



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Eetu Salo

Digitaalinen ohjainjärjestelmä ajoneu- vokäyttöön

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Ajoneuvotekniikan tutkinto-ohjelma

Insinööriyö

27.5.2021

Tekijä Otsikko	Eetu Salo Digitaalinen ohjainjärjestelmä ajoneuvokäyttöön
Sivumäärä Aika	59 sivua + 1 liite 27.05.2021
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Ajoneuvotekniikka
Ammatillinen pääaine	Autosähkötekniikka
Ohjaajat	Lehtori Pasi Oikarinen
<p>Tässä opinnäytetyössä kehitettiin digitaalinen ohjelmitava käyttöliittymällä varustettu ohjainjärjestelmä ajoneuvokäyttöön. Idea työn aiheeseen syntyi, kun tarkasteltiin vaihtoehtoja vanhemman harrasteajoneuvon sähköisten toimilaitteiden automatisointiin. Pää tavoitteena oli luoda elektronisesti toimintavarma ja kohtalaisen helppokäyttöinen laite ajoneuvojen tyypillisesti haastavaan sähköjärjestelmään. Lisäksi tavoitteena oli polttomoottorin pakokaasuahdinten ahtopaineensäädön toteuttaminen PID-algoritmilla.</p> <p>Järjestelmän kehitys aloitettiin laatimalla projektin tavoitelista sekä kartoitus halutuista ohjattavista toimilaitteista. Tämän jälkeen alettiin tutkia järjestelmän luomiseen vaadittavia elektronisia komponentteja. Kokonaiskuvan hahmotuttua aloitettiin mikro-ohjaimen firmwaren kehitys. Järjestelmästä luotiin prototyyppi heti käsillä olevilla komponenteilla, ja ahtopaineohjauksen koestamiseen rakennettiin pneumaattinen testipenkki. Prototyypistä opitun perusteella luotiin CAD-ohjelmistolla kytkentäkaaviot sekä järjestelmämoduulin PCB-piirilevy. Järjestelmämoduulille ja käyttöliittymälle suunniteltiin ja 3D-tulostettiin muovista soveltuvat koteloinnit. Komponenttien saavuttua moduulit koottiin, ja käyttöliittymälle rakennettiin johtosarja. Kokonaisjärjestelmä koottiin testipenkkiin, jolloin firmwarea kehitettiin voimakkaasti, ja hardwarelle suoritettiin sähköisiä ja termisiä testejä.</p> <p>Kehitystyö tuotti halutun tuloksen: järjestelmä todettiin toimintavarmaksi ja helposti ajoneuvoon asennettavaksi toimivaksi tuotteeksi. Ahtopaineen säätötekniikka saatiin toimimaan, mutta sille jäi kehitysvara. Käyttöliittymä valikkoineen toimi erinomaisesti. Työn laajuuden vuoksi järjestelmää ei ehditty asentaa ajoneuvoon. Itse työn aikana syntyi useita kehitysehdotuksia, jotka tullaan ottamaan huomioon järjestelmän seuraavissa kehitysversioissa.</p>	
Avainsanat	Arduino, autosähkö, säätötekniikka, pakokaasuahdaminen

Author Title	Eetu Salo Digital automotive control system
Number of Pages Date	59 pages + 1 appendix 27 May 2021
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automotive engineering
Professional Major	Automotive Electronics Engineering
Instructors	Pasi Oikarinen, Lecturer
<p>A digital programmable controller system with a user interface was developed for vehicle use in this thesis. The idea for developing this system came up when alternatives for the automation of electric actuators of an older hobby vehicle were considered. The main objective was to create an electronically reliable and reasonably easy-to-use device for vehicles which typically have challenging electrical conditions. In addition, the implementation of a charge pressure control of a turbocharger of an internal combustion engine by the PID algorithm played a significant role.</p> <p>The development of the system began with the preparation of a project target list and an inventory of the desired controllable actuators. This was followed by research into the electronic components required to create the system. Once the overall picture was clear, the development of the microcontroller firmware was started. A prototype of the system was immediately created with the components at hand, and a pneumatic test bench was built to test the boost pressure control. Based on what was learned from the prototype, wiring diagrams and a PCB for the system module were created with CAD software. Suitable plastic enclosures were designed and 3D printed for the system module and user interface. When the components arrived, the modules were assembled, and wiring harnesses were built for the user interface. The overall system was assembled on a test bench, and at the same time the firmware was vigorously developed, and electrical and thermal tests were performed on the hardware.</p> <p>The development work carried out produced the desired result: the system was found to be reliable and easy to install in a vehicle. The boost pressure control worked, although there is room for improvement. The interface with menus worked very well. Due to the scope of the work, the system could not be installed in the vehicle. Several development suggestions were made during the work itself, which will be taken into account in the next development versions of the system.</p>	
Keywords	Arduino, automotive electronics, control theories, turbocharging

Sisällys

Lyhenteet

Käsitteet

1	Johdanto	1
2	Teoriaa ja taustaa	2
2.1	Säätöjärjestelmät ajoneuvokäytössä	2
2.2	Pakokaasuahtimen ohjaus	3
2.3	Jäähdyttimen puhaltimen ohjaus	6
3	Suunnittelun työkalut	7
4	Tekniikka, vaatimusmäärittely ja komponentit	7
4.1	Pneumatiikka hukkaportin ohjaukseen	8
4.2	Säätöalgoritmit	11
4.3	Elektroniikka	12
4.3.1	Ohjelmoitava suoritin	14
4.3.2	Solenoidiventtiilin ohjauspiiri	16
4.3.3	Jäähdyttimen puhaltimen piiri	18
4.3.4	Jänniteregulointi	19
4.3.5	Paineanturi	22
4.3.6	Käyttöliittymän komponentit	23
4.3.7	Muut komponentit	26
5	Ohjelmointi	27
6	Prototyyppi	30
6.1	Prototyyppimoduuli	30
6.2	Prototyypin ohjelmointi	32
6.3	Testaus	33
7	Ensimmäinen revisio	35
7.1	Suunnittelu	35
7.1.1	Elektroniikka	35
7.1.2	Johtosarjat	40

7.1.3	Kotelointi	41
7.2	Valmistus	43
7.2.1	Järjestelmämoduuli	43
7.2.2	Kotelointi	45
7.2.3	Johtosarjat	46
7.3	Testaus	48
7.3.1	Sähköinen ja terminen testaus	48
7.3.2	Säätöalgoritmin toiminta	53
8	Kehitysehdotukset	55
9	Yhteenveto	56
	Lähteet	58
	Liitteet	
	Liite 1. Arduino-koodin URL-osoite	

Lyhenteet

CAD	Computer-aided Design (tietokoneavusteinen suunnittelu)
VDC	Voltage Direct Current (tasavirran jännite)
PCB	Printed Circuit Board (tulostettu piirilevy)
MCU	Microcontroller Unit (mikrokontrolleri)
IC	Integrated Circuit (sulautettu piiri, mikropiiri)
CNC	Computerised Numerical Control (numeerinen ohjaus)
LCD	Liquid Crystal Display (nestekidenäyttö)
OLED	Organic Light Emitting Diode
IDE	Integrated Development Environment (sulautettu kehitysympäristö)
ISO	International Organisation for Standardisation
PWM	Pulse Width Modulation (pulssinleveysmodulaatio)
PLC	Programmable Logic Controller (ohjelmoitava logiikka)
ISR	Interrupt Service Routine (keskeytysrutiini)
PID	Proportional-integral-derivative-säädin
FET	Field Effect Transistor (kanavatransistori)
ESR	Equivalent Series Resistance

EMC	Electromagnetic Compatibility (sähkömagneettinen yhteensopivuus)
EMI	Electromagnetic Interference (sähkömagneettinen häiriö)
LDO	Low drop-out (matala jännitepudotus)

Käsitteet

Digitaalisuus	Tiedonkäsittely ennalta määritetyillä arvoilla (1).
Analogisuus	Tiedonkäsittely suoraan dataa vastaavilla arvoilla (1).
Binäärisuus	Tiedonkäsittely, jossa data-alkiolla on kaksi mahdollista arvoa.
Alasvetovastus	Vastus, jolla komponentti saa referenssijännitteenä maapotentiaalin ohjaussignaalin puuttuessa.
Ylös vetovastus	Vastus, jolla komponentti saa referenssijännitteenä loogisen ylemmän potentiaalin ohjaussignaalin puuttuessa.
Protokolla	Tiedonsiirtomenetelmän määritelmä tai standardi.
Firmware	Ohjelmoitavan digitaalisen laitteen alimman tason ohjelmisto.
Flyback-diodi	Induktiivisen kytkettävän kuorman rinnalle asetettu diodi (2).

