

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
Infotehnoloogia teaduskond

Benedikte Petrutis 179531IACB

# **SÕIDUKI ALUSPINNA TEMPERATUURI MÕÕTMISE SEADE**

Bakalaureusetöö

Juhendaja: Peeter Ellervee

PhD

Kaasjuhendaja: Henri Sink

Elektroonika peainsener

AuVe Tech OÜ

Tallinn 2020

## **Autorideklaratsioon**

Kinnitan, et olen koostanud antud lõputöö iseseisvalt ning seda ei ole kellegi teise poolt varem kaitsmisele esitatud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on töös viidatud.

Autor: Benedikte Petrutis

14.05.2020

## **Annotatsioon**

Lõputöö eesmärgiks oli luua sõiduki aluspinna temperatuuri mõõtmise seade. Töö on valminud koostöös ettevõttega AuVe Tech OÜ. Seade on loodud ettevõtte isesõitvale autole Iseauto ning seadme ülesandeks on edastada sõiduki juhtsüsteemidele informatsiooni sõiduki aluspinna seisundi kohta. Vastuvõetud andmeid saab sõiduki juhtprogramm kasutada liikluses kaalutletud otsuste tegemiseks.

Töö koosneb seadmes kasutatavate kommunikatsiooniprotokollide ülevaatest, millele järgneb seadmes kasutatava temperatuurianduri valik kahe anduri teoreetilise ja funktsionaalse võrdluse kaudu. Temperatuurianduri valikul luuakse prototüüp seadme põhikomponentide ühenduvuse kinnitamiseks ning ülejäänud komponentide välja valimisel jätkatakse skeemi koostamisega. Skeemi valmimisel disainitakse trükkplaat ning koostatakse seadme mikrokontrollerile juhtprogramm. Valminud seadet testitakse sõidukiväliselt prototüübina.

Töö tulemusena arendati välja seadme trükkplaat koos tarkvaraga, millega mõõdetakse sõidukialuse tee- või maapinna temperatuuri ning edastatakse töödeldud andmed sõiduki juhtsüsteemidesse.

Lõputöö on kirjutatud eesti keeles ning sisaldab teksti 38 leheküljel, 5 peatükki, 21 joonist, 4 tabelit.

## **Abstract**

### **Device for Measuring the Surface Temperature Under a Vehicle**

The aim of this thesis was to develop a device for measuring the surface temperature under a vehicle. This thesis was done in cooperation with AuVe Tech OÜ, and the resulting device is to be integrated into their self-driving vehicle Iseauto. The data acquired and processed by the device will be sent to the vehicle's control systems, which can be used to make deliberate decisions while navigating traffic.

The thesis consists of an overview of the communication protocols used in the device, followed by the selection of the contactless temperature sensor which is done through theoretical and functional comparison of the two preselected sensors. After the sensor is selected, a device prototype is created to test the interoperability of the device's main components. The remaining components were selected according to automotive standards, after which the scheme is created, followed by the design of the printed circuit board. Finally, the main program for the device's microcontroller is created, which is responsible for processing and forwarding the temperature information gathered from the sensor.

As a result of this thesis a printed circuit board with the corresponding software was developed for measuring the surface temperature under a vehicle.

The thesis is in Estonian and contains 38 pages of text, 5 chapters, 21 figures, 4 tables.

## Lühendite ja mõistete sõnastik

ACK	<i>Acknowledgement</i> , kviteerimine [1]
AMP	<i>Arbitration on Message Priority</i> , sõnumipõhine arbitreerimine
ASSP	<i>Application-specific standard product</i> , rakenduspõhine standardtoode
ATI	TTÜ Arvutitehnika instituut
CD	<i>Collision Detection</i> , põrketuvastus
CISPR	<i>International Special Committee for Radio Protection</i>
CSMA	<i>Carrier-sense multiple access</i> , multipöördussüsteem
dB $\mu$ V	Müra tase detsibellides, mis vastab 1 mikrovoldile
EEPROM	<i>Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory</i> , püsimälu
EMI	<i>Electromagnetic Interference</i> , elektromagnethäired
ESD	<i>Electrostatic Discharge</i> , elektrostaatiline laeng
ESR	<i>Equivalent Series Resistance</i> , ekvivalentne jadatakistus
HAL	<i>Hardware Abstraction Layer</i>
HDPE	<i>High-density polyethylene</i> , kõrge tihedusega polüetüleen
PC	Kahejuhtmeliides
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> , Rahvusvaheline Standardiorganisatsioon
JTAG	<i>Joint Test Action Group</i>
kHz/MHz	Kiloherts/megaherts, sageduse ühik
LED	Valgusdiod
mA	Milliamper, voolu ühik
ms	Millisekund, aja ühik
NACK	<i>Negative-acknowledgement</i> , negatiivne kviteerimine
OSI	<i>Open Systems Interconnection</i> , avatud süsteemide sidumise arhitektuur
PEC	<i>Packet Error Code</i> , paketi veakood
PTAT	<i>Proportional To Absolute Temperature</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> , pulsilaiusmodulatsioon

RAM	<i>Random Access Memory</i> , muutmälu
SCL	<i>Serial Clock Line</i> , takti jadasiin
SDA	<i>Serial Data Line</i> , andmete jadasiin
SMBus	<i>System Management Bus</i> , süsteemi haldamise liides
TVS-diood	<i>Transient Voltage Suppressor diode</i> , impulssvoolude supressordiood
V	Volt, pinge ühik
$\Omega$	Oom, takistuse ühik
$\mu\text{F}/\text{pF}$	Mikrofarad/pikofarad, mahtuvuse ühik

## Sisukord

1 Sissejuhatus .....	10
1.1 Ülesandepüstitus .....	10
1.2 Ülevaade tööst .....	11
1.3 Tulemused .....	11
2 Kommunikatsiooniprotokollid.....	13
2.1 CAN.....	13
2.2 SMBus .....	15
3 Temperatuurianduri valik .....	17
3.1 Temperatuuriandurite teoreetiline võrdlus .....	17
3.2 Temperatuuriandurite funktsionaalne võrdlus.....	20
3.3 Temperatuurianduri MLX90614 tööpõhimõte .....	24
3.4 Prototüüp .....	30
4 Seadme skeem .....	31
4.1 Komponentide valik .....	31
4.2 Toiteahel .....	32
4.3 Mikrokontroller .....	35
4.4 Temperatuuriandur .....	39
4.5 CAN-transiiver .....	39
5 Trükkplaadi disain .....	41
6 Tarkvaraarendus .....	43
7 Kokkuvõte .....	47
Kasutatud kirjandus .....	48
Lisa 1 – Ettevõtte nõuded seadmele .....	51
Lisa 2 – Seadme skeem .....	52
Lisa 3 – Seadme skeem (2).....	53
Lisa 4 – Seadme trükkplaadi pooled A ja B .....	54

## Jooniste loetelu

Joonis 1.1. Sõidukialuse teepinna temperatuuri mõõtmise seadme arhitektuur.....	11
Joonis 2.1. ISO-11898 standardis defineeritud OSI mudeli kihid [2]. .....	13
Joonis 2.2. CAN-siini topoloogia [2]. .....	14
Joonis 2.3. SMBus liidese topoloogia [4]......	15
Joonis 2.4. SMBus liidese andmevahetus [4]. .....	16
Joonis 3.1. Temperatuuriandurite testimise prototüüp kahe temperatuurianduriga. ....	20
Joonis 3.2. Temperatuuriandurite testkombinatsioon nr. 5. ....	22
Joonis 3.3. Temperatuuriandurite testkombinatsioon nr. 8. ....	23
Joonis 3.4. Temperatuuriandurite testkombinatsioon nr. 2. ....	24
Joonis 3.5. Temperatuurianduri MLX90614 plokkskeem [5]. .....	25
Joonis 3.6. RAMis asuva registri sisu lugemine [4]......	27
Joonis 4.1. Pistiku ning kaitsemehhanismide skeem. ....	32
Joonis 4.2. EMI filtri skeem. ....	33
Joonis 4.3. Sisendpinge 5 V-ile teisendava pingestabilisaatori skeem.....	34
Joonis 4.4. 5 V-ilt 3.3 V-ile teisendava pingestabilisaatori skeem.....	35
Joonis 4.5. STM32F1 mikrokontrolleri ühenduste skeem.....	36
Joonis 4.6. Ostsillaatori, valgusdiodide ning programmeerimise liidese skeem. ....	37
Joonis 4.7. Temperatuurianduri ühenduste skeem.....	39
Joonis 4.8. CAN-transiiveri skeem.....	40
Joonis 6.1. Mikrokontrolleri STM32F1 konfiguratsioon. ....	43
Joonis 6.2. Tarkvara ülesehitus. ....	45



## Tabelite loetelu

Tabel 3.1. Temperatuuriandurite mõõteparameetrite võrdlus [5], [7], [8]. .....	18
Tabel 3.2. Temperatuuriandurite üldiste parameetrite võrdlus [5], [7], [8].....	19
Tabel 3.3. Funktsionaalse võrdluse testide kombinatsioonid. ....	21
Tabel 5.1. Trükkplaadi raja soovituslik laius (10-kraadise temperatuuri tõusu jaoks) [28]. .....	42

# 1 Sissejuhatus

Ettevõtte AuVe Tech OÜ arendab isesõitvaid sõidukeid, mis on loodud liiklemiseks madala piirkiirusega asustatud aladel, näiteks ülikoolilinnakus või elamurajoonis. Ettevõtte sõiduk Iseauto peab ilma inimese sekkumiseta iseseisvalt hakkama saama eri ilmastiku-, tee- ning liiklusoludes. Iseauto kogub liigeldes informatsiooni väliskeskkonna kohta erinevate sensorite ja kaamerate abil. Anduritelt kogutud andmete põhjal võetakse vastu otsuseid liikumise suuna või kiiruse muutmiseks. Hetkel puudub Iseautol võimalus määrata sõidetava teekatte täpset seisundit. Kaamerapildi abil on võimalik määrata, kas teepind on kuiv, märg või lumine, kuid sõidukil puudub informatsioon teepinna temperatuurist. Teepinna temperatuuriandmete olemasolul saaks sõiduk reguleerida sõidukiirust ka juhul, kui kaamerapildist tuvastatav teepind on kuiv. Jäine teepind võib vahel jätta mulje kuivast teepinnast, mistõttu on võimalik temperatuuri mõõtva seadmega kindlaks määrata teepinna tegelik seisund.

Lõputöö eesmärk on luua isesõitvale sõidukile seade, millega mõõdetakse sõidukialuse tee- või maapinna temperatuuri. Valmiva seadme puhul on tegemist Iseautole loodud integreeritava lisaseadmega, millelt vastuvõetud andmeid saab sõiduki juhtprogramm kasutada liikluses kaalutletud otsuste tegemiseks.

## 1.1 Ülesandepüstitus

Lõputöö koosneb järgnevatest osadest:

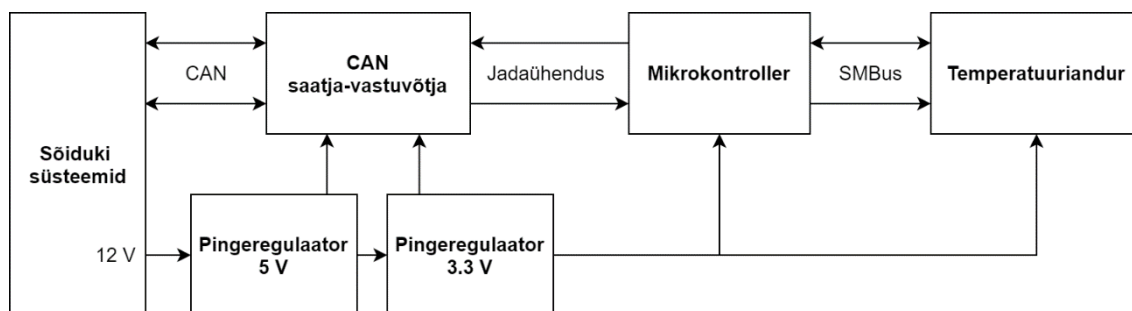
- Temperatuuriandurite analüüs ning valik;
- Trükkplaadi arendamine ja koostamine;
- Tarkvara arendamine;
- Korpuse arendamine;
- Valminud seadme testimine.

Valmiv seade peab võimaldama mõõta sõidukialuse tee- või maapinna temperatuuri. Seade peab edastama mõõdetud andmeid sõiduki juhtimissüsteemidele. Seade peab

olema ilmastikukindel, võimalikult väikeste mõõtmetega, ning vastama ettevõtte AuVe Tech OÜ esitatud nõuetele.

## 1.2 Ülevaade tööst

Sõidukialuse teepinna temperatuuri mõõtmise seadme põhikomponendid on kontaktivaba infrapuna-temperatuuriandur, mikrokontroller integreeritud CAN-kontrolleriga, CAN saatja-vastuvõtja (edaspidi transiiver) ning kaks pingestabilisaatorit (Joonis 1.1).



Joonis 1.1. Sõidukialuse teepinna temperatuuri mõõtmise seadme arhitektuur.

Seadme juhtkomponendiks on mikrokontroller, millega juhitakse temperatuurianduri ning CAN-transiiveri tööd. Juhtprogrammi töö seisneb kõigi temperatuurianduri poolt loetud andmete vastuvõtmises, nende töötlemises ning töödeldud andmete sõiduki süsteemidesse saatmises. Seade realiseeriti kahepoolisel trükkplaadil, mille komponendid vastasid ettevõtte AuVe Tech OÜ nõuetele. Ettevõttepoolsed nõuded seadmele on välja toodud Lisas 1.

## 1.3 Tulemused

Lõputöö tulemusena valmis seadme trükkplaat, mille abil on võimalik mõõta sõidukialuse teepinna temperatuuri. Seadmes kasutatav temperatuuriandur valiti välja teoreetilise ja funktsionaalse võrdluse käigus. Seadme juhtkomponendile loodi tarkvara, mille põhieesmärk on edastada andurilt vastuvõetud andmeid sõiduki süsteemidesse. Seade võimaldab mõõta temperatuuri iga 100 ms tagant täpsusega 1 °C, kui mõõdetava pinnase temperatuur on alla null kraadi. Ettevõtte nõuetele vastavalt saadetakse anduri mõõdetud keskmistatud temperatuur sõiduki juhtsüsteemidesse kord sekundis.

