



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

# ANEMOMEETRI ARENDAMINE TUDENGIVORMELILE FEST19

DEVELOPMENT OF AN ANEMOMETER FOR FORMULA STUDENT VEHICLE  
FEST19

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Rain Sarapuu

Üliõpilaskood: 164290MAHB

Juhendaja: Tanel Jalakas, vanemteadur

Tallinn 2019

## AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“.....” ..... 201.....

Autor: .....

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetööle esitatud nõuetele

“.....” ..... 201.....

Juhendaja: .....

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....” .....201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

## Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

### LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

**Üliõpilane:** Rain Sarapuu (nimi, üliõpilaskood)  
**Õppekava, peeriala:** MAHB02/13, mehhatroonika (kood ja nimetus)  
**Juhendaja(d):** vanemteadur, Tanel Jalakas, 620 3703 (amet, nimi, telefon)  
**Konsultandid:** (nimi, amet)  
(ettevõtte, telefon, e-post)

#### Lõputöö teema:

(eesti keeles) Anemomeetri arendus tudengivormelile FEST19

(inglise keeles) Development of an Anemometer for Formula Student Vehicle FEST19

#### Lõputöö põhieesmärgid:

1. Õhukiiruse mõõtmise jaoks trükkplaadi projekteerimine
2. Mõõturite paigaldusvõimalus aerodünaamika tiibade külge

#### Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Anemomeetri trükkplaadi projekteerimine	24.03.2019
2.	Anemomeetri ühildamine vormeliga	23.04.2019
3.	Lõputöö lõplik versioon valmis	21.05.2019

**Töö keel:** eesti keel

**Lõputöö esitamise tähtaeg:**

21. mai 2019 a

**Üliõpilane:** Rain Sarapuu

.....

“.....” .....201....a

/allkiri/

**Juhendaja:** Tanel Jalakas

.....

“.....” .....201....a

/allkiri/

**Konsultant:**

.....

“.....” .....201....a

/allkiri/

# SISUKORD

EESSÕNA.....	6
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU .....	7
SISSEJUHATUS .....	8
1. TUDENGIVORMELIS FEST19 VALITSEVAD TINGIMUSED .....	10
1.1 Aerodünaamika paketi olemus/kirjeldus.....	10
1.2 Elektroonikasüsteemide kirjeldus.....	11
1.3 Vormeli sõidudünaamika kirjeldus .....	11
2. LAHENDUSE VALIK.....	13
2.1 Pitot' torude kasutamine .....	13
2.1.1 Seonduvad probleemid .....	13
2.2 Kasutatav lahendus.....	13
2.2.1 Õhuvoolu kiiruse mõõtmise sensori valik .....	14
2.2.2 Projekteeritava süsteemi kirjeldus.....	15
3. ANEMOMEETRI RIISTVARALINE DISAIN .....	17
3.1 Anemomeetri elektroonikaskeemid .....	18
3.1.1 Anemomeetri toiteahelad.....	19
3.1.2 Anemomeetri õhuvoolu kiiruse mõõtmise ahelad .....	22
3.1.3 Anemomeetri signaali konverteerimise ahelad .....	23
3.1.4 Anemomeetri analoog-digitaalmuunduri ahel.....	23
3.1.5 Anemomeetri õhuvoolu suuna mõõtmise ahelad .....	24
3.1.6 Anemomeetri mikrokontrolleri ahel .....	24
3.1.7 Anemomeetri CAN võrgu ahel .....	25
3.1.8 Anemomeetri I <sup>2</sup> C suhtluse transleerimise ahel.....	26
3.2 Anemomeetri trükkplaadi komponentide paigutus .....	26

3.2.1 Toiteahelate disain.....	27
3.2.2 Trükkplaadi disaini kirjeldus.....	29
4. ANEMOMEETRI TRÜKKPLAADI KORPUSE NING MÕÕTURI DISAIN .....	31
4.1 Anemomeetri korpuse disain.....	31
4.2 Anemomeetri mõõturi disain.....	32
4.2.1 Mõõtetoru disain .....	32
4.2.2 Tuulelipu disain .....	35
5. ANEMOMEETRI TRÜKKPLAADI PROGRAMMEERIMINE .....	36
5.1 Programmikoodi andmevooskeem.....	36
5.2 ADC, CAN ning I <sup>2</sup> C teekide genereerimine.....	37
KOKKUVÕTE .....	39
SUMMARY .....	40
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU .....	41
LISAD .....	43

## EESSÕNA

Käesoleva lõputöö teema tekkis Formula Student Team Tallinn meeskonna vajadusest mõõta aerodünaamika paketi tiibadel liikuva õhu kiirust. Töö koostati ja põhilised algandmed koguti Tallinnas, Tallinna Tehnikaülikoolis ning Tallinna Tehnikakõrgkoolis. Lõputöö autor avaldab tänu kogu meeskonnale, kes on abiks olnud lõputöö koostamisel.

Autor avaldab tänu meeskonna liikmele Magnus Loos, kes abistas lõputöö koostamisel andmete kogumisega.

Töö käsitleb tudengivormeli FEST19 aerodünaamika tiivaprofiilidel voolava õhu kiiruse ning suuna mõõtmiseks projekteeritud elektroonilise anemomeetri disainiprotseduure.

## LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

<i>ADC</i>	analoog-digitaalmuundur ( <i>Analog-Digital Converter</i> )
<i>CAN</i>	siini standard ( <i>Controller Area Network</i> )
<i>CCA</i>	konstantse voolutugevuse anemomeeter ( <i>Constant Current Anemometer</i> )
<i>CTA</i>	konstantse temperatuuri anemomeeter ( <i>Constant Temperature Anemometer</i> )
<i>ECU</i>	elektrooniline kontrollüksus ( <i>Electronic Control Unit</i> )
<i>GND</i>	maandus ( <i>Ground</i> )
<i>I<sup>2</sup>C</i>	kahejuhtmeliides ( <i>Inter-Integrated Circuit</i> )
<i>LDO</i>	lineaarne pingeregulaator ( <i>Low-Dropout Regulator</i> )
<i>PCB</i>	trükkplaat ( <i>Printed Circuit Board</i> )
<i>SMD</i>	trükkplaadi pinnale joodetav komponent ( <i>Surface-Mount Device</i> )
<i>TVS</i>	supressordiod ( <i>Transient-voltage-suppression</i> )
<i>VDC</i>	alalisvoolu pinge

## SISSEJUHATUS

Tudengivormeli meeskond on tegutsenud alates 2006. aastast, mil see loodi eesmärgiga ehitada üheistmeline vormelauto, millega osaleda Student Formula nimelisel tootearendusvõistlusel. Meeskonda kuuluvad tudengid nii Tallinna Tehnikaülikoolist kui ka Tallinna Tehnikakõrgkoolist. Tänapäevaks on kokku ehitatud 12 vormelit, millega käiakse suviti toimuvatel võistlustel üle maailma.

Meeskond on võistlustel senini saavutanud väga häid tulemusi, peale 2012. aasta võistlusi platseeruti Student Formula maailma edetabelis 2. kohal ning peale 2017. aasta võistlusi 10. kohal. Võistlustel osalevad tiimid maailma tugevaimatest tehnikaülikoolidest ning iga aasta kasutatakse vormelautodel uudseid ning optimeeritud lahendusi. Edukuse jätkamiseks on tarvis pidevat edasiarenemist ning olemasolevate lahenduste analüüsimist ja parandamist.

Süsinik-kiudmaterjalide kasutusele võtt on viimaste aastate jooksul tudengivormelite masse märgatavalt vähendanud, mille tõttu on aerodünaamika pakettide vajalikkus oluliselt suurenenud. Aerodünaamika pakettide kavandamisel on senini toetunud arvutis tehtavatele simulatsioonidele ning analüüsidele, samuti ei ole olnud võimalik vormeleid testida tuuletunnelis. Tulenevalt sellest puuduvad meeskonnal arvulised mõõdetud andmed aerodünaamika tiivaprofiilide käitumise kohta reaalses sõidu olukordades.

Antud bakalaureusetöö eesmärgiks on projekteerida ning koostada elektrooniline anemomeeter ehk tuulemõõtur, millega on võimalik mõõta aerodünaamika tiivaprofiilidel liikuva õhu kiirust ning lisafunktsioonina ka suunda. Mõõdetud informatsioon peab kajastuma vormelauto logis, et inseneridel oleks võimalik järgnevate aerodünaamika pakettide disainimisel seda arvesse võtta.

Anemomeetri projekteerimisel tuleb kasutusvaldkonnast lähtuvalt otsida ning võrrelda olemasolevaid lahendusi ning erinevaid sensoreid, mille põhjal saab valida õhu kiiruse mõõtmiseks kohase lahenduse. Trükkplaadi tegemiseks on vaja koostada elektroonikaskeemid, mille abil saab sensorilt tulevat informatsiooni talletada logisse. Elektroonikaskeemide koostamisel tuleb arvestada komponentide arvu ning suurusega, et trükkplaat oleks võimalikult väikeste mõõtmetega. Seda tuleb arvestada ka plaadile komponentide paigutamise puhul.

Vormelautoga ühildamiseks on vaja disainida trükkplaadile korpus ning panna paika korpuse kinnitusviis. Mõõtuuri disainimise puhul peab arvestama õhu kiiruse sensori iseärasustest tuleneda võivate probleemidega. Õhu suuna mõõtmiseks tuleb arendada lahendus, mis sobituks kokku õhu kiiruse mõõtmise süsteemiga. Kogu süsteem ei tohi mõjutada sensoriteni jõudva õhuvoolu liikumist.



Töös esitatud ülesannete ja probleemide lahendamiseks on kasutatud mitmeid erinevaid tarkvarasid. Anemomeetri trükkplaat projekteeriti programmiga Altium Designer 18. Trükkplaadi korpus ja mõõtur on disainitud Catia V5 tarkvaraga. Mikrokontrolleri programmikoodi tegemiseks kasutati Atollic TrueSTUDIO ning STM32CubeMX programme.

# 1. TUDENGIVORMELIS FEST19 VALITSEVAD TINGIMUSED

Anemomeeter kujutab endast vormeli aerodünaamika paketi õhuvoolude kiiruse ja suuna mõõtmiseks arendatud seadeldist, mille olemasolu ei ole nõutud võistlussarja reeglistikuga. See tähendab, et antud süsteem ei ole alaliselt vormeli küljes, vaid paigaldatakse testperioodi vältel soovitud aerodünaamika tiibade külge sobivasse asukohta. Eelnimetatu tõttu ei ole vormeli projekteerimise käigus arvestatud anemomeetri kinnitamise võimalustega aerodünaamika profiilide külge. Selle tõttu tuleb seadeldise mõõturi disainimisel arvestada tiivaprofiilide kuju ning mõõtmega.

Anemomeetri puhul on tegemist elektroonilise seadmega, kus kasutatakse õhu kiiruse ja suuna määramiseks sensoreid. Sensoritelt tuleva signaali tõlgendamiseks ning vormeli sõidulogis kuvamiseks on vaja digitaalset elektroonikat. Kuna anemomeeter peaks olema võimalikult väikeste mõõtmega, tuleb trükkplaadile vajalik toitepinge võtta vormeli akupakist, mitte eraldiseisvast akust.

## 1.1 Aerodünaamika paketi olemus/kirjeldus

Tudengivormeli FEST19 aerodünaamika pakett koosneb esitiivast, vormeli monokoki ehk kere külgedele peal asuvatest külgdifuusoritest, sõiduki tagaosas asuvast tagatiivast ning põhja all olevast difuusorist.

**Esitiib** on kinnitatud vormeli ette otsa. Sõidu ajal puutub just see tiib kõige esimesena voolava õhuga kokku ning on selle tõttu ka kõige efektiivsem aerodünaamika element. Lisaks survejõu tekitamisele, juhib esitiib esimestest ratastest õhku eemale, et ülejäänud aerodünaamika elementide töö ei oleks häiritud. Esitiiva põhiprofiili keskmine osa on äärtest kõrgemal, et vormeli põhja alla voolaks rohkem õhku [1].

**Külgdifuusorid** on kinnitatud monokoki külgedele esimeste ja tagumiste rataste vahele. Külgdifuusoril paiknevad tiivaprofiilid tekitavad survejõudu ning suunavad tagatiiva alla laminaarset õhuvoolu, mis seeläbi suurendab tagatiiva survejõudu. Samuti suunavad antud tiivaprofiilid õhu üle tagumiste rataste. [1].

**Tagatiib** asub kerest kõrgemal vormeli tagaosas. See koosneb kolmest tiivaprofiilist ning otsaplaadist. Tagatiiva kõige ülemine profiil on servomootori abil liigutatav. Selle abil on võimalik sirgetel rajalõikudel saavutada suuremaid kiiruseid [1].

**Difuusor** on sõiduki põhja all ning tagaosast tõuseb see maapinna suhtes kaare kujuliselt kõrgemale. See tekitab õhu kiirenemise auto keskosas [1].

## 1.2 Elektroonikasüsteemide kirjeldus

Vormeli FEST19 elektroonikasüsteemid jagunevad nõrkvoolusüsteemideks ning veojõusüsteemideks. Kõik süsteemid, mille pinge on alla 60 VDC, liigitatakse nõrkvoolusüsteemide hulka ning ülejäänud veojõusüsteemide hulka. Vormeli elektroonika süsteemid saavad toite akupakist, mille maksimaalne pinge sel hooajal on 600 VDC. Nõrkvoolusüsteemile kohase toitepinge tekitab DC/DC muundur ning FEST19 puhul on selleks 24VDC.

Nõrkvoolusüsteemis asub ka logija, mille eesmärgiks on salvestada kõik trükkplaatide vahel liikuvad sõnumid, mille abil saab tuvastada vormeli testimisel ilmnunud probleemide põhjuseid ning analüüsida kogutud informatsiooni. Vormelis suhtlevad omavahel elektrooniline kontrollüksus ehk ECU (ingl k *Electronic Control Unit*), akuhaldussüsteem ehk AMS (ingl k *Accumulator Management System*) ning armatuurlauaplaat ehk Dash (ingl k *Dashboard*).