1 Johdanto

Opinnäytetyö on oleellinen osa suomalaisia korkeakoulututkintoja. Sen tehtävänä on osoittaa, että opiskelija kykenee uskottavasti soveltamaan opinnoissaan hankkimia tietoja ja taitoja. Ammattikorkeakouluinsinöörin opinnäytetyö voi olla muun muassa todistus siitä, että opiskelijalla on valmiuksia toimia oman alansa kehitystehtävissä. Opinnäytetyö on myös parhaimmillaan kehittävä oppimistapahtuma, josta on hyötyä pitkälle tulevaisuuteen.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli suunnitella, valmistaa ja kokeilla käytännössä digitaalitekniikalla toteutettua elektronista monipuolista ohjainyksikköä ajoneuvokäyttöön.

Idea opinnäytetyöhön syntyi, kun pohdinnassa olivat eri ratkaisut täysmekaanisella esikammiodieselmootorilla varustetun harrasteajoneuvon ahtopaineen säätöön ja jäähdytinpuhaltimen automatisoimiseen.

Tällä opinnäytetyöllä oli useita tavoitteita:

- Suunnitellaan, valmistetaan ja hiotaan toimivaksi tuotteeksi asti elektroninen järjestelmä, jolla voidaan ohjata erilaisia sähköisiä toimilaitteita ajoneuvossa.
- Suoritetaan valmistetulle laitteelle kokeita sen toimintavarmuuden todistamiseksi.
- Kehitettävällä laitteella voidaan automatisoida varsinkin vanhempaa tekniikkaa edustavien ajoneuvojen sähköjärjestelmiä, ja se on helppoa asentaa.
- Järjestelmän hardwareen ja firmwareen sisällytetään työn aikana ainakin pakokaasuahntimen ja jäähdytysjärjestelmän tuulettimen ohjauksiin vaadittavat ominaisuudet.

Työn pääpaino oli laitteen elektroniikassa.

2 Teoriaa ja taustaa

2.1 Säätojärjestelmät ajoneuvokäytössä

Erilaiset säätojärjestelmät ovat olleet pitkään tiivis osa ajoneuvoteollisuutta. Erilaisten prosessien automatisoitu hallinta ajoneuvossa voi helpottaa kuljettajan roolia ja parantaa ajoneuvoa useilla osa-alueilla, esimerkiksi lisätä toimintavarmuutta ja turvallisuutta erilaisissa käyttötilanteissa. Mikroprosessoripohjaiset ratkaisut alkoivat yleistyä massatuotetuissa ajoneuvoissa viimeistään 1980-luvulla, ja uusimmat teknologiset innovaatiot on autoteollisuudessa nähty yleensä ensin ylemmän keskiluokan henkilöautoissa. Viimeistään polttoaineen suihkutuksen syrjäytettyä kaasuttimet ja muut mekaaniset polttoaineen annosteluratkaisut täysin autoissa, tulivat mikroprosessorit osaksi jokaista massatuotettua henkilöautoa, jonka jälkeen elektroniikan merkitys on jatkuvasti vain korostunut ajoneuvoteollisuudessa niin kustannus-, kuin käyttäjäkokemuksen näkökulmasta.

Suomessa ja monissa muissa maissa on vahva harrasteajoneuvokulttuuri. Ottomootoreilla varustetuissa harrasteajoneuvoissa on harrastepiireissä pitkään käytetty jälkimarkkinoituja moottorinohjausyksiköitä, joissa signaaliprosessointiin on käytetty yleensä mikrokontrolleria. Kyseiset kaupalliset tuotteet ovat perinteisesti olleet kuitenkin suljettua lähettä sekä tekijänoikeuksin suojattuja. Digitaali- ja mikroprosessoritekniikan hyödyntäminen muutoin onkin yleensä rajoittunut marginaalisen ajoneuvoharrastajajoukon aktiviteetteihin.

2010-luvulla lähinnä Arduino-tavaramerkin ja sen taustalla olevan yhteisön kautta, mutta myös huimaa vauhtia digitalisoituvan ja verkottuvan yhteiskunnan takia mikrokontrolleritekniikka alkoi saavuttaa suurempaa yleisöä niin ammatillisesta kuin harrastajanäkökulmasta. Eri organisaatiot julkaisevat jatkuvasti edullisia tai ilmaisia ohjelmistoja, joilla mikrokontrollerien ohjelmointi on helposti lähestyttävää. Näistä syistä digitaalitekniikan hyödyntäminen on alkanut yleistyä myös ajoneuvoharrastepiireissä.

2.2 Pakokaasuahtimen ohjaus

Polttomoottori on lämpövoimakone, joka muuttaa palamistuotteiden kaasunpaisumisen kautta lämpöenergiaa liike-energiaksi. Polttomoottorin hyötysuhdetta nostamalla voidaan vähentää sen ominaiskulutusta ja päästöjä ja nostaa sen suorituskykyä. Hyötysuhteen nostamiseen on useita keinoja, mutta modernissa polttomoottoritekniikassa eräs merkittävimmistä teknologioista on imuilman ahtaminen. Ahtamalla saadaan nostettua sekä termodynaamista hyötysuhdetta, että muita kokonaishyötysuhteen osa-alueita esimerkiksi sen kautta, että moottorin fyysinen koko ei kasva, sen kuitenkin kyetessä tuottamaan enemmän suorituskykyä. Ahdettu moottori ei joudu pumppaamalla tuottamaan atmosfääristä painetta alhaisempaa painetta imuilman virtauksen aikaansaamiseksi paltiloihin, jolloin sen ei välttämättä tarvitse käyttää pyörimisenergiaansa oman toimintansa mahdollistamiseksi. (3, s 6.) (Kuva 1.)

Thermodynamic Cycle

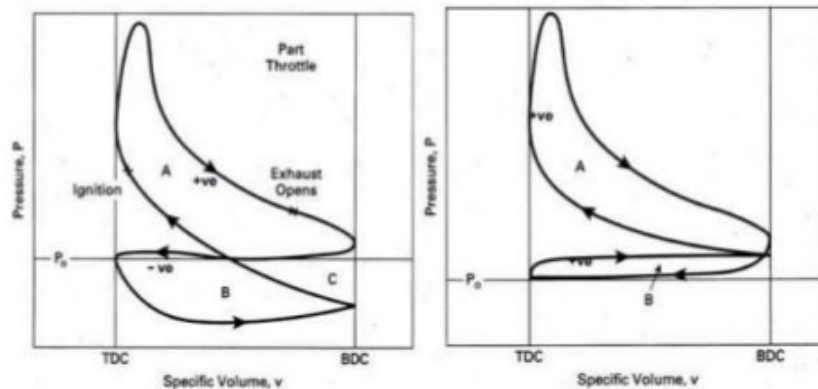


Fig. p-v cycle of Naturally aspirated Engine

Fig. p-v cycle of Supercharged Engine

Kuva 1. Vapaasti hengittävän ja mekaanisesti ahdetun moottorin teoreettiset termodynaamiset kierrot kaasun paine-tilavuus-kuvaajassa. Oikean puolen kuvaajasta voidaan todeta, että teoriassa kuormitettuna ahdetun moottorin tuottama työ ei laske ikinä negatiiviseksi. (4.)

Polttomoottorin ahtamiseen on useita metodeja, mutta yleisin keino on pakokaasu- eli turboahtaminen, jossa moottorin pakokaasuvirran virtaus- ja lämpöenergiaa muutetaan imuilman potentiaalienergiaksi eli paineeksi. Turboahtamisen etuna muihin

ahtamistekniikoihin verrattuna on se, että muussa tapauksessa ilmakehään poistuvasta pakokaasuun sitoutuneesta energiasta suuri osa saadaan hyödynnettyä.