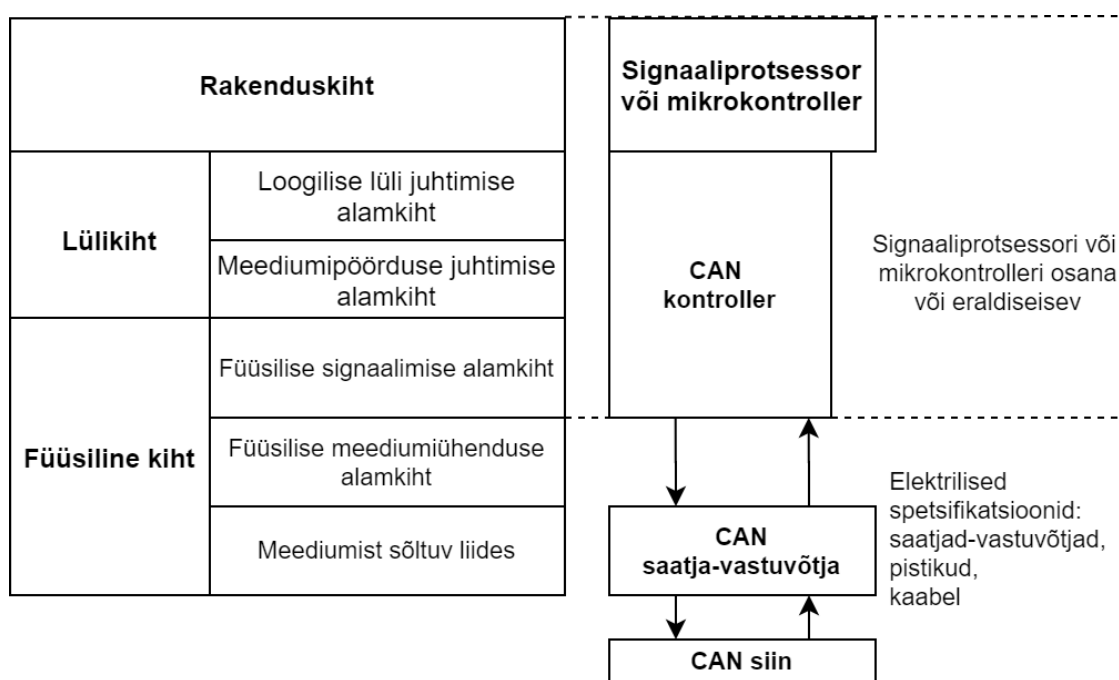
Trükkplaadi valmimise käigus tekkis seadme põhikomponendi ehk kontaktivaba temperatuurianduri defitsiit, mistõttu ei olnud võimalik kõiki lõputöö ülesandepüstituses märgitud osasid lõpule viia. Vajalike komponentide puuduse tõttu ei olnud võimalik trükkplaati koostada, seadmele sobivat korpust arendada ega valminud seadet sõidukis testida. Seadme testimine viidi läbi kahes osas prototüübi abil. Esimeses osas testiti temperatuurianduri mõõtmise stabiilsust samaaegselt teise temperatuurianduriga kasutades Arduino arendusplaati (Peatükk 3.2). Teises osas testiti anduri toimimist välja valitud mikrokontrolleri arendusplaadi ja CAN-transiiveriga (Peatükk 3.4).

## 2 Kommunikatsiooniprotokollid

Valminud seadmes kasutati kahte levinud kommunikatsiooniprotokolli: CAN ja SMBus. CAN kommunikatsiooniprotokolli kasutati mikrokontrolleri ja sõiduki süsteemide vahelises suhtluses, kus temperatuurianduri poolt mõõdetud ning mikrokontrolleri poolt töödeldud andmed edastatakse sõiduki süsteemidesse. SMBus kommunikatsiooniprotokolli kasutati valitud temperatuurianduri ja mikrokontrolleri vahelises ühenduses. Seadmetevahelise suhtluse käigus edastatakse mikrokontrollerilt kärke temperatuuriandurile ning anduri mõõtetulemusi tagasi mikrokontrollerile.

### 2.1 CAN

CAN on mitme ülemsõlmega jadasini kommunikatsiooniprotokoll, mis võimaldab sõidukis asuvatel elektroonilistel seadmetel (sõlmedel) juhtarvuti olemasolust olenemata andmeid vahetada. CAN on spetsiaalselt autotööstuse jaoks loodud sõnumipõhine protokoll, mille eesmärk on asendada keeruline juhtmestik kahejuhtmesiiniga. CAN võrgu kommunikatsiooniks on vajalik kahe või enama sõlme olemasolu.

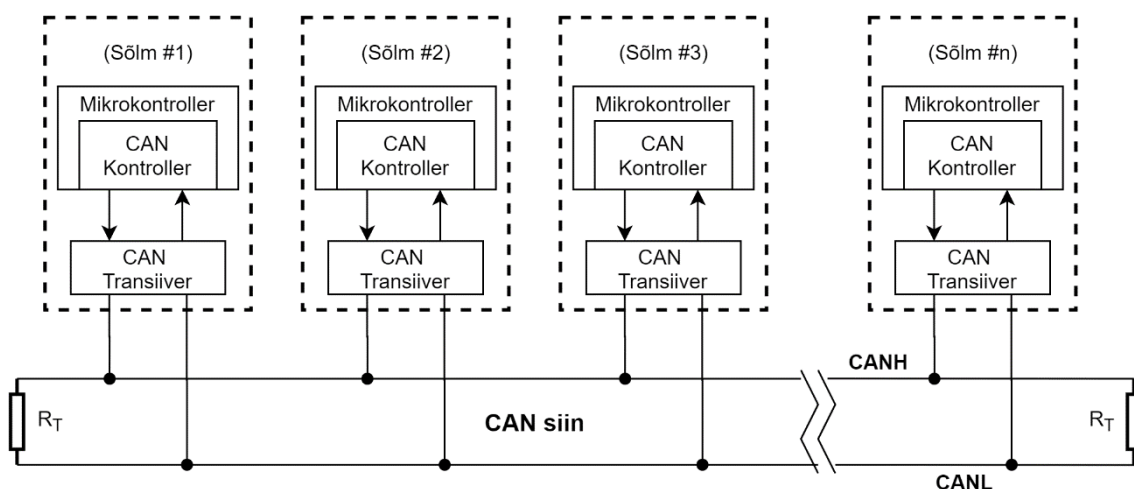


Joonis 2.1. ISO-11898 standardis defineeritud OSI mudeli kihid [2].

CAN-i kommunikatsiooniprotokoll, mille defineerib standard ISO-11898, kirjeldab andmete edastust CAN-võrgus, ning vastab avatud süsteemide sidumise arhitektuuri (OSI) mudelile. ISO-11898 arhitektuur defineerib seitsmest OSI/ISO mudeli kihist alumised kaks kihti: kanali- ehk andmelülikihi ning füüsilise kihi (Joonis 2.1).

CAN-i kommunikatsiooniprotokoll on põrketuvastusega multipöördussüsteem sõnumite prioriteedi tuvastamise võimekusega (CSMA/CD+AMP). CSMA tähendab, et enne uue sõnumi siinile edastamist peab iga sõlm ootama teatud ajaperioodi, mille jooksul ükski teine sõlm andmeid ei edasta ning alles siis üritama edastada enda sõnumit. CD+AMP tähendab, et kokkupõrked siinil lahendatakse bitiviisilise arbitreerimise abil, mille eelduseks on CAN-i omadus, kus iga sõnumil on identifikaatori väljal defineeritud tema prioriteet. Kõrgema prioriteediga sõnumitel on eesõigus siinile pääsemisel. CAN-i signaaliedastus on diferentsiaalne, mis tagab siini kõrge müra- ja veataluvuse. Tasakaalustatud diferentsiaalne signaaliedastus vähendab müra sidestust ja võimaldab kõrgeid andmeedastuskiiruseid üle keerdpaarkaabli [2].

ISO-11898 standard defineerib maksimaalse andmeedastuskiirusena 1 Mbit/s, kui siini pikkus on kuni 40 meetrit, millele on ühendatud maksimaalselt 30 sõlme. Andmevahetuseks kasutatav kaabel on sellise andmeedastuskiiruse puhul varjestatud või varjestamata keerdpaarkaabel, millel on 120-oomine näivtakistus. ISO-11898 defineerib üheliinilise keerdpaarkaabli võrgutopoloogia (Joonis 2.2), mille mõlemasse otsa on ühendatud 120-oomised takistid, mis ühilduvad liini iseloomustava näivtakistusega signaalide peegeldumise vältimiseks [2].

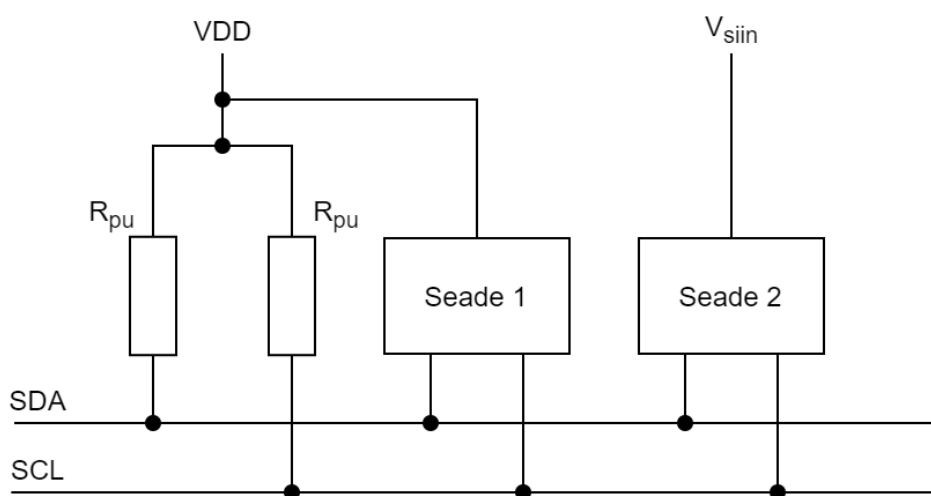


Joonis 2.2. CAN-siini topoloogia [2].

CAN-kontrolleri ja CAN-siini vahel on tavaliselt lisaks veel nii saatja kui vastuvõtja rollis olev võimendav seade (edaspidi transiiver). Transiiveri ülesandeks on teisendada kontrollerilt vastu võetud biti elektriline esitus CAN-siinile sobivasse formaati. Lisaks peab transiiver varustama CAN-kontrollerit piisava väljundvooluga, ning kaitsma kontrolleri kiipi ülepinge eest. Vastuvõtjana annab transiiver retsessiivse signaalitaseme ning kaitseb kontrolleri sisendkomparaatorit siiniliinidel oleva ülepinge eest, samuti tuvastab siinil tekkivaid vigu. Transiiveri funktsionaalsuseks võib olla ka CAN sõlme ning siiniliini galvaaniline isoleerimine, millega eraldatakse kaks elektriahelat nii, et nende ahelate vahel ei ole otsest voolurada, mistõttu ei saa elektrilaengud vahetult ühest ahelast teise liikuda [3].

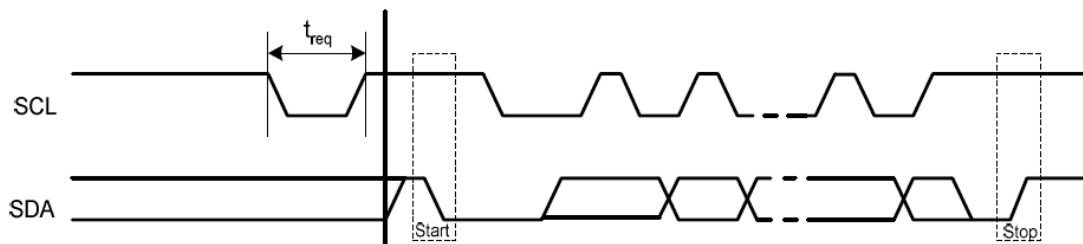
## 2.2 SMBus

SMBus on kahejuhtmeliides, mis on loodud madala kiirusega kommunikatsiooni jaoks. SMBus liidese abil saavad erinevad seadmed kommunikeerida üksteise ning ülejäänud süsteemiga. SMBus põhineb I<sup>2</sup>C jadasiini protokollil.



Joonis 2.3. SMBus liidese topoloogia [4].

Tegemist on mitme ülemseadmega siiniga, millel on olemas kokkupõrke tuvastamise võimekus ning arbitreerimine, kui kaks või enam ülemseadet üritavad samaaegselt algatada andmete siinile saatmist. Arbitreerimise mehhanism põhineb *wired-AND* ühendusel, mille eelduseks on kõigi siinile ühendatud seadmete väljundite avatud kollektor. SMBus-i toitepinge võib olla vahemikus 3 kuni 5 volti ning siinil asuvad seadmed võivad toimimiseks kasutada ka siini pingellikat (Joonis 2.3). SMBusi taktsageduse vahemik on 10 kHz kuni 100 kHz [4].



Joonis 2.4. SMBus liidese andmevahetus [4].

SMBus liidese rakendamiseks on vaja kahte liini: SDA ning SCL. Nii SDA kui SCL liinid on kahesuunalised, olles ühendatud positiivsesse toitepingesse *pull-up* takistite või voluallika abil. Kui siin on vaba, siis on mõlemad liinid kõrged. Kui mõni seade soovib siinile saata loogilise nulli ('0'), siis peab seade vastava siiniliini seadma siinil defineeritud loogilise madala pingeniivoole. Loogilise ühe ('1') saatmiseks peab seade vabastama siiniliini võimaldades liinil end siini *pull-up* skeemi abil üles tõmmata (Joonis 2.4).



### **3 Temperatuurianduri valik**

Arenduse algfaasis pakuti ettevõtte poolt välja kaks temperatuuriandurit, mille hulgast pidi töö koostaja valima seadmele sobivaima anduri. Temperatuurianduri valikul lähtuti andurite teoreetilistest, tootja poolt esitatud andmetest, ning funktsionaalsetest aspektidest. Funktsionaalsete aspektide hindamiseks loodi enne arendusprotsessi algust valmiva seadme kahe anduriga prototüüp, millega võrreldi andurite töökindlust erinevates tingimustes. Temperatuuriandurite prototüüpimise periood jäi 2020. aasta jaanuarisse, mis võimaldas andurite testimist nii kuiva kui ka jäise pinna peal.

Ettevõtte poolt välja pakutud temperatuuriandurid kuulusid erinevatesse hinna- ja täpsusklassidesse ning nende tootjateks olid Melexis ja Omron Electronics.

#### **3.1 Temperatuuriandurite teoreetiline võrdlus**

Temperatuuriandurite teoreetilise võrdluse eesmärgiks oli enne funktsionaalse testimise algust kaardistada andurite eelised ning puudujäägid, mida testimisel enim jälgida. Lisaks uuriti andurite tootjate poolt pakutava dokumentatsiooni sisu, kvaliteeti ning rakendatavust andurite eri rakenduste puhul. Kogutud andmetest võis järeldada, kas valitud anduri kasutusele võtmisel ettevõtte tootes piisaks tootja pakutud avalikust informatsioonist. Järgnevates tabelites (Tabel 3.1, Tabel 3.2) on välja toodud andurite võrreldavad mõõte- ja üldised parameetrid, mille kohta oli mõlema anduri tootja poolt esitatud dokumentatsioonis informatsioon olemas.

Tabel 3.1. Temperatuuriandurite mõõteparameetrite võrdlus [5], [7], [8].

Parameeter	MLX90614ESF-BCF-000-SP	D6T-1A-02
Vaatevälja suurus	10° (X-teljel)	26.5° (X- ja Y-teljel)
Mõõteala suurus mõõtekaugusel		
1 m	0.5 m (raadius); 0.8 m <sup>2</sup>	47*47 cm; 0.2209 m <sup>2</sup>
30 cm	15 cm; 0.07 m <sup>2</sup>	14*14 cm; 0.0196 m <sup>2</sup>
Mõõdetav temperatuurivahemik		
Välitemperatuur	-40 °C ... +125 °C	-40 °C ... +80 °C
Objekti temperatuur	-70 °C ... +380 °C	-40 °C ... +80 °C
Mõõtetäpsus		
0 °C ... +50 °C	± 0.5 °C *	± 1.5 °C
-40 °C ... 0 °C	± 1 °C *	± 3 °C
Resolutsioon	0.02 °C	0.06 °C
Mõõtmise kiirus	Minimaalselt 60 ms (täpsus muutub)	Maksimaalselt 100 ms (ei ole reguleeritav)
Mõõteefektiivsus erinevate materjalide kasutamisel		
HDPE (0.3 mm)	Konfigureeritav kiirusvõime	71.5 %
HDPE (0.5 mm)		60.1 %
HDPE (0.7 mm)		54.9 %

\* Mõõtetäpsus on saavutatav, kui nii välis- kui objekti temperatuur on antud vahemikus.