Trükkplaatide vaheline suhtlus toimub CAN-siiniga, mis on autotööstuses üsna laialt levinud. Eelmise hooaja vormelil FEST18 ilmnes probleeme CAN võrgu mürasusega, kuna kasutusel oli tavapärase isoleerimata CAN võrk. Müra põhjustajaks võis olla sagedusmuundurite lülitades tekkiv elektromagnetväli või ebakorrekne CAN-liinide varjestuse maandamine. Sel hooajal otsustati kasutusele võtta isoleeritud CAN võrk, et mürasuse probleemi vähendada.

## 1.3 Vormeli sõidudünaamika kirjeldus

Formula Student sarjas ehitatakse väikesemõõtmelisi vormelautosid. Võistlemiseks mõeldud rajad on pigem tehniliselt keerulised, mis tähendab, et radadel on palju kurve ja slaalomeid ning vähe sirgeid lõike. Selle tõttu panustatakse vormeli ehitamisel just sõiduki kiirendusele ning kurvi läbimise suutlikkusele. Kiiruseid üle 100 km/h saavutatakse vaid vähestel lõikudel. Oluline ongi keskmine kiirus, millega vormel suudab kurve läbida.

Meeskonna aerodünaamika insenerid teostavad aerodünaamika paketi detailidele analüüse olukorras, kus vormel sõidab kiirusel 55 km/h (ligikaudu 15,3 m/s) ning läbib kurvi, kuna antud kiirust loetakse meie vormeli puhul keskmiseks. Kurvide läbimine käib tavaliselt väga kiiresti, enamasti kulub selleks vaid kuni üks sekund. Sellest lähtuvalt on oluline anemomeetri õhu kiiruse mõõtmise sensorit valides jälgida sensori väljundsignaali uuendamise kiiruse võimekust.

Vormeli sõites liigub õhk aerodünaamika paketi profiilide alt kiiremini kui pealt poolt, sest alumise osa pikkus on suurem, tekitades tiiva alla madalama rõhuga ala kui tiiva peale. Aerodünaamika käitumise kohta on oluline talletada informatsiooni ka suurematel kiirustel ning vormeli tippkiirusel, mis jääb 120 km/h kanti. Arvestades profiilide käitumisega, tuleb anemomeetriga õhu kiiruse mõõtmiseks kasutada sensorit, mille maksimaalne võimalik mõõdetav kiirus on vähemalt 120 km/h.

## 2. LAHENDUSE VALIK

Anemomeetri projekteerimine algas erinevatel mõõteprintsipidel baseeruvate anemomeetrite ning lahenduste otsimisega. Samuti tutvuti erisuguste sensorite ning nende tööpõhimõtetega. Järgnevalt on toodud kaks erinevat lahendust õhuvoolu kiiruse mõõtmiseks. Sensori valik sooritati vastavalt vormeli aerodünaamika paketiga sobitumisele.

### 2.1 Pitot' torude kasutamine

Pitot' toru näol on tegemist mehaanilise mõõteriistaga, mille abil on võimalik mõõta õhuvoolu tekitatavat dünaamilist rõhku. Sellest saab omakorda arvutada voolu kiiruse. Dünaamilise rõhu mõõtmiseks on torul tüüpiliselt kaks kanalit. Üks kanal on suunatud õhuvooluga paralleelselt, mis mõõdab kogu rõhu väärtust, ning teine kanal ristvalt, mis mõõdab staatilise rõhu väärtust. Dünaamiline rõhk saadakse staatilise rõhu väärtuse lahutamisel kogu rõhu väärtusest [2].

Vormel 1 sarjas kasutatakse aerodünaamika paketi testimiseks *aero rake*'e. Nimetatud seadeldise puhul on tegemist pitot' torudest koosneva võrestikuga, mis paigutatakse soovitud aerodünaamilise elemendi taha, et tiivaprofiilist või ratastest sõltuva õhuvoolu liikumist analüüsida. Meeskondadel on arendatud programmid, mis koostavad kogutud informatsiooni põhjal simulatsioone, mida aerodünaamika insenerid saavad kasutada lahenduste projekteerimisel ning optimeerimisel.

#### 2.1.1 Seonduvad probleemid

Pitot' torude kasutamine tudengivormeli puhul tekitab probleemseid olukordi. Pitot' torudest koosneva võrestiku kasutamiseks on vaja kinnitusi, et seda saaks kere külge fikseerida. Samuti on vaja projekteerida ning kokku panna võred koos pitot' torudega. Lisaks tuleb disainida ja koostada elektrooniline süsteem, mis kogu sensoritest tuleva informatsiooni salvestaks. Sellise süsteemi arendamine võtab aga väga palju aega ning raha, kuna pitot' torude hinnad on üsna kõrged. Selle tõttu ei ole antud süsteem tudengivormeli jaoks otstarbekas.

## 2.2 Kasutatav lahendus

Õhuvoolu kiiruse mõõtmiseks kasutatakse *hot-wire* anemomeetrit. Tegu on elektroonilise seadmega, mis elektrivoolu toimel kuumutab traadi või juhtme kiudu. Kui kiud on asetatud

õhuvoolu sisse, hakkab liikuv õhk seda jahutama. Kiu jahtumisel väheneb ka selle takistus, millest tulenevalt saab välja arvutada õhuvoolu kiiruse [3].

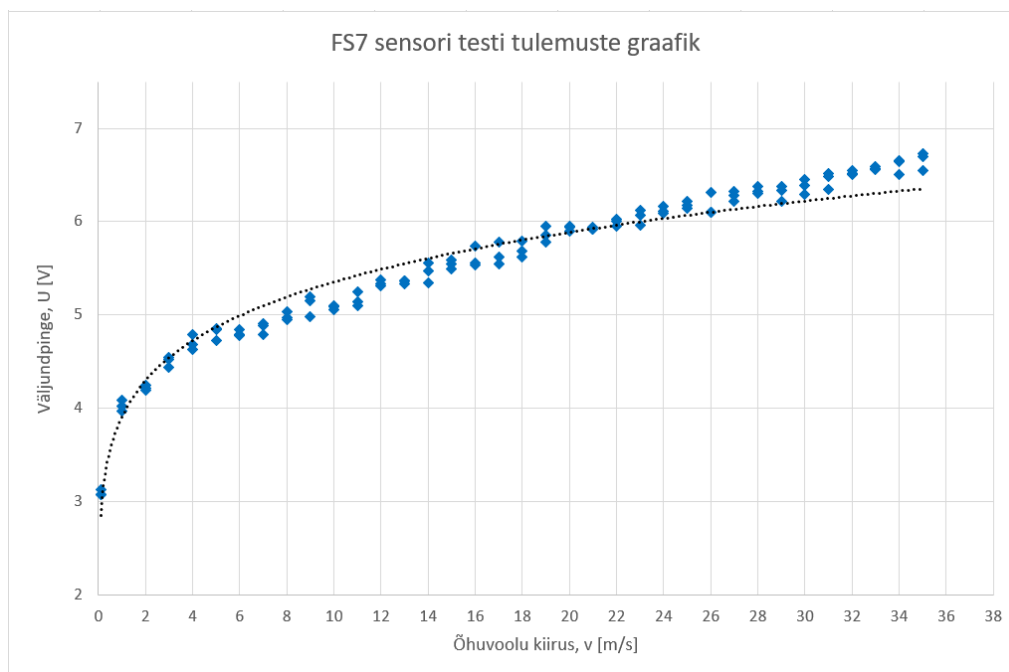
*Hot-wire* anemomeetritel on kaks erinevat tööpõhimõtet: CCA (ingl k *Constant Current Anemometer*) ning CTA (ingl k *Constant Temperature Anemometer*). CCA printsiibi puhul hoitakse kiudu läbivat voolutugevust konstantsena ning õhuvoolu tekitatavaid temperatuuri erinevusi mõõdetakse pingelangu abil. CTA printsiibi puhul ühendatakse kiud Wheatstone'i sillaga ning tagasisidestatud võimendi abil hoitakse kiu takistust konstantsena [3]. Temperatuuri muutudes muutub ka kasutatav võimsus, järelikult on voolu kiirus ning võimsus omavahel seotud.

### **2.2.1 Õhuvoolu kiiruse mõõtmise sensori valik**

Valitud sensoriks osutus Innovative Sensor Technology poolt toodetav IST AG FS7, mille puhul kasutatakse voolu kiiruse mõõtmiseks CTA printsiipi [4]. Kuna sensor on mõõtetelt väike, saab disainida ka väikese mõõturi. Samuti ei ole sensoril liikuvaid osasid, mis lihtsustab mõõtetoru disaini.

Anemomeetri sensori valideerimiseks otsustati koostada testimise eesmärgil eraldi trükkplaat, millel asus ainult õhuvoolu kiiruse sensori tööks vajalik elektroonikaskeem. Sensori testimiseks kasutati toru, millesse see oli paigaldatud. Sensor oli ühenduses trükkplaadiga ning trükkplaadi toide tuli toiteplohist. Õhuvoolu kiirust mõõdeti vahetult toru otsast ning selle jaoks kasutati SKYWATCH Xplorer 1 nimelist anemomeetrit [5].

Joonisel 2.1 on näha, et õhuvoolu kiirusele vastava sensori elektroonikaahela väljundpinge graafik joonistub välja üsna sarnaselt sensori andmelehes leiduva graafikuga võrreldes [4]. Samuti näib, et väikestel kiirustel on sensori tundlikkus suurem. Testimisel oli sensori elektroonikaahela väljundpinge reguleeritud kiiruse 0 m/s juures ligikaudu 3 V-ni.



Joonis 2.1 Sensori IST AG FS7 testimise mõõtetulemused

## 2.2.2 Projekteeritava süsteemi kirjeldus

Projekteeritavaks süsteemiks on anemomeeter, mis koosneb trükkplaadist ning trükkplaadile ühenduvatest mõõturitest. Kuna antud trükkplaadi mõõdetav informatsioon on aerodünaamika inseneridele oluline, tuleb see kuvada vormeli logisse. Logiga on võimalik suhelda läbi CAN võrgu. See eeldab anemomeetri trükkplaadilt CAN võimekuse olemasolu.

Sensoritest tuleva informatsiooni reaalseteks väärtusteks ümber arvutamiseks tuleb kasutada mikrokontrollerit. Mikrokontrolleri olemasolu on samuti vajalik ka CAN suhtluse toimimiseks. Lisaks peab trükkplaadile panema CAN võrgu transmitteri ehk saatja.

Projekteerimise alustamiseks tuli valida õhuvoolu kiiruse mõõtmise sensor ning tutvuda selle andmelehega [4]. Andmelehest selgus, et sensori elektroonikaahela väljundpinge väärtus algab 3 V-st (kiirusel 0 m/s). Esmalt tuli väljundpinge skaala ümber nihutada. Selleks kasutati operatsioonvõimendit. Kuna mikrokontrolleri ADC sisenditesse on võimalik maksimaalselt lasta 3,3 V, kuid õhuvoolu kiiruse sensori väljundpinge väärtus 35 m/s juures on ligikaudu 6,5 V, ei saa signaali sisselugemiseks kasutada mikrokontrollerit, vaid tuleb leida sobiv väline ADC. Kiiruse mõõtmise andmete jõudmiseks mikrokontrollerisse, peab ADC mikrokontrolleriga suhtlema.

Õhuvoolu suuna mõõtmiseks kasutatakse Halli efektil põhinevat sensorit. Sensori väljastab analoogsignaali ning selle skaala on 0 – 5 V. Kuna õhuvoolu suuna lugemite väärtused ei pea olema nii täpsed, nagu kiiruse väärtused, on trükkplaadi mõõtmete huvides loobunud teise välise ADC

kasutamisest. Õhuvoolu suuna väljundpinge väärtus muudetakse skaalalt 0 – 5 V skaalale 0 – 3,3 V kasutades pingejagurit ning seejärel loetakse mikrokontrollerisse sisse ehitatud ADC abil.

Anemomeetri trükkplaadil paiknevad elektroonikaskemid on mõeldud informatsiooni sisselugemiseks, töötlemiseks ning vormeli CAN võrku saatmiseks. Õhuvoolu kiiruse ning suuna mõõtmise sensorid paiknevad aga mõõturitel, mis kinnitatakse aerodünaamika tiivaprofiilide külge soovitud asukohta. Anemomeetri trükkplaadiga on võimalik korraga kasutada viit mõõturit.



### 3. ANEMOMEETRI RIISTVARALINE DISAIN

Anemomeetri trükkplaadi riistvaralise disaini puhul on enim keskendunud trükkplaadi väikestele mõõtmetele, sest siis on parem seda näiteks vormeli ette otsa kinnitada. Samas on disainides pandud rõhku ka plaadi töökindlusele.