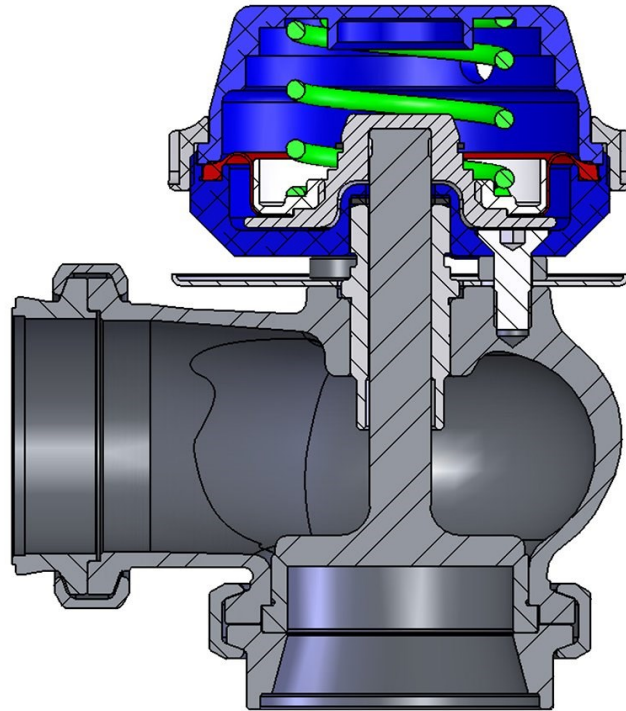
Turboahdamisen oleellisia tunnusmuureita ovat pakokaasujen lämpötila, imusarjapaine ja pakopaine. Imusarjapaineesta käytetään usein termiä ”ahtopaine”, jolloin sen nolla-arvona yleensä pidetään vallitsevaa atmosfääristä painetta. Ahtimen tuottamaa maksimi-imusarjapainetta rajoitetaan yleensä päästämällä osa pakokaasuvirtauksesta ahtimen turbiinin ohi, tai muuttamalla turbiinin geometrioita siten, että pienempi osa pakokaasun liike-energiasta siirtyy turbiinin siipipyörään. Ensin mainittua tekniikkaa kutsutaan hukkaportiksi. Molemmissa tapauksissa mekaanisen liikkeen aikaansaamiseksi hyödynnetään yleensä painekelloa. Painekello on pneumaattismekaaninen komponentti, joka muuttaa joustavan kalvon avulla paine-eron muutoksen mekaaniseksi liikkeeksi. (3, s. 13.) (Kuva 2.)



© FreeASEStudyGuides.com

Kuva 2. Pakokaasuahdin, jossa on integroitu hukkaportti. Painekello on ylhäällä oikealla näkyvä mustahopeinen osa. Painekello liikuttaa hukkaportin vipua muttereilla säädettävän tangon välityksellä. (5.)

Hukkaporttien ohjaus on ollut perinteisesti tapana toteuttaa painekelloilla, koska ne ovat yksinkertaisia, helposti sarjatuotettavia ja siksi halpoja. Lisäksi ne sietävät hyvin korkeita lämpötiloja. (Kuva 3.)



Kuva 3. Erillishukkaportin rakenne poikkileikkausprojektiossa. Paine-kello on ylhäällä näkyvä sininen osa. Paine-kellon vastajousi on väritetty vihreällä. (6.)

Yleistyvää teknologiaa ovat suoraan sähkökäyttöiset hukkaporttien ja geometrianmuutosmekanismien käyttölaitteet, joilla on mahdollista yhdessä moottorinohjausyksiköiden kanssa saavuttaa erittäin tarkkaa ahtimen ohjausta (3, s. 30). Lisääntyneen elektroniikan vuoksi niiden toimintavarmuus saattaa äärimmäisissä olosuhteissa olla epävarmaa. Tällaisen teknologian kilpailukykyä suhteessa pneumaattisiin versioihin heikentävät huomattavasti myös sen kalliit kustannukset. Tämän takia pneumaattisilla ahtimenohjausjärjestelmillä on vielä paikkansa autoteollisuudessa ja varsinkin ajoneuvoharrastajien keskuudessa.

Yksinkertaisimmillaan pakokaasuahtimen hukkaportin painekello saa referenssipaineen suoraan imusarjalta tai ahtimen kompressorikotelosta, jolloin ahtopaineen noustessa myös hukkaportti alkaa aukeamaan paineen ylitettyä tietyn raja-arvon, joka määräytyy painekellon kalvon pinta-alan ja vastajousen jousivakioista. Integroiduilla hukkaporteilla varustetuissa ahtimissa hukkaportin käytöstä voidaan mekaanisesti säätää myös painekellon ja hukkaportin vivun asennolla (kuva 2). Joissain painekelloissa jousen esijännitystä voidaan säätää ruuvilla avautumispainearvon säätämiseksi. Toinen yleinen tapa

sen säätämiseen on lisätä referenssipaineletkuun manuaalisesti säädettävä ohivuotoventtiili, joka päästää osan imusarjapaineesta virtaamaan atmosfääriin, jolloin painekellon kalvo saa imusarjapainetta pienemmän paineen ja sitä kautta hukkaportti aukeaa vähemmän. Tällaisen säädön heikkoutena on kuitenkin se, että vastajousen ominaisuuksien takia hukkaportti alkaa joka tapauksessa aukeamaan huomattavasti ennen halutun imusarjapaineen saavuttamista, jolloin pakokaasuahtimella on haluttua enemmän niin kutsuttua heräämisviivettä.

Ottamalla käyttöön hukkaportille takaisinkytketty säätö, voidaan ahtimen viivettä vähentää, jolloin ahtimen mahdollistama hyötysuhdeparannus on käytettävissä suuremman aikaikkunan kiihdytyksiin kuluva ajasta. Etuna on myös se, että painekellon mekaanisia säätöjä moottorillassa ei tarvitse välttämättä suorittaa koskaan esimerkiksi maksimaalisen ahtopaineen arvoa säädettäessä. Samalla painekellon vastajousella voidaan myös saavuttaa elektronisten säätöjen puitteissa laajempi käyttöalue. Nämä toteamukset otettiin huomioon säätöjärjestelmän suunnittelussa.

2.3 Jäähdyttimen puhaltimen ohjaus

Polttomoottorit tuottavat prosessinsa sivutuotteena aina lämpöä, josta osa voidaan johtaa autoissa ohjaamon lämmittämiseen, mutta jäljelle jäävä ylimääräinen lämpökuorma täytyy johtaa ajoneuvoa ympäröivään ilmakehään jäähdytysjärjestelmän kautta, jotta moottori saadaan pysyttelemään hyötysuhteen ja mekaanisen toiminnan kannalta optimaalisella lämpötila-alueella. Nestejäähdytysjärjestelmissä – jotka ovat vuosikymmeniä olleet käytetyin keino liikennepolttomoottorien jäähdytykseen – termostaatti hoitaa mekaanisesti tai sähköisesti ohjattuna jäähdytysnesteen lämpötilan säätelyä rajoittamalla nesteen tilavuusvirtaa jäähdyttimeen, joka puolestaan luovuttaa nesteen lämpöenergiaa sen läpäisevään ilmavirtaan, jollainen syntyy ajoneuvon liikkuessa. Jäähdyttimen toiminta on kuitenkin voimakkaasti riippuvainen sen lävitse virtaavan ilmassan suuruudesta, ja käytännössä erilaisten ajoneuvojen ajoprofiiliin sisältyy paljon tilanteita, joissa moottorin terminen tasapaino vaarantuu, mikäli jäähdyttimen läpäisevää ilmavirtaa ei avusteta tai kokonaan tuoteta erillisellä puhaltimella. (7, s 2.)

Vanhemmissa ajoneuvoissa jäähdyttimen tuuletinpropelli on yleensä kiinnitetty suoraan johonkin moottorin hihnapyöristä, jolloin se saa käyttövoimansa suoraan moottorin

kampiakselilta. Tällaisen ratkaisun hyötynä on yksinkertaisuus ja haittana ylimääräinen ajonaikainen parasiittinen vastusmomentti moottorille, jolloin sen kokonaiskulutus kasvaa. Nykyaikainen ratkaisu on käyttää sähkömoottorilla varustettua puhallinta, joka saa käyttösähkösä ajoneuvon akulta ja laturilta. Tällöin lisjäähdytys on elektroniikan keinoin mahdollista kytkeä käyttöön vain tilanteissa, joissa sitä tarvitaan.