Erinevatel mõõtekaugustel on Melexise anduri mõõteala enam kui kolm korda suurem kui Omroni anduril, mis võimaldab mõõta temperatuuri ka vajalikust mõõtepunktist ette- ja tahapoole ning saada parem ülevaade sõidetava pinnase seisundist. Samas võib Omroni anduri väiksem mõõteala vähendada ebaoluliste teepinnal asuvate objektide temperatuuri mõõtmist, mille tagajärjel võivad keskmistatud mõõtetulemused olla ühtlasemad. Melexise anduri mõõdetava objekti temperatuurivahemik on mitu korda

laiem kui teisel anduril ning mõõtetäpsus ja -resolutsioon suurusjärgus kolm korda täpsem, kui teisel anduril.

Tabel 3.2. Temperatuuriandurite üldiste parameetrite võrdlus [5], [7], [8].

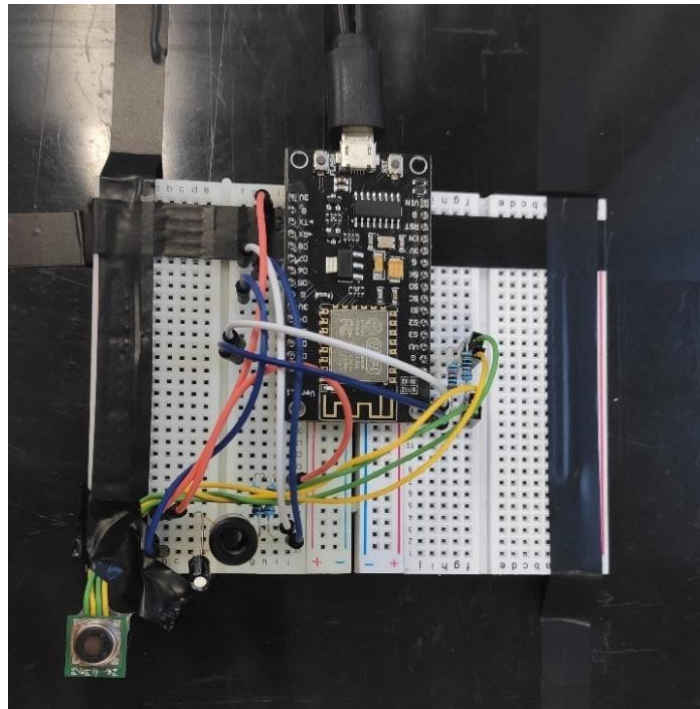
Parameeter	MLX90614ESF-BCF-000-SP	D6T-1A-02
Tootja	Melexis	Omron Electronics
Toitepinge	3 V või 5 V	5 V
Toitevool	2 mA	3.5 mA
Kommunikatsiooniliides	SMBus (I <sup>2</sup> C)	SMBus (I <sup>2</sup> C)
Töötemperatuur	-40 °C ... +85 °C	-40 °C ... +80 °C
Niiskuse määr töökeskkonnas	Kuni 85 %	20 % ... 95 %
Lisakomponendid	1x 0.1 µF kondensaator, 2x 10 kΩ takistid	2x 10 kΩ takistid
Hind (1 tk)	23.95 eurot	15.08 eurot
Kommentaariid	Põhjalik dokumentatsioon.	Puudulik dokumentatsioon.

Tootja Melexis temperatuuriandur on saadaval kahe erineva toitepingega töötava variandina, lisaks on anduri toimimiseks vajalik toitevool peaaegu kaks korda väiksem kui tootja Omron anduril. Lisaks on Omroni temperatuurianduri niiskustaluvus töökeskkonnas kuni 10% suurem kui Melexise anduril. Omroni anduri kasutamisel vajalike lisakomponentide arv on ka ühe võrra väiksem kui Melexise anduril, ning anduri hind on oluliselt madalam kui Melexise anduril.

Melexise anduri olulisimaks eeliseks on konfigureerimise ja kalibreerimise funktsionaalsus, millega on võimalik muuta anduri temperatuuri mõõtmise kiirust ning seeläbi ka mõõtetäpsust. Kalibreerimise funktsioon võimaldab kasutada temperatuurianduri mõõteava ees ka läbipaistvat katematerjali, millega seadet kaitstes ei väheneks oluliselt anduri mõõteefektiivsus. Lisaks on Melexise poolt pakutav anduri dokumentatsioon põhjalikum ning sisaldab erinevaid asjakohaseid rakendussoovitusi ja -näiteid.

## 3.2 Temperatuuriandurite funktsionaalne võrdlus

Temperatuuriandurite funktsionaalse testimise eesmärgiks oli välja selgitada andurite töökindlus ja mõõtetulemuste stabiilsus erinevates tingimustes võrreldes andurite välitingimustes mõõdetud mõõtetulemusi. Andurite funktsionaalsuse testimiseks loodi prototüüp, mis sisaldas mõlemat testitavat temperatuuriandurit (Joonis 3.1).



Joonis 3.1. Temperatuuriandurite testimise prototüüp kahe temperatuurianduriga.

Andurid ühendati makettplaadil asuva ESP8266 arendusplaadi külge tagades andurite samaaegse ühenduse I<sup>2</sup>C/SMBus protokolliga kahel erineval siinil. Temperatuuriandurid kinnitati makettplaadist samale kõrgusele, et minimeerida andurite mõõtetulemuste erinevust, mille oleks võinud põhjustada andurite erinev kaugus mõõdetavast teepinnast. Andurite funktsionaalsuse testimiseks läbi viidud testide tingimused on välja toodud järgnevas tabelis (Tabel 3.3).

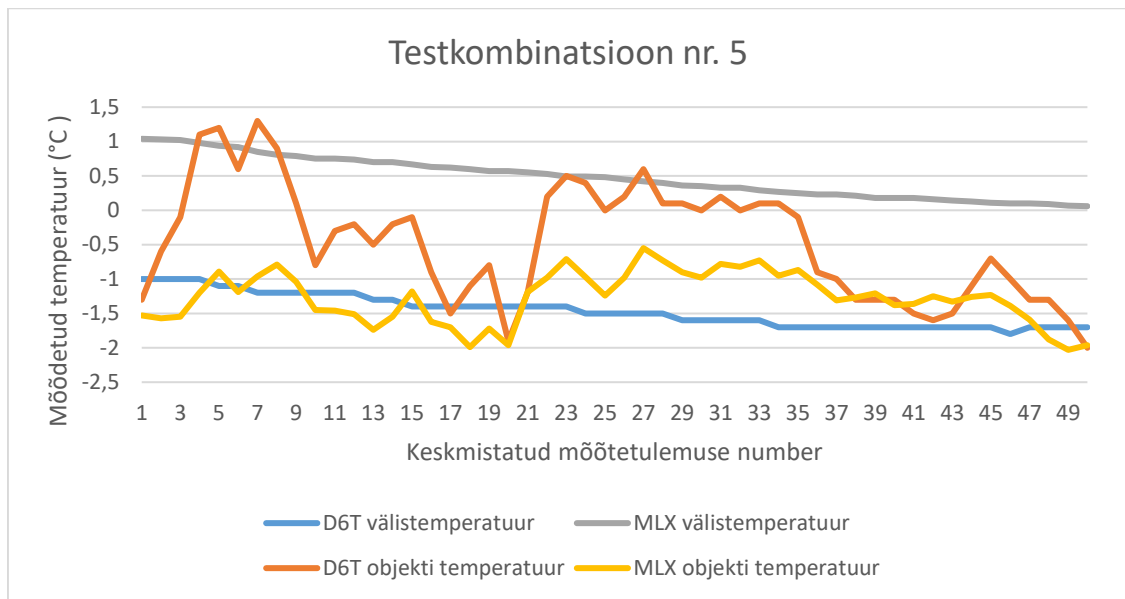
Tabel 3.3. Funktsionaalse võrdluse testide kombinatsioonid.

Tingimus	Variandid	Kombinatsioonid							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Testi number									
Pinnakate									
	Asfalt	x	x	x	x	x	x	x	
	Pehme pinnas								x
Pinnakatte seisund									
	Kuiv	x	x	x	x	x			
	Jäine						x	x	x
Mõõtmise kõrgus									
	5 cm				x				
	10 cm			x					
	30 cm		x			x	x	x	x
	50 cm	x							
Sõiduki asukoht tee suhtes									
	Paigalseisev			x	x		x	x	
	Liikuv (~ 5 km/h)	x	x			x			x
Mõõtmise kiirus									
	Tehasekonfiguratsioon	x	x	x	x		x		x
	Iga 100 ms					x		x	

Iga tabelis märgitud kombinatsiooni puhul edastati temperatuuriandurilt mikrokontrollerile kõik ühe minuti jooksul mõõdetud temperatuurid, mis keskmistati kord sekundis vastavalt mõõdetud tulemuste arvule. Tulemuste analüüsimiseks kasutati iga testi 50 keskmistatud mõõtetulemust. Temperatuuriandurite reaalselt rakendust ettevõtte sõidukis iseloomustasid enim testid, kus andurid olid maapinnast 30 cm kõrgusel, sõiduk liikus ning mõõdetavaks pinnakatteks oli asfalt.

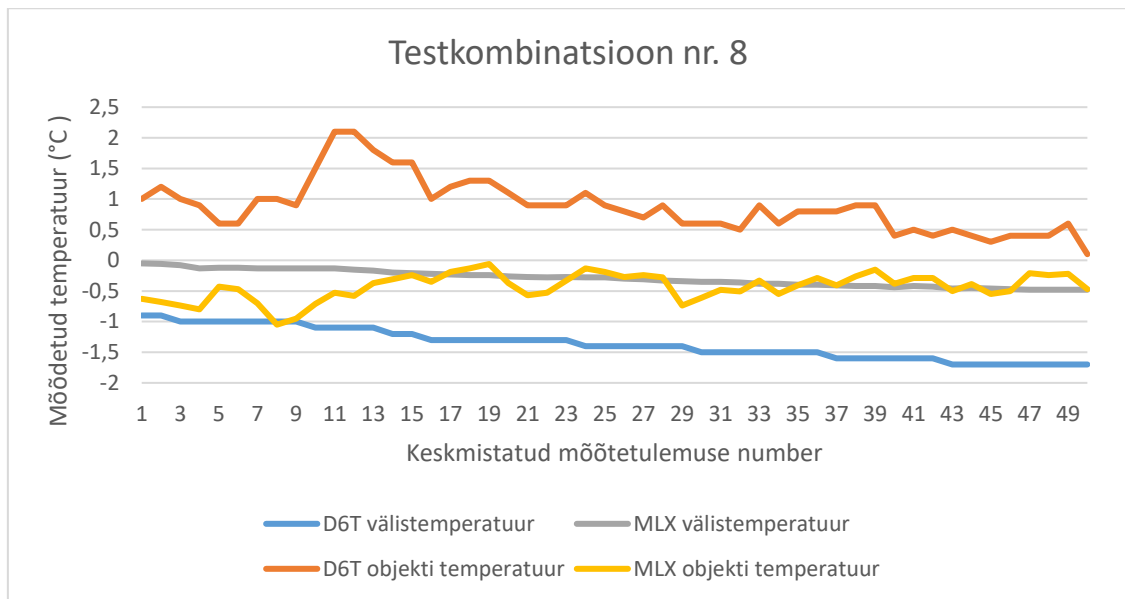
### Funktsionaalse võrdluse tulemused

Testimise käigus selgus, et tootja Omron (graafikul D6T) temperatuurianduri välistemperatuuri mõõtetulemused on alati tootja Melexis (graafikul MLX) anduri mõõtetulemustest umbes 1 kraadi võrra madalamad, samas ei ole antud korrelatsioon selgelt nähtav objekti temperatuuride mõõtetulemustes.



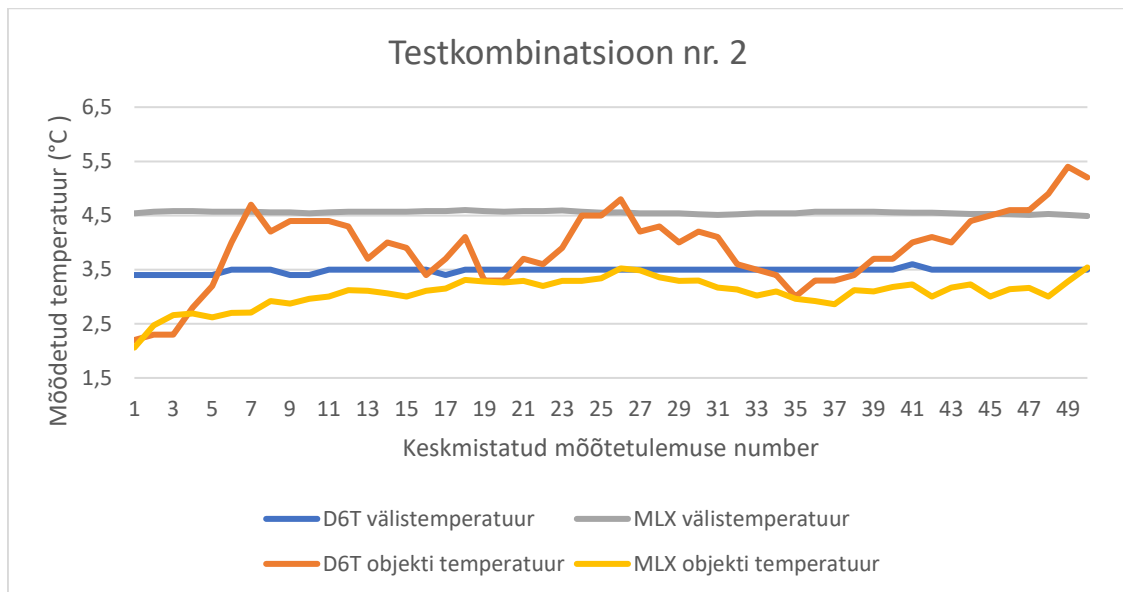
Joonis 3.2. Temperatuuriandurite testkombinatsioon nr. 5.

Testkombinatsiooni nr. 5 (Joonis 3.2) puhul testiti temperatuuriandureid liikumise ajal kuival asfaldil, kus andurid asusid teepinnast 30 cm kõrgusel, ning mõlemad andurid mõõtsid temperatuuri sama mõõtesagedusega, iga 100 ms järel. Testi tulemustest on näha, et tootja Omron dokumentatsioonile vastavalt muutub temperatuuri alla null kraadi langedes oluliselt anduri mõõtetäpsus. Näiteks on mõõtepunktide 3 ja 9 vahel andurite mõõdetud temperatuuride vahe kuni 2 kraadi. Samuti on näha, et identsete mõõtesageduste kasutamisel, mille puhul tootja Melexis sõnul suureneb nende anduri mõõtmiste ebastabiilsus, on Melexise anduri tulemused ühtlasemad kui Omroni anduri puhul. Teatud mõõtepunktide puhul on mõlema anduri mõõtetulemused sarnased, kuid enamuse tulemustest erinevad vähemalt 1 kraadi võrra.



Joonis 3.3. Temperatuuriandurite testkombinatsioon nr. 8.