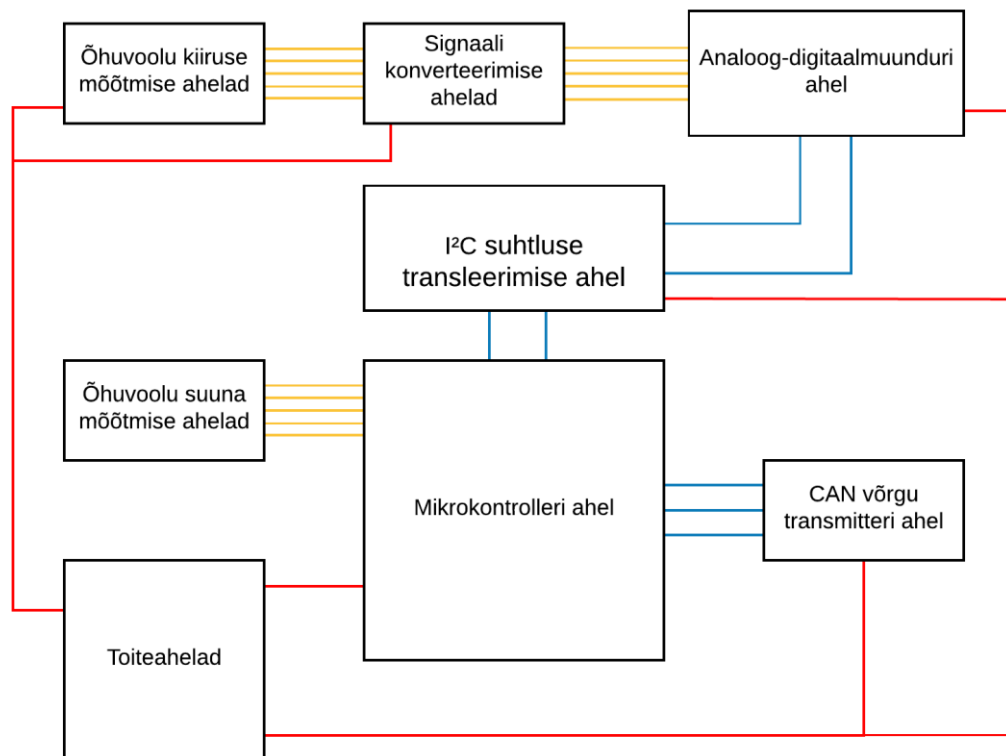
Disainides tuleb arvestades ka anemomeetri funktsionaalsusest tulenevaid eripärasid, nagu näiteks õhu suuna mõõtmiseks kasutatav sensor.

Anemomeetri elektrooniline pool koosneb trükkplaadist, mille külge ühenduvad mõõturid, ning mõõturi küljes olevast õhu kiiruse ja suuna mõõtmise sensorist. Trükkplaadi ülesanne on mõõturi sensoritelt tuleva signaali ümbertöötlemine ning digitaalselt loetavaks tegemine. Seejärel on võimalik trükkplaadil asuvas mikrokontrolleris arvutada vastavalt sisenditele õhu liikumise kiirus ning suund.

Õhu suuna mõõtmiseks kasutatav sensor on ehitatud üldlevinud kujuga elektroonika komponendi korpusesse. Tegemist on SMD (ingl k *Surface-Mount Device*) ehk trükkplaadi välisele pinnale joodetava komponendiga, millel on kokku 8 jalga. Samuti on vajalikud komponendi jalgade lähedale paigutada kondensaatorid. Selle tõttu on suuna sensori jaoks disainitud eraldi väikene trükkplaat, et sensorit oleks lihtne kinnitada mõõturi külge.

Anemomeetri trükkplaat koosneb järgnevatest ahelatest:

- toiteahelad;
- kiiruse sensori ahelad;
- signaali konverteerimise ahelad;
- analoog-digitaalmuunduri ahel;
- suuna sensori ahel;
- mikrokontrolleri ahel;
- CAN võrgu transmitteri ahel;
- I<sup>2</sup>C suhtluse transleerimise ahel.



Joonis 3.1 Anemomeetri elektroonikaahelate plokk skeem

Punane joon – toitejuhe, kollane joon – analoogsignaali juhe, sinine joon – suhtlussignaali juhe

### 3.1 Anemomeetri elektroonikaskeemid

Elektroonikaskeemide disainimiseks on vaja teada, millised sensorid trükkplaadiga ühendatakse, kust tuleb plaadile toide ning milliste süsteemidega plaat veel ühenduses on. Projekteerimise alguses pandi kirja vajaminevad sisendid ning väljundid. Tabelis 3.1 ning 3.2 on näha anemomeetri trükkplaadi mõõturite pistikute *pinout*.

Tabel 3.1 Anemomeetri trükkplaadi mõõturi pistiku *pinout* (1/5-st)

Nr	I/O	Kommentaar
1	RH	Kiiruse sensori kuumuti väljund
2	RS	Kiiruse sensori temperatuurianduri väljund
3	GND	Maandus
4	GND	Maandus
5	5V	Suuna sensori toitepinge väljund
6	ANALOG_Hall	Suuna sensori väljundsignaali sisend

Tabel 3.2 Anemomeetri trükkplaadi toite ning CAN võrgu pistiku *pinout*

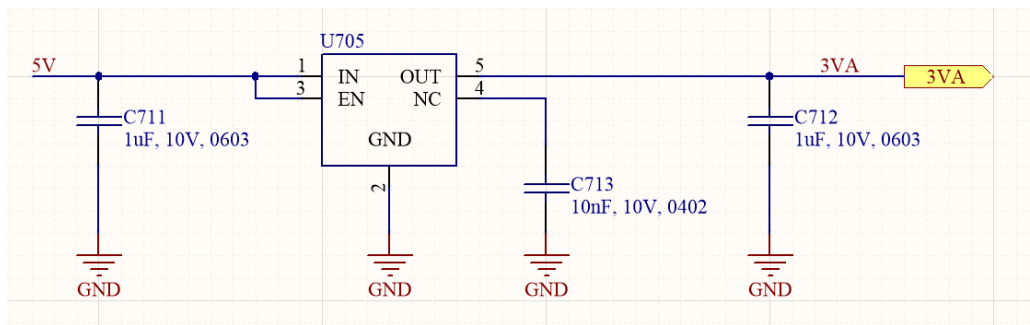
Nr	I/O	Kommentaar
1	24 V	Trükkplaadi toitepinge
2	24 V	Trükkplaadi toitepinge
3	CANH	CAN <i>high</i> ehk kõrge (ingl k <i>high</i> )
4	GND_CAN	CAN võrgu isoleeritud maandus
5	CANL	CAN <i>low</i> ehk madal (ingl k <i>low</i> )
6	GND	Maandus

### 3.1.1 Anemomeetri toiteahelad

Toiteahelad projekteeriti vastavalt sensorite ning ülejäänud elektroonika poolt nõutavatele tööpingetele. Pingeregulaatorite valikul arvestati ahelate poolt tarbitava voolutugevusega ning samuti regulaatorit ümbritsevate komponentide arvu ja suurusega, et ahelad võtaksid võimalikult vähe ruumi. Anemomeetri trükkplaadil on analoogsignaalide ahelate jaoks kasutatud eraldi toitepingeid.

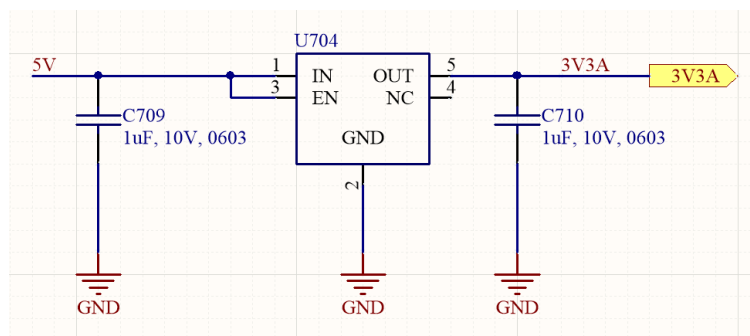
Trükkplaadi toide tuleb vormeli akukastist ning selleks on FEST19 nõrkvoolusüsteemi puhul 24 VDC. Antud pingest konverteeritakse 12 V. 12 V ahel hargneb paralleelselt kaheks, millest ühes muundatakse 12 V 10 V-ks ning teises ahelas 5 V-ks. Samuti jaguneb ka 5 V ahel kaheks, millest ühes konverteeritakse 5 V 3,3 V-ks ning teises 5 V 3 V-ks.

3 V suurust pinget on anemomeetri trükkplaadile vaja, et õhuvoolu kiiruse sensorist tulevat analoog väljundsignaali ümber konverteerida. Signaali muundava operatsioonvõimendi sisendid tarbivad aga äärmiselt vähe voolu (tüüpiliselt 1,4  $\mu\text{A}$  [6]), seega valiti 5 V-st 3 V tegemiseks Microchipi MIC5255-3.0YM5-TR lineaarne pingeregulaator ehk LDO, mille väljundvool 3 V juures on 150 mA [7]. Joonisel 3.2 on näha LDO skeemi koos väliste komponentidega ning nende väärtustega, mis on võetud toote andmelehest.



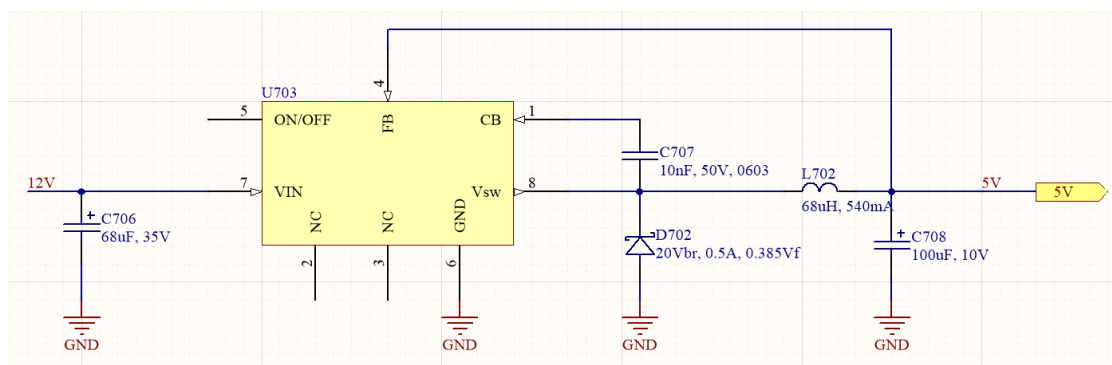
Joonis 3.2 Anemomeetri trükkplaadi 3 V toite muundamise skeem

3,3 V ahela puhul on põhiliseks tarbijaks mikrokontroller, mis võib maksimaalselt tarbida kuni 156 mA [8]. Selle tõttu valiti 3,3 V tegemiseks Microchipi lineaarne pingeregulaator MIC5504-3.3YM5-TR, mille väljundvool on 300 mA [9]. Ümbritsev skeem koos komponentide väärtustega (Joonis 3.3) on võetud pingeregulaatori andmelehest.



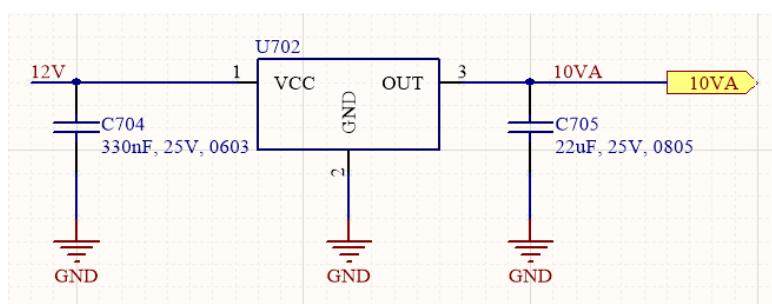
Joonis 3.3 Anemomeetri trükkplaadi 3,3 V toite muundamise skeem

5 V toiteahelas (Joonisel 3.4) on suurima maksimaalse tarbimisega CAN võrgu transmitter, mis võib tarbida kuni 232 mA [10]. Õhu liikumise suuna sensor tarbib 5 V juures maksimaalselt 15 mA, kuna mõõturitel on kokku 5 sensorit, on nende kogutarbimine 75 mA [11]. Analoo-digitaalmuunduri ning mikrokontrolleri vahelise I<sup>2</sup>C suhtluse translaator tarbib 5 V puhul 14 mA [12]. ADC kiip tarbib maksimaalsel diskreetimissagedusel 5 V juures 3 mA [13]. Kuna 5 V-st 3,3 V tegemiseks kasutatakse lineaarset pingeregulaatorit, siis on selle regulaatori sisendvool peaaegu sama suur nagu väljundvool, mis tähendab, et 3,3 V ahela tarbimine 5 V puhul on ligikaudu 156 mA. Kokku on 5 V ahela maksimaalne tarbimine 480 mA, mis tähendab, et valida tuleb pingeregulaator, mille väljundpinge on vähemalt 500 mA. Valitud pingeregulaatoriks sai Texas Instrumentsi DC/DC pingeregulaator LM2674M-5.0, mille väljundvool on 500 mA [14]. Pingeregulaatori skeem ning ümbritsevate komponentide väärtused on koostatud andmelehe põhjal.



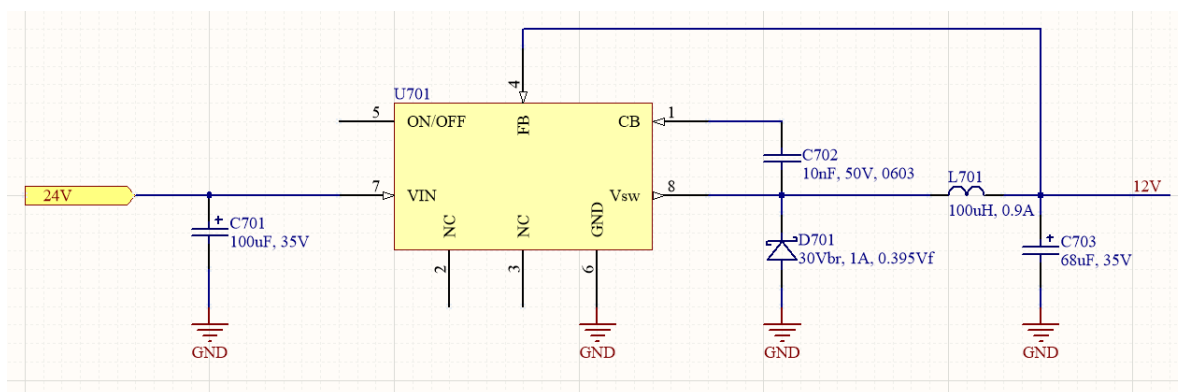
Joonis 3.4 Anemomeetri trükkplaadi 5 V toite muundamise skeem

10 V toiteahela tarbijateks on õhuvoolu sensori ning selle sensori ahela väljundsignaali konverteerimise analoogahelad. Õhuvoolu puudumisel tarbib ahel umbes 33 mA ja maksimaalsete kiiruste juures ligikaudu kuni 80 mA (sõltub kalibreerimisest). Sensori ahelaid on kokku 5 tükki, järelkult on nende maksimaalne kogutarbimine 400 mA. Signaali konverteerimise ahelas tarbib operatsioonvõimendi 3 mA, kuna neid on kokku 5 tükki, on kogutarbimine 15 mA. 10 V ahela kogutarbimine on seega 415 mA. Valitud pingeregulaatoriks osutus Rohm Semiconductori LDO BAJ0CC0FP-E2, mille väljundvool on 1 A [15]. Joonisel 3.5 on näidatud vastava regulaatori elektroonika skeem.