3 Suunnittelun työkalut

Tässä opinnäytetyössä suunniteltavia ja testattavia osa-alueita on useita, minkä takia tarvittiin tietokoneohjelmistoja. Tässä työssä laitteen firmwaren kirjoittamiseen, kehittämiseen ja mikrokontrollerin Flash-ohjelmointiin käytettiin avoimen lähteen Arduino IDE -kehitysympäristöä. Kytkentäkaavioiden ja piirilevyjen suunnitteluun käytettiin ilmaista KiCad-kehitysympäristöä. Koteloinnin suunnitteluun käytettiin oppilaitoksen lisenssin kautta CATIA V5 -ohjelmistoa. 3D-mallinnusten käsittelyyn 3D-tulostusta varten käytettiin Ultimaker Cura -ohjelmistoa.

4 Tekniikka, vaatimusmäärittely ja komponentit

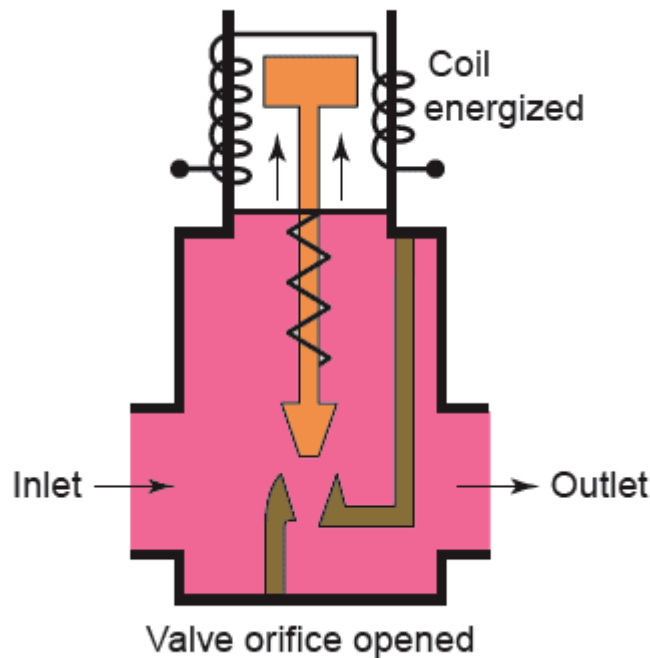
Tässä insinöörityössä suunniteltu laite yhdistää elektroniikan, pneumatiikan, säätötekniikan, mekaniikan sekä käyttöliittymän suunnittelua. Tämän vuoksi huomioon otettavia seikkoja suunnittelussa on myös runsaasti. Tässä luvussa perehdytään tekniikan suunnitteluun, komponentteihin ja vaatimusmäärittelyyn, jonka tavoitteena on antaa suuntaa järjestelmämoduulin suunnitteluun.

Järjestelmään päätettiin sisällyttää seuraavaa:

- käyttöliittymä näyttöineen ja hallintalaitteineen
- digitaalinen suoritin (mikrokontrolleri)
- ajoneuvoympäristössä luotettavaan toimintaan vaadittu oheiselektroniikka
- säätöalgoritmi ja pneumaattinen piiri hukkaportin ohjaukseen
- säätöalgoritmi jäähdyttimen puhaltimen ohjaukseen
- anturisisäätuloja
- toimilaitteulostuloja.

4.1 Pneumatiikka hukkaportin ohjaukseen

Pakokaasuahtimen hukkaportin painekellon ohjauspaineen on syytä olla tarkan säädön aikaansaamiseksi analoginen. Ajoneuvoteollisuudessa tämä on yleensä toteutettu käyttökohteeseen optimoiduilla pneumaattisilla solenoidiventtiileillä, jotka kuitenkin kykenevät käyttäytymään vain binäärisesti, toisin sanoen niin että venttiili on kokonaan auki tai kokonaan kiinni (kuva 4).

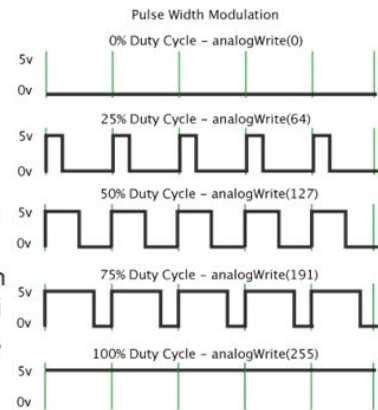


Kuva 4. Yksinkertaistettu normaalisti suljetun solenoidiventtiilin poikkileikkaus (8).

Jotta painekellolle johdettava paine saadaan käyttäytymään näennäisesti analogisesti, voidaan venttiilin sähköiselle kytkentäsignaalille ottaa käyttöön PWM eli pulssinleveysmodulaatio. Pulssinleveysmodulaatio tarkoittaa käytännössä sitä, että vakiotajuudella lähetettävän binäärisignaalin tilojen aikaikkunoita muutetaan (kuva 5). Optimitilanteessa PWM-signaalin taajuutta voitaisiin nostaa reilusti tarkkuuden lisäämiseksi, mutta koska venttiilikaralla sekä paineilmalla on massan takia hitautta, on pulssitetun ohjaussignaalin taajuuden järkevää pysytellä vain muutamissa kymmenissä hertseissä.

PULSSINLEVEYSMODULAATIO (PWM)

- Kun digitaalinen pinni saa arvon nolla, se vastaa jännitteenä nollaa (GND). Digitaalisen pinnin arvo yksi vastaa ko. laitteen lähdejännitettä (V_s+).
- Kun on kyse analogisista pinneistä, jännite voi saada muitakin arvoja. Kun analoginen pinni saa arvon nolla, se vastaa jännitteenä nollaa (GND) ja analogisen pinnin maksimiarvo 255 (tai 1023) vastaa ko. laitteen lähde-jännitettä (V_s+). Koska kyseessä on digitaalinen laitteisto, analogisen arvon tekeminen pitää tehdä hieman kiertotietä. Tämän tekniikan nimi on pulssin leveysmodulaatio (*Pulse-Width Modulation, PWM*). Siinä pinnin jännite (V_s+) on päällä tietyn aikaa, ja pois tietyn aikaa (GND). Kun näitä päällä/pois jaksoja vaihdellaan hyvin tiheästi, saadaan aikaan jännite, joka on keskimäärin se mitä halutaankin. Pinnejä joissa tämä toiminto on saatavilla merkitään Arduinossa ~merkillä.



PWM-esimerkki arvoilla 0-255 (Arduino)

Kuva: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pwm_5steps.gif

Kuva 5. Pulssinleveysmodulaatio yksinkertaisesti selitettynä (9).

Hukkaportin ohjaussolenoidiventtiilin on syytä olla normaalisti auki -tyyppinen, sillä järjestelmän vikaantuessa tai ollessa poissa käytöstä hukkaportti saa ohjauspaineena täyden imusarjapaineen. Mikäli venttiili olisi tyypiltään normaalisti kiinni, ei hukkaportti saisi venttiilin ohjauksen vikaantuessa ollenkaan ohjauspainetta, jolloin riskinä on imusarjapaineen karkaaminen ja mahdollisesti ahdin- tai moottorivaurio.