Testkombinatsiooni nr. 8 (Joonis 3.3) puhul testiti temperatuuriandureid paigal seistes jäisel pehmel pinnasel, kus andurid asusid teepinnast 30 cm kõrgusel. Mõlemad temperatuuriandurid mõõtsid temperatuuri tehasekonfiguratsiooniga, mis Omron temperatuurianduri puhul vastas mõõtmisele iga 100 ms järel ning Melexis temperatuurianduril iga 840 ms järel. Testi tulemustest on näha, et ka juhul, kui kõikide testide puhul on tootja Omron temperatuurianduri mõõdetud välistemperatuur enamasti ühtlaselt 1-2 kraadi madalam, siis mõõdetav objekti temperatuur on kõikumavam kui tootja Melexis anduri tulemustel. Lisaks on graafikult näha, et näiteks mõõtepunktide 3 ja 15 vahel liiguvad andurite mõõtetulemused eri suundades, mistõttu järeldub, et tootja Omron anduri mõõtetulemused on ebausaldusväärsed, kui objekti temperatuur on null kraadile lähedal.



Joonis 3.4. Temperatuuriandurite testkombinatsioon nr. 2.

Testkombinatsiooni nr. 2 (Joonis 3.4) puhul testiti temperatuuriandureid paigal seistes kuival asfaldil, kus andurid asusid teepinnast 10 cm kõrgusel, ning mõlemad andurid mõõtsid temperatuuri tehasekonfiguratsiooniga. Testi tulemused illustreerivad selgelt tootja Omron objekti temperatuuri mõõtetulemuste kõikumust, kuigi mõõtmine toimub ühe liikumatu objekti kohal. Tootja Melexis anduri tulemused kõiguvad 1.5 kraadises temperatuurivahemikus, kuid tootja Omron anduri tulemuste kõikumus on 3.5 kraadi.

Teoreetilise ja funktsionaalse võrdluse tulemusel valiti edasiseks seadme arenduseks tootja Melexis temperatuuriandur MLX90614.

### 3.3 Temperatuurianduri MLX90614 tööpõhimõte

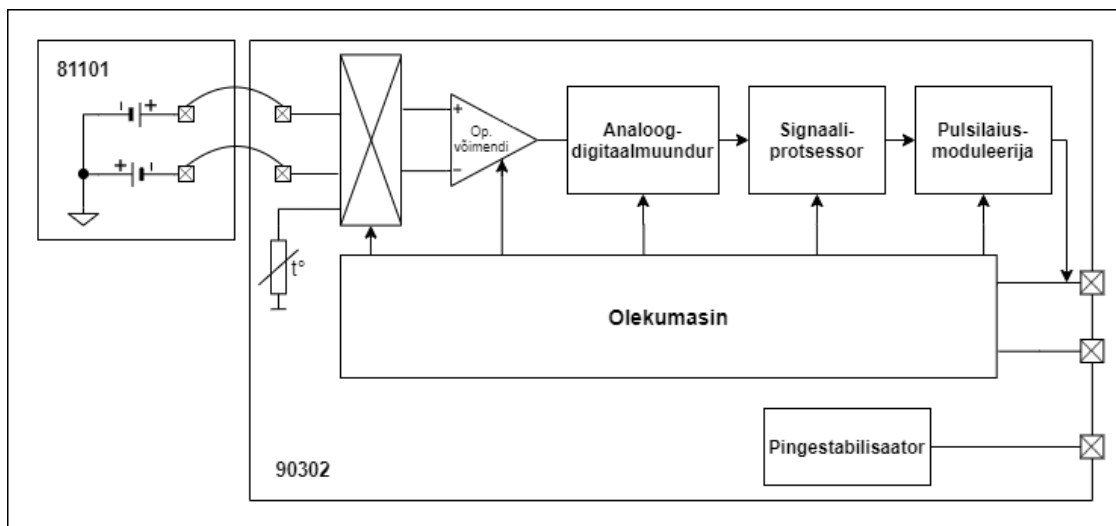
MLX90614 [5] puhul on tegemist kontaktivaba infrapuna termomeetriga. Termomeeter koosneb kahest osast:

- Infrapunasensor MLX81101
- Signaalitöötlemiseks kasutatav rakenduspõhine standardtoode (ASSP) MLX90302, mis on loodud infrapuna sensori väljundi töötlemiseks.

Infrapunasensori puhul on tegemist elektroonilise seadmega, mis muundab termilise energia elektrienergiaks. Seade koosneb mitmetest jadaühenduses olevatest termopaartajuritest ehk termopaaridest. Termopaarid koosnevad kahest eri metallist



(enamasti metallisulamist) juhtmest, mille külmad liitekohad on paigutatud kiibi jämedale aluspinnale ning kuumad liitekohad on paigutatud õhukese membraani peale. Membraanilt neelatud infrapuna kiirgus soojendab või jahutab sensorit. Sensor töötab termoelektrilise efekti põhimõttel, mis genereerib pinge, kui tema erinevad metallid (termopaartajurid) puutuvad kokku temperatuurierinevusega [5].



Joonis 3.5. Temperatuurianduri MLX90614 plokk skeem [5].

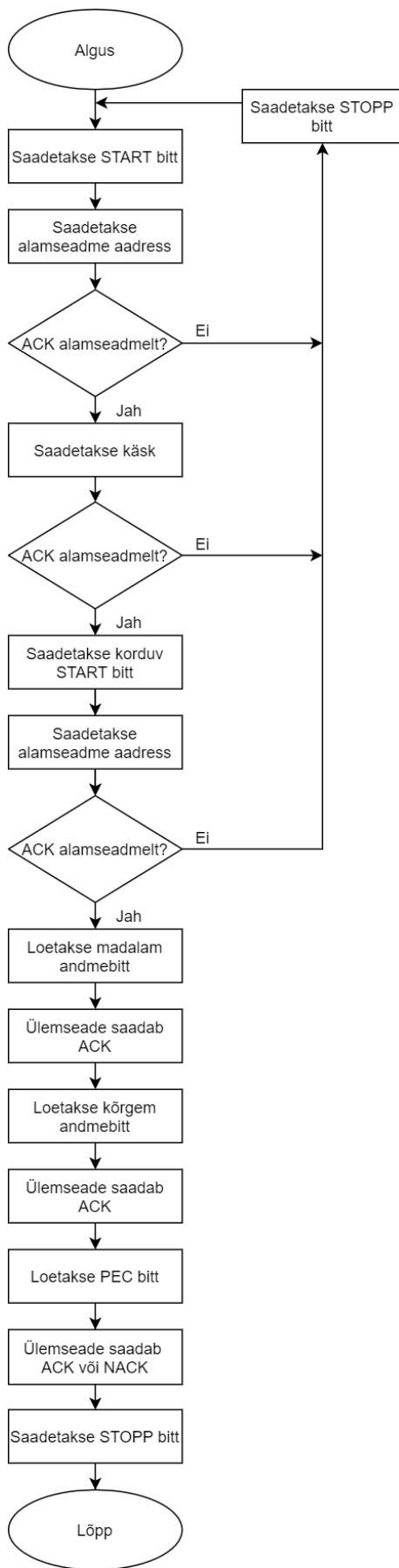
ASSP koosneb eelvõimendist, 17-bitisest analoog-digitaalmuundurist ning signaaliprotsessorist (Joonis 3.5). Lisaks sisaldab andur optilist madalpääsfiltrit, mille eesmärgiks on vähendada mõõtetulemuste varieerumist päikese- või muu infrapuna kiirgust tekitava allika tõttu. Kommunikatsioon temperatuurianduri ja andmeid vastu võtva seadme vahel on üles ehitatud SMBus liidesega ühilduval kahejuhtmeliidese jadaprotokollile, samuti on võimalik anduri mõõdetud tulemusi lugeda pulsilaiusmodulatsiooni abil [5]. Valminud seadme puhul kasutatakse vaid kahejuhtmeliidese kommunikatsioonivarianti. Andur on võimeline mõõtma ümbritseva õhu temperatuuri ehk välistemperatuuri vahemikus  $-40 \dots +125 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ning mõõdetava objekti temperatuuri vahemikus  $-70 \dots 380 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### 3.3.1 SMBus kommunikatsioon temperatuurianduriga MLX90614

Temperatuuriandur MLX90614 toetab SMBusiga ühilduvat, aga veidi erinevat kahejuhtmeliidest. Võrreldes standardse SMBus spetsifikatsiooniga toetab MLX90614 vaid kahte spetsifitseeritud käsuprotokollit: sõna lugemist ja sõna kirjutamist. Anduriga suhtlusel kasutatakse SCL liini ainult digitaalse sisendina SMBus kommunikatsiooni

takti edastamiseks, SDA liini kasutatakse digitaalse sisendi ja väljundina temperatuuriandmete edastamiseks ja käskude vastuvõtmiseks. MLX90614 osaleb SMBus siinil ainult alamseadmena, kus andmevahetuse algatab ülemseade (mikrokontroller) pöördudes valitud alamseadme poole tema aadressi abil, ning alustades seadmele taktsignaali edastust.

Anduril MLX90614 on kahte tüüpi mälu: muutmälu ehk RAM ning püsिमälu ehk EEPROM. RAMi salvestatakse temperatuurianduri mõõdetud ning arvutatud välis- ning objekti temperatuuride väärtused. Anduri RAMi ei ole võimalik kirjutada, vaid ainult teatud registrite sisu lugeda. EEPROM sisaldab kalibreeritavat kiibi konfiguratsiooni ning kiibi identifitseerimiskoodi. Kogu EEPROMi sisu on SMBusiga ühilduva liidese kaudu loetav ja kirjutav. EEPROM kaudu on võimalik muuta näiteks alamseadme aadressi, kui SMBus siinile soovitakse lisada mitu andurit, mille tehasekonfiguratsiooniga seatud aadressid on identsed. Valminud seadmes enim rakendatud kommunikatsioonioperatsioon on RAMis asuva registri sisu lugemine (Joonis 3.6).



Joonis 3.6. RAMis asuva registri sisu lugemine [4].

Alamseadme RAMis asuva registri lugemise algatab ülemseade saates siinile START biti. Seejärel saadab ülemseade siinile soovitud alamseadme aadressi ning kirjutussoovi väljendava biti. Alamseadmelt saadud positiivse vastuse korral saadab ülemseade alamseadmele RAMi aadressi lugemise käsu, millele järgnevad alamseadmelt saadud positiivse vastuse korral korduv START bitt ning alamseadme aadress lugemissoovi väljendava bitiga.

Seejärel loetakse alamseadme poolt saadetud madalam andmebait ning eduka lugemise korral saadetakse positiivne vastus tagasi alamseadmele, sama protseduur kordub ka kõrgema baidi lugemisel. Seejärel loeb ülemseade välja paketi veakoodi (PEC) ning saadab alamseadmele tagasi positiivse vastuse, kui ülemseadme poolt kalkuleeritud PEC vastab alamseadmest loetud andmete PEC-iga. Vastuse saatmise järel saadetakse siinile STOPP bitt ning siin jääb järgmise operatsiooni alustamiseni vabaks.

Muutmälust andmete lugemine on jagatud kaheks osaks, kuna muutmälu sisaldab ka märgibitti, mis muutub, kui mõõdetava objekti temperatuur tõuseb  $-70.01$  kraadist  $+382.19$  kraadini [4].

### **3.3.2 Signaalitöötuse põhimõte**

Temperatuurianduri tööd kontrollib sisemine olekumasin, mis reguleerib objektide- ning välistemperatuuride mõõtmist ja arvutamist. Lisaks on olekumasina ülesandeks läbi viia andmete hilisem töötus, et mõõdetud andmeid oleks võimalik läbi valitud liidese edastada. ASSP toetab kahte infrapuna sensorit, mille väljundeid võimendatakse madala müra, madala sisendi nihkepinge ja programmeeritava pingevõimendusteguriga võimendiga, muundatakse ühebitiseks vooks ning edastatakse signaaliprotsessorile edasiseks töötuseks. Signaal juhitakse läbi programmeeritavate lõpliku ja piiramatu siirdega madalpääsfiltrite, et vähendades sisendsignaali ribalaiust saavutada soovitud müratase ning värskendussagedus. Piiramatu filtri väljund ongi mõõtetulemus, mis salvestatakse anduri sisemisse muutmällu [5].

Eelmainitud mõõtetulemustega arvutatakse välis- ja objekti temperatuur. Arvutatud temperatuuride resolutsioon on  $0.01$  °C, kuid andurist välja loetava temperatuuri resolutsioon oleneb kasutatavast kommunikatsiooniprotokollist, PWM protokollil puhul on resolutsioon  $0.14$  °C ning kahejuhtmeliidese puhul  $0.02$  °C. Mõõtettsükli viimases

osas muudetakse arvatud temperatuurid kasutatavale protokollile vastava resolutsiooniga väärtusteks.

### 3.3.3 Temperatuuride arvutamine

Välis temperatuuri ning objekti temperatuuri arvutamiseks kasutatakse temperatuurianduri infrapunasensorilt saadud väljundsignaali, mille saab esitada valemiga (1).

$$V_{ir}(T_a, T_o) = A \times (T_o^4 - T_a^4), \quad (1)$$

kus

- $T_o$  on absoluutne objekti temperatuur (Kelvin),
- $T_a$  on sensori otsiku (inglise keeles *sensor die*) absoluutne temperatuur (Kelvin),
- $A$  on üldine tundlikkus.

Kiibi temperatuuri mõõtmiseks on vajalik seadmesisene temperatuuriandur. Välise ja sisemise temperatuuri mõõtmise järel on võimalik arvutada vastavad välis- ja objektide temperatuurid. Arvutused viiakse läbi sisemises signaaliprotsessoris, mis genereerib mõõdetud temperatuuridele lineaarselt vastavad digitaalsed väljundid.

Sensori otsiku temperatuuri mõõdetakse PTAT elemendiga, millega määratakse ümbritseva õhu temperatuur. Arvatud temperatuuri resolutsioon on 0.01 °C ning tehasekalibratsiooniga sensoriga on võimalik välis temperatuuri mõõta autotööstuse standarditele [6] vastavas temperatuurivahemikus -40 .. +125 °C. Lineariseeritud otsiku temperatuuri ehk ümbritseva õhu temperatuuri on võimalik lugeda muutmälu registrist aadressil 0x06 ning objekti temperatuuri registrist aadressil 0x07.

Muutmälust välja loetud andmete kraadidesse teisendamisel tuleb esialgu kuuteistkümnendarv teisendada kümnendarvuks ning seejärel rakendada järgmist valemit (2).

$$T_{a/o} [^{\circ}C] = T_{a/oreg} \times 0.02 - 273.15 \quad (2)$$

Identset arvutuskäiku kasutati ka seadme tarkvaras, kus enne CAN-siinile saatmist töötleb mikrokontroller temperatuuriandurilt saadud andmeid.

### 3.4 Prototüüp

Trükkplaadi arendus algas prototüübi valmistamisest eesmärgiga valida seadmele sobiv temperatuuriandur ning testida anduri suhtlust ettevõtte soovitud mikrokontrolleriga. Temperatuuriandurite valimiseks kasutati ESP8266 mikrokontrolleriga arendusplaati, millele ühendati mõlemad valikus olevad temperatuuriandurid, et testida nende mõõtmise stabiilsust üksteisega võrreldes.

Prototüübi testkoodi kirjutamiseks kasutati Arduino IDE [9] arenduskeskkonda. Testkoodis kasutati I<sup>2</sup>C protokollide rakendamiseks *Wire* teeki [10], mille abil konfigureeriti kaks I<sup>2</sup>C siini, kus ühel siinil saatis temperatuuriandmeid Melexise temperatuuriandur ning teisel siinil Omroni temperatuuriandur. Teoreetilise ning funktsionaalse võrdluse tulemusel valiti edasiseks seadme arenduseks tootja Melexis temperatuuriandur. Valiku tegemisel jätkati anduri ja valitud mikrokontrolleri vahelise ühenduse testimist STM32F1 mikrokontrolleriga arendusplaadi ning CAN-transiiveriga, millega kinnitati temperatuurianduri ja mikrokontrolleri vahelise eduka ühenduvuse olemasolu.