Joonis 3.5 Anemomeetri trükkplaadi 10 V toite muundamise ahel

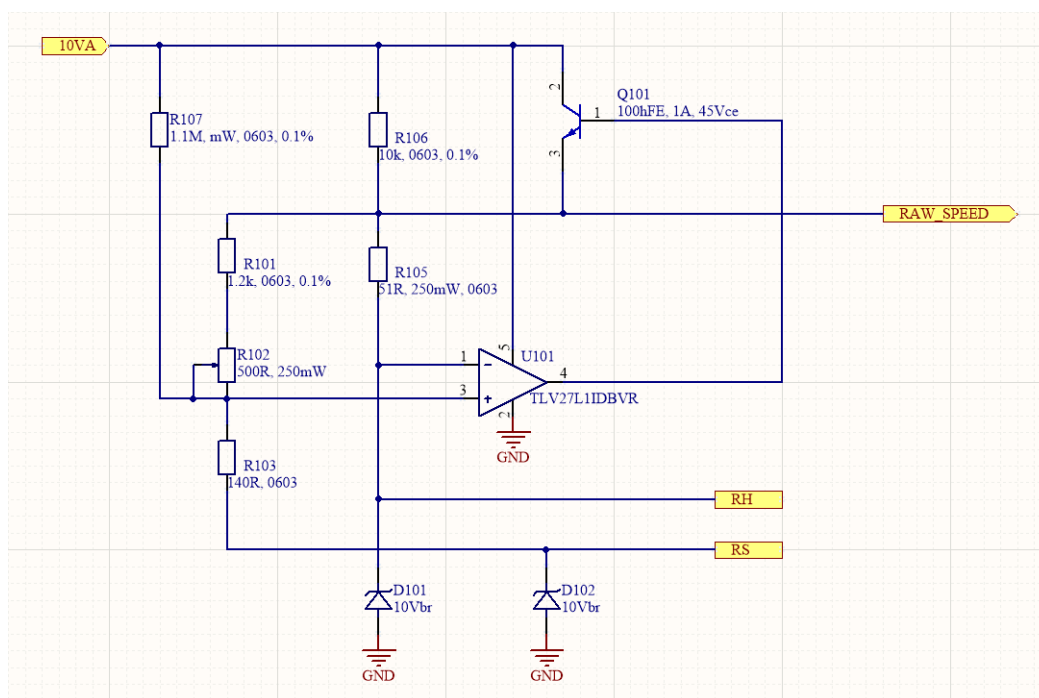
10 V ahela pingeregulaatori sisendvoolu maksimaalne suurus on ligikaudu 415 mA 12 V juures. Paralleelses 12 V ahelas on 12 V-st 5 V regulaatori sisendvoolu suurus umbes 212 mA. Sellest lähtuvalt on kogu 12 V ahela tarbimine maksimaalselt ligikaudu 630 mA. 24 V-st 12 V tegemiseks valiti Texas Instrumentsi LM2675MX-12/NOPB, mille väljundvool on 1 A [16]. Skeem koos ümbritsevate komponentidega on nähtav Joonisel 3.6.



Joonis 3.6 Anemomeetri trükkplaadi 12 V toite muundamise skeem.

### 3.1.2 Anemomeetri õhuvoolu kiiruse mõõtmise ahelad

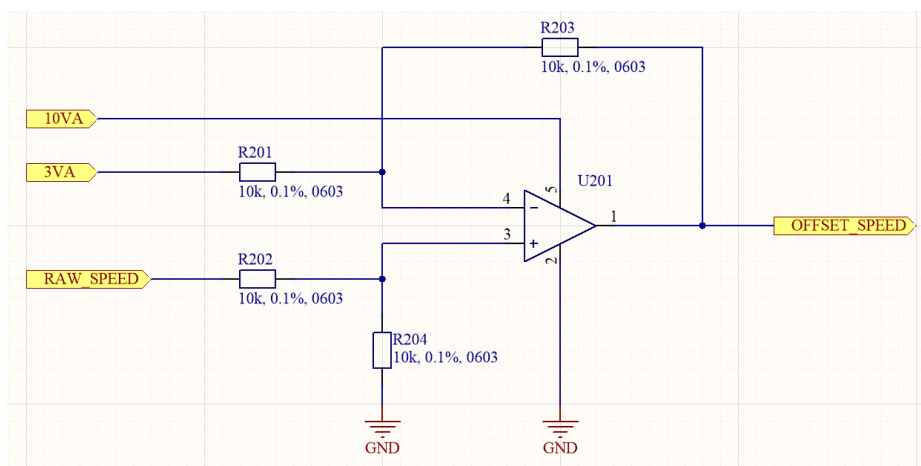
Õhuvoolu kiiruse mõõtmise sensorit kasutatakse CTA režiimis. Selleks on kasutatud sensori andmelehes olevat elektroonika skeemi koos komponentide väärtustega [4]. Sensori ülepinge eest kaitsmiseks on skeemile lisatud kaks TVS diodi D101 ja D102 vastavalt enne sensori kuumuti väljundit RH ning temperatuurianduri väljundit RS, mida näeb Joonisel 3.7. Kuna õhuvoolu kiiruse mõõtmise ahela väljundiks on analoogsignaali, kasutatakse ahela toitenähtena lineaarset pingeregulaatorit. Antud elektroonikaskeeme on anemomeetri trükkplaadil kokku 5 tükki.



Joonis 3.7 Anemomeetri trükkplaadi õhuvoolu kiiruse mõõtmise ahel

### 3.1.3 Anemomeetri signaali konverteerimise ahelad

Kuna õhuvoolu kiiruse mõõtmise ahela väljundsignaali pinge algab 3 V-st ning tõuseb vastavalt kiirusele kuni 7,5 V-ni (sõltuvalt ahela kalibreerimisest), on signaali skaalat vaja nihutada, et seda oleks lihtsam digitaalselt loetavaks muundada. Muundamiseks kasutatakse ADC-d, mille sisendsignaali skaala on 0 – 5 V. Selle tõttu on vaja kiiruse mõõtmise ahela väljundsignaali nihutada 3 V võrra ehk sooritada lahutamistehe, mille käigus lahutatakse väljundsignaalilt 3 V. Selle teostamiseks kasutatakse operatsioonvõimendit, mida ümbritsev skeem on näidatud Joonisel 3.8 [6]. Ümbritsevad komponendid on valitud vastavalt differentsiaalvõimendi loogikale, mille tulemusena on võimendi võimendusteguri väärtus 1 ning mitte inverteeritud sisendist lahutatakse inverteeritud sisendi väärtus. Tulemuseks on võimendi väljundsignaal skaalas 0 – 4,5 V. Antud skeeme on trükkplaadil kokku 5 tükki.



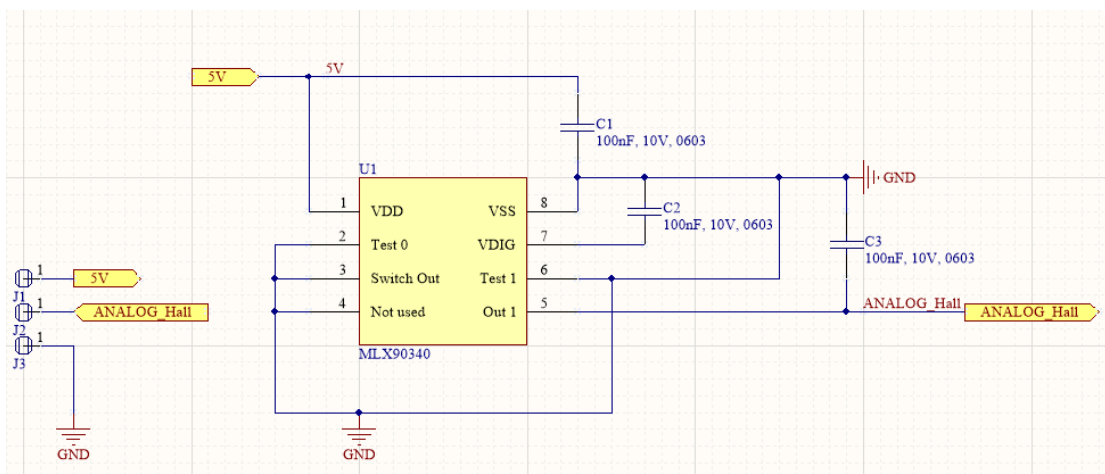
Joonis 3.8 Anemomeetri trükkplaadi signaali konverteerimise ahel

### 3.1.4 Anemomeetri analoog-digitaalmuunduri ahel

Analoog-digitaalmuunduriks on valitud Analog Devices'i LTC2309 [13]. Antud muundur suudab mikrokontrolleriga suhelda läbi I<sup>2</sup>C võrgu, mis võimaldab kasutada ainult kahte signaaliliini. Samuti tagab selle muunduri diskreetimissagedus piisava näitude lugemise kiiruse. Tegu on 12 bitise ADC-ga, mis tähendab, et sisendskaala 0 – 5 V jaotatakse ümber digitaalskaalaks 0 – 4095, mis annab küllaldase täpsuse.

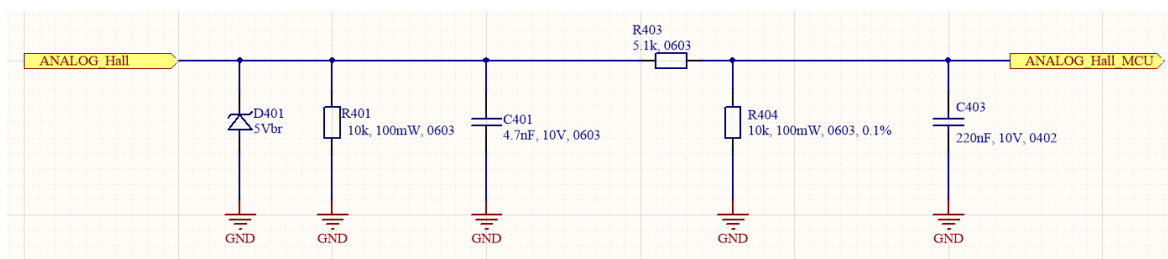
### 3.1.5 Anemomeetri õhuvoolu suuna mõõtmise ahelad

Õhuvoolu suuna mõõtmiseks kasutatakse Halli efektil põhinevat sensorit [11]. Kuna sensor võimaldab analoogset väljundsignaali, saab informatsiooni lugemiseks kasutada mikrokontrolleri analoogsisendeid. Sensori trükkplaat koos ümbritsevate komponentidega asub anemomeetri mõõturitel ning vastav elektroonikaskeem (Joonis 3.9) on koostatud Halli anduri andmelehe põhjal.



Joonis 3.9 Anemomeetri mõõturil asuv õhuvoolu suuna mõõtmise sensori ahel

Sensori väljundsignaali pinge maksimaalne väärtus on 5 V, kuid mikrokontrolleri ADC sisendi suurimaks pingele väärtuseks on 3,3 V. Selle tõttu on anemomeetri trükkplaadile tehtud analoogsignaali mikrokontrollerisse sisse lugemiseks tarvilik skeem (Joonis 3.10), mis sisaldab signaali konverteerimiseks vajalikku takistitel R403 ja R404 põhinevat pingejagurit. Ahelale on enne mikrokontrolleri jalga lisatud signaali kõrgsagedusliku müra filtreerimiseks kondensaator ning peale ahela sisendit asub TVS diod D401 ülepinge vältimiseks.



Joonis 3.10 Anemomeetri trükkplaadil asuv õhuvoolu suuna mõõtmise ahel

### 3.1.6 Anemomeetri mikrokontrolleri ahel

Vormeli FEST19 puhul kasutatakse kõikidel meeskonna liikmete poolt arendatud trükkplaatidel STMicroelectronicsi poolt loodud STM32F7 seeriast pärinevaid mikrokontrollereid. Kuna



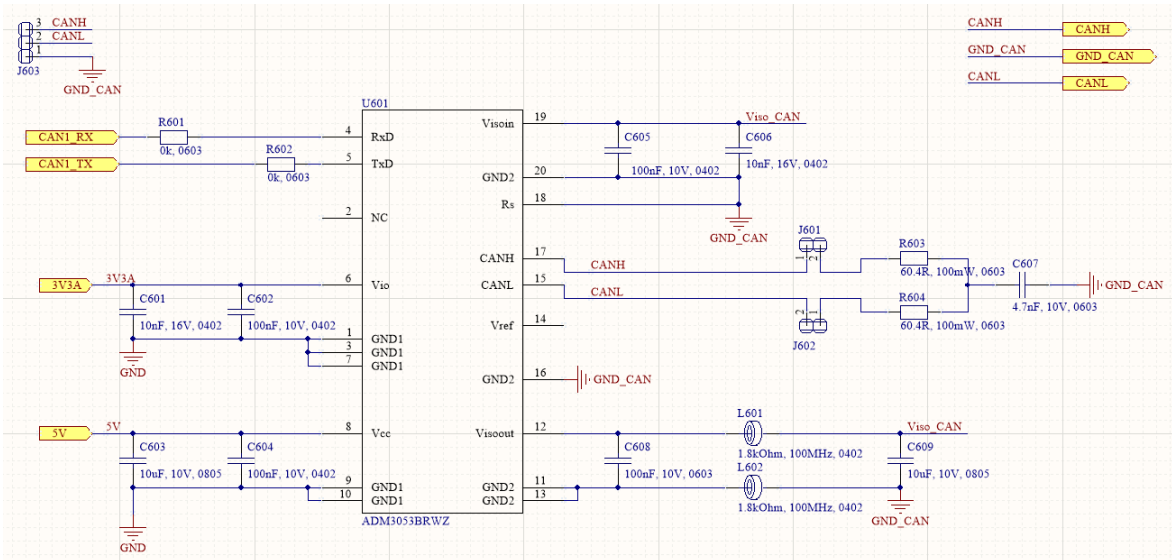
meeskonnas kasutatavad mikrokontrollerite programmeerimiseks mõeldud programmeerijad kongruueeruvad eelnimetatud seeria mikrokontrolleritega, on ka anemomeetri trükkplaadi jaoks valitud STM32F7 seeriast pärit mikrokontroller. Anemomeetri funktsionaalsusest johtuvalt on tarvis valida mikrokontroller, millel oleks CAN ja I<sup>2</sup>C võrgu võimekus ning ADC olemasolu vähemalt viie analoogsisendiga. Sellest lähtuvalt valiti STM32F722RET6 [8].

