab pöörete arv/radiaan sekundis

P – mootori võlli väljundvõimsus, watt (W)

RPM – mootori väljundvõlli pöörete arv minutis

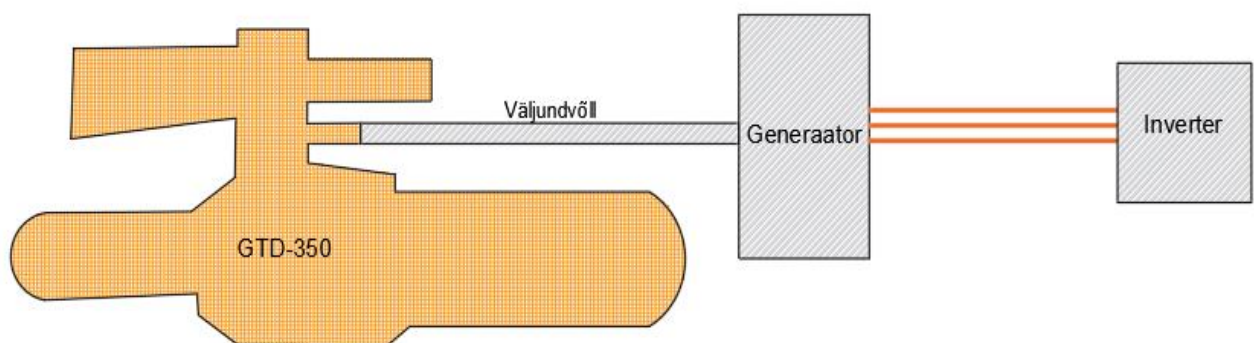
Vastavalt valemile (1) leitakse turbiinmootori väljundvõlli väändemoment:

$$Nm = \frac{9,5488 \times 235000}{5904 (p/min)} = 380,07 Nm.$$

Mille vastuseks saame ~380 Nm.

Väljundvõimsust on vaja teada, et oleks võimalik valida sobiv generaator, kuna kui mootor ei suuda generaatorit väljundvõlli abil vedada, siis ei toodeta generaatori poolt piisavalt elektrienergiat, mistõttu ebasobiv kombinatsioon omaks negatiivset efekti majanduslikus mõttes.

Generaator ja turbiinmootor seostatakse omavahel Pilt 2. näidatud nr 5 objektiga, milleks on väljundvõll.



Pilt 3. Põhimõtteline skeem

## 1.2 Hooldus

Kuna mootor oli Eesti Lennundusmuuseumis hoiul konserveerituna ehk mootor võeti lahti ja kaeti vastava õlikihiga, et vältida korrosiooni teket, mis võib mootorit kahjustada, kuna enamus materjale on metalsed ning niiskes Eesti kliimas on korrosioon kiiresti tekkima, siis on vaja üle kontrollida mootori tehniline seisukord, mootori toimimiseks vajalikud andurid ja seadmed.

Kuna autoril ja kellelgi Tallinna Tehnikakõrgkoolis puudub eelnev kogemus turbiinmootorite hooldustega, siis on antud töö teenusena sisse ostetud lennundus firmas töötavana mehaanikult. Küll aga on võimalus üle kontrollida muud seadmed nagu näiteks starter/generaator ja andurid – temperatuuri andur, kütuserõhk, õlirõhk.

### 1.2.1 Temperatuuriandurid

Temperatuuriandureid on antud turbiinmootoril 8 tükki ja paiknevad põlemiskambri olevatel külgedel ning on ühendatud rööbiti ehk temperatuuri jälgimisel kuvatakse displeile keskmine temperatuuri väärtus.



Pilt 4. Temperatuuriandur

Antud temperatuuriandurid on N-tüüpi ehk siis nende andmevoogu ei näidata tavapärase takisti väärtusel, vaid millivoltides (mV).

Et kontrollida temperatuuri andurite korrasolekut on ette antud N-tüüpi termopaaride standard tabel:

Termopaaride termoelektriline pinge millivoltides vastavalt temperatuurile [4]

| °C                                  | 0     | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |
|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>Thermoelectric Voltage in mV</b> |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>0</b>                            | 0.000 | 0.026 | 0.052 | 0.078 | 0.104 | 0.130 | 0.156 | 0.182 | 0.208 | 0.235 | 0.261 |
| <b>10</b>                           | 0.261 | 0.287 | 0.313 | 0.340 | 0.366 | 0.393 | 0.419 | 0.446 | 0.472 | 0.499 | 0.525 |
| <b>20</b>                           | 0.525 | 0.552 | 0.578 | 0.605 | 0.632 | 0.659 | 0.685 | 0.712 | 0.739 | 0.766 | 0.793 |
| <b>30</b>                           | 0.793 | 0.820 | 0.847 | 0.874 | 0.901 | 0.928 | 0.955 | 0.983 | 1.010 | 1.037 | 1.065 |
| <b>40</b>                           | 1.065 | 1.092 | 1.119 | 1.147 | 1.174 | 1.202 | 1.229 | 1.257 | 1.284 | 1.312 | 1.340 |
| <b>50</b>                           | 1.340 | 1.368 | 1.395 | 1.423 | 1.451 | 1.479 | 1.507 | 1.535 | 1.563 | 1.591 | 1.619 |
| <b>60</b>                           | 1.619 | 1.647 | 1.675 | 1.703 | 1.732 | 1.760 | 1.788 | 1.817 | 1.845 | 1.873 | 1.902 |
| <b>70</b>                           | 1.902 | 1.930 | 1.959 | 1.988 | 2.016 | 2.045 | 2.074 | 2.102 | 2.131 | 2.160 | 2.189 |
| <b>80</b>                           | 2.189 | 2.218 | 2.247 | 2.276 | 2.305 | 2.334 | 2.363 | 2.392 | 2.421 | 2.450 | 2.480 |
| <b>90</b>                           | 2.480 | 2.509 | 2.538 | 2.568 | 2.597 | 2.626 | 2.656 | 2.685 | 2.715 | 2.744 | 2.774 |
| <b>100</b>                          | 2.774 | 2.804 | 2.833 | 2.863 | 2.893 | 2.923 | 2.953 | 2.983 | 3.012 | 3.042 | 3.072 |

Temperatuuri andurid said järele kontrollitud keevas vees, mille temperatuur oli ligikaudselt 100 °C



Pilt nr 5. Temperatuuriandurid keevas vees

ning mõõtetulemused olid järgmised:

Tabel 4. Mõõtmistulemused

| Nimetus    | Tulemus (mV) |
|------------|--------------|
| Andur nr 1 | 2,9          |
| Andur nr 2 | 2,9          |
| Andur nr 3 | 2,9          |
| Andur nr 4 | 2,7          |
| Andur nr 5 | 2,9          |
| Andur nr 6 | 2,9          |
| Andur nr 7 | 2,7          |
| Andur nr 8 | 2,7          |

Tulemusteks oli 2,7 millivolti ja 2,9 millivolti. Arvestades mõõteseadme Kyoritsu KEW1011 mõõtmisviga juurde ( $\pm 0,5 \% \pm 2 \text{ dgt}$ ), andurite seisukorda ja katsetamise kohta (köök), siis tabeli järgi on tulemused head konstantsed ja andurid töökorras.

#### 1.2.2 Starter-generaator STG-3

Järgmiseks komponendiks, mis vajab kontrolli, on 24-voldine starter/generaator STG-3, mis käivitab turbiinmootorit ja kui käivitus moment on läbi, siis liigub starter üle generaatori rolli ja hakkab laadima akusid. Jahutuse saab starter/generaator kooperi tiivikutelt. Hinnaks uuena ~13 000 eurot, kasutatuna teadmata seisukorras ~200 eurot. STG-3 nimiaandmed on järgmised:

Tabel 5. STG-3 nimiaandmed [5]

|               |                  |
|---------------|------------------|
| Väljund pinge | 28 VDC           |
| Koormus vool  | 100 ADC          |
| Võimsus       | 3 kW             |
| Pöörde kiirus | 6520-11250 p/min |
| Mõõtmed       | 165 mm x 340 mm  |
| Kaal          | 16 KG            |



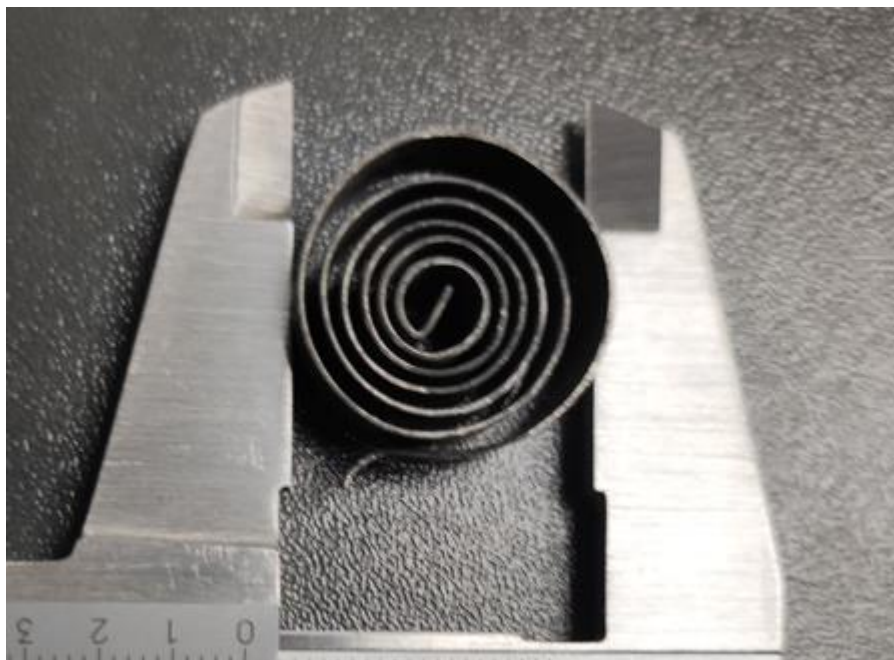
Pilt 6. Starter-Generaator STG-3

Starter-generaatori hoolduseks kujunes üldine puhastus, rootori ja staatormähiste kontrollimine ja katkiste osade, kui neid peaks eksisteerima, väljavahetamine. Antud juhul tuli välja 3 katkist osa, milleks kujunesid harja spiraalne survevedru ja 2 laagrit, mis asetsesid rootori mõlemas otsas. Spiraalvedru oma tavaolekus peaks välja nägema selline:



Pilt 7. STG-3 harjakamber

Ent spiraalvedru konksu kujuline ots, millega anti surve harjale, oli ära murdunud aastate pikkuse surve avaldamise tõttu ja näeb välja selline:



Pilt 8. Spiraalvedru

Olemasolevat katkist spiraalvedrut sai kuumutatud ja ots vastavasse asendisse väänatud ning uuesti installeeritud omaesse pessa.

Samuti sai ära vahetatud 2 laagrit, mis olid oma tööea lõppu jõudnud, asendatud uute laagritega ja starter/generaator uuesti kokku pandud.

### 1.2.3 Süüteküüнал

Põletiks on antud turbiinmootoril SI18-UA küüнал, mis asub mootori otsas ning sai töö käigus viga ning vajab asendamist. Järelturul on antud põleti hinnaks 300-500 vene rublat [6].



Pilt 9. Põleti küünal CII-18YA

#### 1.2.4 Tahhomeeter

Tahhomeetriks on D-1M konverter, mis on kolmefaasiline püsिमagnet generaator ning tekitab magneetilise induktsiooni ja kuvab lõpuks selle info mõõte displeile.