## 4 Seadme skeem

Trükkplaadi skeem koostati programmis KiCad [11], mis on ettevõtte eelistatud töövahendiks. Lisaks oli töö koostajal olemas varasem kogemus antud programmiga töötamisel projektiaine raames.

### 4.1 Komponentide valik

Seadmele komponente valides lähtuti ettevõttepoolsetest nõuetest, lisaks anti seadmes kasutatavad integraalskeemid – mikrokontroller ja CAN-transiiver – töö koostajale teada ettevõtte poolt. Selline lahendus võimaldas valmival seadmel kasutada juba ettevõtte eelnevas arendustöös tõestatud vastupidavuse ja töökindlusega integraalskeeme. Seadme olulisima komponendi, temperatuurianduri, valis töö koostaja ettevõtte välja pakutud kahe anduri seast.

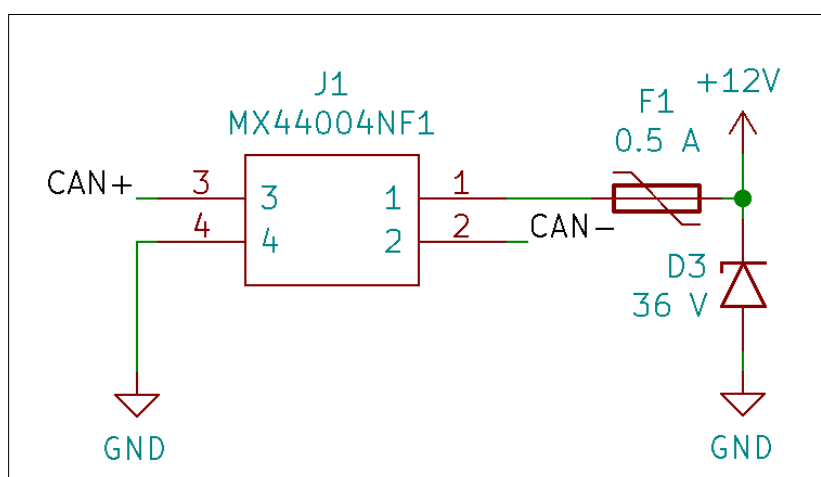
Teiste trükkplaadil kasutatavate komponentide valikul oli olulisimaks nõudeks komponentide vastavus autotööstuse standarditele. Eriti oluline oli standardiseeritus keraamiliste kondensaatorite valimisel, kuna need koosnevad õhukestest keraamilistest kihtidest, mis võivad tugeva vibratsiooni tõttu murduda. Selle tulemusena võivad kihid omavahel lühistuda ning toitepinge liigub otse maandusesse, tekitades lühise [12]. Autotööstuse standarditele [6] vastavatel kondensaatoritel on olemas erinevad lahendused sellise probleemi vältimiseks, näiteks *soft-termination*, kus keraamiliste kihtide ning metallikihi vahel on elastne vahekiht. *Soft termination*'i puhul jääb keraamilises kihis tekkinud mõra pidama elastsesse kihti, eraldudes metallikihist, mis komponenti trükkplaadiga ühendab, mistõttu ei teki lühist [13]. Lisaks oli komponentide valikul määravaks faktoriks komponentide kättesaadavus kindlalt elektroonikakomponentide tarnijalt, mis tulevikus hõlbustab valmiva seadme suuremas koguses tootmist ning lõpptootesse integreerimist.

## 4.2 Toiteahel

Trükkplaadi skeemi koostamist alustati vajaliku toiteahela koostamisega. Seade on mõeldud kasutamiseks ettevõtte sõidukis, mistõttu on seadme toiteallikaks sõiduki aku. Seadme arendamisel valiti seetõttu sisendpingeks lai pingevahemik (7 - 36 V), mis arvestaks aku pingekõikumisega sõiduki käitamise erinevatel etappidel. Lai pingevahemik ning autotööstuse standarditele vastavuse nõue kitsendas oluliselt võimalikke kasutatavaid komponente.

### 4.2.1 Ülepinge kaitsemehhanismid

Esimeseks ülesandeks oli seadmele sobiva pistiku valimine. Kasutusele võetav pistik pidi olema väikeste mõõtmetega, täisnurkne, nelja väljaviiguga ning tolmu- ja veekindel. Antud kriteeriumitele vastavaid pistikuid oli seadme arendushetkel pakkumisel vaid üks, milleks oli tootja JAE Electronics sarja MX44 pistik. Seadme toite sisendisse lisati taastuv kaitse, mis katkestab kaitsme nimivoolu ületamisel vooluahela, kaitstes nii järgnevaid komponente. Sisendisse lisati ka supressordiod ehk TVS-diod (Joonis 4.1), mille eesmärk on suuri impulssvoole ümber juhtida ning kaitsta kogu järgnevat elektriahelat ülepinge eest [14].

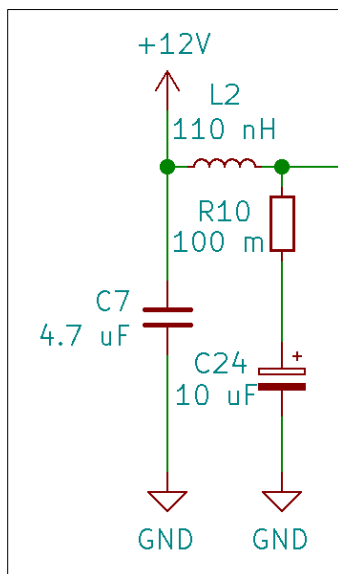


Joonis 4.1. Pistiku ning kaitsemehhanismide skeem.

Järgnevate pingestabilisaatorite töökindluse tagamiseks lisati seadme pistikusse tulevale sisendpingele Pi-tüüpi EMI filter sisendmüra vähendamiseks. EMI filter on elektromagnetilisi (ka raadiosageduslikke) häireid filtreeriv komponent, mis koosneb kondensaatorist, induktiivpoolist ja takistist. Pi-tüüpi filtri puhul on tegemist



madalpääsfiltriga, millega filtreeritakse välja kõrgsageduslikud signaalid. Elektriülekanedega liinide puhul kasutatakse EMI filtrit lairiba raadiosagedusliku müra vähendamiseks, mida võivad tekitada teised komponendid või rajad trükkplaadil [15].



Joonis 4.2. EMI filtri skeem.

EMI filtri (Joonis 4.2) koostamisel arvestati sisendmürana maksimaalse võimaliku väärtusega, kus müratase enne filtri rakendamist on  $62.29 \text{ dB}\mu\text{V}$ . Samuti on filtri koostamisel üritatud viia sisendmüra suurus alla  $53.92 \text{ dB}\mu\text{V}$ , mis vastab CISPR 25 CLASS 5 mürapiirile. CISPR standard [16] defineerib autotööstuses kasutatavate seadmete müratasemed. Kõrgsagedusliku sumbumuse jaoks on oluline filtris kasutada kondensaatoreid madala ekvivalentse jadainduktiivsuse ja -takistusega. Filtri kondensaatoriks valiti elektrolüüt-kondensaator, mis vastab eelmainitud nõuetele. Valitud takisti eesmärgiks on vähendada filtri väljundi näivtakistust piirdesagedusel. Valitud kondensaator blokeerib sisendpinge vahelduvpinge elementi ning aitab vältida võimsusekadu takistil. Lõpliku filtriga on skeemi simuleerimisel sisendmüra suurus  $33.87 \text{ dB}\mu\text{V}$ , mis on väiksem, kui eesmärgina seatud  $53.92 \text{ dB}\mu\text{V}$ .

#### 4.2.2 Pingestabilisaatorid

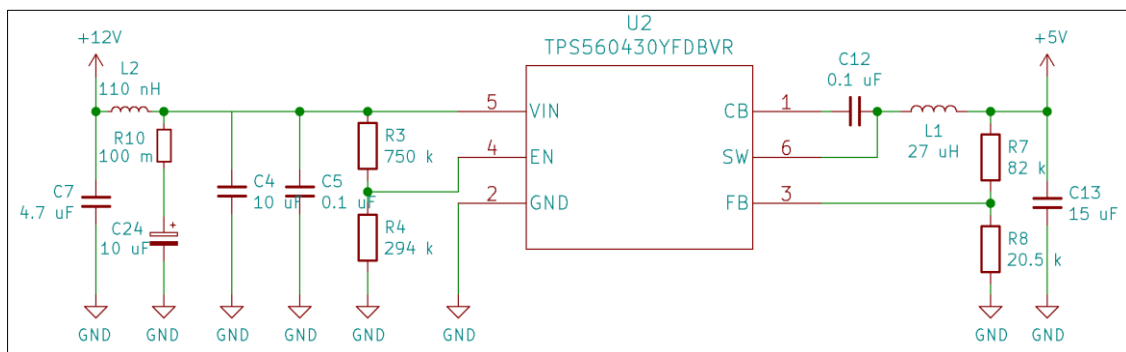
CAN-transiiver vajab töötamiseks 5 V pinget ning mikrokontroller ja temperatuuriandur 3.3 V pinget, mistõttu kasutati pingeteisendamiseks kahte erinevat pingestabilisaatorit.

Pinge teisendamiseks sisendpingest 5 voldini kasutati tootja Texas Instruments lülitatavat pingestabilisaatorit [17] (Joonis 4.3). Sobiva pingestabilisaatori välja valimise järgselt jätkati tööd regulaatori tootja tööriistaga Texas Instruments WeBench [18],

millega loodi esialgne pingestabilisaatori ning tema sisendis oleva EMI filtri skeem. Skeemi muudeti vastavalt ettevõtte nõudele kasutada vaid autotööstuse standarditele [6] vastavaid komponente, mis tähendas vajadust teatud komponentide väärtust muuta ning välja vahetada. Välja tuli vahetada takistid R7 ning R8, et vähemalt üks neist oleks takistite standardrea [19] väärtusega ehk komponendid oleksid võimalikult standardsed. Tegemist on pingejaguri komponentidega, mistõttu oli võimalik vajalikud väärtused leida kasutades pingejaguri valemit (3).

$$V_{out} = \frac{R2}{R1+R2} \times V_{in} \quad (3)$$

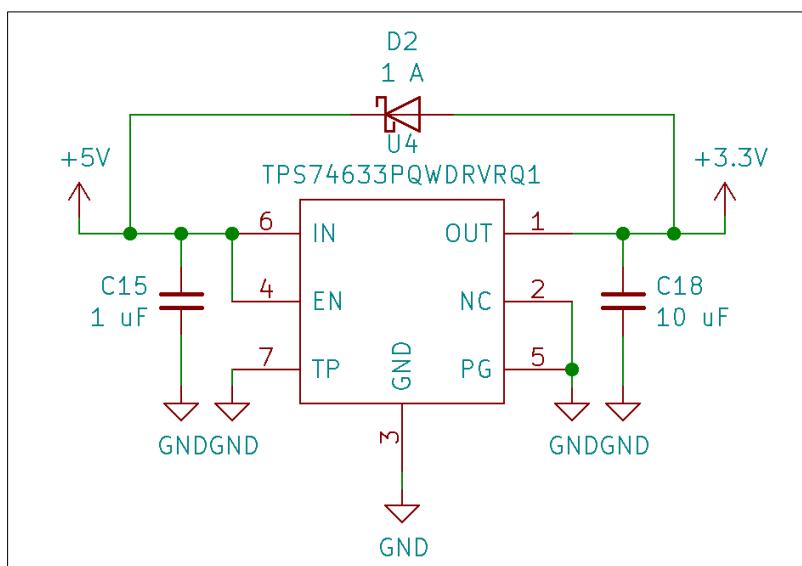
Valitud takistid tuli valida nii, et uute väärtuste puhul säiliks esialgne 1-voldine etalonpinge, mis on vajalik pingestabilisaatori väljundpinge täpseks seadistamiseks. Lisaks pidi säilima vajalik minimaalne väljundvool ning voolu väärtus ei tohtinud ületada regulaatori maksimaalset väljundvoolu.



Joonis 4.3. Sisendpinge 5 V-ile teisendava pingestabilisaatori skeem.

Pinge teisendamiseks 5 voldist 3.3 voldini juhiti pinge eelneva stabilisaatori väljundist lineaarse pingestabilisaatori sisendisse (Joonis 4.4), mille tootjaks oli samuti Texas Instruments [20].

Pingestabilisaatorile lisati Schottky diod vastupidise voolu kaitseks, mille puhul vool liigub sisendist väljundisse liikumise asemel väljundist sisendisse. Vastupidine vool võib tekkida, kui temperatuuri mõõtvat seadme toiteallikas ühendatakse lahti, kuid näiteks CAN-transiiveri kaudu liikuv vool liigub mööda regulaatorit seadme sisendi suunas [21]. Antud rakenduses võib vastupidise voolu olemasolu kahjustada ka eelnevat pingestabilisaatorit või sõiduki süsteeme.



Joonis 4.4. 5 V-ilt 3.3 V-ile teisendava pingestabilisaatori skeem.

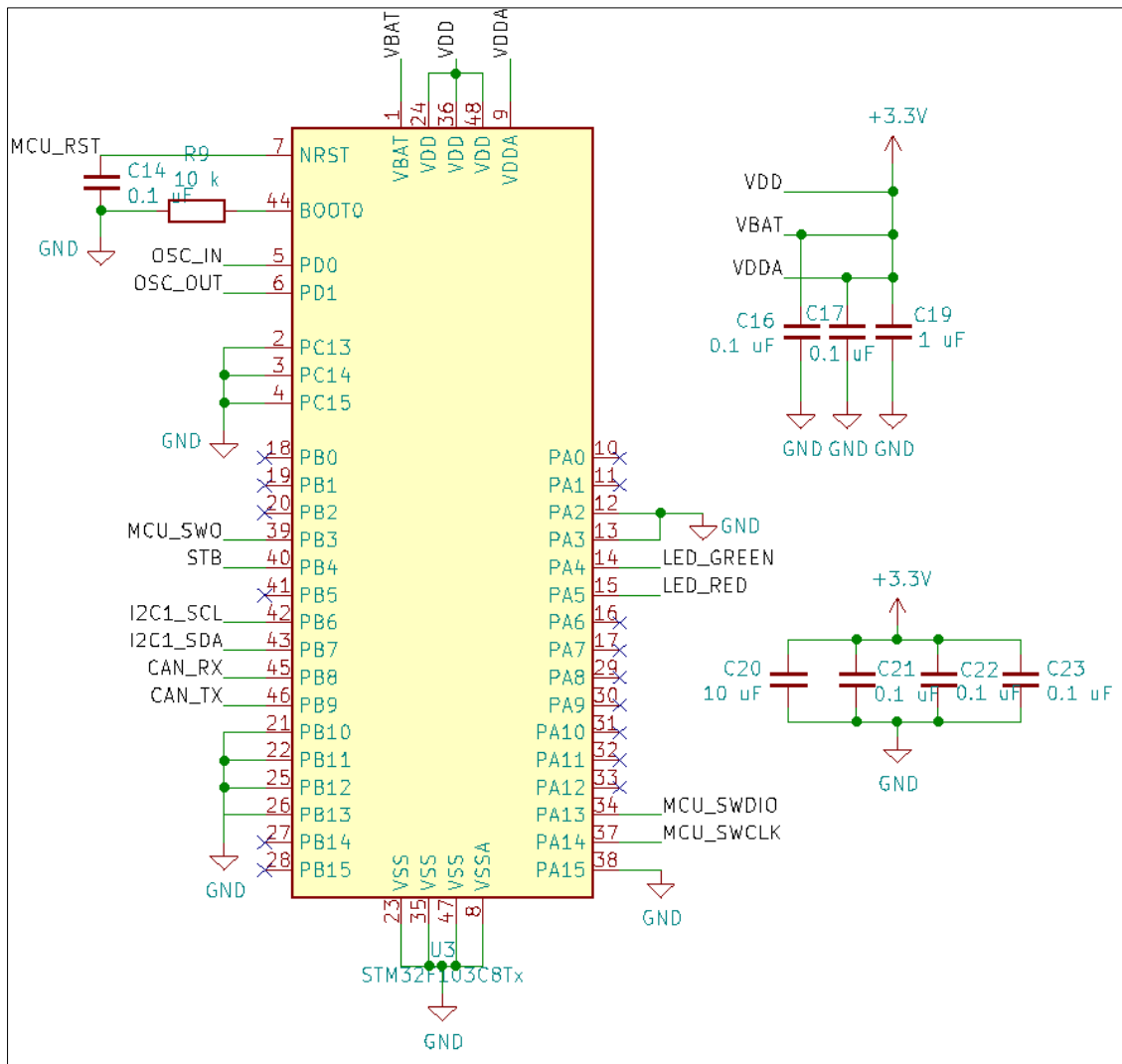
Pingestabilisaatorite väljundpinged juhiti edasi vastavalt CAN-transiiveri ning mikrokontrolleri ja temperatuurianduri sisenditesse.