Mikrokontrolleri ahelas asub väline ostsillaator, mille sagedus on kõikide FEST19 trükkplaatide puhul 25 MHz. Välise ostsillaatori kasutamine tagab täpsema ning stabiilsema sageduse. Lisaks on mikrokontrolleri ahelas kaks LED-i, mille eesmärk on inditseerida mikrokontrolleri töötamist, ning programmeerimise võimaldamiseks pistik koos ülepinge eest kaitsvate TVS diodidega. Samuti kasutatakse enne mikrokontrolleri toitejalgu pingeregulaatorist pärit müra filtreerimiseks kondensaatoreid, mille elektroonilised parameetrid on võetud mikrokontrolleri andmelehest [8].

### **3.1.7 Anemomeetri CAN võrgu ahel**

Eelneval hooajal kasutati vormeli üldises CAN võrgus isoleerimata transmittereid, mis tähendab, et CAN võrgus oli kaks juhet: CAN *high* ja CAN *low*. Kuna selle tõttu oli vormeli CAN võrk mürane, kasutatakse FEST19 puhul isoleeritud CAN saatjaid. See tähendab, et CAN siinis on lisaks kahele eelnimetatud juhtmele kolmas: CAN *ground* (ingl k *ground*, maandus).

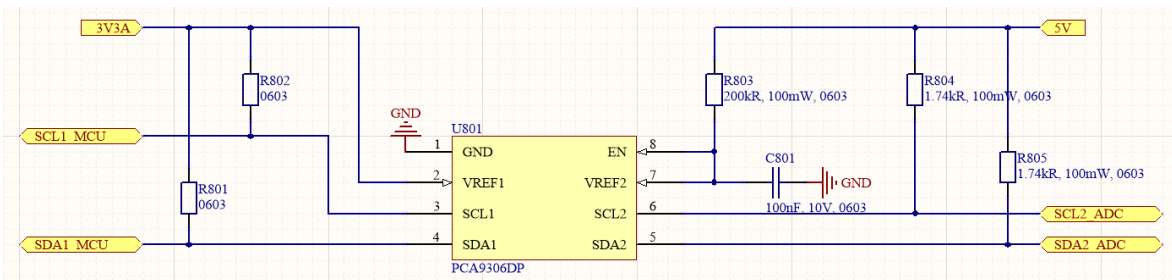
Kõikidel isearendatud trükkplaatidel kasutatakse Analog Devicesi isoleeritud CAN võrgu transmitterit ADM3053BRWZ [10]. Samuti kasutatakse seda ka anemomeetri trükkplaadil, kuna antud saatja puhul on samasse komponendi korpusesse mahutatud nii transmitter kui ka isoleeriv toitemuundur. See hoiab trükkplaadil ruumi kokku ning on lihtsasti disaini integreeritav. CAN võrgu saatjat ümbritsev elektroonikaskeem ning komponentide parameetrid (Joonis 3.11) on koostatud andmelehe põhjal.



Joonis 3.11 Anemomeetri trükkplaadil asuv CAN võrgu ahel

### 3.1.8 Anemomeetri I<sup>2</sup>C suhtluse transleerimise ahel

Õhuvoolu kiiruse mõõtmisel kasutatakse ADC suhtleb mikrokontrolleriga kasutades I<sup>2</sup>C võrku. Mikrokontrolleri poolse kahejuhtmeliidese pinge on 3,3 V, kuid ADC poolne liidese pinge on 5 V. Selle tõttu kasutatakse I<sup>2</sup>C suhtluse transleerimist, mille abil on võimalik ühendada mitu erineva pingega kahejuhtmeliidest. Anemomeetri trükkplaadil kasutatakse transleerimiseks NXP toodetavat PCA9306DP [12]. Ahel ning komponentide väärtused (Joonis 3.12) on koostatud komponendi andmelehe põhjal.



Joonis 3.12 Anemomeetri trükkplaadil asuv I<sup>2</sup>C suhtluse transleerimise ahel

## 3.2 Anemomeetri trükkplaadi komponentide paigutus

Komponentide paigutuse ehk trükkplaadi disaini eelduseks on elektroonikaskeemide olemasolu ning teostatud komponentide valik, et oleks teada komponentide vahelised ühendused ning suurused. Anemomeetri trükkplaadi disainimisel tuli arvesse võtta plaadi suurust, et see oleks kinnitav nii auto esi- kui ka tagaotsas. Samuti tuli silmas pidada, et paigutatud komponente oleks

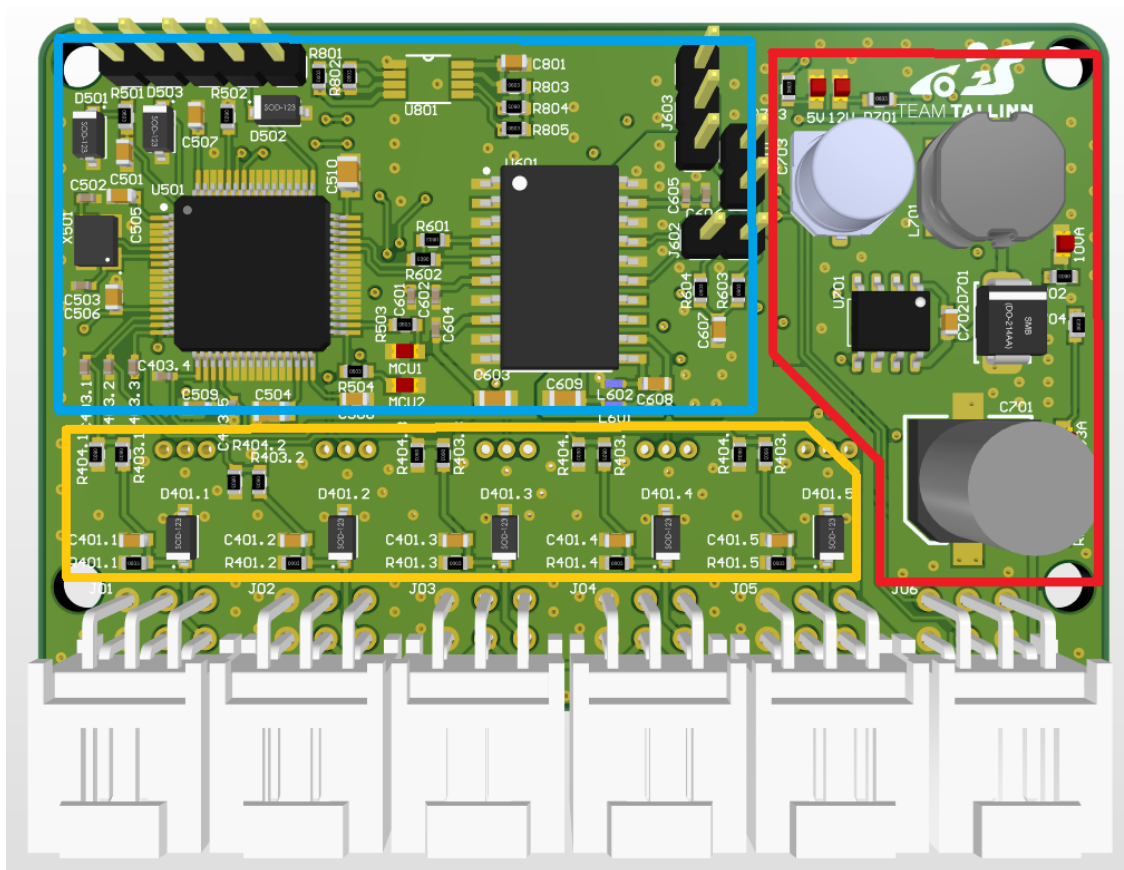
võimalik hiljem joota ning trükkplaadil oleks minimaalselt häiringuid. Pistikute asetusel arvestati radade vedamise võimalustega ning paigutati kõik pistikud ühele poole plaati.

Algselt paigutati kõik komponendid vastavalt erinevatele ahelatele gruppidesse. Seejärel oli võimalik hakata grupe üksteisega kokku sobitama. Sobitamisel jälgiti, et komponendid ei satuks üksteisele liiga lähedale või teisel pool plaati poleks signaaliradade vedamist segavaid komponente. Järgnevalt sai hakata vedama komponentide vahelisi radasid. Kui radade vedamisel tekkis probleeme, tuli teha muudatusi komponentide paigutuses. Rajad üritati vedada taoliselt, et need oleksid võimalikult lühikesed ning sirged.

Anemomeetri trükkplaat koosneb neljast kihist ning on 1,6 mm paksusega. Peamine väliskiht on komponentide ning signaalide jaoks, seesmine toitekiht on toitesignaalide jaoks, seesmine maanduskiht on trükkplaadi maanduse ühtlustamiseks terve plaadi ulatuses ning alumine väliskiht on komponentide ja signaalide jaoks. Signaale on võimalik vedada ühelt kihilt teisele, selleks kasutatakse läbiviike.

### **3.2.1 Toiteahelate disain**

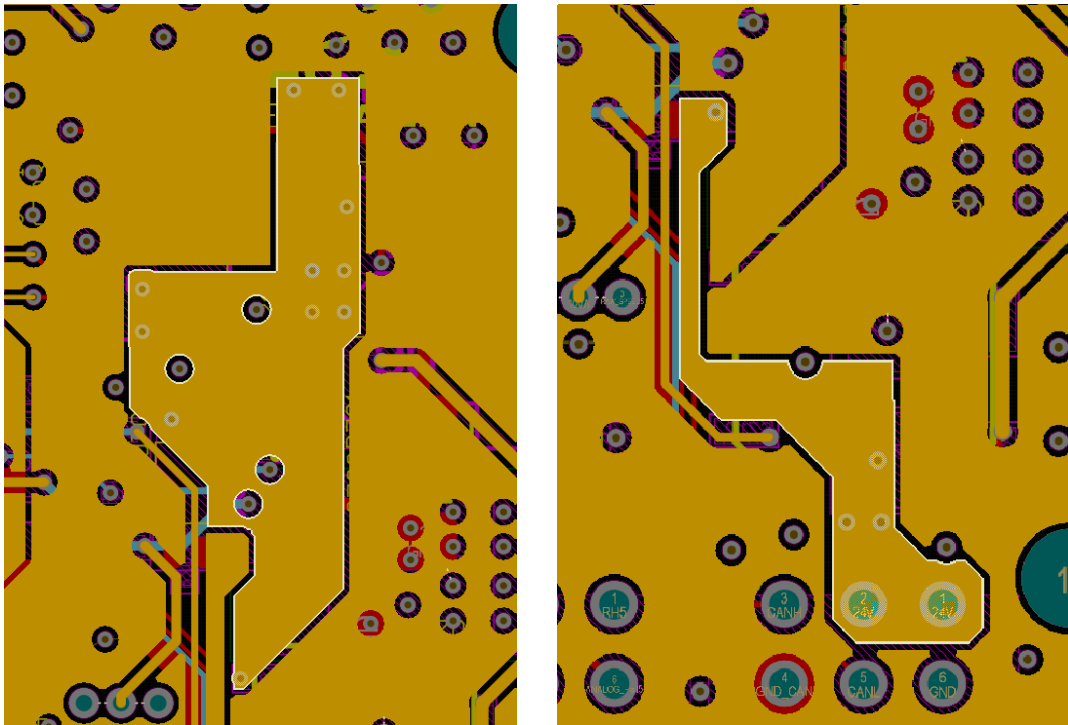
Pingeregulaatorid (eriti lineaarsed pingeregulaatorid) tekitavad soojust vastavalt pinge muundamise efektiivsusele ning tarbitava voolutugevuse suurusele. Selle tõttu üritati komponentide paigutamisel toiteahelad teistest ahelatest eemal hoida, kuid siiski disainida kogu trükkplaat võimalikult ruumi raiskamata. Joonisel 3.13 on näha 24 V-st 12 V muundamise toiteahela paiknemist anemomeetri trükkplaadi pealmisel poolel. Ülejäänud toiteahelad on samas asukohas teisel pool trükkplaati. Trükkplaadi 24 V sisend asub Joonisel 3.13 kõige parempoolsemas pistikus, et 24 V liin oleks võimalikult lühike.



Joonis 3.13 Anemomeetri trükkplaat pealtvaates

Punane ala – 24 V-st 12 V toiteahel, sinine ala – digitaalahelad, kollane ala - analoogahelad

Parema soojuse eraldumise nimel kasutati toitekihis 24 V ja 12 V polügoone, sest nende abil hajub soojus suurema pinna peale laiali (Joonis 3.14).