Nimiandmed on järgmised:

Tabel 5. D-1M nimiandmed [7]

|                         |                   |
|-------------------------|-------------------|
| Nimipöörded             | 750 p/min         |
| Maksimaalne pöörete arv | 2500 p/min        |
| Ühenduste arv           | 1 tk              |
| Nimipinge               | 10,5 - 12 VAC     |
| Mõõdud                  | 130 x 112 x 62 mm |
| Kaal                    | 0,9 KG            |

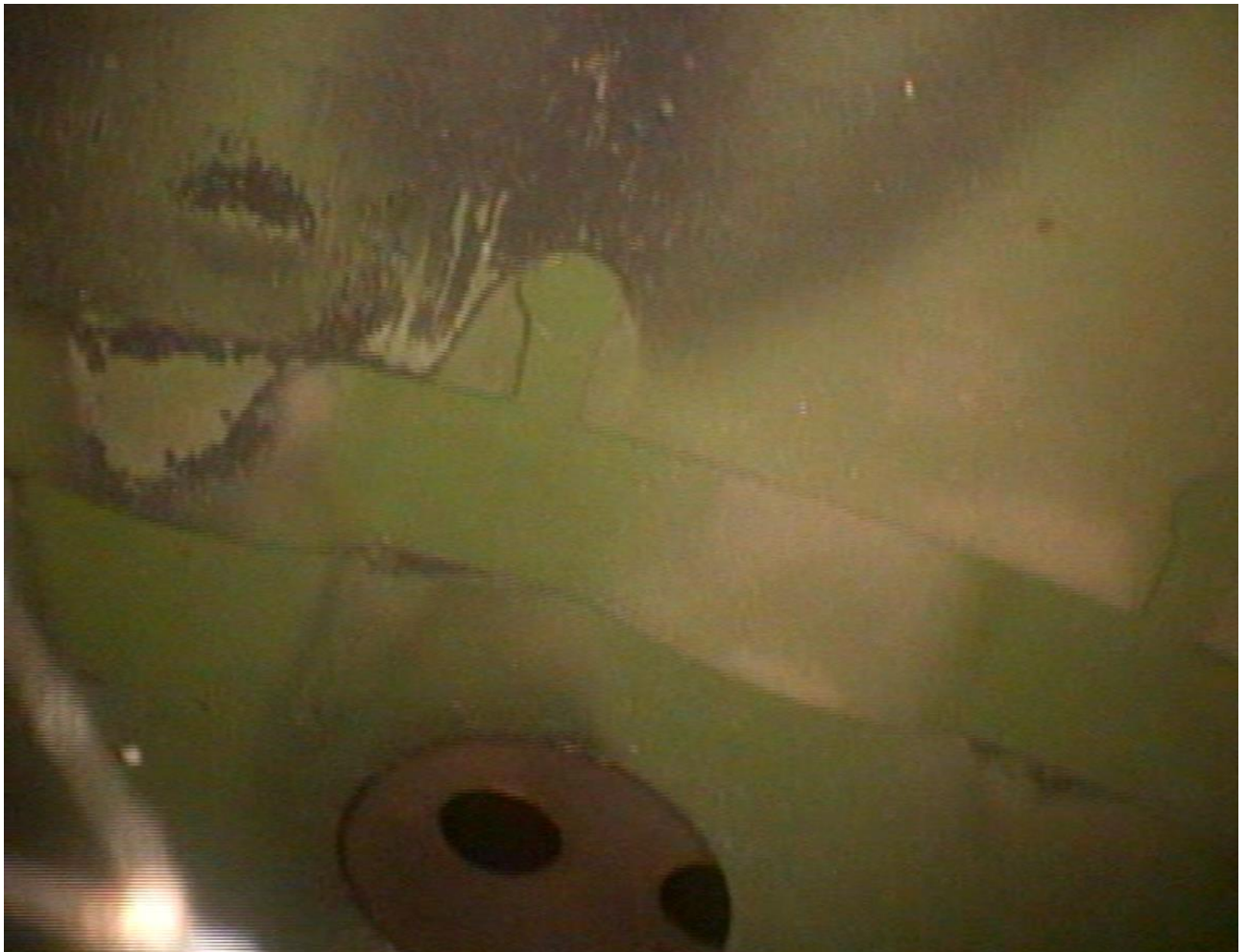


Pilt 10. D-1M seestpoolt

Pildil 15 on näha D-1M sisemus, mis oma aja kohta nägi väga hea välja ning sai uue määrdekihi ja kokku tagasi pandud. Töökorras olekul katsetamine seisnes akutrelli otsa panekuga ja mõõtes multimeetriga pingeid väljundklemmidelt. Multimeeter kuvas vastavalt trelli tekitatud maksimaalsele kiirusele, milleks oli 2450p/min ja mõõdetud generaatori klemmide vahelist pinget, mille väärtus jäi 25,7 VAC juurde.

### 1.3 Mootori seisukord

Turbiinmootoris sai sisestatud tehnoskoopiline sond, millega sai uuritud mootori sisemust, siis ilmus välja, et näiteks põlemiskambris oli alles veel roheline värv mõningate tahmamis jälgedega.



Pilt 11. GTD-350 põlemiskamber

Millest võib järeldada, et mootorit kasutati võib-olla korraks käivitamiseks või siis äärmisel juhul töötas ka mõningad minutid ja peale seda konserveeriti ära ning seisis järgmised mitukümmend aastat väljas keskkonna mõjude käes, siis on mootori seisukord väga hea.

Turbiin labad nägid ka heas seisukorras välja, küll aga oli nende külge kogunenud tolmu ja muu mustust, arvatavasti õli pärast, mis kanti peale, kui konserveerimist tehti. Muus osas ei leitud muid kahjustumisi jälgi.

## 2. Generaator

### 2.1 Cascadia Motion DS-250-115

Esimeseks valikuks olevaks generaatoriks on USA-s toodetud Cascadia Motion LLC poolt toodetud 3-faasiline püsिमagnet sünkroon Cascadia Motion DS-250-115.



Pilt 12. DS-250-115 [3]

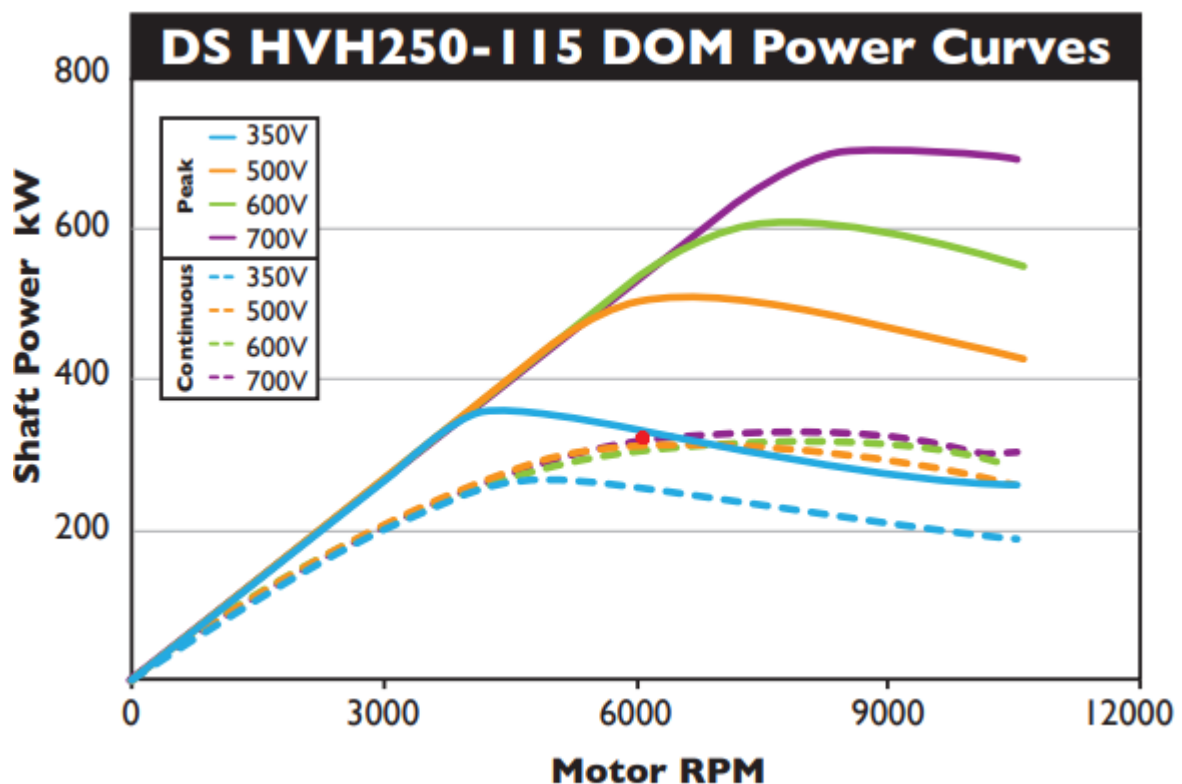
Cascadia on kokku pannud 2 BorgWarneri toodetud elektrimootorit/generaatorit HVH250-115P, mille nimiaandmed on järgmised [1]:

Tabel 2. DS-250-115 nimiaandmed

|                         |                            |
|-------------------------|----------------------------|
| Tüüp                    | 2x BorgWarner HVH250-115P  |
| Maksimaalne võimsus     | 680 kW                     |
| Pidev võimsus           | 300 kW (jahutusest olenev) |
| Maksimaalne Pinge       | 800 VDC                    |
| Maksimaalne vool        | 700 ADC                    |
| Maksimaalne temperatuur | 160 °C                     |
| Kaal                    | 109 KG                     |

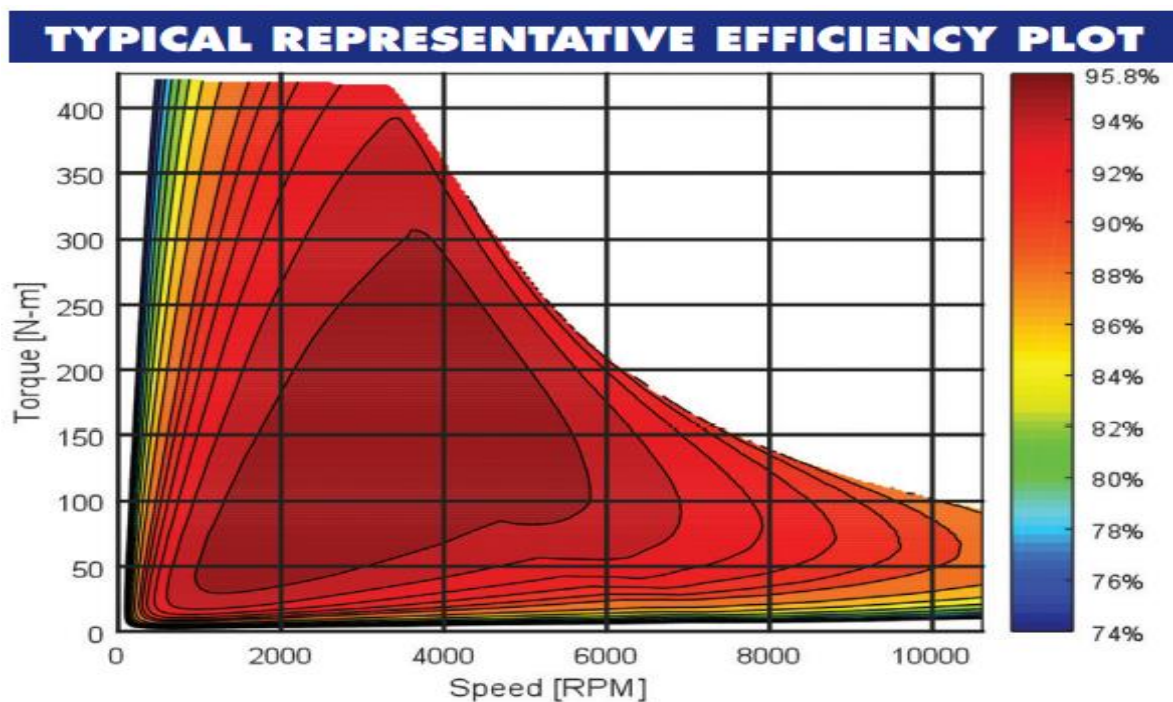
Tabelist loeme välja, et Cascadia kasutab antud koosluses kahte BorgWarneri elektrimootorit/generaatorit, et saavutada pidevaks võimsuseks 300 kW, mis on oleneb jahutusest. Maksimaalseks võimsuseks lubatakse kuni 680 kW. Jahutustüüpideks on nii vedelik, õhk kui ka kombineeritud jahutus. Tootja annab küll maksimaalseks temperatuuriks 160 °C, kuid kasutajajuhend annab hoiatuse, et hoida jahutusvedelik või õli alla 70 °C.

Graafikul (Graafik 1.) näitab punane täpp ära pideva võimsuse 6000 p/min juures, mis on ühtiv mootori väljund võlliga. Selleks on antud juhul ligikaudu 310 kW, mida antud kooslus suudaks pidevalt toota 700 VDC süsteemis. Maksimaalseks tootmiseks oleks ligikaudu 500 kW, mis on oleneb jahutussüsteemi võimekusest.