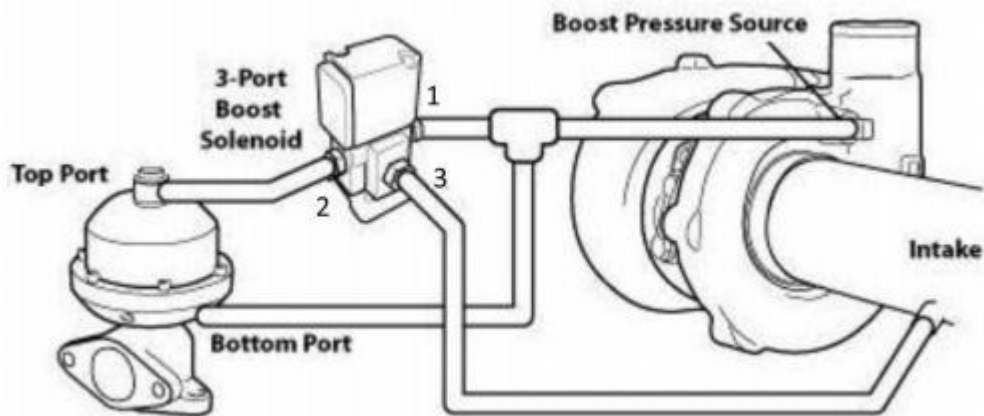
Ajoneuvokäyttöön tarkoitettuja solenoidiventtiileitä on saatavilla helposti hyväkuntoisina esimerkiksi purkuautoista. Tässä työssä käytettiin prototyypivaiheessa VAG-konsernin laajasti käyttämää N75-tyyppistä solenoidiventtiiliä, joka on peräisin Volkswagen Golf Mk4 1.9TDI -henkilöautosta. (Kuva 6.)



Kuva 6. Työn alkuvaiheessa käytetty 1J0906627A-varaosanumeroitu solenoidiventtiili.

N75 on tyypiltään normaalisti auki -venttiili. Sen tavanomainen virrankulutus pysyttelee reilusti alle yhden ampeerin henkilöautotason latausjännitteillä, joten sen ohjaukseen voidaan huoletta käyttää tehokanavatransistoria. Komponentti on suunniteltu käytettäväksi nimellisesti 12 voltin ohjaussignaalilla.

Alla olevassa kuvassa havainnollistetaan pneumaattista kytkentää.



Kuva 7. Kolmeporttisen ahtopaineen ohjaussolenoidin pneumaattinen kytkentä kaksiporttiseen erillishukkaporttiin ja pakokaasuahtimeen. Kolmas portti voidaan kuvasta poiketen jättää kytkemättä ahtimen kompressorin sisääntuloon, jolloin se päästää painetta suoraan atmosfääriin. (10, s. 8.)

4.2 Säätoalgoritmit

Tässä opinnäytetyössä toteutettava järjestelmä on automatisoitu systeemi. Automaatiotekniikan alalla tunnetaan suuri joukko erilaisia säätoalgoritmeja, mutta pääsääntöisesti toteutuksissa käytetään lähinnä muutamaa eri algoritmia, joista tunnetuin lienee PID eri variaatioineen. Ottaen huomioon tämän järjestelmän toimintaympäristön on PID hukkaportin ohjauskokeiluun soveltuvim algoritmi, koska se on yksinkertainen, hyvin dokumentoitu ja siten helposti toteutettavissa ja muokattavissa. Yleensä PID on konfiguroitu siten, että termit laskevat säädön ulostulon asetusarvon ja mittausarvon erotuksella eli error. Jokaiseen algoritmilausekkeen termiin sisältyy erillinen algoritmin säätäjän määrittämä kerroin, jolla voidaan vaikuttaa oleellisesti säädön käyttäytymiseen.

PID-algoritmi sisältää kolme termiä: proportionaalinen, integroiva ja derivoiva:

- Proportionaalinen termi lasketaan suoraan erosuureen e ja kertoimen K_p tulona. Termi on yksinään käytettynä suhteellisen alttis häiriöille sekä asen-tovirheelle. (11, s. 69 ja 76.)
- Integroiva termi nimensä mukaisesti sisältää ajan funktiona muuttuvan erosuureen integraalilausekkeen. Se voidaan ajatella edeltävien erosuu-reen arvojen summana. Integroiva termi vaikuttaa ohjaukseen sekä erosuureen aseman että asemanmuutokseen kuluvan ajan mukaan. (11, s. 72 ja 77.)
- Derivoiva termi sisältää joko erosuuren tai mittaussuureen derivaattalau-sekkeen. Se vaikuttaa ohjaukseen ero- tai mittaussuureen muutosnopeu-den mukaan. (11, s. 73 ja 78.)

Useissa tapauksissa riittävän hyvä säätö saadaan aikaiseksi P- ja I-termeillä (11, s. 72).

Alla ideaalisen rinnakkaisrakenteisen PID-säätimen kaava (11, s. 92).

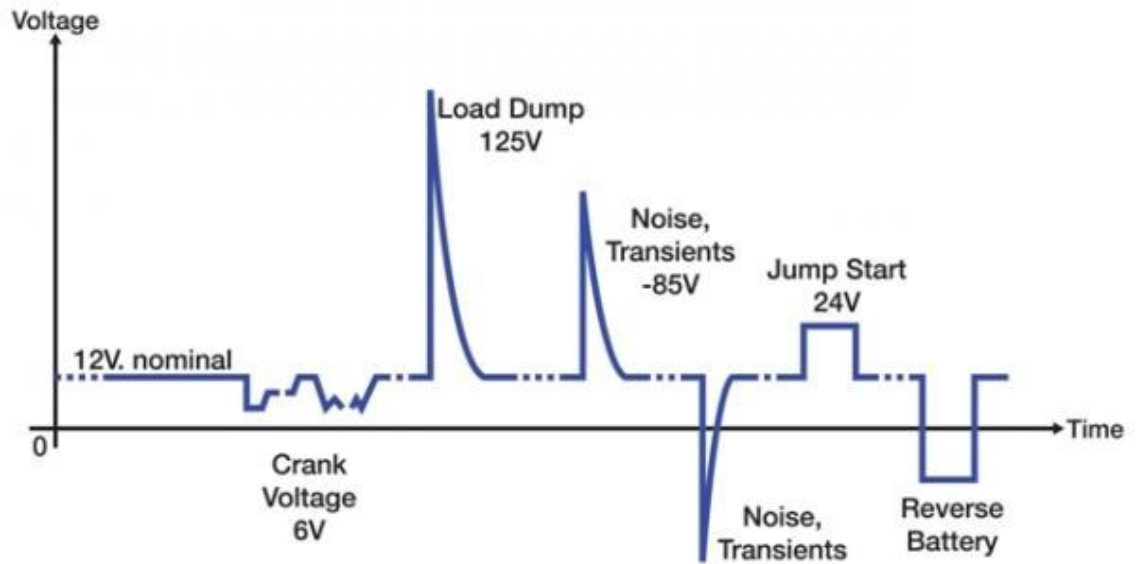
$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt}$$

Jäähdyttimen puhaltimen ohjauksen ei tarvinnut olla erityisen tarkka, joten siinä päätet-tiin hyödyntää yksinkertaista kaksipistealgoritmia: jäähdytysnesteen lämpötilan noustua tiettyyn arvoon puhallin käynnistyy, ja tämän jälkeen sen laskettua tiettyyn arvoon puhal-lin sammuu.

4.3 Elektroniikka

Tässä opinnäytetyössä pääpaino on elektroniikan suunnittelussa.

Ajoneuvojen sähköjärjestelmissä, joissa sähköenergian varastona toimii suuren kapasi-teetin kemiallinen akku, ja joissa on useita epäsäännöllisesti toimivia suuria induktiivisia kuormittajia, on varsinkin puolijohdekomponenttien näkökulmasta haastavat olosuhteet (kuva 8).



Kuva 8. Akkujännitteen erilaiset profiilit 12 voltin järjestelmällä varustetussa ajoneuvossa (12).