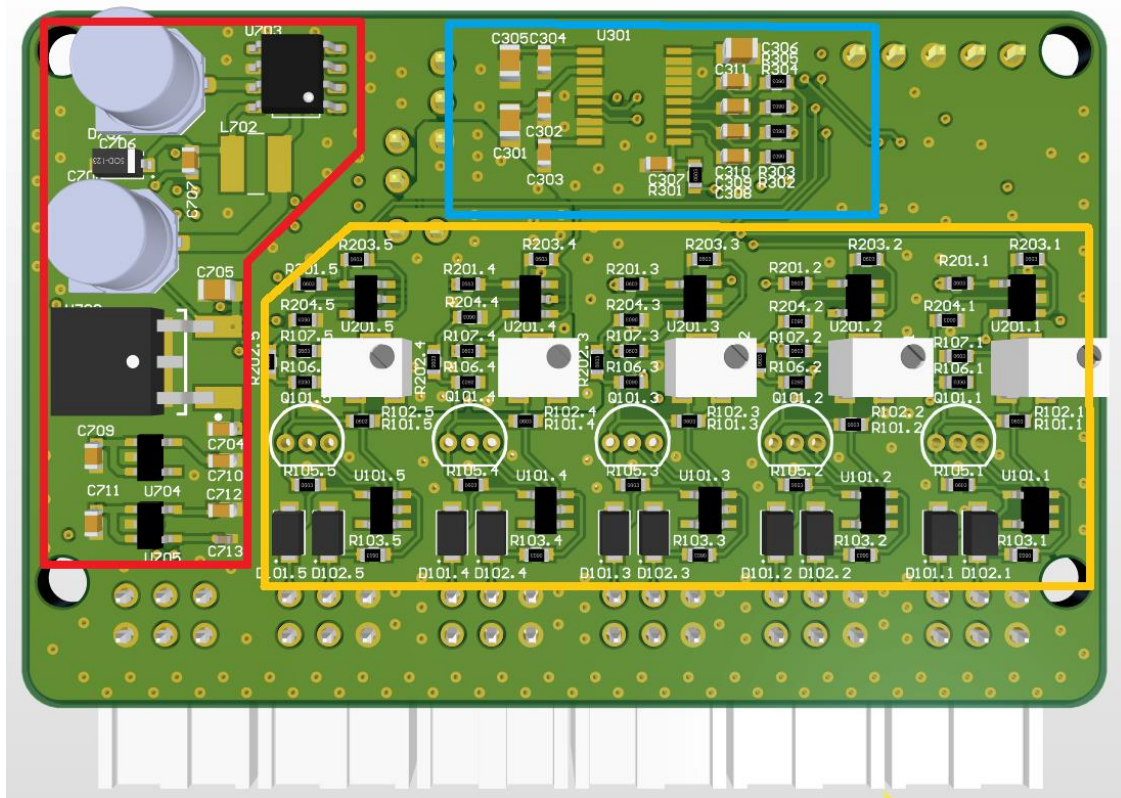


Joonis 3.14 Anemomeetri trükkplaadi toiteahela polügoonid: 12 V polügoon (vasakul), 24 V polügoon (paremal)

### 3.2.2 Trükkplaadi disaini kirjeldus

Ülepingete mööda plaati levimise ennetamiseks kasutati trükkplaadi sisendite ja väljundite juures TVS diode (Joonistel 3.13 ja 3.15 asuvad need pistikute jalgade lähedal). Antud diodid reageerivad ülepinge korral ning hakkavad pinget juhtima maandusesse kaitstes seeläbi ülejäänud elektroonikakomponente.

Iga mõõturi jaoks on trükkplaadil üks pistik ning need asuvad üksteise kõrval (Joonisel 3.13 viis pistikut alates vasakult). Mõõturite pistikutes asuvad õhuvoolu kiiruse ning suuna mõõtmiseks vajalikud sensorite sisendid ja väljundid. Pistikutest kõrgemal asuvad vastakuti mõlemal plaadi poolel analoogahelad (Joonisel 3.13 on suuna mõõtmise ahelad ning Joonisel 3.15 kiiruse mõõtmise ahelad). Joonistel oleva sinise ala sees on digitaalhelad. Vastamisi mõlemal trükkplaadi poolel on ka toiteahelad, mille töötamise inditseerimiseks on plaadi pealmisele poolele paigutatud LED-id. Joonisel 3.13 on ülemises vasakus nurgas 5-jalaline pistik, mida kasutatakse mikrokontrolleri programmeerimiseks.



Joonis 3.15 Anemomeetri trükkplaadi alumine pool

Punane ala – toiteahelad, sinine ala – digitaalhelad, kollane ala - analoogahelad

## 4. ANEMOMEETRI TRÜKKPLAADI KORPUSE NING MÕÕTURI

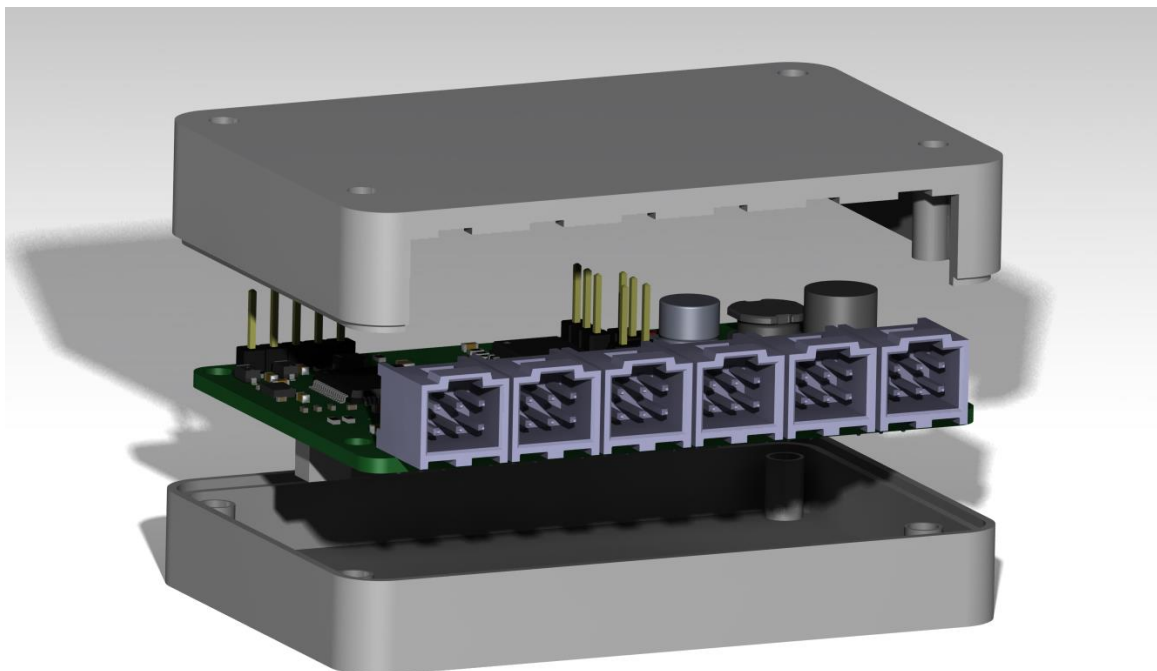
### DISAIN

Anemomeetri trükkplaadi vormeli külge kinnitamiseks on oluline korpuse olemasolu, mille abil on trükkplaati lihtsam sõiduki külge kinnitada. Samuti kaitseb korpus trükkplaati väliskeskkonnast tulenevate mõjutuste eest nagu näiteks vibratsioon ja niiskus.

Mõõturite disain sõltub põhiliselt õhuvoolu kiiruse ning suuna mõõtmiseks tulenevatest iseärasustest (näiteks kasutatavad sensorid). Samuti on arvestatud, et mõõturit oleks võimalik kinnitada aerodünaamika paketi tiivaprofiilide külge ning ka vormeli põhja all olevasse difuuserisse. Trükkplaadi korpus ning mõõtur on disainitud kasutades CAD programmi Catia V5.

### 4.1 Anemomeetri korpuse disain

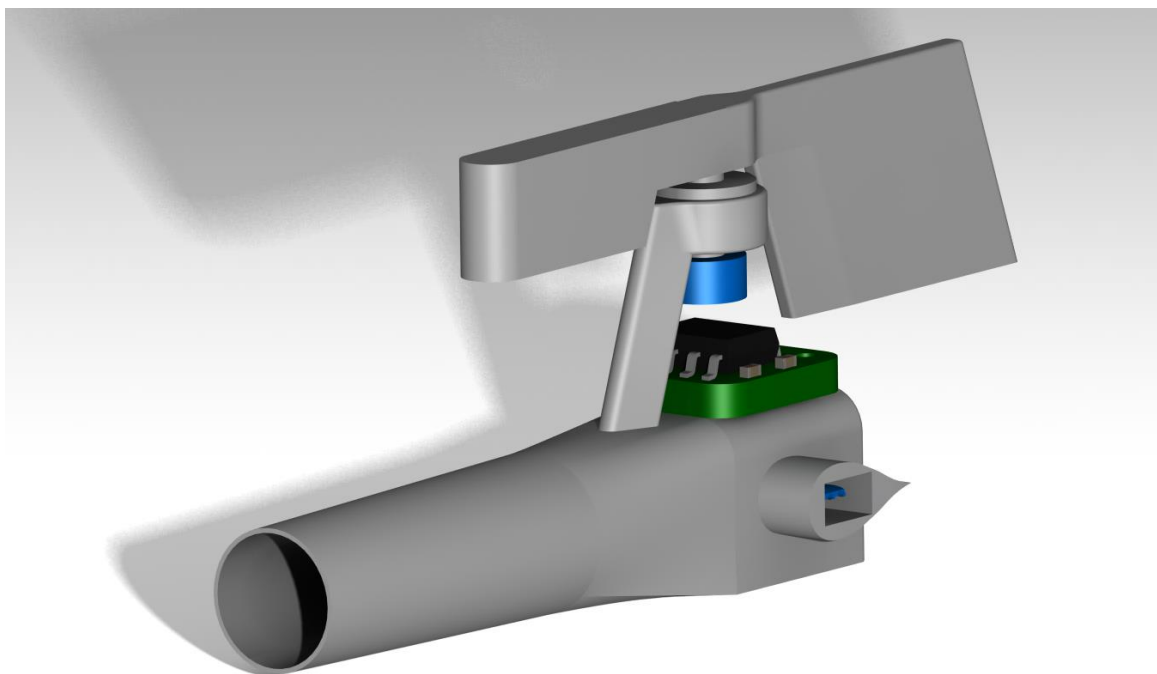
Korpus koosneb pealmisest ning alumisest osast, millele on projekteeritud puksid vastavalt trükkplaadi sisse tehtud avade asukohale. Kui korpuse mõlemad pooled kokku panna, fikseerub trükkplaat nende vahel tänu puksidele. Korpuse kokku monteerimiseks kasutatakse polte ja mutreid, mille jaoks on trükkplaadis ja korpuse puksides avad. Poldid sisestatakse Joonisel 4.1 alumisest osast ning kasutatakse peitpea polte, et korpuse alumise osa pind ei jääks vormeli kerest kõrgemale. Detaili tootmiseks kasutatakse 3D-printimist.



Joonis 4.1 Anemomeetri trükkplaat koos korpusega

## 4.2 Anemomeetri mõõturi disain

Mõõtur koosneb õhuvoolu kiiruse mõõtmiseks mõeldud torukujulisest osast ning sensorist, suuna määramise tuulelipukesest, tuulelipu kinnitamise süsteemist ning suuna määramiseks vajalikust väikesest trükkplaadist koos sensoriga (Joonis 4.2). Tuulelipu kinnitamise süsteemi küljes on väikene laager, millest läheb läbi võll, mille ühte otsa on kinnitatud tuulelipp ning teise otsa magnet (joonisel sinine silinder). Mõõtetoru ning lipu kinnitussüsteem on üks detail ning see toodetakse 3D-printides. Samuti toodetakse ka tuulelipp. Kuna mõõturite asukohta tiivaprofiilidel testimise käigus pidevalt muudetakse, on lihtsaim kinnitusviis kasutada takjateipi. Mõõturi väikeste mõõtmete tõttu on seda võimalik kinnitada enamikesse profiilide pinnal asuvatesse kohtadesse.