Graafik 1. Kahe mootori koostöö graafik [8]

Meil on teada generaatori tööpiirkond ja toodetav võimsus, siis järgmiseks kriteeriumiks on generaatori efektiivsus, et kas on võimalik toota piisavalt palju elektrienergiat põletatud kütusest, mida näitab meile graafik (Graafik 2.):



Graafik 2. Efektiivsus graafik [9]

Graafikul (Graafik 2.) loeme välja, et 6000 p/min piirkond jääb efektiivsuse protsentuaalsuse poolest ligikaudu 90-94% juurde. Kuna turbiinmootor on võimeline väljundvõllil välja andma 380 Nm, siis ei teki probleeme generaatori maksimaalse koormamisega, seega antud juhul mõlemast komponendist antakse välja maksimum.

## 2.2 Emrax 348

Teiseks generaatoriks sai välja otsitud parameetrite poolest sobiv Sloveenia ettevõtte Emrax d.o.o poolt toodetud 3-faasiline püsिमagnet sünkroon elektrimootor/generaator Emrax 348.



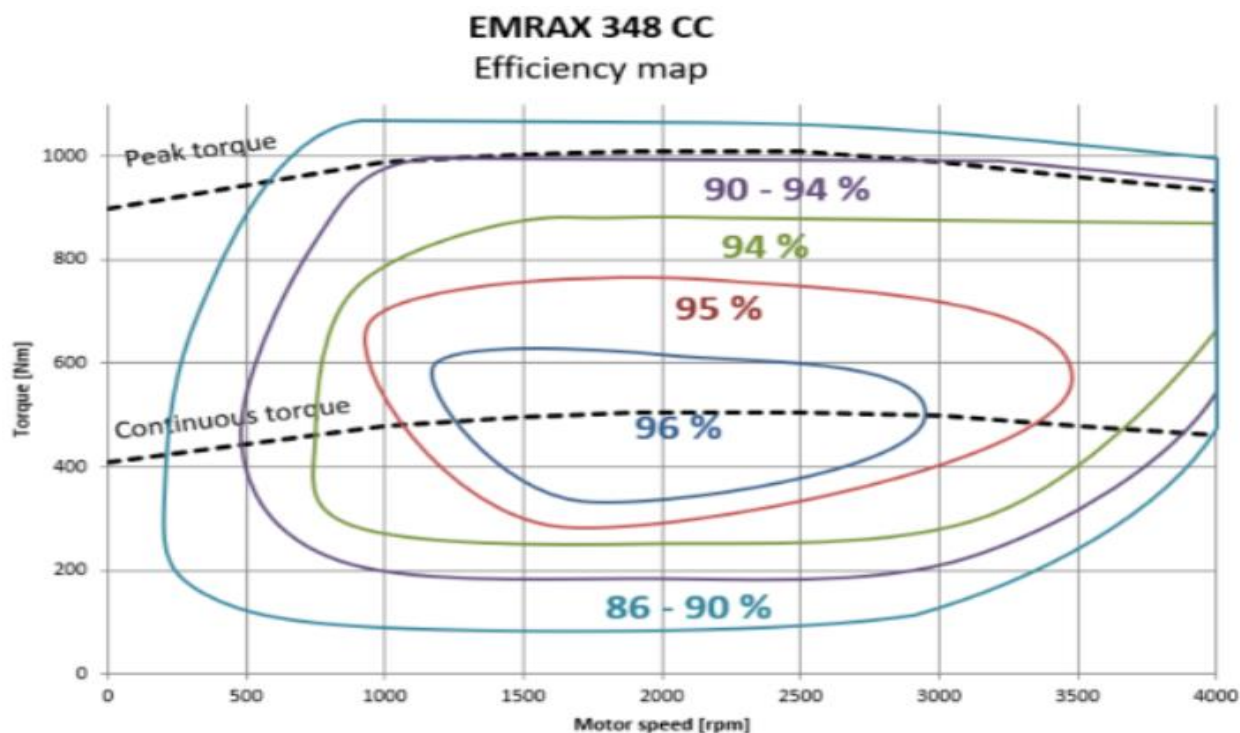
Pilt 12. Emrax 348 [10]

Emrax 348 nimiaandmed on järgmised:

Tabel 3. Emrax 348 režiimide nimiaandmed [10]

|                         | Emrax 348 HV | Emrax 348 MV | Emrax 348 LV |
|-------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Maksimaalne pinge       | 800 VDC      | 800 VDC      | 420 VDC      |
| Maksimaalne võimsus     | 170 kW       | 260 kW       | 380 kW       |
| Pidev võimsus           | 85 kW        | 129 kW       | 210 kW       |
| Maksimaalne vool        | 280 ADC      | 450 ADC      | 1100 ADC     |
| Pidev vool              | 140 ADC      | 210 ADC      | 550 ADC      |
| Maksimaalne pöörete arv | 4000 p/min   |              |              |
| Maksimaalne temperatuur | 120°C        |              |              |
| Efektiivsus             | 92-98%       |              |              |
| Ühendusviis             | Täht         |              |              |
| Kaal                    | 42 KG        |              |              |

Tabelist loeme välja, et Emrax pakub 348-le veel alamudeleid vastavalt pingele – 800 V või 420 V. Vastavalt pingeklassile oleneb kaabli valik, sest mida kõrgemaks läheb pinge, seda peenemat kaablit on võimalik kasutada, kuna voolu lähevad väiksemaks.



Graafik 3. Emrax 348 efektiivsus graafik kombineeritud jahutuse korral [10]

Efektiivsuse graafikust (Graafik 3.) loeme välja, et mootori maksimaalses võimsusel oleva väljund võlli nimipöörtega sobivaid pöördeid pole, seega on vaja kasutada reduktorit 2:1, et tuua pöörded 2 kordselt allapoole, mis tähendab, et mootori väljundvõlli poolt antud moment suureneb 2 korda ja saavutab seejärel 760 Nm ja nimipöörded oleks peale reduktorit 2952 p/min, mis annab generaatori poolt 94 protsentuaalse efektiivsuse, mil turbiinmootori töörežiim oleks 100 protsenti peal.

## 2.3 Inverterid

Et generaatori poolt toodetud elektrienergia edasi liiguks õigete parameetritega elektrivõrku ehk muudab toodetava alalisvoolu (DC) vahelduvvooluks (AC), siis on vaja peale generaatorit paigaldada inverter. Selleks sai välja valitud Wolf speed Inc. DC/AC inverter CRD300DA12E-XM3, mille nimiaandmed on järgmised:

Tabel 2. Inverteri nimiaandmed [11]

|                                                |     |
|------------------------------------------------|-----|
| Nimi sisend alalispinge (VDC)                  | 800 |
| Maksimaalne sisend alalispinge (VDC)           | 900 |
| Maksimaalne sisend alalisvool (ADC)            | 300 |
| Nimi temperatuur (°C)                          | 25  |
| Maksimaalne temperatuur (°C)                   | 90  |
| Maksimaalne vahelduvvool väljundis (AAC)       | 360 |
| Maksimaalne vahelduv pingeline väljundis (VAC) | 800 |

Et hoida antud tootmisjaama mobiilsena, on väljavalitud inverter mõõtudelt väike – 27,8 x 11,5 x 22,7 cm.



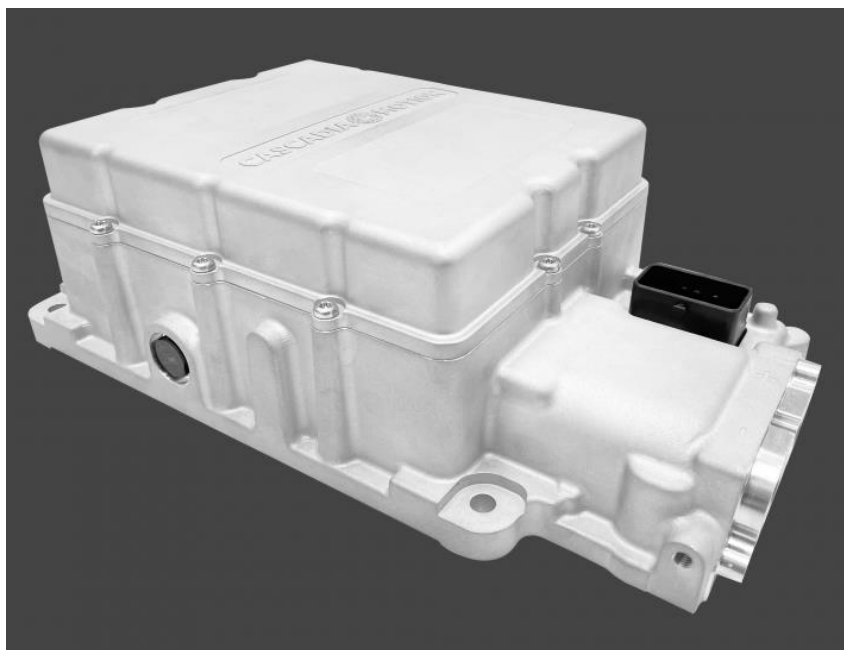
Pilt 13. WolfSpeed inverteri väljanägemine [11]

Samuti pakub inverteid ka Cascadia, kus tulevad välja 3 eksemplaari, sest nende süsteemne pinge on sobilik 24 voldiga nagu ka turbiinmootori süsteem ning on võimelised vastu võtma 800 V alalispinget. Nendeks on siis järgmised:

Tabel 6. Inverterite andmed [9]

|                                   | CM200DZ | RM100DZ | RM300DZ |
|-----------------------------------|---------|---------|---------|
| Nimipinge, VDC                    | 840     | 820     | 820     |
| Maksimaalne pinge, VDC            | 860     | 850     | 850     |
| Nimivool, ADC                     | 200     | 150     | 450     |
| Maksimaalne vool, ADC             | 400     | 220     |         |
| Kaal, KG                          | 6,75    | 8       | 20      |
| Süsteemipinge, VDC                | 24      | 24      | 24      |
| Juhtme ristlõige, mm <sup>2</sup> | 16-50   | 35-95   | 125-150 |

Loetletud inverterid on kinnise ehitusega ja seega on rakendatud ettevaatusabinõud igasuguste ohtude jaoks nagu näiteks üle pinge, ülekuumenemise, füüsilised vigastuste (IP67 ja IP6K9K). Ette on nähtud vedelikjahutus nagu ka generaatoritel.



Pilt nr 14. Cascadia inverter CM200DZ [9]

## 2.4 Võrdlusanalüüs

Mõlemad elektrimootorid/generaatorid on 3-faasilised püsomagnet sünkroonmootorid, mis tähendab, et nende hoolduskulud on madalamad kui tavalisel asünkroonmootoril, millel on rootorimähis ja staatorimähis, aga kuna tegemist on püsomagnetitega, siis on generaatorite hinnad kõrged. Antud juhul mähiseid ei eksisteeri ning staatori osa on asendatud püsomagnetitega ja rootor on kaetud elektrotehnilise terasest plekiga.

Kui üldiselt sama võimsusastmega (300 kW) generaatorid kaaluvad tonnides, siis välja leitud generaatorid on vahemikus 42 kilogrammi (Emrax) ja 109 kilogrammi (Cascadia), mis tõstab kaalu ja võimsuse suhte kõrgele – 6,19 kW/kg Emrax 348 ja 6,24 kW/kg Cascadia DS-250-115 puhul.

Kui Cascadia DS-250-115 saab turbiinmootori väljund võlli külge ühendada otseselt, siis Emraxi 348 puhul tuleb rakendada reduktorit 2:1, et tuua turbiinmootori väljund võlli poolt tekitatud pöörlemissagedus allapoole 2-kordselt, ehk siis ~3000 p/min peale.

Cascadia DS-250-115 on kokku pandud kahe BorgWagneri elektrimootor/generaatoriga, siis on antud koosluse mass üle saja kilo, täpsemalt siis 109 kilogrammi, mil Emrax 348 kaal on 42 kilogrammi. Isegi, kui juurde arvata reduktori kaal, siis Emrax-i kooslus ei saavutaks Cascadia kaalu, ent Cascadia lahendus on kõige sõbralikum mehaaniliselt poolelt, sest puudub lisa reduktor, mis suurendab ka mehaanilisi kadusid ja lisab veel lisakulutusi hoolduse näol.