Suunniteltaessa elektroniikkaa ajoneuvoympäristöihin täytyy ottaa huomioon seuraavia erikoistilanteita:

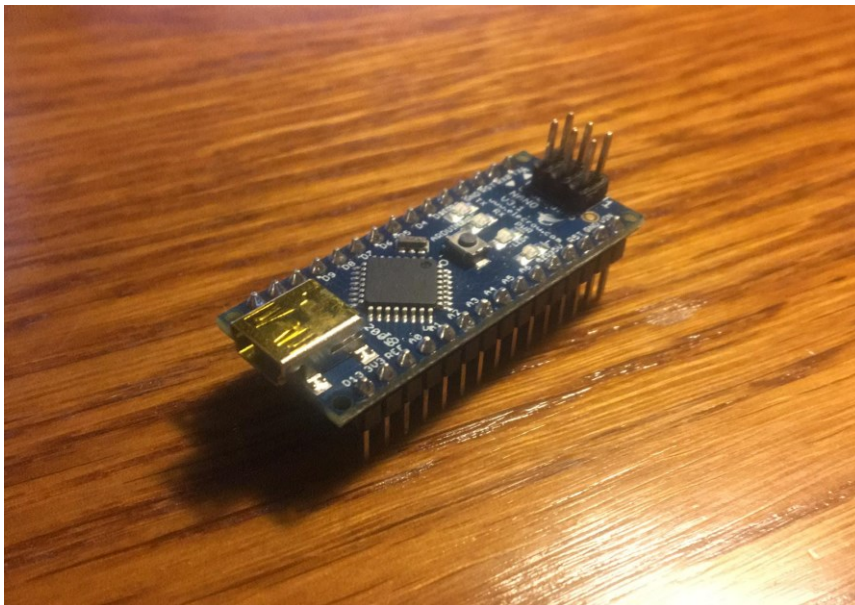
- jännitepiikit, joita syntyy induktiivisten kuormien poistuessa lähdejänniteverkosta
- jännitteenalenemat, joita syntyy esimerkiksi kylmäkäynnistystilanteessa, huonokuntoisella akulla tai äkillisessä kuormitustilanteessa
- käänteinen potentiaali, joka voi syntyä virheasennuksissa
- oikosulku, jonka voi aiheuttaa vikaantunut johtosarja
- ylijännite, joka ilmenee, jos 12 voltin järjestelmällä varustetulle ajoneuvolle annetaan apuvirtaa 24 voltin järjestelmällä varustetulla ajoneuvolla
- sykkivä potentiaali, jonka aiheuttaa vaihtovirtageneraattorin tuoton tasa-suuntaus
- suuresti vaihtelevat ympäristöolosuhteet: lämpötilat, kosteus, värinä, pöly, jne.

Tässä luvussa tarkastellaan järjestelmän elektroniikan eri osa-alueita ottaen huomioon ajoneuvoympäristön erikoisolosuhteet.

4.3.1 Ohjelmoitava suoritin

Säätöjärjestelmien ytimenä on nykyisin lähes aina uudelleenohjelmoitava toimilaite, joka ottaa vastaan signaaleja ja lähettää signaaleja, tai vain lähettää signaaleja, sille ohjelmoitujen ohjeiden perusteella, ja toteuttaa siten järjestelmän ohjausta. Tämä toimilaite voi olla käyttökohteeseen täysin suunniteltu tai yleismallinen komponentti, kuten PLC, PC, MCU tai erillisistä elektronisista komponenteista koottu yksikkö.

Ottaen huomioon järjestelmälle osoitetut toiveet, valikoitui suorittimeksi suositun avoimen lähteen Arduino-konseptin Nano-formaatin kehitysalusta (kuva 9).



Kuva 9. Kiinalaisvalmisteinen Arduino Nano -klooni kuvattuna päältä päin. PCB:n alla näkyvät siihen juotetut piikkirimat.

Arduino Nano on käytännössä pienelle PCB:lle eli tulostetulle piirilevyllä juottamalla koottu kokonaisuus, niin kutsuttu kehitysalusta, joka sisältää useimmissa tapauksissa 8-bittisen Atmel ATmega328P -mikrokontrollerin, kaksi jänniteregulaattoria, USB to Serial -kommunikaatiokonvertterin, 22 ohjelmoitavaa I/O-napaa, USB 2.0 Mini B -tyyppisen naarasliittimen ohjelmointia tai käyttöjännitettä varten, sekä näihin liittyviä oheiskomponentteja. ATmega328P:n I/O-nastat kykenevät toimittamaan erilaisia tehtäviä, ja osa niistä kykenee esimerkiksi I2C- ja SPI-väylätiedonsiirtoon. Mikrokontrolleri on monipuolinen digitaalielektronikan IC-komponentti, joka prosessoriytimiensä lukumäärän

puitteissa ilman käyttöjärjestelmää suorittaa yhtä tai useampaa binäärikielistä komento-riviä kerrallaan, ja toteuttaa sen mukaan toiminnallisuuksia sisään- ja ulostulokanavien sekä väyläyhteyksien kautta. Atmel ATmega328P ja useat muut AVR-arkkitehtuuria edustavat mikrokontrollerit ovat ajoneuvokäytössä sangen yleisiä komponentteja, ne muun muassa sietävät jännitevaihteluita ja staattisia sähköpurkauksia hyvin (13).

Kun Arduino Nano -kehitysalustalle tuodaan sille soveltuva käyttöjännite, se alkaa auto-maattisesti heti käymään läpi mikrokontrollerin Flash-ohjelmamuistista löytyviä komen-torivejä, ja se toistaa ohjelman mukaisia ohjeita niin kauan, kun käyttöjännitettä on saa-tavilla. Käyttäjän on mahdollista ohjelmoida esimerkiksi erilaisia painikkeita ja antureita kehitysalustan käytöksen ohjaamiseen.

Kehitysalustaan kytketyt ulkoiset piirit saattavat joskus virrankulutuksensa takia häiritä sen ohjelmointitapahtumaa, minkä vuoksi sen on järkevää olla irrotettavissa muista pii-reistä eli modulaarinen. Myös kehitysalustan mahdollisesti vikaantuessa sen olisi hyvä olla vaihdettavissa helposti. Nämä seikat huomioiden kehitysalusta kiinnittyä laitteen pääpiirilevyyden piikkirimoilla.

Kehitysalustat yhdessä Arduino IDE -kehitysympäristön kanssa ovat viimeisen kymme-nen vuoden aikana tehneet mikrokontrollerien käytöstä helposti lähestyttävää ja halpaa. Kehitysalustojen ympärille onkin kehittynyt täysin uusi ala, ja niillä on miljoonia harrasta-jia ympäri maailman. Elektroniikka-alan ammattilaiset hyödyntävät usein kehitysalustoja tuotekehityksessä.

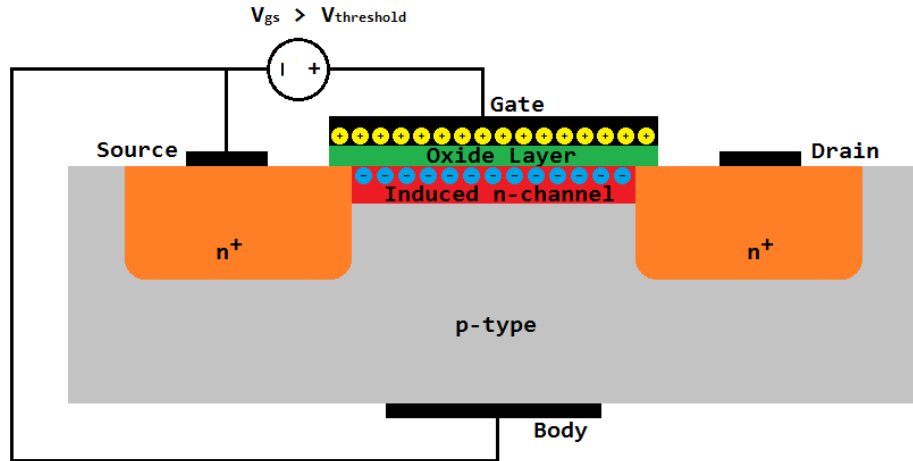
4.3.2 Solenoidiventtiilin ohjauspiiri

Kuten luvussa 4.1 todettiin, on solenoidiventtiilin ohjaus tarkoituksenmukaista toteuttaa kanavatransistorilla. Toinen mahdollinen komponentti PWM-signaalin tuottoon samassa sovelluksessa voisi olla sähkömekaaninen rele, mutta sillä on tehotransistoriin verrattuna heikkouksia:

- suurempi fyysinen koko
- mekaanisten osien takia enemmän hitautta ja vikaherkkyyttä
- mekaanisten osien takia lyhyempi käyttöikä, kun arvioidaan komponentin eliniän aikaisten kytkeytymistapahtumien lukumäärää
- mekaaninen meluhaitta.