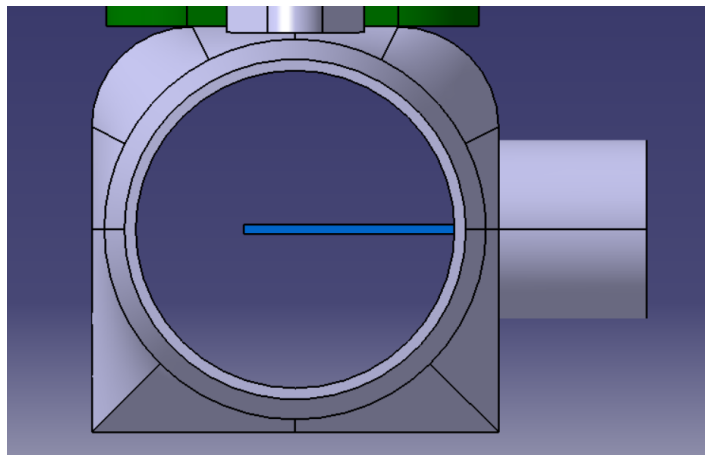
Joonis 4.2 Anemomeetri mõõturi disain

### 4.2.1 Mõõtetoru disain

Õhuvoolu kiiruse mõõtmiseks on disainitud mõõtetoru, millest läbi voolava fluidumi ehk õhu kiirust mõõdetakse toru tagumises osas paikneva sensoriga (Joonisel 4.2 toru tagumises otsas sinine sensor). Toru tagumine ots on disainitud laienevalt, et selle peale oleks võimalik liimida väikene õhuvoolu suuna sensori trükkplaat. Alumine pind on jäätud lamedaks, et kogu mõõturit kinnitada aerodünaamika tiivaprofiili külge. Kiiruse mõõtmise sensori juhtmete ning selle fikseerimiseks on toru ühele poolele tehtud pisike veetilga kujuline detail. Sensori paiknemine ning toru sisemine

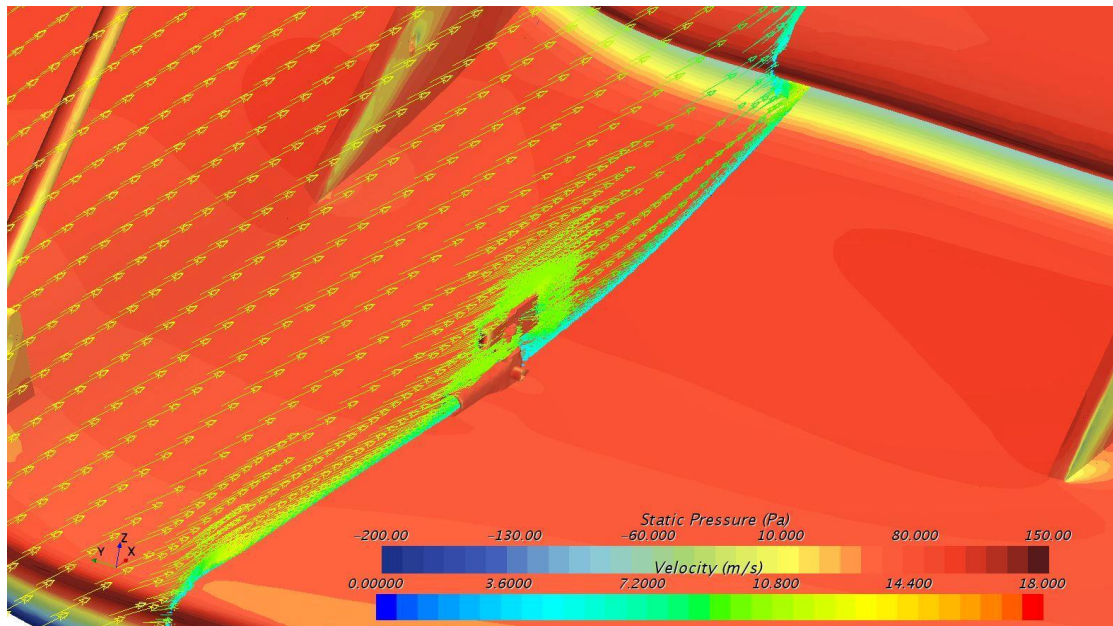


läbimõõt on valitud taoliselt, et sensori kuumuti ja temperatuuriandur oleksid võimalikult toru ristlõike keskpunktis (Joonis 4.3).



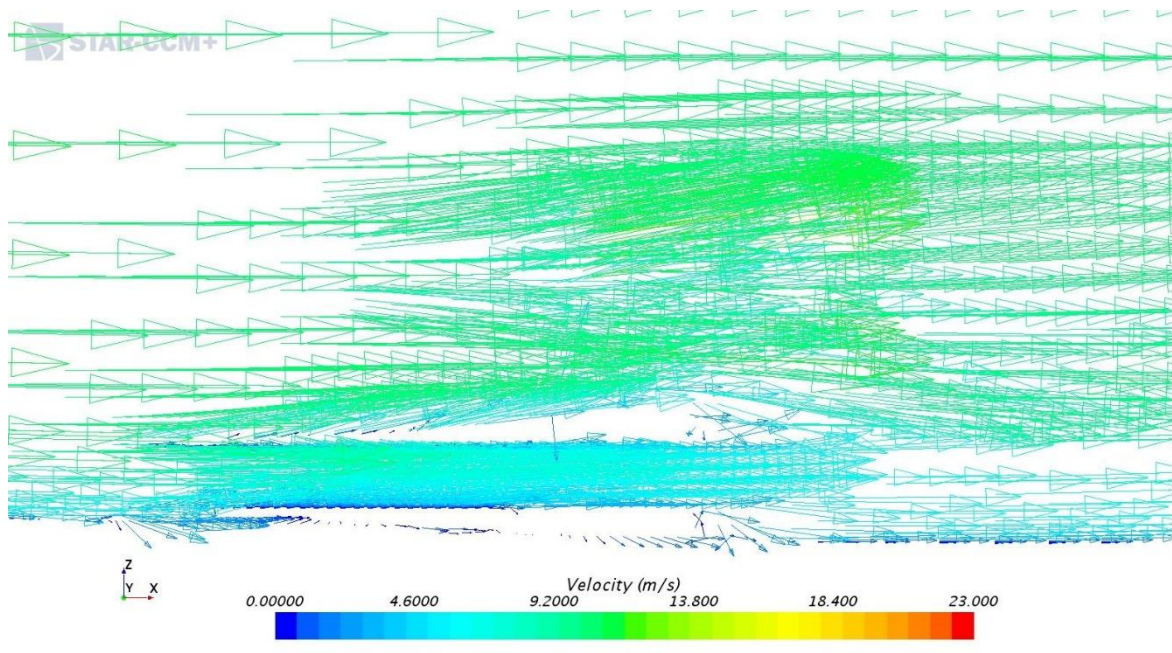
Joonis 4.3 Mõõtetoru eestvaates

Tulenevalt sensori spetsiifikast tuli toru disainimisel jälgida, et torust läbi liikuv õhk oleks võimalikult laminaarne ehk voolaks rööpsete kihtidena, mis tagab täpseima mõõtetulemuse. Kuna aerodünaamika inseneride jaoks on vajalik teada õhuvoolu käitumist tiivaprofiilide pinna läheduses, peab mõõteturi toru samuti olema tiiva pinnale küllaldaselt ligidal. Mõõtetoru läbiva õhuvoolu omaduste väljaselgitamiseks tegi meeskonna aerodünaamika insener Magnus Loos torule voolavusanalüüsi, mille tulemusi on näha Joonistel 4.4 ning 4.5. Analüüs oli üles ehitatud olukorrale, kus vormel liigub sirgel lõigul kiirusega 15,3 m/s. Mõõtur oli paigutatud esitiiva põhiprofiilile. Analüüsi tegemiseks kasutatud arvutitarkvara oli Star-CCM+.



Joonis 4.4 Mõõtetoru voolavusanalüüs: õhuvektorite liikumine mõõteturi suhtes ning mõõteturi asukoht esitiiva põhiprofiilil. Autor Magnus Loos [17]

Joonisel 4.5 alumises osas on näha õhuvektorite liikumist läbi mõõtetoru. Torusse siseneva õhuvoolu kiirus jääb samasse kanti nagu torust väljuva õhuvoolu kiirus. Samuti ei tundu, et mõõtetorus oleks turbulentset õhuvoolu, vaid pigem liiguvad vooluvektorid üsnagi laminaarselt.

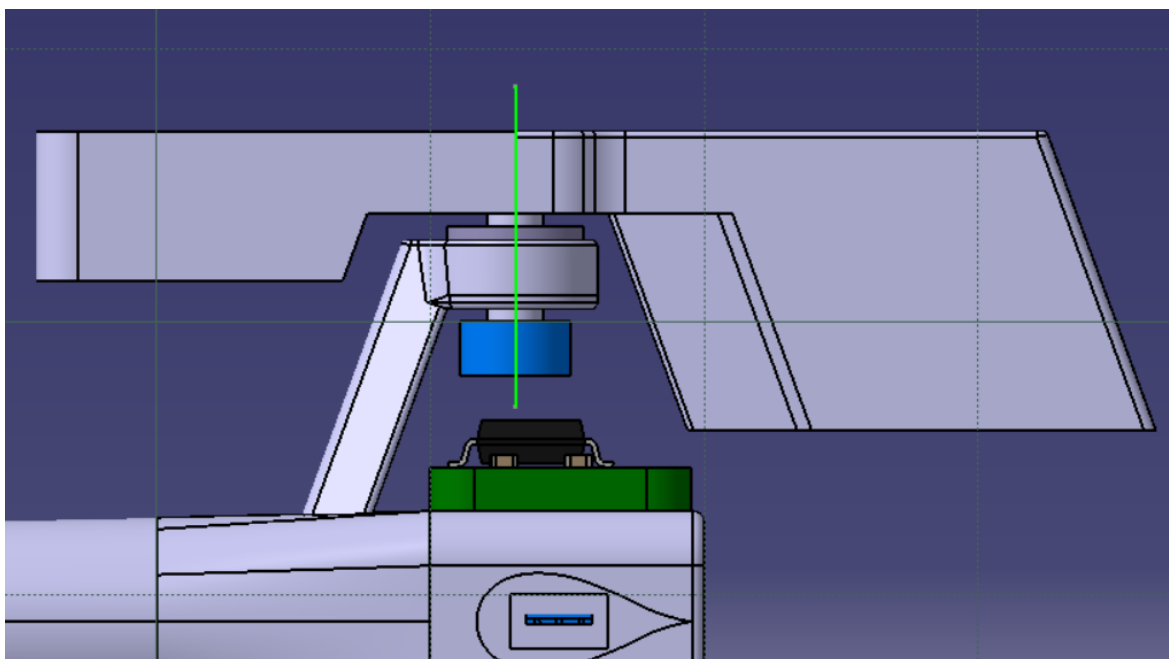


Joonis 4.5 Mõõtetoru voolavusanalüüs: õhuvektorite liikumine läbi mõõtetoru külgvaates. Autor Magnus Loos [17]

## 4.2.2 Tuulelipu disain

Õhuvoolu suuna sensori trükkplaadi kohal on magnet, mille pöördenurgale vastavalt on võimalik määrata lipu suund. Magnet on lipuga ühendatud võlli abil ning võlli pöörlemiseks mõõtetoru suhtes on kasutatud laagrit. Selle tõttu on tuulelipu ja võlli kinnituspunkt mõõturi põhjast üsna kõrgel. Kuna mõõturit soovitakse kasutada ka vormeli põhja all asuva difuusori jaoks, peab mõõturi kõrgus olema alla 35 mm, sest see on tudengivormeli FEST19 puhul minimaalne kaugus difuusori ning maapinna vahel. Selle tõttu projekteeriti tuulelipp, mille tagumine lapik osa on suunatud mõõturi põhja poole (Joonis 4.6), tänu millele on kogu mõõturi maksimaalne kõrgus 22,05 mm.

Lipp on projekteeritud taoliselt, et võll kinnituks selle massikeskme vertikaalsele teljele. See tähendab, et jagades lipu geomeetria võlli pöörlemistelje abil horisontaalsihis kaheks osaks, on nii vasakpoolse kui ka parempoolse geomeetrilise keha massid võrdsed. Joonisel 4.6 tähistab roheline joon võlli pöörlemistelge ning horisontaalsihis jaguneb tuulelipp vasakpoolseks ning parempoolseks osaks. Vasak- ning parempoolse osa massid peavad olema samad, et vältida olukorda, kus vormeliga kurvis sõites tuulelipp end ise tsentrifugaaljõu tõttu keerama hakkab.



Joonis 4.6 Võlli pöörlemistelg ning tuulelipu vasak- ja parempoolne osa

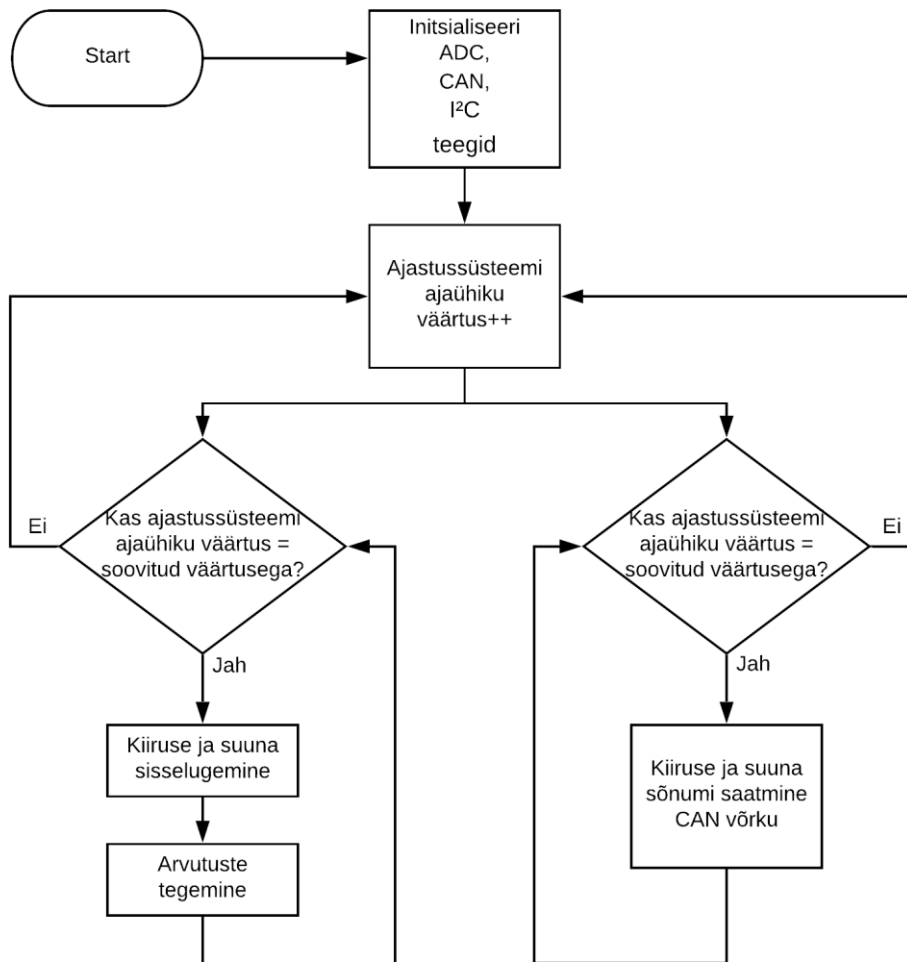
## 5. ANEMOMEETRI TRÜKKPLAADI PROGRAMMEERIMINE

Õhuvoolu kiiruse ning suuna sensoritest tulev analoogsignaali ehk pinget on vaja muuta digitaalselt loetavaks informatsiooniks ning seejärel saata vormeli üldisesse CAN võrku, et anemomeetri mõõdetavad mõõtetulemused kajastuksid sõidu logis. Õhuvoolu kiiruse muundab digitaalseks eraldi ADC, mis edastab andmed mikrokontrollerisse läbi I<sup>2</sup>C siini. Suuna sensori väljundsignaal muundatakse digitaalseks mikrokontrolleri sees asuva ADC-ga. Anemomeetri trükkplaadi ning vormeli vahelist CAN suhtlust juhib mikrokontroller. Sellest lähtuvalt on programmikoodis vaja I<sup>2</sup>C, CAN ning ADC funktsionaalsuse toimimiseks vastavaid teke.