Kuna antud lahenduse eesmärk on toota elektrienergiat, siis mängib rolli maksuvus – Cascadia DS-250-115 oma suuruse ja võimsuse poolest kajastub ka hinnakirjas, nimelt soovib Cascadia oma elektrimootor/generaatori eest saada ligikaudselt 18 800 USA dollarit. Emraxi 348 eest soovib Emrax d.o.o saada 10 500 kuni 12 000 eurot, millele lisandub veel reduktori hind.

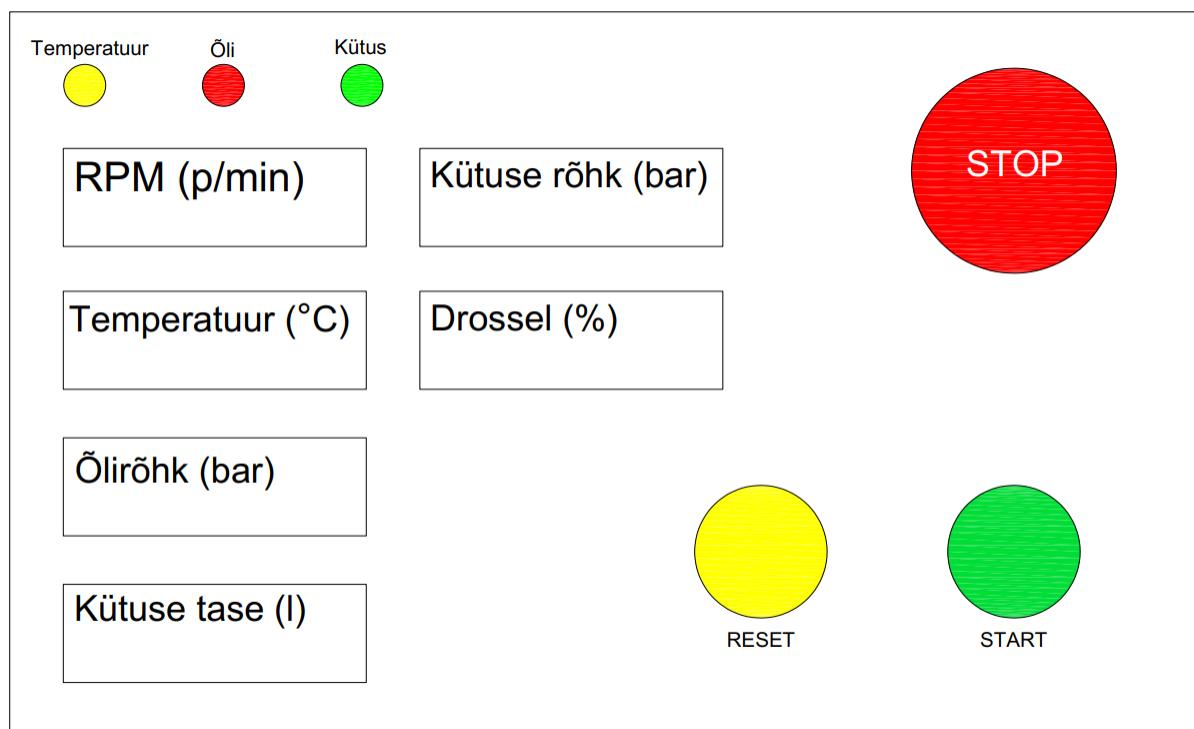
Cascadia pakub ka enda poolseid lahendusi, mis aitaks lihtsustada ja isegi ehk välistada ühilduvus probleeme, mis võib tekkida, kui panna kaks erifirma komponenti kokku. Peamiselt tarkvaralised probleemid, sest riistvaraliselt on võimalik sobitada komponente.

Kuna elektritootmise pealmised komponendid – inveter ja generaator, on võimelised töötama pingel 800 VDC, siis see aitab optimeerida kaabli ristlõiget.

### 3. Juhtpaneel turbiinmootorile

#### 3.1 Juhtpaneeli iseloomustus

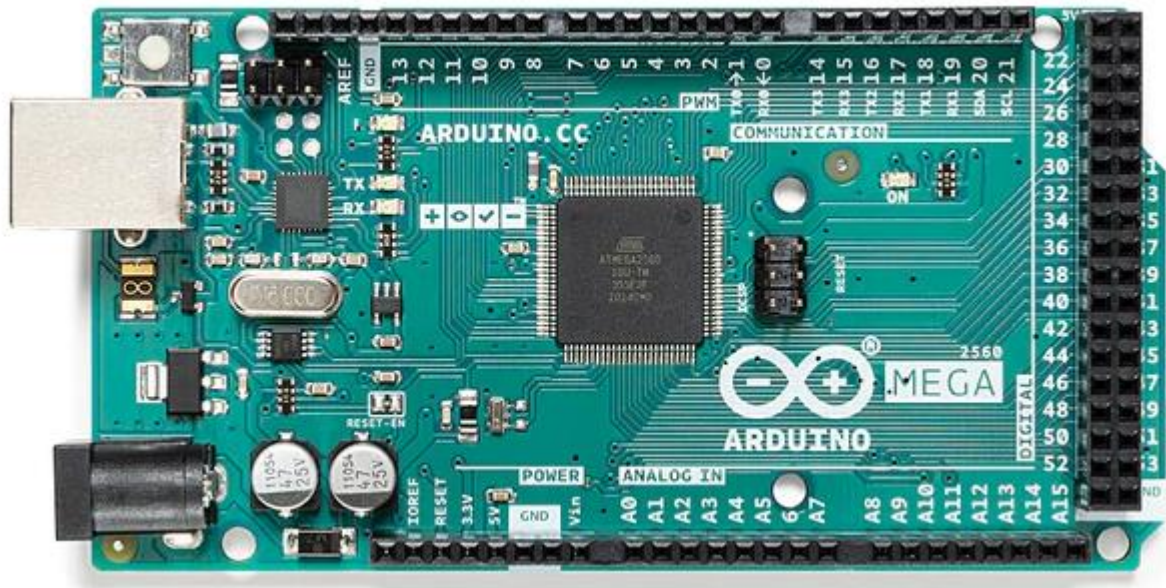
Juhtpaneelil peab olema kuvatud järgmise parameetrid turbiinmootori töö jälgimiseks: drosseli asend protsentuaalselt, kütusetase paagis, temperatuur põlemiskambris, õlirõhk, kütuse rõhk ja pöörded. Kõiki neid parameetreid hakatakse kuvama digitaalsel ekraanidel juhtpaneeli peal, et oleks ülevaade, samuti paigaldatakse LED märguande tuled temperatuuri, õlirõhu ja kütuse taseme kohta, sest need on peamised faktorid, mis mängivad rolli mootori korrektses töös. Temperatuur, sest kui liigselt kuumaks läheb põlemise tagajärjelt keskkond, on ees oodata sulamist või laagrite kinnijäämist, mis oleks katastroofiline hetk. Samasugune seis on ka õlirõhuga, kuna enam ei toimuks mootori seesmiste komponentide määrimist. Kütuse taseme „punase tulega“ on olukord lihtne – pole kütust, pole ka põlemist ja pole ka mootori tööd, aga kuna inimene kipub unustama, siis teatud liitritest hakkaks tuli märku andma vähesest kütuse kogust, täpselt nagu autodel. Juhtpaneeli väljanägemine on kujutatud pilt 15:



Pilt 15. Juhtpaneel

### 3.2 Juhtpaneeli kontrollid

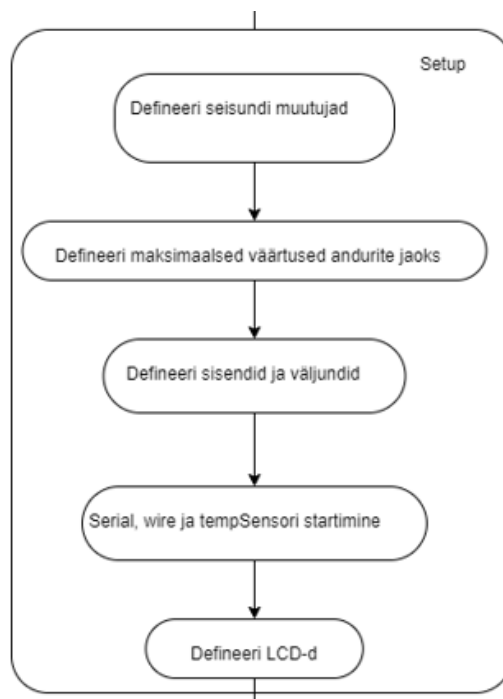
Juhtpaneeli ajuks on Arduino Mega, mis on mikrokontroller, millel on 54 digitaalset sisendit/väljundit ja 16 analoog sisendit. Operatiiv pingeks on ettenähtud tootja poolt 5 V, toitepingeks on 7-12 V, seega võimalik anda toitepinget Arduinole näiteks autoaku või mootorraata aku pealt. [12]



Pilt 16. Arduino Mega [12]

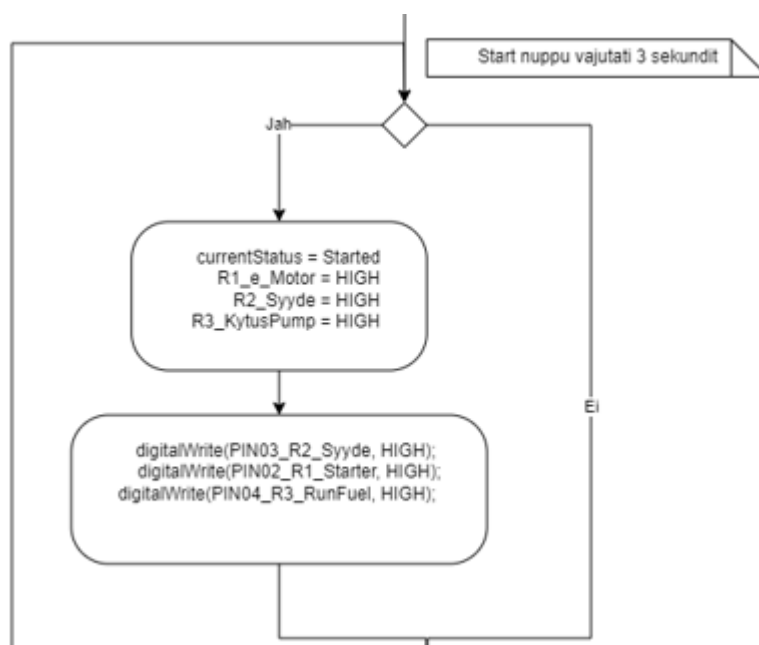
Arduino Mega läheb kasutusse sellepärast, et ära toetada mootori kohta kuvavate ekraanide hulk ja antud juhul on neid 6 tükki. Iga displei vajab 6 digitaal väljundit, mis tähendab, et kasutusele lähevad 36 digitaal väljundid, mida UNO puhul ainult 16 tükki aga Megal on neid 54, mis jätab ruumi ka tulevikus tulevaste arenduste jaoks.

Arduino töötab järgmise loogikaga:



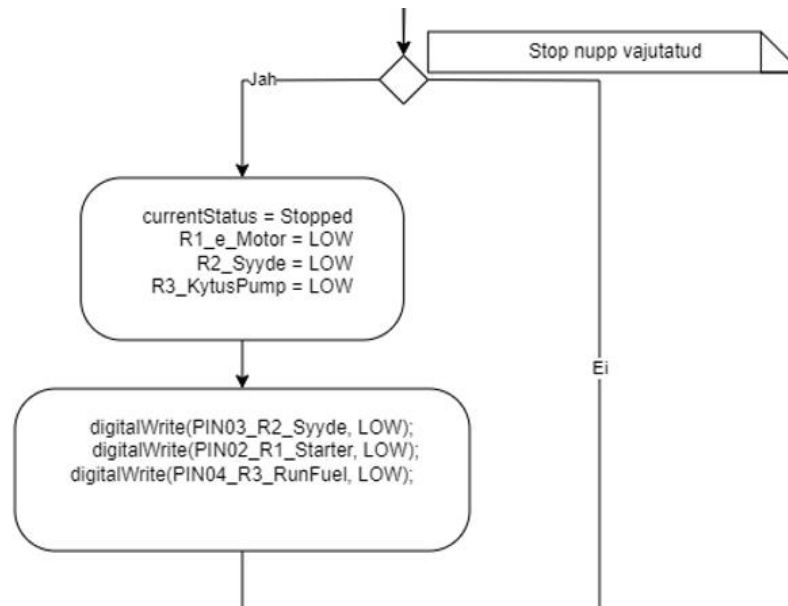
Pilt 17. Setup funktsioon

Funktsioon setup käivitatakse korra peale Arduino sisselülitamist või lähtestamist (restart).