### 4.3 Mikrokontroller

Seadme juhtkomponendi ehk mikrokontrollerina kasutati ettevõtte poolt soovitud tootja STMicroelectronics STM32F1C8T6 mikrokontrollerit [22]. Mikrokontrollerile lisati vajalikud ühendused nii CAN-transiiveri kui temperatuurianduriga.

Mikrokontrolleri skeemi (Joonis 4.5) koostamisel lähtuti põhimõttest, et kontrollerisse sisenevad liinid oleksid maksimaalselt kontrollerit kaitsvad. Tegemist on ainsa komponendiga seadmes, mis ei ole autotööstuse standarditele [6] vastav, mistõttu lisati kontrollerile kõik andmelehes soovitatud kaitseviisid. Mikrokontrolleri kõikidele toite ning maanduse viikudele lisati filtreerivad sidestuskondensaatorid.

Trükkplaadi disaini faasis lisati mikrokontrollerile ka eraldi maanduse ala, kuhu kontrolleri maandus on ühendatud vaid ühe ühenduskoha kaudu. Sellega välditakse mikrokontrolleri maanduse väljaviikude eri kaugust trükkplaadi üldisest maandusest, samuti maandusesõlme tekkimist. Maandusesõlm võib käituda antennina, millest võib saada suurim elektromagnetilise müra tekitaja ja vastuvõtja. Lisaks seadistati hulk kasutamata sisend- ja väljundviikuseid sisendi ning maandusena, et suurendada maanduse ala mikrokontrolleri all ning vähendada võimalikku tekkivat müra [23].

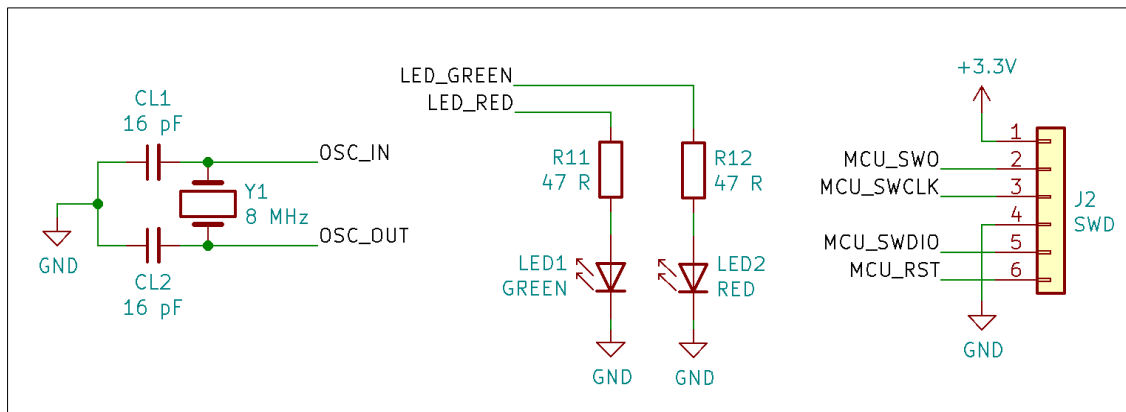


Joonis 4.5. STM32F1 mikrokontrolleri ühenduste skeem.

Mikrokontrolleri väljunditele lisati kaks valgusdiodi, millega on võimalik jälgida mikrokontrolleri tööd ka seadme töötamise ajal. Valgusdiodide kasutuselevõtuks tuli neile valida eeltakistid, mille arvutamiseks kasutati valemit (4).

$$R = \frac{V - V_{LED}}{I} \quad (4)$$

Mikrokontrollerile lisati ka programmeerimise liidese pistik, mille kaudu on võimalik ettevõtte olemasolevate JTAG-programmaatoritega seadet programmeerida. Lisaks lisati mikrokontrollerile väline kristall-ostsillaator (Joonis 4.6).



Joonis 4.6. Ostsillaatori, valgusdiiodide ning programmeerimise liidese skeem.

### Ostsillaatori kristalli valimine

STM32F1 andmelehe [22] järgi on mikrokontrollerile sobiva kristalli võnkesagedus vahemikus 1 kuni 25 MHz. Kasutatavaks võnkesageduseks valiti 8 MHz, kuna tegemist on ostsillaatorite kristallide seas laialt kasutusel oleva sagedusega. Sobiva elektroonikakomponentide tarnija valikust valiti välja 8 MHz-ine autotööstuse standarditele [6] vastav kristall, mille sobivust mikrokontrollerile hakati seejärel määrada. Sobivuse hindamiseks tuli välja selgitada, kas ostsillaatori võimendusmarginaal ( $gain_{margin}$ , inglise keeles *gain margin ratio*) on suurem kui 5 [24]. Võimendusmarginaali arvutamiseks kasutati valemit (5).

$$gain_{margin} = \frac{g_m}{g_{m_{crit}}} \quad (5)$$

Võimendusmarginaali arvutamiseks tuli välja selgitada ostsillaatori minimaalne läbivjuhtivus, mille leidmiseks kasutati valemit (6).

$$g_{m_{crit}} = 4 \times ESR \times (2\pi F)^2 \times (C_0 + C_L)^2, \quad (6)$$

kus

- ESR on ekvivalentne jadatakistus,
- $C_0$  on kristalli šuntmahtuvus,
- $C_L$  on kristalli nominaalne koormusmahtuvus,
- $F$  on kristalli nominaalne võnkesagedus.

Kristalliks valiti tootja Abracon ABLS3-seeria kristall [25], mille sobivuse kontrollimiseks vajalikud andmed olid järgmised:

- $ESR = 80 \Omega$ ,
- $C_0 = 7 \text{ pF}$ ,
- $C_L = 18 \text{ pF}$ ,
- $F = 8 \text{ MHz}$ .

Kristalli võnkumise kontrollimiseks arvutati  $g_{\text{mcrit}}$ :

$$g_{\text{mcrit}} = 4 \times 80 \times (2 \times \pi \times 8 \times 10^6)^2 \times (7 \times 10^{-12} + 18 \times 10^{-12})^2 = 0.51 \text{ mA/V}$$

STM32F1 andmelehes [22] defineeritud ostsillaatori läbivjuhtivuse ( $25 \text{ mA/V}$ ) ja eelnevalt arvutatu põhjal arvutatakse võimendusmarginaal:

$$gain_{\text{margin}} = \frac{25}{0.51} = 49$$

Arvutatud võimendusmarginaal on piisav võnkumise alustamiseks ning  $gain_{\text{margin}} > 5$  tingimus on rahuldatud. Seega võib järeldada, et valitud kristall sobib antud seadmes kasutamiseks.

Seejärel arvutati kristalli jaoks sobivad välised kondensaatorid. Kristalli nominaalne koormusmahtuvus näitab kristalli külge ühendatud vooluringi lõplikku mahtuvust. Antud väärtuse määravad välised kondensaatorid  $C_{L1}$  ja  $C_{L2}$  ning trükkplaadi ja seal olevate ühenduste kontakتماhtuvus  $C_S$ . Väliseid kondensaatoreid kasutatakse selleks, et reguleerida soovitud  $C_L$  väärtust kristalli tootja määratud väärtuseks [24]. Mahtuvuse  $C_L$  arvutamiseks kasutatakse valemit (7).

$$C_L = \frac{C_{L1} \times C_{L2}}{C_{L1} + C_{L2}} + C_S \quad (7)$$

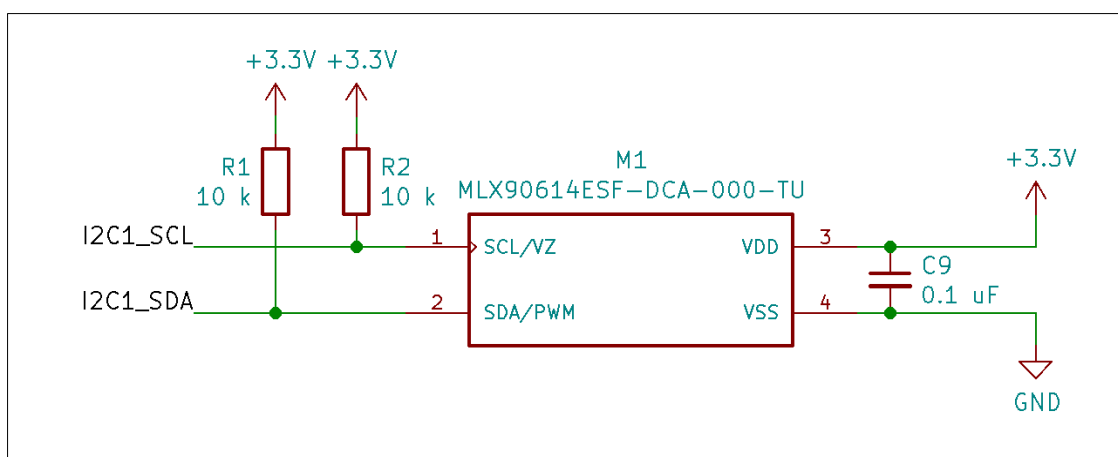
Antud valemi abil on võimalik leida kristallile sobivad välised kondensaatorid  $C_{L1}$  ja  $C_{L2}$ . Selleks kasutati andmelehes märgitud väärtusi  $C_L = 18 \text{ pF}$  ning  $C_S = 10 \text{ pF}$ :

$$C_L - C_S = \frac{C_{L1} \times C_{L2}}{C_{L1} + C_{L2}} = 8 \text{ pF}$$

Seega  $C_{L1} = C_{L2} = 16 \text{ pF}$ .

## 4.4 Temperatuuriandur

Temperatuurianduri skeemi (Joonis 4.7) koostamisel kasutati samu komponente nagu prototüübi koostamisel. Andurile lisati kaks 10 kilo-oomist takistit, mis on vajalikud vastavalt SMBus protokollile liinide kõrgel hoidmiseks. Lisaks lisati skeemi üks 100 nF kondensaator toite ning maanduse väljaviikude vahele. Kondensaator on vajalik anduri toiteallikast tuleneva sisendmüra vähendamiseks, kuna kõrge müratase võib mõjutada anduri mõõtmiste stabiilsust.

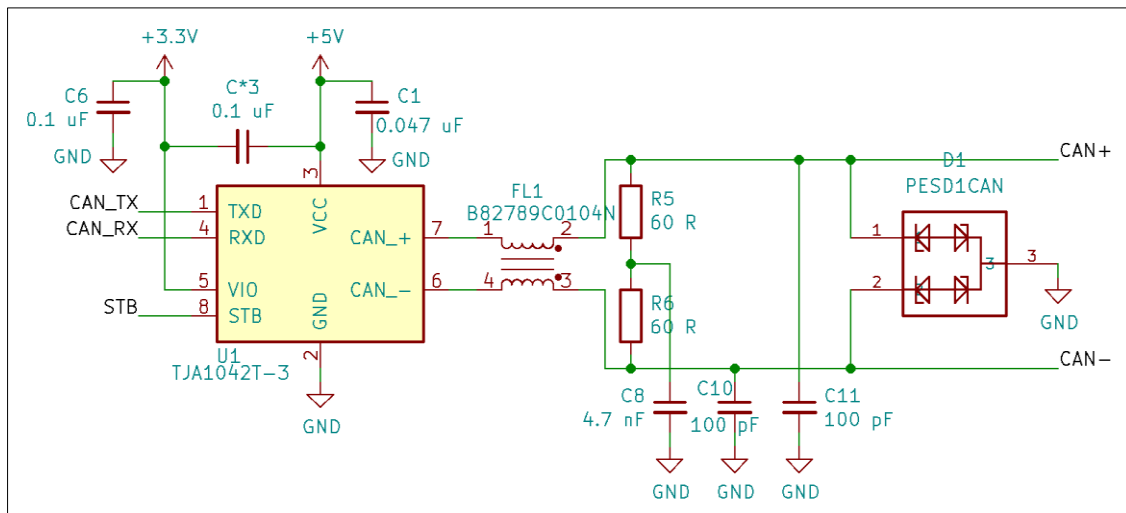


Joonis 4.7. Temperatuurianduri ühenduste skeem.

Elektrostaatilise laengu (ESD) vastaseks kaitseks on temperatuurianduri siseselt kõikide väljaviikude vahele ühendatud ka klamberdiodid.

## 4.5 CAN-transiiver

Seadmes kasutati CAN-transiiverina tootja NXP Semiconductors transiiverit TJA1042/3 [26], kuna tegemist oli ettevõttes juba varem kasutusel oleva komponendiga. CAN-transiiveri skeemi (Joonis 4.8) koostamisel lähtuti tootja dokumentatsioonist, milles sisalduvaid soovitusi transiiveri kaitseks rakendati skeemis mitmeid. Transiiveri kahele sisendpinge viigule lisati sidestuskondensaatorid, lisaks ühendati antud viikude vahele üks sidestuskondensaator, mille eesmärk on parandada transiiveri elektromagnetilist vastupidavust. Tootja dokumentatsioonile tuginedes tuleks kasutada ühte kahest eelmainitud variandist, kuid käesolevas rakenduses ei ole selget arusaama sellest, kas sisendpinge viikude omavaheline sidestamine parandab seadme töökindlust. Seetõttu lisati skeemi mõlemad variandid, et vajadusel kasutada erinevaid lahendusi.



Joonis 4.8. CAN-transiiveri skeem.

Transiiverile lisati CAN protokolliga jaoks loodud ESD kaitse diodid, kuna CAN-i transiiveri sisendsiinidele jõuab signaal otse sõiduki süsteemidest, kust liikuv sisendpinge võib rikke korral küündida väga kõrgeks.

Siinidele lisati ka samafaasilist signaali väljafiltreeriv komponent (inglise keeles *common mode choke*). Komponenti eesmärgiks on tekitada kõrge näivtakistus sama faasi signaalidele ning madal näivtakistus diferentsiaalsignaale. Selle tulemusena filtreeritakse samafaasilised müra signaalid enne CAN-transiiverisse jõudmist välja. Antud filtreeriv komponent aitab vähendada sisendsignaali kiirgumist ning parandab seadme vastupidavust samafaasilistele häiretele ilma, et CAN-siinidele lisanduks liigset müra [27].

Seadme terviklik skeem on välja toodud Lisades 2 ja 3.