Lähtuvalt funktsionaalsusest on programm jagatud osadeks ehk alamfunktsioonideks. Põhifunktsioonis initsialiseeritakse kasutatavad teegid ning *while* tsüklis kutsutakse kindla sagedusega välja vajalikud funktsioonid. Funktsioonide väljakutsumise ajastussüsteem põhineb *interrupt*'del ning see on meeskonna poolt loodud. Trükkplaat programmeeritakse keskkonnas Atollic TrueSTUDIO kasutades C keelt.

### 5.1 Programmikoodi andmevooskeem

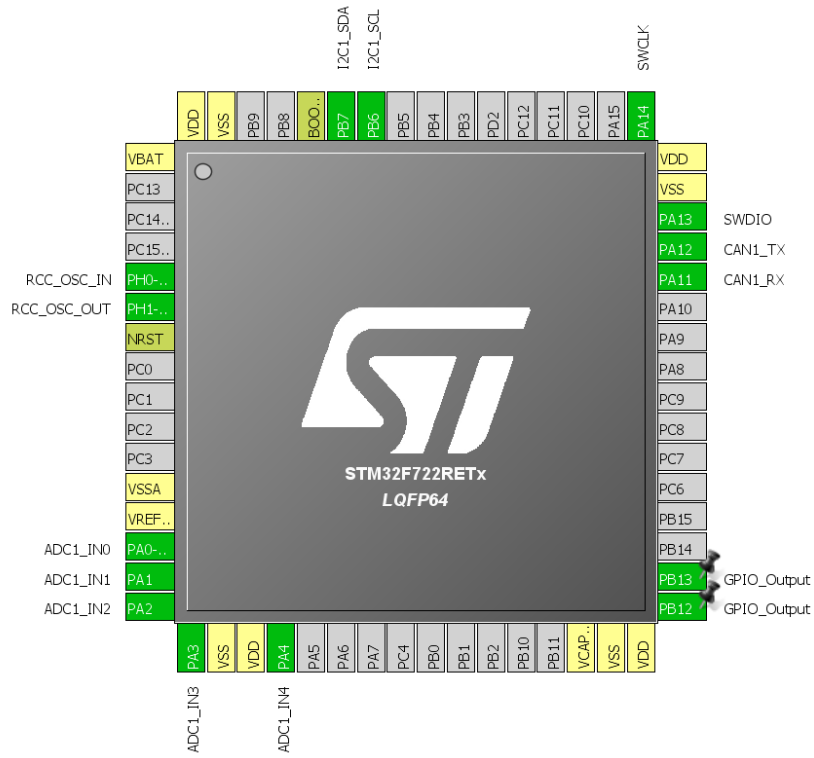
Kui plaadile ühendatakse järgi toide, hakkab mikrokontrolleris asuv kood tööle. Alguses initsialiseeritakse ADC, CAN ning I<sup>2</sup>C teegid. Seejärel läheb programm lõpmatusse *while* tsüklisse, kus kontrollitakse *if* tingimuste abil, kas ajastussüsteemi aja loenduri väärtus ühtib tingimuses paika pandud väärtusega. *If* tingimuste sees on funktsioonid, mille abil loetakse sisse õhuvoolu kiiruse või suuna digitaalsed väärtused (Joonis 5.1). Seejärel kasutades valemeid teisendatakse antud väärtused kas kiiruseks (m/s) või suuna nurgaks.



Joonis 5.1 Andmevooskeem

## 5.2 ADC, CAN ning I<sup>2</sup>C teekide genereerimine

Mikrokontrolleri suhtlusfunktsioonide ning analoog-digitaalmuunduri kasutamiseks on vaja vastavaid teekes, mis määravad eelnimetatud funktsioonide tööviisi. Teekide ülesehitus on üpriski keeruline ning aeganõudev, selle tõttu on STMicroelectronics arendanud tarkvara STM32CubeMX, mis genereerib kasutajale valitud mikrokontrolleri ning sisestatud parameetrite alusel sobiva projektifaili koos teekidega. Programmis on kasutajal võimalik mikrokontrolleri jalgadele määrata kindel sisendi või väljundi tüüp, konfigurereida *clock*'ide sagedusi ning seadistada mikrokontrolleri sise- ning välisparameetreid. Joonisel 5.2 on näidatud anemomeetri trükkplaadi mikrokontrolleri reserveeritud sisendid ja väljundid.



Joonis 5.2 Mikrokontrolleri sisendid ja väljundid

## KOKKUVÕTE

Käesolevas lõputöös kirjeldatakse tudengivormeli FEST19 tarvis projekteeritud anemomeetrit, mille eesmärgiks on aerodünaamika tiivaprofiilidel liikuva õhuvoolu kiiruse ning suuna mõõtmine. Töös antakse ülevaade õhuvoolu kiiruse mõõtmiseks rakendatava lahenduse leidmisest, anemomeetri süsteemi olemusest, vajalike elektroonikaahelate disainimisest, trükkplaadi komponentide paigutusest, anemomeetri korpuse ja mõõture disainimisest ning süsteemi juhtimiseks vajaliku programmikoodi arendamise alustest.

Põhieesmärgi saavutamiseks oli tarvis valida õhuvoolu kiiruse mõõtmise sensor. Seejärel oli võimalik hakata koostama elektroonikaskeeme, mille abil anemomeeter informatsiooni käsitleb ning edastab. Seejärel valiti skeemidele sobivate parameetritega komponendid ning viimaks disainiti trükkplaadi komponentide paigutus.

Lisaks elektroonika disainile tuli anemomeetri trükkplaadile projekteerida korpus ning trükkplaadi külge ühenduvad mõõturid, mis omakorda koosnevad mõõtetorust ja tuulelipust. Disainitud mõõturite väikeste mõõtmete tõttu on neid võimalik kasutada tiivaprofiilidel eripaikades ning kinnitada isegi vormeli põhja all asuva difuusori külge.

Käesoleva bakalaureusetöö tulemusena on otsitud ning võrreldud erinevaid võimalikke lahendusi õhuvoolu kiiruse mõõtmiseks, loodud aerodünaamika tiivaprofiilide õhuvoolu kiiruse mõõtmiseks vajaliku süsteemi tööloogika, projekteeritud anemomeetri funktsioneerimiseks tarvilikud elektroonikaahelad, teostatud trükkplaadi komponentide paigutus, disainitud trükkplaadi fikseeriv korpus ning mõõtetorust ja tuulelipust koosnev mõõtur ning alustatud anemomeetri juhtimiseks vajaliku programmikoodi kirjutamisega.

Antud lõputöösse ei mahtunud anemomeetri testimine, kuna arenduses olev programmikood ei ole piisaval määral valmis. Küll aga tegeletakse anemomeetri koodi arendamisega edasi, et projekteeritud lahendust saaks hakata testima.

## SUMMARY

Current thesis describes the development of an anemometer for Formula Student vehicle FEST19, which purpose is to measure the airflow velocity and direction on vehicle's aerodynamic wings. This work gives an overview about finding a suitable solution for airflow velocity measurement, the essence of the system, designing required electronic circuits, designing the PCB layout, designing the PCB case and gauge and the anemometer controlling code development.

To achieve the main objective, firstly the airflow velocity sensor had to be chosen. Afterwards the composing of electronic circuits began, which are essential for the anemometer to read, process and transmit the data. After that electronic components were picked and the PCB layout was designed.

In addition to electronic design a case for the anemometer's PCB and gauges, which consist of measuring tube and weathervane. Because of the gauges' small size, they fit on every aerodynamic wing and can also be attached to the diffuser under the formula car.

As the result of current Bachelor's thesis different solutions to measure airflow velocity have been researched and compared to each other, the working principle to measure airflow velocity on aerodynamic wings has been made, the electronic circuits along with the PCB layout have been designed, anemometer's case and gauges consisting of measuring tube and vane have been designed and the development of the code to control anemometer has been started.

Current thesis does not include information about the testing of the anemometer, because program code is not enough functional at the moment. Although the code is in development so that anemometer can be tested in the future.



## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] K.-G. Tamm, „Formula Student klassi vormelauto aerodünaamikapaketi arendus,“ Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 2018. [Kasutatud 11. mai 2019]
- [2] G. Argentini, „Pitot tube from Euler equations point of view. Application to Formula 1 cars.,“ [0,1]Bending - Italy, 2008. [Kasutatud 16. mai 2019]
- [3] J. H. Watmuff, „A High-Performance Constant-Temperature Hot-Wire Anemometer,“ MCAT Institute, San Jose, 1994. [Kasutatud 16. mai 2019]
- [4] „Application Note, Thermal Mass Flow Sensor FS7,“ Innovative Sensor Technology IST AG, [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://www.ist-ag.com/sites/default/files/AFFS7\\_E.pdf](https://www.ist-ag.com/sites/default/files/AFFS7_E.pdf). [Kasutatud 11. mai 2019].
- [5] „SKYWATCH Xplorer,“ JDC ELECTRONIC SA. [Võrgumaterjal]. [Kasutatud 16. mai 2019].
- [6] „XR8051, XR8052, XR8054 Low Cost, High Speed Rail-to-Rail Amplifiers,“ Exar Corporation, [Võrgumaterjal]. Saadaval: [http://www.farnell.com/datasheets/1813781.pdf?\\_ga=2.173363370.889727036.1558008215-1315226299.1513518556](http://www.farnell.com/datasheets/1813781.pdf?_ga=2.173363370.889727036.1558008215-1315226299.1513518556). [Kasutatud 11 Mai 2019].
- [7] „150mA Low Noise  $\mu$ Cap CMOS LDO,“ Micrel, Inc., [Võrgumaterjal]. Saadaval: [http://www.farnell.com/datasheets/83924.pdf?\\_ga=2.98718743.889727036.1558008215-1315226299.1513518556](http://www.farnell.com/datasheets/83924.pdf?_ga=2.98718743.889727036.1558008215-1315226299.1513518556). [Kasutatud 11. mai 2019].
- [8] „ARM® Cortex®-M7 32b MCU+FPU, 462DMIPS, up to 512KB Flash /256+16+4KB RAM, USB OTG HS/FS, 18 TIMs, 3 ADCs, 21 com IF,“ STMicroelectronics, [Võrgumaterjal]. Saadaval: [http://www.farnell.com/datasheets/2240089.pdf?\\_ga=2.135550776.889727036.1558008215-1315226299.1513518556](http://www.farnell.com/datasheets/2240089.pdf?_ga=2.135550776.889727036.1558008215-1315226299.1513518556). [Kasutatud 11. mai 2019].
- [9] „Single 300mA LDO in 1.0mm x 1.0mm DFN Package,“ Micrel, Inc., [Võrgumaterjal]. Saadaval: [http://www.farnell.com/datasheets/2108564.pdf?\\_ga=2.140139322.889727036.1558008215-1315226299.1513518556](http://www.farnell.com/datasheets/2108564.pdf?_ga=2.140139322.889727036.1558008215-1315226299.1513518556). [Kasutatud 11. mai 2019].
- [10] „Signal and Power Isolated CAN Transceiver with Integrated Isolated DC-to-DC Converter,“ Analog Devices, Inc., [Võrgumaterjal]. Saadaval:

[http://www.farnell.com/datasheets/2256433.pdf?\\_ga=2.99261591.889727036.1558008215-1315226299.1513518556](http://www.farnell.com/datasheets/2256433.pdf?_ga=2.99261591.889727036.1558008215-1315226299.1513518556). [Kasutatud 11. mai 2019].

- [11] „MLX90340 Datasheet,“ Melexis, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.mouser.ee/datasheet/2/734/MLX90340-Datasheet-Melexis-1516802.pdf>. [Kasutatud 11. mai 2019].
- [12] „PCA9306 - Dual bidirectional I2C-bus and SMBus voltage-level translator,“ NXP B.V., [Võrgumaterjal]. Saadaval: [http://www.farnell.com/datasheets/1805226.pdf?\\_ga=2.135117048.889727036.1558008215-1315226299.1513518556](http://www.farnell.com/datasheets/1805226.pdf?_ga=2.135117048.889727036.1558008215-1315226299.1513518556). [Kasutatud 11. mai 2019].
- [13] „LTC2309 - 8-Channel, 12-Bit SAR ADC with I2C Interface,“ Linear Technology Corporation, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.mouser.ee/datasheet/2/609/2309fd-1270144.pdf>. [Kasutatud 11. mai 2019].
- [14] „LM2674 SIMPLE SWITCHER® Power Converter High Efficiency 500-mA Step-Down Voltage Regulator datasheet (Rev. G),“ Texas Instruments Incorporated, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2674.pdf>. [Kasutatud 11. mai 2019].
- [15] „2A/1A Fixed Output LDO Regulators,“ ROHM Co., Ltd., [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.mouser.ee/datasheet/2/348/baxxdd0-e-208708.pdf>. [Kasutatud 11. mai 2019].
- [16] „LM2675 SIMPLE SWITCHER® Power Converter High Efficiency 1-A Step-Down Voltage Regulator datasheet (Rev. F),“ Texas Instruments Incorporated, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2675.pdf>. [Kasutatud 11. mai 2019].
- [17] M. Loos, „Anemomeetri mõõtetoru voolavusanalüüs,“ FS Team Tallinn, Tallinn, 2019. [Kasutatud 16. mai 2019]

**LISAD**