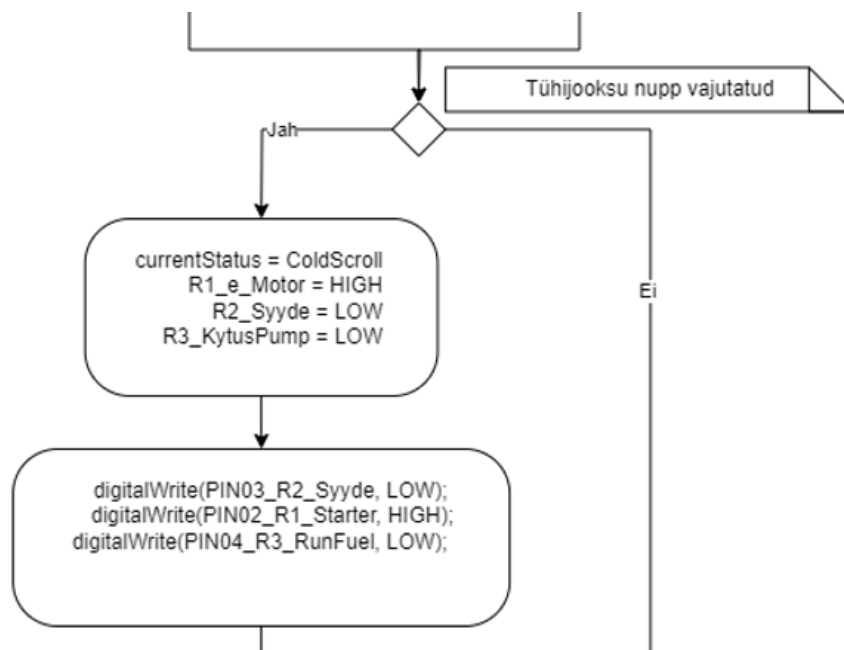
Pilt 18. Start nupu loogika

Vajutades start nuppu, siis käivitatakse koodirida ja hakkab käima blokk „started“, millega järgneb releedele impulss. Kui ei vajutata, siis kehtib „stopped“ olukord.



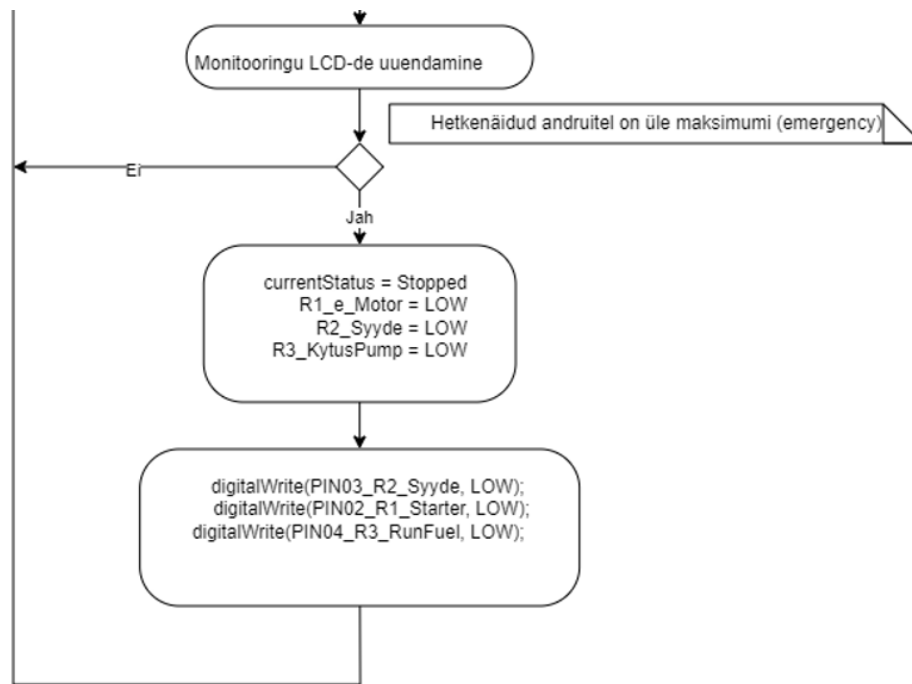
Pilt 19. Stopp nupu loogika

Kui vajutada stopp nuppu, siis käivitatakse järgmine loogika, et kõik vajalikud komponendid mootori tööks nagu kütus ja süüde, siis nendel releedel võetakse toitepinge maha.



Pilt 20. Reset nupu loogika

Kui vajutada reset nuppu, siis lülitatakse välja süüde ja kütus ning antakse starterile täisvõimsus, et põlemiskamber kütusest tühjaks tõmmata, sest kui anda süüdet, mil on kogunenud suurem hulk kütust ühte kohta, siis sealt tulenev detonatsioon oleks katastroofiline.



Pilt 21. Hädaolukorra loogika

Kui mõne anduri väärtus ületatakse, siis läheb käiku stopp nupule sama loogika, et kõik asjad lülitatakse välja, et vältida kahju mootorile.

### 3.3 Juhtpaneeli kodeerimine

Selleks, et kontrolleri teaks, mida teha, siis on vaja selleks kirjutada C programmeerimis keeles kood Arduino enda poolt pakutavas programmis Arduino IDE, et anda talle ette käsuahtel, kui toimub nupuvajutus või anduritest tulevat infot vaja protsessida, kuvada anduritest tulenev info LCD displeile või anda näiteks relele impulssi. Selleks kasutatakse Arduinol analoog ja digitaal sisendeid – analoogi puhul kuvatakse defineeritud väärtuste vahemik vastavalt anduritele/nuppudele, digitaali puhul on tegemist „low“ või „high“ olekuga, et kas on sees või väljas nuppude korral, kui vaja kuvada infot displeile, siis 1 digitaalne sisend tähistaks 1 bitti infot.

Enne, kui hakkama kirjutama Arduinole käsukoode, on vaja ära defineerida, mis sisendeid me kasutame:

```
const int PIN02_R1_Starter = 2;           // Start
const int PIN03_R2_Syyde = 3;             // Süüde
const int PIN04_R3_RunFuel = 4;           // Kütus

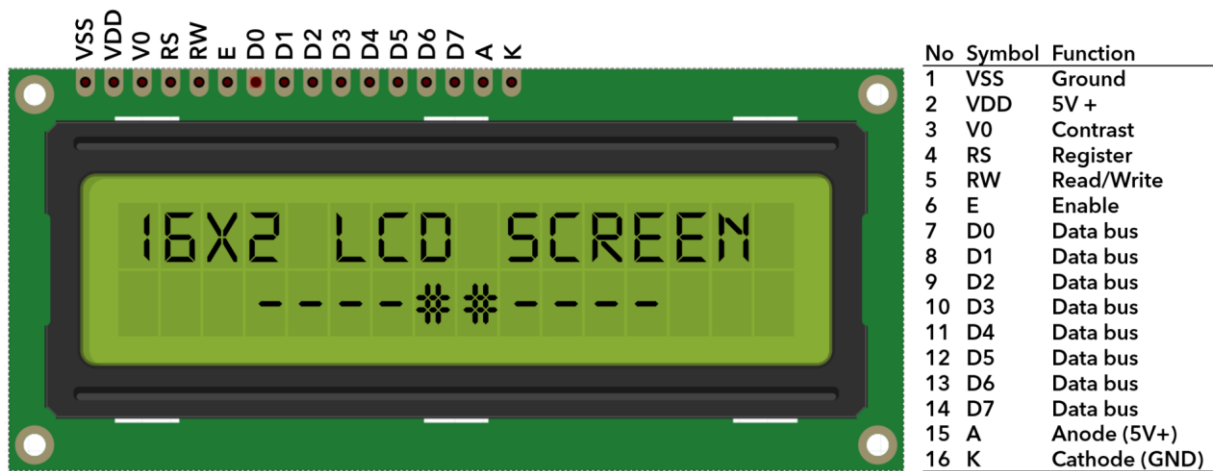
const int PIN05_Start = 5;                // START
const int PIN06_Stop = 6;                 // STOP
const int PIN07_coldScroll = 7;           // Tühijooks

const int PINA0_RPM = A0;                 // RPM (mootori pöörded)
const int PINA1_Temp = A1;                // Põlemiskambri temperatuur
const int PINA2_FuelPressure = A2;        // Kütuse rõhu andur
const int PINA3_FuelLevel = A3;           // Kütuse taseme andur
const int PINA4_Drossel = A4;             // Drosseli asend
const int PINA5_OilPressure = A5;         // Õlirõhu andur
```

Siinsel koodireal määramegi ära, et digitaal kahest kuni digitaal neljani on meil 5-voldise impulsi andmine releeni ja digitaal viiest kuni digitaal seitsmeni on nuppude vajutus. Edasi tulevad read andurite kohta, mis kasutavad analoog sisendeid nullist kuni viieni.

Et info jõuaks LCD ekraan, siis on vaja kirjutada järgmine koodirida:

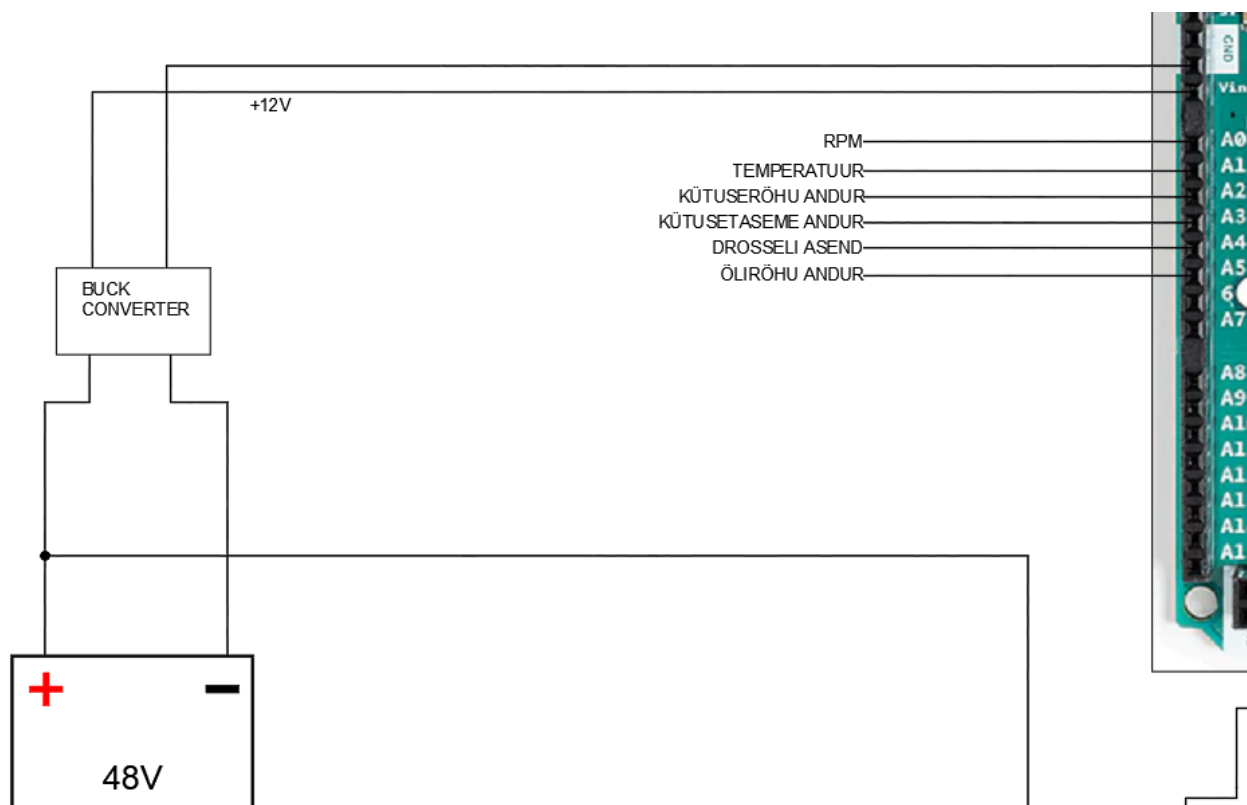
```
const int PIN08_LCD1_RS = 8;
const int PIN09_LCD1_ENABLE = 9;
const int PIN10_LCD1_DATA4 = 10;
const int PIN11_LCD1_DATA5 = 11;
const int PIN12_LCD1_DATA6 = 12;
const int PIN13_LCD1_DATA7 = 13;
LiquidCrystal lcdRPM(PIN08_LCD1_RS, PIN09_LCD1_ENABLE, PIN10_LCD1_DATA4,
PIN11_LCD1_DATA5, PIN12_LCD1_DATA6, PIN13_LCD1_DATA7);
```