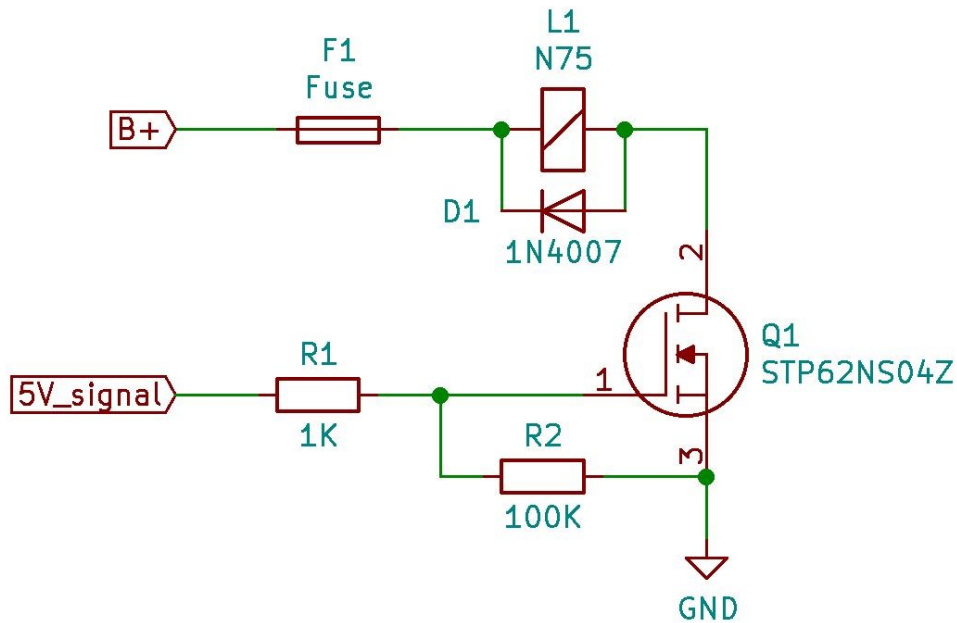
Voidaan siis yleistäen todeta, että sähkömekaaniset releet soveltuvat paremmin ajallisesti pitkäkestoisempiin ja suuremman jatkuvan sähkövirran kytkeytymistapahtumiin sekä vaihtosähkön kytkemiseen.

Kanavatransistori eli MOSFET on aktiivinen puolijohdekomponentti, jossa varauksenkuljettajien virtaa puolijohdekanavassa ohjataan sähkökentän voimakkuudella (kuva 10). MOSFET voi toimia sekä analogisena että digitaalisena komponenttina, joten se voi toimia vahvistimena tai kytkimenä. Ajoneuvoympäristössä MOSFETien merkittävimpiä rajoitteita on niiden käyttölämpötila-alue sekä herkkyys jännitepiikeille. MOSFETien etuja ovat muun muassa halpa hinta, saatavuus, pieni koko sekä suuri kytkentätaajuus, joiden puolesta se soveltuu mainiosti solenoidin ohjauskomponentiksi. MOSFETit soveltuvat käytännössä vain tasavirran vahvistamiseen ja kytkemiseen.



Kuva 10. N-enhancement -tyyppisen MOSFETin yksinkertaistettu poikkileikkaus (14).

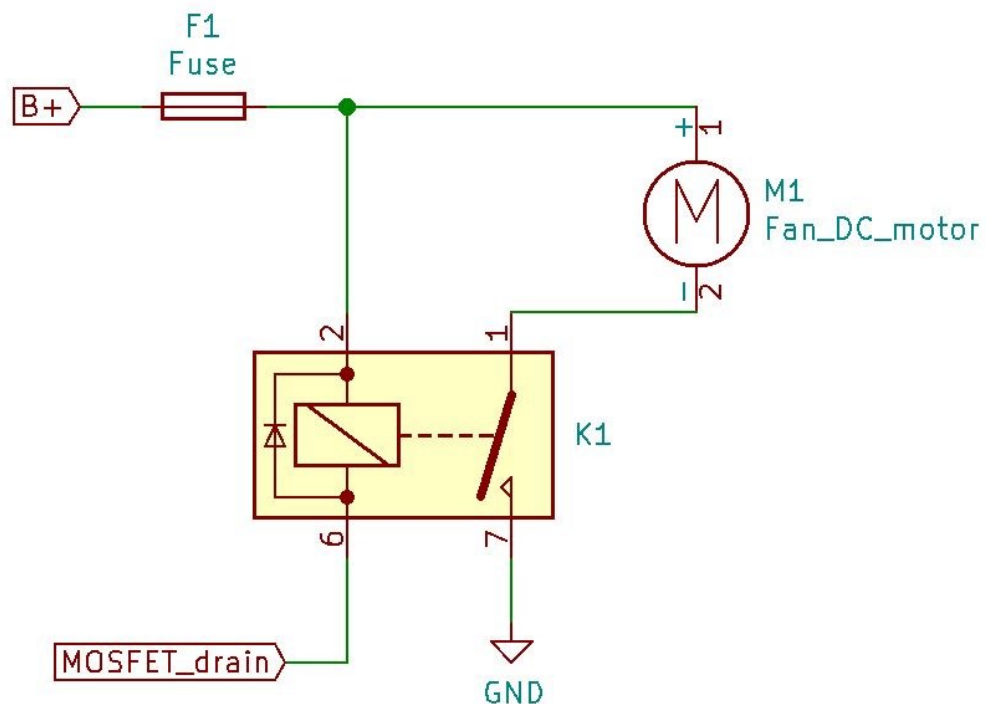
Kanavatransistorin mallia valitessa selvitettiin tunnetuimpien valmistajien ajoneuvokäyttöön tarkoitettuja mallistoja. Malliksi valikoitui N-MOSFET-tyyppinen STMicroelectronicsin STP62NS04Z, jolle erityistä on sen sourcen linkitys drainiin sarjaankytkettyjen vastakkaisten zenerdiodien kautta, mikä suojaa puolijohdemateriaaleja ylijännitteiltä (15, s. 1). Kuten useimmat elektroniikan aktiivikomponentit, vaatii myös valittu MOSFET ohespiirin halutunlaisen toiminnan mahdollistamiseksi. (Kuva 11.)



Kuva 11. Valitun FETin ja solenoidiventtiilin piirikaavio oheiskomponentteineen. Q1 = FET, R1 = signaalivirran rajoitusvastus, R2 = hilan alasetovastus, L1 = N75, B+ = akkujännite. Flyback-diodi D1 päätettiin kytkeä piiriin, mikäli kokoonpanoon päätyvä N75 ei sellaista jo sisällä.

4.3.3 Jäähdyttimen puhaltimen piiri

Ajoneuvokäyttöön tarkoitettujen jäähdytinpuhaltimien nimellisteho voi olla jopa satoja watteja, jolloin virrankulutus 12 voltin nimellisjännitteellä voi olla kymmeniä ampeereja. Tästä syystä vaivattomin ja kustannustehokkain ratkaisu puhaltimen sähköiseksi kytkemiseksi on yleismallinen ajoneuvorele, joita saa edullisesti erisuuruisilla nimellisvirrankes-toilla. Kyseisten releiden herätepiiri käyttää 12 voltin nimellisjännitettä, joten niiden ohjaukseen suoraan mikrokontrollerin I/O-nastasta ei onnistu, joten kytkentäkaavioon lisättiin kappaleessa 4.3.2 esitetyn MOSFET-piirin kanssa identtinen piiri. Kun mikrokontrolleri kytkee MOSFETin johtavaan tilaan, se maadoittaa releen herätepiiriin sähkömagneetin, jolloin releen kytkin sulkeutuu ja tuuletin käynnistyy. (Kuva 12.)