## 5 Trükkplaadi disain

Skeemi valmimisel jätkati trükkplaadi disainimisega, mille käigus viidi kõik skeemi komponendid trükkplaadile üle. Trükkplaat tehti kahepoolne, millel komponendid paigutati ühele poole ning teisele poole paigutati maksimaalselt terviklik maanduse kiht.

Trükkplaadi disaini alustati komponentide gruppidesse paigutamise vastavalt põhikomponentidele, mille juurde nad kuulusid. Seejärel paigutati grupid trükkplaadi alale põhimõttel, et teatud põhikomponendid asetseksid üksteisest võimalikult kaugel. Temperatuuriandur paigutati võimalikult kaugemale pingestabilisaatoritest, millest kiirgav soojus võib mõjutada anduri mõõtetulemusi. Lisaks paigutati seadme pistik temperatuuriandurist võimalikult kaugemale, et andur oleks ettevõtte sõiduki sisemusest võimalikult väljaulatuv. Lähtuti ka põhimõttest, et CAN-ühendusega seotud komponendid peavad asetsema ühel joonel moodustades trükkplaadil teatava sümmeetrilisuse.

Põhikomponentide paigutuse kindlaks määramisel jätkati antud komponentide juurde kuuluvate komponentide paigutamise vastavalt komponentide andmelehtedes olevatele soovitudele, töö koostaja teadmistele ning ettevõtte nõuetele. Komponentide paigutuse kinnitamisel alustati komponentide radadega ühendamise, mida tehti põhimõttel ühendada komponendid samas järjestuses nagu skeemil. Radade laiuse valimisel lähtuti referentstabelist (Tabel 5.1), kuid võimalusel kasutati komponentide vahel soovituslikust laiemaid radasid, et vähendada radade soojuskiirgust. Eelmainitud tabelis on märgitud ka valitud raja laiuse puhul tekkiv alalispinge takistus ühe tolli kohta.

Tabel 5.1. Trükkplaadi raja soovituslik laius (10-kraadise temperatuuri tõusu jaoks) [28].

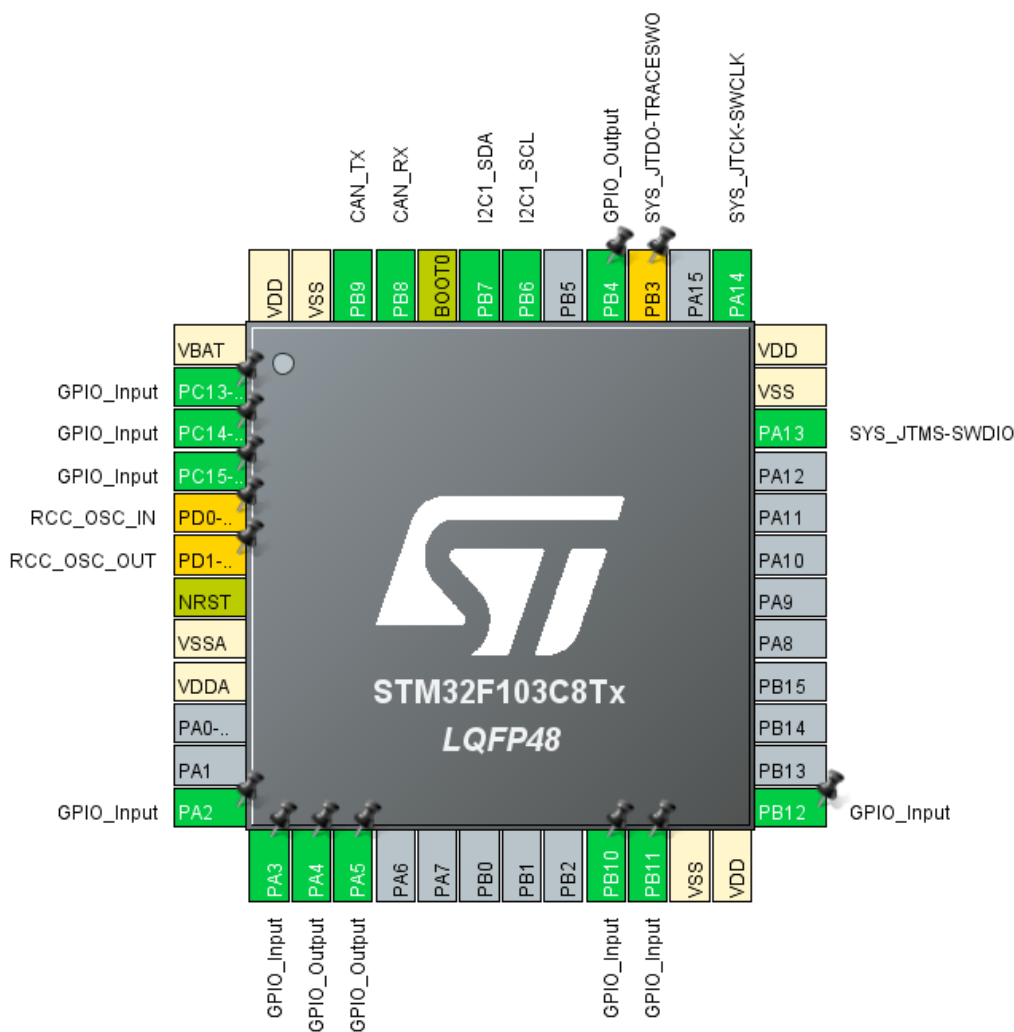
<b>Vool (amper)</b>	<b>Raja laius 1 oz vaskplaadi jaoks (mil)</b>	<b>Raja laius 2 oz vaskplaadi jaoks (mil)</b>	<b>Alalispinge takistus (mΩ/toll)</b>
1	10	5	52
2	30	15	17.2
3	50	25	10.3
4	80	40	6.4
5	110	55	4.7

CAN-ühendusega seotud komponendid ühendati diferentsiaalradade abil, kuna CAN-ühenduse puhul on tegemist diferentsiaalsignaalidega. Seetõttu ei vasta ka antud komponentide vaheliste radade laius referentstabelis soovitatud väärtustele.

Trükkplaadi esimene ja tagumine pool on välja toodud vastavalt Lisas 3 ja 4.

## 6 Tarkvaraarendus

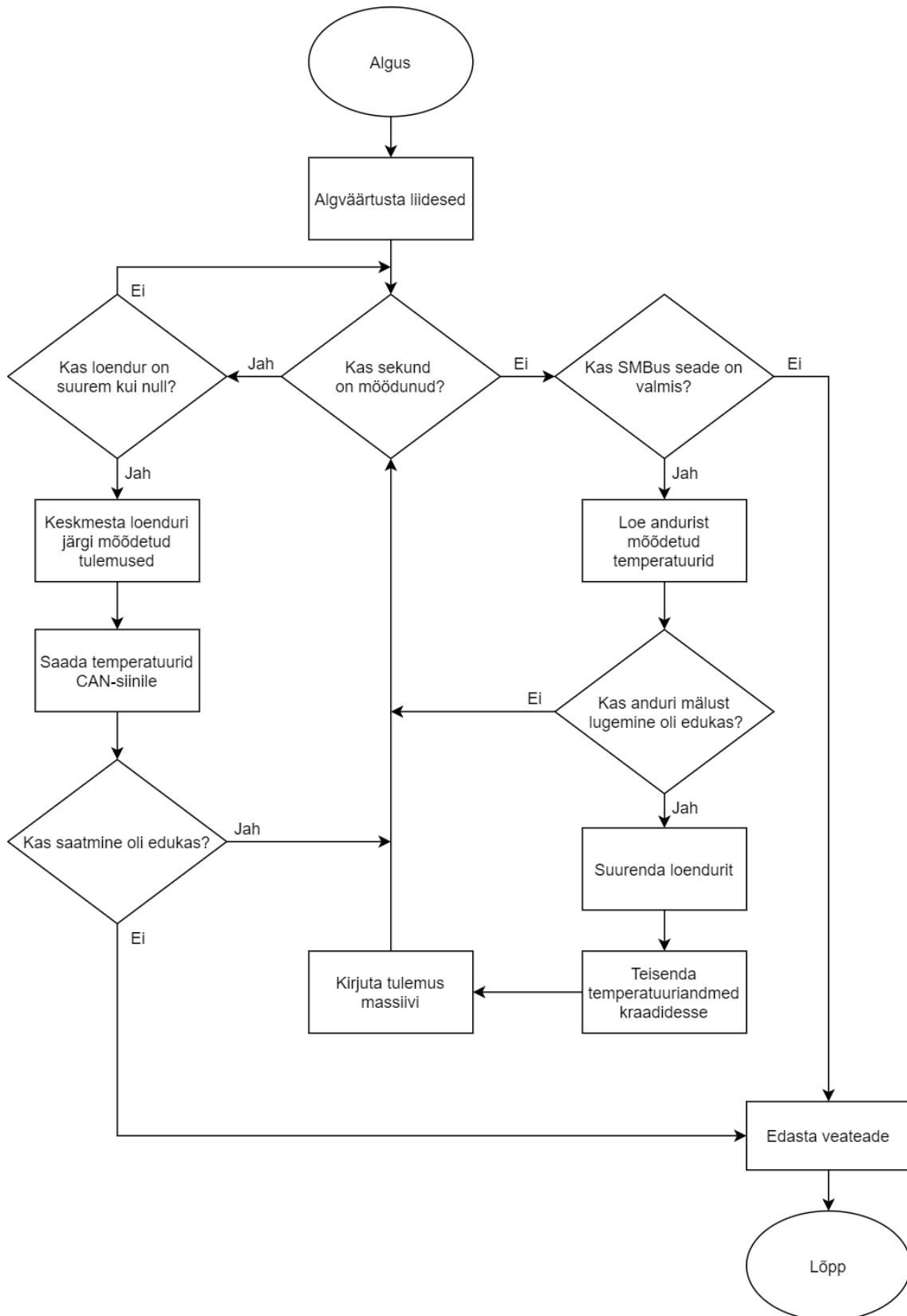
Seadme juhtkomponendiks on STM32F1 mikrokontroller, millele kirjutati seadme tööd juhtiv tarkvara. Tarkvara kirjutamiseks kasutati C programmeerimiskeelt ja mikrokontrolleri tootja STMicroelectronics programme. Programmi STM32CubeMX [29] abil konfigureeriti kasutatava mikrokontrolleri sisendid ja väljundid, seades aktiivseks mikrokontrolleri viigud, mis olid vajalikud CAN- ja I<sup>2</sup>C-ühenduse loomiseks, CAN-transiiveri ja LED-ide juhtimiseks ning mikrokontrolleri esialgseks programmeerimiseks (Joonis 6.1).



Joonis 6.1. Mikrokontrolleri STM32F1 konfiguratsioon.

Mikrokontrolleri seadistamisel teisaldati konfiguratsiooniprojekt System Workbench for STM32 [30] programmi, millega kirjutati programm temperatuuriandurilt andmete vastu võtmiseks, töötlemiseks ning CAN-siinile saatmiseks.

Temperatuuriandurilt andmete lugemiseks SMBus protokolliga ning CAN protokolliga andmete CAN siinile saatmiseks kasutati HAL teeki [31]. HAL teegi puhul on tegemist draiveritaseme kihiga, mis pakub kasutajale rakendusliideseid, millega on võimalik suhelda programmi kõrgemate kihtidega. Antud seadmes kasutatud kommunikatsiooniprotokollide puhul pakutakse HAL teegi näol võimalusi liideste initsialiseerimiseks ja konfigureerimiseks, sünkroonseks ja asünkroonseks andmeedastuseks ning kommunikatsioonivigade käsitlemiseks.



Joonis 6.2. Tarkvara üleschitus.

Programmi töö alguses (Joonis 6.2) algväärtustatakse kasutatavad liidesed (CAN ja SMBus) ning programmi töö jätkub *while* tsüklis. Temperatuuriandmete vastuvõtmine ja töötlemine algab järgmises *while* tsüklis, mille käivitumistingimuseks on *SysTick* kellatakt. Kellatakti väärtusega kontrollitakse, kas eelmisest tingimuse kontrollimisest on möödunud 1 sekund. Kui sekund ei ole veel möödunud, kontrollitakse, kas SMBus seade (antud juhul temperatuuriandur) on valmis sõnumite vastuvõtmiseks. Kui seade ei ole veel valmis, siis edastatakse veateade ning programmi töö lõpetatakse.

Temperatuurianduri valmisolekul programmi töö jätkub ning anduri muutmälust loetakse SMBus protokolliga abil viimati mõõdetud välis- ja objekti temperatuur. Kui anduri mälust lugemine oli edukas, suurendatakse loendurit, millega hinnatakse edukaid temperatuurilugemisi, teisendatakse temperatuuriandmed kraadidesse (°C) ning kirjutatakse tulemus massiivi. Ebaõnnestunud lugemise puhul liigutakse taas *while* tsükli tingimuskontrolli juurde ning kui sekund pole veel möödunud, proovitakse uuesti andurilt temperatuuriandmeid lugeda.

Sekundi möödumisel kontrollitakse, kas edukate temperatuurilugemiste arv on suurem kui null. Juhul, kui ei ole, alustatakse programmi tööd algusest. Kui loendur on suurem kui null, siis keskmistatakse loenduri alusel mõõdetud tulemused (välis- ning objektide temperatuurid eraldi), ning saadetakse keskmistatud tulemused CAN-siinile. Eduka andmeedastuse korral liigutakse tagasi programmi algusesse, ning jätkatakse tsüklis programmi tööd. Kui CAN-siinile saatmine ebaõnnestus, edastatakse mikrokontrollerile veateade ning lõpetatakse programmi töö.

## 7 Kokkuvõte

Käesoleva lõputöö eesmärgiks oli valmis arendada sõiduki aluspinna temperatuuri mõõtmise seade.

Eesmärgi täitmiseks olid sissejuhatuses välja toodud järgmised punktid:

- Temperatuuriandurite analüüs ning valik;
- Trükkplaadi arendamine ja koostamine;
- Tarkvara arendamine;
- Korpuse arendamine;
- Valminud seadme testimine.

Seadmes kasutatud temperatuuriandur valiti teoreetilise ning funktsionaalse võrdluse tulemusena. Trükkplaadi arendamine oli lõputöö aeganõudvaim osa, kuna nõudis põhjalikku arusaamist autotööstuses kasutatavate komponentide eripärast ning seadmetele kehtivatest nõuetest. Tarkvara arendamisel sai lõputöö koostaja edukalt kasutada sardsüsteemide arendusest saadud teadmisi, sellegipoolest oli uudne tarkvara arendus reaalselt kasutusele minevale seadmele. Lõputöö koostamisel tutvuti lähemalt erinevate kommunikatsiooniprotokollidega, mida koostaja saab ka tulevikus enda töös edukalt kasutada. Seadme arendamise perioodil otsustati ühiselt ettevõtte ja lõputöö koostaja poolt, et seadme koostamise, korpuse arendamise ning valminud seadme testimise ülesanded ei saa olema antud lõputöö osadeks. Arendatud seade läheb reaalselt kasutusse peale töö esitamist, mistõttu otsustati seadme koostamine ning testimine hetkel edasi lükata. Lõputöö koostaja poolt arendatud tarkvara funktsionaalsus on testitud identse mikrokontrolleriga prototüübil.