Pilt 22. 2x16 biti LCD ekraan

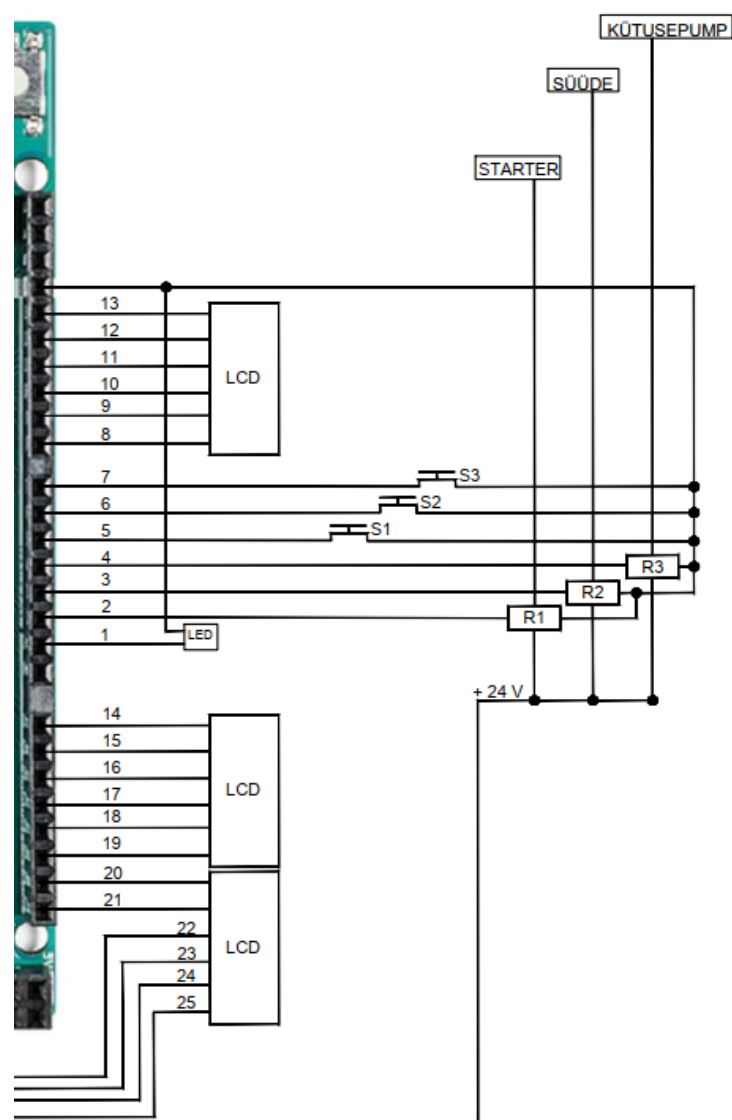
LCD ekraani puhul, mis on 2x16 bitine ehk 2 rida ja 16 veergu, et kirjutada infot ekraanile, on ühendamine näidatud järgmiselt pilt 22. Koodi järgi kasutame ekraanil paremat poolt info kuvamiseks. Ülejäänud ühendused nagu 5 V+, GND, kontrast, register, loe/kirjuta, E, Anood ja katoodi, nende ühendamine on vajalik igal ekraanil. Peamiselt muutub info veergude ja ridade kuvamise loogika. Sama ühendus LCD ekraanile on ka teiste puhul, muutub ainult digitaal väljundi number kuni digitaal väljundini 43.

### 3.4 Juhtpaneeli elektriskeem



Pilt nr 23. Toiteallikas ja analoog sisendid

Et saaks varieeruvate väärtustega sisendeid, siis on ette nähtud analoog sisendid Arduinole ja kasutamegi alates analoog A0 kuni A5 ära järgmiste suuruste mõõtmiseks – mootori pöörded, põlemiskambri temperatuur, kütuserõhk, kütuse tase, drossel servomootori asend ja õlirõhk.



Pilt nr 24. Digitaal väljundid ja sisendid

Pildil nr 24 on näha, et digitaal väljund 1 LED-lamp, et annaks märku, kui vajadus „debug“-ida ehk otsida taha veakohta koodis, juhul kui mingi koodi rida ei eksisteeri või vajab täpsustamist. Edasised digitaal väljundid 2-4 on ette nähtud releele impulsi andmiseks, et käivitaksid kas starteri, süüte või kütusepumba. Järgmised digitaal sisendid 5-7 on lülitid S1, S2 ja S3, et rakendaksid Arduino mälus oleva koodi ja hakkaks sinna kirjutatud koodiahel käivitama ja siis antud olukorras pildil nr 24 olevaid releesid R1, R2 ja R3 lülitama.

### 3.5 Toiteallikas

Originaalse lahenduse puhul helikopteril Mi Mil-2 olid kaks 12SAM-28 akut, millega tekitati jadaühenduses 48-voldine toitepinge ning on ette nähtud aviatsiooni pliiaaku, mida võib kasutada kuni 17 km kõrgusel merepinnast ja mille tähised lahti seletatuna on järgmised - 12 – akude arv jadaühenduses, SAM – starteri aviatsioon monoplokk ja 28 – nominaalne mahtuvus ampertundides [13].



Pilt 25. Aku 12SAM-28 [14]

Ühe uuemat tüüpi 12SAM-28 aku hinnaks on 276 eurot ning neid oleks vaja 2 tükki, seega koguhinnaks oleks 552 eurot [15]. Arduino jaoks piisab ühest mootorratta või auto akust, mille nimipinge jääb 12 voldile, aga kuna starter STG-3 vajab 48 voldist toitepinget käivituseks, siis on vaja ühendada 4 akut jadaühendusse ja akude toitepinge alla toomiseks kasutada „buck converterit“, et tuua toitepinge allapoole enne Arduino toitesisendit nagu pildil 23 kujutatud.

.

## 4. Analüüs

Turbiinmootori ja generaatori koosluseid on 2 tükki, mille majandusliku kokkupanemise ja ära tasuvuse analüüsi tulemused on järgmised:

1. koosluse puhul on turbiinmootoriga ühendatud Cascadia generaator DS-250-115.

| Nimetus                        | Hind                               |
|--------------------------------|------------------------------------|
| Turbiinmootor GTD-350          | 5000 eurot                         |
| Generaator Cascadia DS-250-115 | 18 800 USA dollarit (17 871 eurot) |
| Arduino Mega Kit               | 100 eurot                          |
| Inverter Wolfsped              | 9400 USA dollarit (8 935 eurot)    |
| Kokku                          | 31906 eurot                        |

Tabel 3. 1. koosluse kogumaksumus

Liites kokku komponentide maksuvused, saame, et 1. koosluse realiseerimiseks on vaja 31 906 eurot. Sinna ei ole arvestatud töötundidele kuluvaid kulutusi, sest näiteks turbiinmootori hooldustöödega võib tulla paljusid tagasilööke, et majanduslikult ei pruugigi olemasoleva mootori töökorda viimine mõistlik olla, vaid lihtsam uus eksemplar osta.

2. koosluse puhul on turbiinmootoriga ühendatud Emrax 348 generaator.

| Nimetus               | Hind                            |
|-----------------------|---------------------------------|
| Turbiinmootor GTD-350 | 5000 eurot                      |
| Emrax 348             | 12 000 eurot                    |
| Arduino Mega Kit      | 100 eurot                       |
| Inverter Wolfsped     | 9400 USA dollarit (8 935 eurot) |
| Reduktor 3:1          | 1000 eurot                      |
| Kokku                 | 27035 eurot                     |

Tabel 4. 2. koosluse kogumaksumus

Ka teise koosluse puhul ei ole veel arvestatud töötundidele kuluva summaga, kuid teine kooslus on esimesest kooslusest 4 871 eurot odavam.

Ära tasuvus periood tähendab, et kui kaua läheb aega, et süsteem ennast nulli teeniks ehk antud juhul, kui palju aega kuluks, et müüa ära teatud hulk elektrienergiat ehk kWh.

1. koosluse puhul on teada, et Cascadia generaator DS-250-115 kombineeritud jahutuse puhul on võimeline tootma ligikaudu 310 kW, mille 1 tunni elektrienergia tootlikkus saadakse järgneva valemiga (2):

$$1 \text{ kWh} = 1 \text{ kW} \cdot 1 \text{ h} \quad (2)$$

Kus 1 kW – 1 kilovatt energiat

1 h – 1 tund ehk 60 minutit

1 kWh – 1 tunnis toodetud energiakogus

Vastavalt valemile (2) leitakse 1 tunni jooksul toodetud energiakogus:

$$310 \text{ kWh} = 310 \text{ kW} \times 1 \text{ h}.$$

Generaator tootlikkus on 310 kW elektrienergiat 1 tunni jooksul.

Toetudes simulatsioonile 2021 aasta rakendusuuringust, kus käsitleti mitmeid turbiinmootoreid, nendest üks oli GTD-350 ja seal märgiti 18 tunnise töö kütusekuluks 2098 kilogrammi 80% töökoormuse juures, mis tähendab, et mootor võttis kütust keskmiselt 116,5 kg/h [16]. Kui panna mootor 100% töökoormusele, siis kütuse kulu suureneks ligikaudselt 150 kg/h.

Diisli erikaal on 820 kilograami  $\text{m}^3$  kohta (suvine) [17]. Ehk 1L diislit on 0,82 kg ja kuna tunni kuluks on 150 kg, diisli kulu liitrites leitakse valemi (4) kaudu:

$$\frac{\text{kg}}{\text{kg/m}^3} * 1000 = \text{liiter} \quad (4)$$

Kus kg – kütuse kogus kilogrammides

Kg/l – kütuse erikaal kuupmeetri kohta

Diisli kogu liitrites leitakse järgneva valemi abil:

$$L = \frac{150 \text{ kg}}{820 \text{ kg/m}^3} * 1000 = \sim 183 \text{ L diislit}.$$

Arvutades saame, et tunnikuluks on ligikaudu 183 liitrit diisli ning 02.05.2022 päevaga on diisli hinnaks 1,8 eurot liiter, mis teeb majanduslikult tunnikuluks valemi (5) kaudu [18]:

$$\text{Liiter} \times \text{€/L} = \text{€} \quad (5)$$

Kus, Liiter – kütuse kogus

€/L - kütuse maksumus liitri kohta

Kütusele kuluv rahaline summa leitakse järgneva valemi abil:

$$183 \text{ L} \times 1,8 \text{ eur/L} = 324 \text{ eurot ja } 40 \text{ senti.}$$

Saime teada, et tunnis kuluva kütuse hinnaks on 324 eurot ja 40 senti. Ühes tunnis annab generaator välja 310 kWh energiat ning saame arvutada tunnikulu kWh kohta:

$$\frac{324,4 \text{ €}}{310 \text{ kWh}} = 1,04 \text{ €/kWh}$$

Kasutades generaatoriks Cascadia DS-250-115 generaatorit, siis on tunnikuluks kWh kohta 1,04 eurot.

2. koosluse puhul on generaatoriks Emrax 348, mille puhul on pidevaks võimsuseks 129 kW ning saame kWh elektrienergia koguse vastavalt valemile (2):

$$129 \text{ kW} \times 1 \text{ h} = 129 \text{ kWh}$$

Saame teada, et Emrax 348 toodab ühes tunnis 129 kWh elektrienergiat.

Turbiinmootori töötaks ikkagi 100% võimsusega ning kütuse kulu ei muutuks, seega arvutame tunnikulu kWh kohta:

$$\frac{324,4 \text{ €}}{129 \text{ kWh}} = 2,51 \text{ €/kWh}$$

Kasutades generaatoriks Emrax 348 generaatorit, siis on tunnikuluks kWh kohta 2,51 eurot.

28.04.2022 seisuga oli MWh hind Nordpooli järgi märtsikuus keskmine MWh hind 151,23 eurot, mis teeb keskmiseks kWh maksumuseks 0,15123 eurot ning leitakse järgmise valemi (3) abil:

$$\text{€/MWh} / 1000 = \text{€/kWh} \quad (3)$$

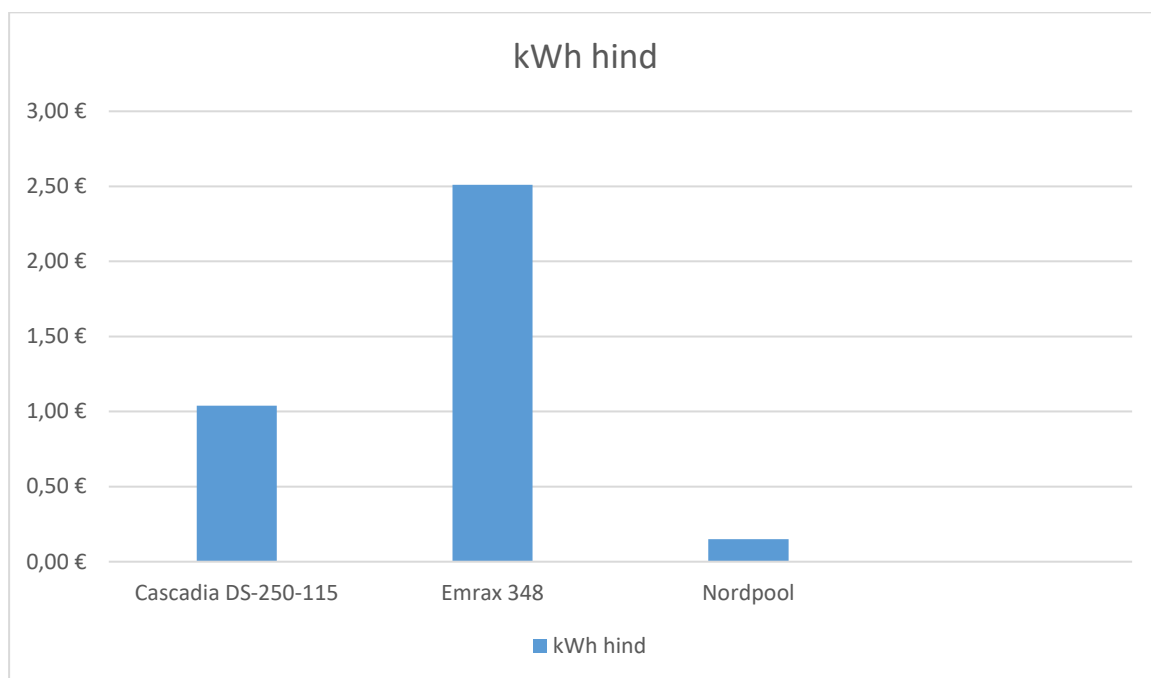
Kus €/MWh – megavatt-tunni väärtus eurodes

€/kWh – kilovatt-tund eurodes

Saame teada, kui palju on väärt 1 tunni jooksul toodetud elektrienergia väärtus kilovatt-tundides valemile:

$$\frac{151,23 \text{ MWh}}{1000} = 0,15123 \text{ kWh.}$$

Diagramm 1. kWh hind.



Diagrammil (Diagraam 1.) näeme võrdlust generaatorite ja Nordpooli kWh hinna kohta ning loeme välja, et 1. kooslusega toota elektrienergiat, tuleb tunnis toodetud kWh hind ligikaudu 7 korda kõrgem kui elektrivõrgus müüdav kWh hind.

2. koosluse puhul suurenes kWh hind võrreldes Nordpooli kWh hinnaga veelgi rohkem – ligikaudu 17 kordseks.

.

## 5. KOKKUVÕTE

Käesoleva lõputöö *Turbiinmootor-generaator* peamiseks eesmärgiks oli välja uurida parim kombinatsioon turbiinmootori ja generaatori vahel, välja mõelda juhtpaneel turbiinmootori kontrollimiseks ning analüüsida turbiinmootor-generaatori otstarvekust majanduslikult.

Esimeses peatükis tutvus autor turbiinmootoriga, selle ehitusega ja põhimõttega. Tegi hooldustöid vajalikele väli komponentidele ja aitas turbiinmootorit kapitaalremontida.

Teises peatükis autor uuris parimat olemasolevat generaatorit, mis pakuks ilma suurema ehituseta võimalust ühendada generaator turbiinmootori külge, arvestades peamiseks teemaks võimalikult suurt tootmisvõimsust ning analüüsis kahe parima variandi parameetreid.

Kolmandas peatükis autor tutvus programmeerimis keelega ja Arduinoga ning kirjutas koodi, et juhtpaneeli kaudu saaks teada informatsiooni mootori kohta ja et mootorile saaks anda käskluseid stardiks või seismajäämiseks.

Neljandas peatükis autor tegi majandusliku analüüsi, kui toota turbiinmootor-generaatoriga tund aega elektrit, küll jäeti välja hooldusele kuluv summa, sest rikkeid ei näe ette ja tulemustest tuli välja, et kui panna tööle esimene kooslus (Cascadia), siis on kWh hinnaks 1,04 eurot. 2. koosluse puhul kWh hind tõusis 2,51 eurole, sest generaator toodab vähem elektrienergiat. Võrreldes Nordpool märtsikuise keskmise hinnaga on antud generaatorite kooslused 7 korda või 17 korda kallim kui elektrivõrgust ostetav elektrienergia.

Lõputöö käigus selgus, et praeguste elektribörsi hindadega ei tasuks turbiinmootor-generaatori rakendamine igapäevaselt, sest kütuse hind on kallis, küll saaks kasutada vedelgaasi või mõnda muud kütuseallikat, ent see eeldaks kütusesüsteemi ümberehitust ja tooks kaasa lisakulusid. Kuna antud kombinatsioon on kaalult kerge ning võimalik kerghaagisena järel vedada, siis mobiilse tootmisjaamana hädaolukorras on antud kombinatsioon võrreldes sarnaste diisलगeneraatoritega parim lahendus.

## 6. SUMMARY

The main goal of this thesis *Turbine Engine Generator* was to find out the best combination between the turbine engine and the generator, to design a control panel for controlling the turbine engine and to analyze the purpose of the turbine engine generator economically.

In the first chapter, the author got acquainted with the turbine engine, its construction and principle. Performed maintenance work on the necessary field components and helped overhaul the turbine engine.

In the second chapter, the author studied the best available generators, which would offer the possibility to connect the generator to a turbine engine without major construction, considering the largest possible production capacity, and analyzed the parameters of the two best options.

In the third chapter, the author became acquainted with the programming language and Arduino, and wrote code to find out information about the engine through the control panel and to give the engine commands to start or stop.

In the fourth chapter, the author made an economic analysis of producing electricity with an turbine engine generator for an hour, although the amount spent on maintenance was omitted because no failures are foreseen and the results show that if the first assembly (Cascadia) is put into operation, the price per kWh is 1.04 euros. In the case of the 2nd combination, the price per kWh increased to 2.51 euros because the generator produces less electricity. Compared to Nordpool's average price in March, these generator sets are 7 times or 17 times more expensive than electricity purchased from the electricity grid.

During the dissertation it turned out that with the current power exchange prices, it would not be worthwhile to install a turbine engine generator on a daily basis, because the price of fuel is expensive, liquefied petroleum gas or another fuel source could be used, but it would require fuel system reconstruction and additional costs.

As this combination is light in weight and can be towed as a light trailer, this combination is the best solution compared to similar diesel generators as a mobile production plant in an emergency.

## 7. Kasutatud kirjandus

- [1] Springer Nature, Detonation Control for Poplulsion, Switzerland: Springer International Publishing, 2018.
- [2] W. "-R. S.A.. [Võrgumaterjal]. Available: [https://pwrze.com/storage/file/core\\_files/2018/9/28/fe0e7d5f3ed928e733895ae2c0765c60/zal\\_nr\\_3\\_gtd-350\\_wersja\\_2pl.pdf](https://pwrze.com/storage/file/core_files/2018/9/28/fe0e7d5f3ed928e733895ae2c0765c60/zal_nr_3_gtd-350_wersja_2pl.pdf).
- [3] EASA, European Aviation Safety Agency, 15 Detsember 2015. [Võrgumaterjal]. Available: [https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/EASA%20TCDS%20E127\\_GTD-350\\_issue01\\_20151512\\_1.0.pdf](https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/EASA%20TCDS%20E127_GTD-350_issue01_20151512_1.0.pdf). [Kasutatud 1 Mai 2022].
- [4] Reotemp, REOTEMP Instrument Corporation, [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.thermocoupleinfo.com/type-k-thermocouple.htm>. [Kasutatud 2 Mai 2022].
- [5] Sklad-Electro, „Aviatsiooni varuosad,“ LLC "EMS", [Võrgumaterjal]. Available: <https://sklad-electro.ru/katalog-aviazapchastej/zapchasti-k-vertoletam-mi-8-i-mi-17/starter-generator-stg-3-2-seriya>. [Kasutatud 3 Mai 2022].
- [6] E. A. Ühing. [Võrgumaterjal]. Available: <https://reaa.ru/threads/prodam-svechi-sp-18ua-2p.31043/>. [Kasutatud 29 Aprill 2022].
- [7] Z. LLC. [Võrgumaterjal]. Available: <https://zapadpribor.com/d-1m-preobrazovatel/>. [Kasutatud 3 Mai 2022].
- [8] C. Motion, Cascadia Motion LCC, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.cascadiamotion.com/images/catalog/DataSheets/DS-250-115.pdf>. [Kasutatud 29 Aprill 2022].

- [9] C. M. LLC. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.cascadiamotion.com/images/catalog/800VDCCComparisonChart.pdf>. [Kasutatud 29 Aprill 2022].
- [10] E. d.o.o. [Võrgumaterjal]. Available: [https://emrax.com/wp-content/uploads/2020/03/emrax\\_348\\_technical\\_data\\_table\\_graphs\\_5.4.pdf](https://emrax.com/wp-content/uploads/2020/03/emrax_348_technical_data_table_graphs_5.4.pdf). [Kasutatud 29 Aprill 2022].
- [11] W. Inc, Inc, Wolfspeed, [Võrgumaterjal]. Available: [https://www.mouser.ee/pdfDocs/crd300da12e\\_xm3\\_data\\_sheet.pdf](https://www.mouser.ee/pdfDocs/crd300da12e_xm3_data_sheet.pdf). [Kasutatud 1 Mai 2022].
- [12] Arduino. [Võrgumaterjal]. Available: <https://store.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3>. [Kasutatud 28 Aprill 2022].
- [13] „Счетчики и показания,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://lemzspb.ru/puskovoy-tok-12-sam-28/>. [Kasutatud 10 Mai 2022].
- [14] Infopedia, „Infopedia,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://infopedia.su/17x1038.html>. [Kasutatud 3 Mai 2022].
- [15] A.-B. Ltd, „All-Biz Ltd,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://ua.all.biz/akkumulyatornaya-batareya-12sam-28-g1427937>. [Kasutatud 3 Mai 2022].
- [16] „ÜLIKERGE TURBIINMOOTORI BAASIL ELEKTRIGENERAATORI RAKENDUSUURING,“ TALLINNA TEHNIKAKÕRGGKool, TALLINN, 2021.
- [17] T. L. OÜ, „TT Labor OÜ,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.ttlabor.ee/diisel.html>. [Kasutatud 3 Mai 2022].
- [18] „Hind24,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://kutus.hind24.ee/>. [Kasutatud 3 Mai 2022].
- [19] „Polish Aviation Museum,“ [Võrgumaterjal]. Available: [https://muzeumlotnictwa.pl/zbiory\\_sz.php?ido=251&w=a](https://muzeumlotnictwa.pl/zbiory_sz.php?ido=251&w=a). [Kasutatud 28 Aprill 2022].

[20 „AalokTech,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://aaloktech.in/index.php/product/16x2-lcd-display-green/>. [Kasutatud 28 Aprill 2022].