## Kasutatud kirjandus

- [1] Eesti Keele Instituut, „[ITS] IT terministandardi sõnastik,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.eki.ee/dict/its/>. [Kasutatud 29. aprill 2020].
- [2] Texas Instruments, „Introduction to the Controller Area Network (CAN),“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.ti.com/lit/an/sloa101b/sloa101b.pdf>. [Kasutatud 29. aprill 2020].
- [3] M. D. Natale, „Understanding and using the Controller Area Network,“ 30. oktoober 2008. [Võrgumaterjal]. Saadaval: [http://inst.cs.berkeley.edu/~ee249/fa08/Lectures/handout\\_canbus2.pdf](http://inst.cs.berkeley.edu/~ee249/fa08/Lectures/handout_canbus2.pdf). [Kasutatud 29. aprill 2020].
- [4] Melexis, „SMBus Communication with MLX90614,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.melexis.com/en/documents/documentation/application-notes/application-note-mlx90614-smbus-communication>. [Kasutatud 29. aprill 2020].
- [5] Melexis, „Datasheet for MLX90614,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.melexis.com/en/documents/documentation/datasheets/datasheet-mlx90614>. [Kasutatud 29. aprill 2020].
- [6] AEC Component Technical Committee, „AEC Documents,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://aecouncil.com/AECDocuments.html> [Kasutatud 29. aprill 2020].
- [7] Omron Electronics, „D6T Datasheet,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://omronfs.omron.com/en\\_US/ecb/products/pdf/en-d6t.pdf](https://omronfs.omron.com/en_US/ecb/products/pdf/en-d6t.pdf). [Kasutatud 29. aprill 2020].
- [8] Omron Electronics, „MEMS Thermal Sensors D6T User's Manual,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://omronfs.omron.com/ko\\_KR/ecb/products/pdf/en\\_D6T\\_users\\_manual.pdf](https://omronfs.omron.com/ko_KR/ecb/products/pdf/en_D6T_users_manual.pdf). [Kasutatud 29. aprill 2020].
- [9] Arduino, „Arduino IDE,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.arduino.cc/en/main/software>. [Kasutatud 29. aprill 2020].
- [10] Arduino, „Arduino Wire Library,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.arduino.cc/en/Reference/Wire>. [Kasutatud 29. aprill 2020].
- [11] KiCad, „KiCad EDA,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.kicad-pcb.org/>. [Kasutatud 29. aprill 2020].
- [12] P. Jacob, „Early life field failures in modern automotive electronics – An overview; root causes and precautions,“ *Proceedings of the 27th European Symposium on Reliability of Electron Devices, Failure Physics and Analysis*, kd. 64, Microelectronics Reliability, 2016, pp. 79-83.
- [13] G. Vogel, „Avoiding flex cracks in ceramic capacitors: Analytical tool for a reliable failure analysis and guideline for positioning cercaps on PCBs,“ *Proceedings of the 26th European Symposium on Reliability of Electron Devices, Failure Physics and Analysis*, kd. 55, Microelectronics Reliability, 2015, pp. 2159-2164.
- [14] N. Davis, „An Introduction to Transient Voltage Suppressors (TVS),“ 24. mai 2019. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/transient-voltage-suppressors-tvs-an-introduction/>. [Kasutatud 29. aprill 2020].



- [15] Texas Instruments, „Input Filter Design for Switching Power Supplies,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.ti.com/lit/an/snva538/snva538.pdf>. [Kasutatud 29. aprill 2020].
- [16] The International Electrotechnical Commission, „CISPR 25:2016,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.evs.ee/et/cispr-25-2016>. [Kasutatud 29. aprill 2020].
- [17] Texas Instruments, „TPS560430-Q1 Datasheet,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps560430-q1.pdf?ts=1587931125088>. [Kasutatud 29. aprill 2020].
- [18] Texas Instruments, „WEBENCH® Power Designer,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.ti.com/design-resources/design-tools-simulation/webench-power-designer.html>. [Kasutatud 30. aprill 2020].
- [19] Vishay Intertechnology, „Standard Electronic Decade Value Tables,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.vishay.com/docs/31001/dectable.pdf>. [Kasutatud 29. aprill 2020].
- [20] Texas Instruments, „TPS746-Q1 Datasheet,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps746-q1.pdf>. [Kasutatud 29. aprill 2020].
- [21] Texas Instruments, „Reverse Current Protection in Load Switches,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.ti.com/lit/an/slva730/slva730.pdf?ts=1588175017123>. [Kasutatud 29. aprill 2020].
- [22] STMicroelectronics, „STM32F103C8 Datasheet,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f103c8.pdf>. [Kasutatud 29. aprill 2020].
- [23] STMicroelectronics, „Getting started with STM32F10xxx hardware development,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://www.st.com/resource/en/application\\_note/cd00164185-getting-started-with-stm32f10xxx-hardware-development-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/application_note/cd00164185-getting-started-with-stm32f10xxx-hardware-development-stmicroelectronics.pdf) [Kasutatud 29. aprill 2020].
- [24] STMicroelectronics, „Oscillator design guide for STM8AF/AL/S, STM32 MCUs and MPUs,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://www.st.com/resource/en/application\\_note/cd00221665-oscillator-design-guide-for-stm8af-al-s-stm32-mcus-and-mpus-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/application_note/cd00221665-oscillator-design-guide-for-stm8af-al-s-stm32-mcus-and-mpus-stmicroelectronics.pdf). [Kasutatud 29. aprill 2020].
- [25] Abracon, „ABLS2 Datasheet,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://abracon.com/Resonators/ABLS2.pdf>. [Kasutatud 29. aprill 2020].
- [26] NXP Semiconductors, „TJA1042 CAN transceiver datasheet,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/TJA1042.pdf>. [Kasutatud 29. aprill 2020].
- [27] NXP Semiconductors, „Application Hints - Standalone high speed CAN transceiver TJA1042,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://www.nxp.com/docs/en/supporting-information/AH1014\\_v1\\_4\\_Application\\_Hints\\_TJA1042\\_43\\_48\\_51.pdf](https://www.nxp.com/docs/en/supporting-information/AH1014_v1_4_Application_Hints_TJA1042_43_48_51.pdf). [Kasutatud 29. aprill 2020].
- [28] D. L. Jones, „PCB Design Tutorial,“ 29. juuni 2004. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.alternatezone.com/electronics/files/PCBDesignTutorialRevA.pdf>. [Kasutatud 29. aprill 2020].
- [29] STMicroelectronics, „STM32CubeMX - STM32Cube initialization code generator,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubemx.html>. [Kasutatud 29. aprill 2020].
- [30] STMicroelectronics, „SW4STM32 - System Workbench for STM32,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.st.com/en/development-tools/sw4stm32.html>. [Kasutatud 29. aprill 2020].

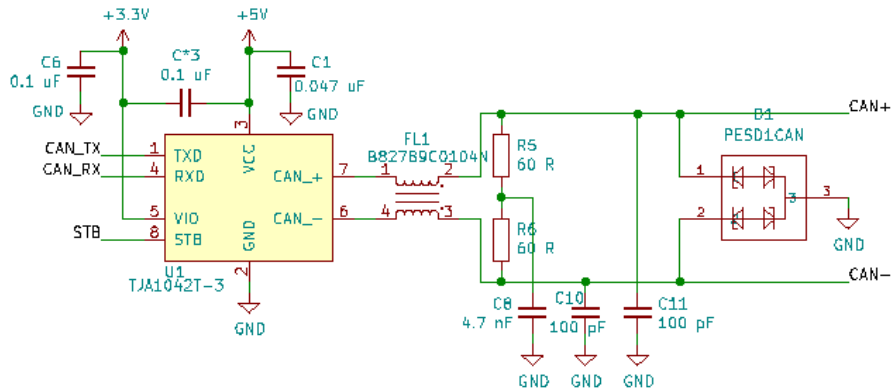
- [31] STMicroelectronics, „Description of STM32F4 HAL and LL drivers - User Manual,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://www.st.com/resource/en/user\\_manual/dm00105879-description-of-stm32f4-hal-and-ll-drivers-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/user_manual/dm00105879-description-of-stm32f4-hal-and-ll-drivers-stmicroelectronics.pdf). [Kasutatud 29. aprill 2020].

## Lisa 1 – Ettevõtte nõuded seadmele

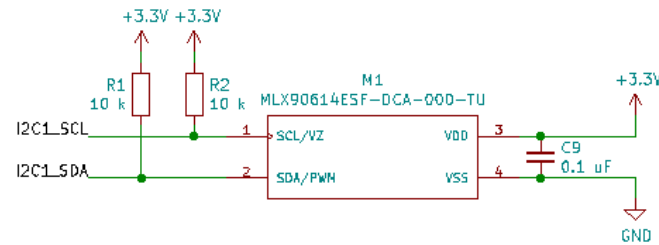
Komponent	Ettevõtte nõue	Kommentaar
Kõik komponendid	Autotööstuse standarditele vastav	Erand: mikrokontroller – ei ole kriitilise tähtsusega süsteem
Temperatuuriandur	Mõõtetäpsusega $\pm 1$ kraad	
Mikrokontroller	STM32 sarja kontroller	Ettevõtte enimkasutatud mikrokontrollerite sari
Kaitsemehhanismid	Autotööstuse standardite järgi	ESD, siirdepinge, vastassuunaline vool
Pistik	Vee- ja tolmukindel, mõõtetelt väike, 4 väljaviiguga	
Toide	12 V, võimeline töötama vahemikus ~ 5 kuni 40 V	
Korpus	Temperatuuriandur saab olema kaetud	
Tarkvara	Mikrokontroller saadab andmeid sõidukile kord sekundis Mõõdetakse 10 korda sekundis ning edastatakse keskmistatud väärtus	Kaks temperatuuri saadetakse 2x16-bitiste sõnumitena
Trükkplaat	Mõõtetelt võimalikult väike	
Kogus	Ühte sõidukisse läheb 2 seadet	

## Lisa 2 – Seadme skeem

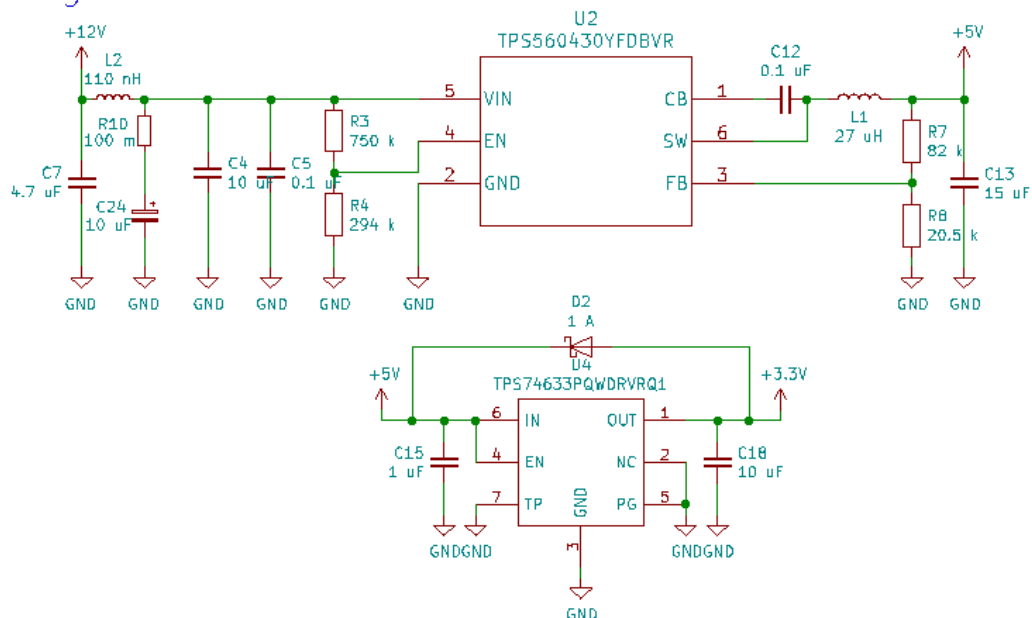
### CAN



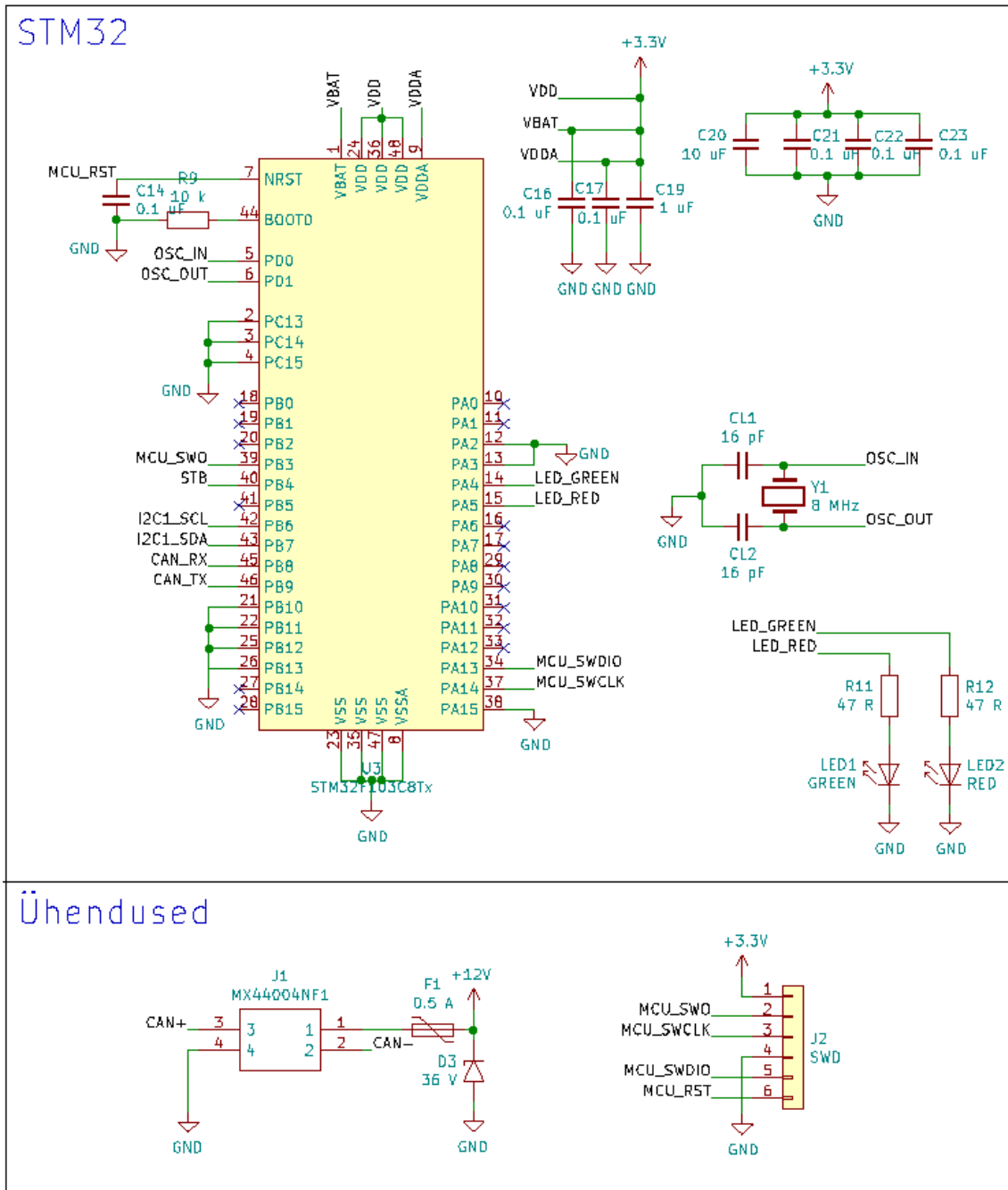
### Temperatuuriandur



### Pingestabilisaatorid



## Lisa 3 – Seadme skeem (2)



## Lisa 4 – Seadme trükkplaadi pooled A ja B