[21 „Swindon,“ [Võrgumaterjal]. Available:  
] [https://webshop.swindonpowertrain.com/index.php?route=product/product&manufacturer\\_id=16&product\\_id=342](https://webshop.swindonpowertrain.com/index.php?route=product/product&manufacturer_id=16&product_id=342). [Kasutatud 29 Aprill 2022].

[22 C. M. LL, Cascadia Motion LLC, [Võrgumaterjal]. Available:  
] <https://app.box.com/s/laggfxh8q41is81unbw4aby1m2iht7g>. [Kasutatud 29 Aprill 2022].

## LISA 1.

```
/*
  GTD-350 Juhtpaneel
  =====
  Andreas Lynekund

*/
#include <Wire.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#include <LiquidCrystal.h>

// Data wire is plugged into port 3 on Arduino
#define ONE_WIRE_BUS 15 // 15=A1
// Setup a oneWire instance to communicate with any OneWire devices (not
// just Maxim/Dallas temperature ICs)
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
// Pass our oneWire reference to Dallas Temperature.
DallasTemperature tempSensor(&oneWire);

#define Debug (bool) false

bool start = false;
bool R1_eMotor = false;
bool R2_Syyde = false;
bool R3_KytusPump = false;

String currentFunction = "Stopped"; //Võimalikud variandid: Stopped,
Started, ColdScroll.

unsigned long aeg;
int nupuVajutuseAlgas = 0;
boolean uusVajutusAlgas = false;

int Sence_Temp=0;

int startStatus;

long StartupDebounceTime= 0; // the last time the output pin
was toggled
long lastDebounceTime = 0; // the last time the output pin
was toggled
int debounceDelay = 400; // the debounce time; increase
if the output flickers

const int maxTemp = 250;
const int maxRPM = 45500;

const int PIN02_R1_Starter = 2; // Start
const int PIN03_R2_Syyde = 3; // Syyde
const int PIN04_R3_RunFuel = 4; // Fuel Start
```

```

const int PIN05_Start = 5;           // START
const int PIN06_Stop = 6;           // STOP
const int PIN07_coldScroll = 7;     // Tühijooks

const int PINA0_RPM = A0;           // RPM (mootori pöörded)
const int PINA1_Temp = A1;          // Põlemiskambri temperatuur
const int PINA2_FuelPressure = A2;  // Kytuse rõhu andur
const int PINA3_FuelLevel = A3;     // Kytuse taseme andur
const int PINA4_Drossel = A4;       // Drosseli asend
const int PINA5_OilPressure = A5;    // Õlirõhu andur

//LCD vasakpoolseim pin -> Arduino GND
//Teine pin -> Arduino 5V
//Kolmas -> Arduino 5V
//Neljas -> D6
//Viies -> GND
//Kuues -> D7
//LCD pin 7-10 -> Ei yhenda kuskile
//LCD pin 11-14 -> D8-D11
//Viimased 2 pin: Anood ja Katood tasutvalgustuse jaoks (vastavalt 5V ja GND)

/*Esimese LCD pinnid*/
const int PIN08_LCD1_RS = 8;        // Esimese LCD RS
const int PIN09_LCD1_ENABLE = 9;    // Esimese LCD Enable pin
const int PIN10_LCD1_DATA4 = 10;    // Esimese LCD neljas data pin
const int PIN11_LCD1_DATA5 = 11;    // Esimese LCD viies data pin
const int PIN12_LCD1_DATA6 = 12;    // Esimese LCD kuues data pin
const int PIN13_LCD1_DATA7 = 13;    // Esimese LCD seitsmes data pin

const int PIN14_LCD2_RS = 14;
const int PIN15_LCD2_ENABLE = 15;
const int PIN16_LCD2_DATA4 = 16;
const int PIN17_LCD2_DATA5 = 17;
const int PIN18_LCD2_DATA6 = 18;
const int PIN19_LCD2_DATA7 = 19;

const int PIN20_LCD3_RS = 20;
const int PIN21_LCD3_ENABLE = 21;
const int PIN22_LCD3_DATA4 = 22;
const int PIN23_LCD3_DATA5 = 23;
const int PIN24_LCD3_DATA6 = 24;
const int PIN25_LCD3_DATA7 = 25;

const int PIN26_LCD4_RS = 26;
const int PIN27_LCD4_ENABLE = 27;
const int PIN28_LCD4_DATA4 = 28;
const int PIN29_LCD4_DATA5 = 29;
const int PIN30_LCD4_DATA6 = 30;
const int PIN31_LCD4_DATA7 = 31;

const int PIN32_LCD5_RS = 32;

```

```

const int PIN33_LCD5_ENABLE = 33;
const int PIN34_LCD5_DATA4 = 34;
const int PIN35_LCD5_DATA5 = 35;
const int PIN36_LCD5_DATA6 = 36;
const int PIN37_LCD5_DATA7 = 37;

const int PIN38_LCD6_RS = 38;
const int PIN39_LCD6_ENABLE = 39;
const int PIN40_LCD6_DATA4 = 40;
const int PIN41_LCD6_DATA5 = 41;
const int PIN42_LCD6_DATA6 = 42;
const int PIN43_LCD6_DATA7 = 43;

//Defining LCD screens
LiquidCrystal lcdRPM(PIN08_LCD1_RS, PIN09_LCD1_ENABLE, PIN10_LCD1_DATA4,
PIN11_LCD1_DATA5, PIN12_LCD1_DATA6, PIN13_LCD1_DATA7);
LiquidCrystal lcdTemp(PIN14_LCD2_RS, PIN15_LCD2_ENABLE,
PIN16_LCD2_DATA4, PIN17_LCD2_DATA5, PIN18_LCD2_DATA6, PIN19_LCD2_DATA7);
LiquidCrystal lcdFuelPressure(PIN20_LCD3_RS, PIN21_LCD3_ENABLE,
PIN22_LCD3_DATA4, PIN23_LCD3_DATA5, PIN24_LCD3_DATA6, PIN25_LCD3_DATA7);
LiquidCrystal lcdFuelLevel(PIN26_LCD4_RS, PIN27_LCD4_ENABLE,
PIN28_LCD4_DATA4, PIN29_LCD4_DATA5, PIN30_LCD4_DATA6, PIN31_LCD4_DATA7);
LiquidCrystal lcdDrossel(PIN32_LCD5_RS, PIN33_LCD5_ENABLE,
PIN34_LCD5_DATA4, PIN35_LCD5_DATA5, PIN36_LCD5_DATA6, PIN37_LCD5_DATA7);
LiquidCrystal lcdOilPressure(PIN38_LCD6_RS, PIN39_LCD6_ENABLE,
PIN40_LCD6_DATA4, PIN41_LCD6_DATA5, PIN41_LCD6_DATA5, PIN43_LCD6_DATA7);

// the setup function runs once when you press reset or power the board
void setup() {
  Serial.begin(115200);
  Wire.begin();
  tempSensor.begin(); // Thermocouple

  pinMode(PIN02_R1_Starter, OUTPUT);
  pinMode(PIN03_R2_Syyde, OUTPUT);
  pinMode(PIN04_R3_RunFuel, OUTPUT);
  pinMode(PIN05_Start, INPUT_PULLUP);

  pinMode(PINA0_RPM, INPUT);
  pinMode(PINA1_Temp, INPUT);
  pinMode(PINA2_FuelPressure, INPUT);
  pinMode(PINA3_FuelLevel, INPUT);
  pinMode(PINA4_Drossel, INPUT);
  pinMode(PINA5_OilPressure, INPUT);

  lcdRPM.begin(16,2); //16 on ekraani laius ja 2 on ridadae arv.
  lcdRPM.print("P66rded");

  lcdTemp.begin(16,2); //16 on ekraani laius ja 2 on ridadae arv.
  lcdTemp.print("Temperatuur");

  lcdFuelPressure.begin(16,2); //16 on ekraani laius ja 2 on ridadae
arv.
  lcdFuelPressure.print("K6tuser6hk");

  lcdFuelLevel.begin(16,2); //16 on ekraani laius ja 2 on ridadae arv.

```

```

    lcdFuelLevel.print("K6tusetase");

    lcdDrossel.begin(16,2); //16 on ekraani laius ja 2 on ridadae arv.
    lcdDrossel.print("Drossel");

    lcdOilPressure.begin(16,2); //16 on ekraani laius ja 2 on ridadae arv.
    lcdOilPressure.print("6lir6hk");
}

// the loop function runs over and over again forever
/*Panna 3s vajutuse check*/
void loop() {
    if(digitalRead(PIN05_Start)) // Kui nupp on vajutatud, siis uuenda
    loendajat praeguseks ajaks
    {
        if(uusVajutusAlgas == false){
            uusVajutusAlgas = true;
            nupuVajutuseAlgas = millis();
        }
        aeg = millis();
    }
    if(!digitalRead(PIN05_Start)){ //Kui nupp on lahti lastud, siis pane
    uueks alguse ajaks praeguse hetke.
        uusVajutusAlgas = false;
        nupuVajutuseAlgas = aeg;
    }
    int dif = aeg - nupuVajutuseAlgas; //Arvuta aega nupu vajutuse
    algusest.

    if(dif > 3000) // if button is HIGH and 3 seconds has passed, LED on.
    {
        currentFunction = "Started";
        if(currentFunction.equals("Started")){
            R1_eMotor = HIGH;      //STARTER = HIGH
            R2_Syyde = HIGH;      //Syyde == HIGH
            R3_KytusPump = HIGH;  //Kytuse pump = HIGH

            digitalWrite(PIN03_R2_Syyde, HIGH);
            digitalWrite(PIN02_R1_Starter, HIGH);
            digitalWrite(PIN04_R3_RunFuel, HIGH);
        }
    }

    //Case 2: Stop.
    if (digitalRead(PIN06_Stop)){
        currentFunction = "Stopped";
    }
    if(currentFunction.equals("Stopped")){
        if ((millis() - lastDebounceTime) > debounceDelay ){ //Button
        debouncing
            R2_Syyde = LOW;      //Syyde == LOW
            R1_eMotor = LOW;      //STARTER = LOW
            R3_KytusPump = LOW;  //Kytuse pump = LOW

            digitalWrite(PIN03_R2_Syyde, LOW);
            digitalWrite(PIN02_R1_Starter, LOW);

```

```

        digitalWrite(PIN04_R3_RunFuel, LOW);
    }
}

//Case 3: Tyhi jooks.
if (digitalRead(PIN07_coldScroll)){
    currentFunction = "ColdScroll";
}

if(currentFunction.equals("ColdScroll")){
    if ((millis() - lastDebounceTime) > debounceDelay ){ //Button
de bouncing
        R2_Syyde = LOW;           //Syyde == LOW
        R1_eMotor = HIGH;         //STARTER = HIGH
        R3_KytusPump = LOW;       //Kytuse pump = LOW

        digitalWrite(PIN03_R2_Syyde, LOW);
        digitalWrite(PIN02_R1_Starter, HIGH);
        digitalWrite(PIN04_R3_RunFuel, LOW);
    }
}

//Monitooring
float currentRPM = analogRead(PINA0_RPM);
float currentTemp = GetTemperature();
float currentFuelPressure = analogRead(PINA2_FuelPressure);
float currentFuelLevel = analogRead(PINA3_FuelLevel);
float currentDrossel = analogRead(PINA4_Drossel);
float currentOilPressure = analogRead(PINA5_OilPressure);

writeToLCD(lcdRPM, "RPM", currentRPM);
writeToLCD(lcdTemp, "Temp", currentTemp);
writeToLCD(lcdFuelPressure, "Fuel Pressure", currentFuelPressure);
writeToLCD(lcdFuelLevel, "Fuel Level", currentFuelLevel);
writeToLCD(lcdDrossel, "Drossel", currentDrossel);
writeToLCD(lcdOilPressure, "Oil Pressure", currentOilPressure);

//In case of emergency, stop everything.
if(currentRPM > maxRPM || currentTemp > maxTemp){
    currentFunction = "Stopped";
}
}

void writeToLCD(LiquidCrystal lcd, String parameter, float value){
    lcd.clear();
    String toShow = "Current " + parameter + ": " + String(value);
    lcd.print(toShow);
}

float GetTemperature()
{
    tempSensor.requestTemperatures(); // Send the command to get
temperatures
    Sence_Temp=tempSensor.getTempCByIndex(0);
    return Sence_Temp;}

```