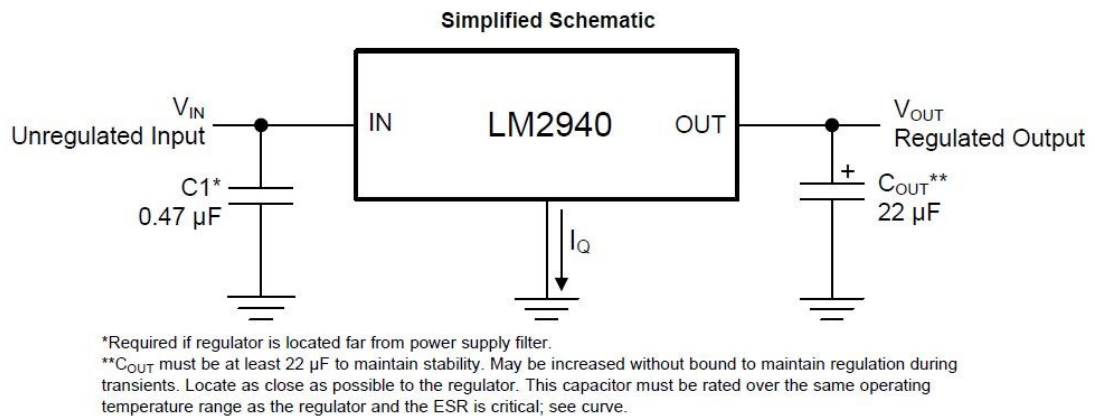


Kuva 12. Puhallinjähdyttimen piirikaavio. Releen sähkömagneetin induktiivisen käyttäytymisen vuoksi päätettiin käyttää relettä, jossa on sisäänrakennettu flyback-diodi.

4.3.4 Jänniteregulointi

Useimpien järjestelmään valittujen elektronisten komponenttien nimellinen käyttöjännite on +5 VDC. Puolijohdekomponentit, kuten MCU, vaativat toimiakseen luotettavasti mahdollisimman tasaista ja häiriötöntä tasajännitettä. Ajoneuvon sähköjärjestelmän nimellinen jännitetaso on kuitenkin 12 voltia, ja kuten luvussa 3.3 todettiin, voi jännitteen profiili olla hyvinkin vaihteleva. Ratkaisuksi jännitteen alentamiseen ja stabiloimiseen järjestelmään päätettiin sisällyttää jänniteregulaattori. Myös sen valintakriteereissä otettiin huomioon eri valmistajien ajoneuvoympäristöön spesifioidut mallit. Järjestelmään valittujen +5 VDC -komponenttien yhteisen virrankulutuksen arvioitiin pysyttelevän reilusti alle yhden ampeerin, mutta toisaalta ylityttäminen ei ole mahdollisia tulevia komponenttilisäyksiä ajatellen lainkaan haitaksi. Komponentiksi valikoitui Texas Instrumentsin LM2940T-5.0 -mallinen jänniteregulaattori. Valikoitu komponentti on tyypiltään LDO-lineaariregulaattori, joille tyypillistä on suurehko hukkalämmön tuotto riippuen tulo- ja lähtöjännitteiden erosta. Täten komponenttiin on järkevää lisätä alumiininen lämpösiiili

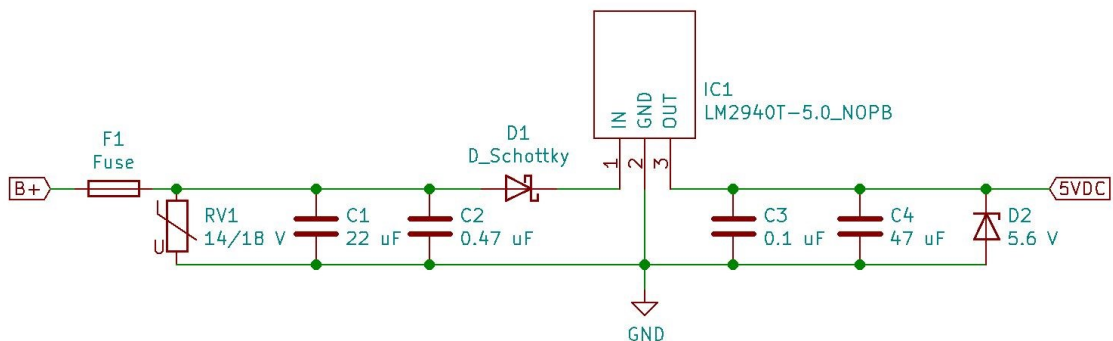
ylimääräisen lämmön pois johtamiseen. Regulaattorin oheispiirin suunnitteluun saatiin viitteitä komponentin valmistajan toimittamalta datalehdeltä (16, s. 15). (Kuva 13.)



Kuva 13. Kuvakaappaus komponentin valmistajan datalehdellä suositellusta regulaattorin oheispiiristä (16, s. 15).

Kondensaattori on energiaa sisäiseen sähkökenttäänsä varastoiva komponentti, joka pystyy varautumaan ja purkautumaan erittäin nopeasti. Kondensaattori niin sanotusti pyrkii pitämään napojensa välisen potentiaalieron mahdollisimman pienenä. Jänniteregulaattorin datalehdessä ilmenee, että sisääntulon kondensaattori C1 tarvitaan, mikäli regulaattori on kaukana jännitelähteestä. Tässä tapauksessa jännitelähteenä toimii ajoneuvon akku tai vaihtovirtalaturi moottorin käydessä, ja todennäköisesti regulaattorin ja näiden väliin johdinta tulee vähintään useita kymmeniä senttimetrejä, joten C1 sisällytetään piiriin suositellulla kapasitanssin arvolla. Kondensaattori C_{out} voi olla valmistajan mukaan kapasitanssiltaan suurempi, kuin kuvassa 10 ehdotettu 22 uF, joten sen arvoksi mielivaltaisesti valittiin noin tuplasti suurempi 47 uF. Tämän kokoinen kondensaattori ei välttämättä kykene tasoittamaan riittävästi nopeimpia regulaattorin ulostulojännitteen vaihteluita eli rippeitä, joten kondensaattorin C_{out} rinnalle mahdollisimman lähelle regulaattoria kytketään kapasitanssiarvoltaan yleisesti käytetty 0,1 mikrofaradin kondensaattori. Kuten aikaisemmin todettu, on jännitteen profiili ajoneuvoympäristössä hyvinkin moninainen, minkä vuoksi tähän mennessä esitetyt komponentit eivät vielä riitä, vaikka komponentilla onkin sisäiset suojaustoiminnot ylijännitteelle, -virralle ja -lämmölle (16, s. 13).

Valitun regulaattorin absoluuttinen maksimaalinen sisääntulojännite on valmistajan mukaan 60 V ja turvallinen maksimijännite 26 V. Tämä saattaa tietyissä tilanteissa ylittyä, joten sisääntulosolmuun kytketään varmuussyistä varistori, eli vastus, jonka resistanssi määräytyy sen napojen potentiaalieron mukaan. Kun jännite sisääntulosolmussa ylittää varistorin nimellisarvon, alkaa varistorin läpäisevän virran arvo nousta voimakkaasti, jolloin ylimääräinen potentiaali pääsee virtaamaan varistorin läpi maihin. Johtosarjoihin mahdollisesti asennusvirheen tai kulumisen takia muodostuvat oikosulut otetaan huomioon sulakkeella. Päinvastaisen napaisuuden tilanteessa matalan jännitepudotuksen Schottky-diodi estää virrankulun piirissä väärään suuntaan. Mikäli jänniteregulaattori viikaantuu ja esimerkiksi sen ulostulojännite alkaa nousemaan yli nimellisen viiden voltin, päästää ulostulosolmuun kytketty 5,6 voltin zenerdiodi ylimääräisen potentiaalivirtaamaan maihin, jolloin viiden voltin piiriin kytketyt puolijohdekomponentit todennäköisesti eivät vaurioidu. (Kuva 13.)



Kuva 14. Jänniteregulaattoriipiiri kokonaisuudessaan.

Datalehdessä kävi ilmi, että regulaattoriin tulevien kondensaattorien ESR-arvon pitää asettua tietyille alueelle, jotta regulaattorin toiminta olisi mahdollisimman stabiilia (kuva 15). Tästä syystä piirissä tullaan käyttämään tantaalikondensaattoreita, joilla on tyypillisesti matala ESR. Rinnankytkettyjen kondensaattoreiden ESR lasketaan yksittäisten arvojen käänteislukujen summan käänteislukuna. (16, s. 16.)

Jotta myös sisääntulossa kondensaattorien ESR-arvo asettuisi halutulle välille, kytketään datalehden suositteleman kondensaattorin rinnalle 22 mikrofardin kondensaattori, joka toimii myös pienenä energiavarastona. (Kuva 15.)

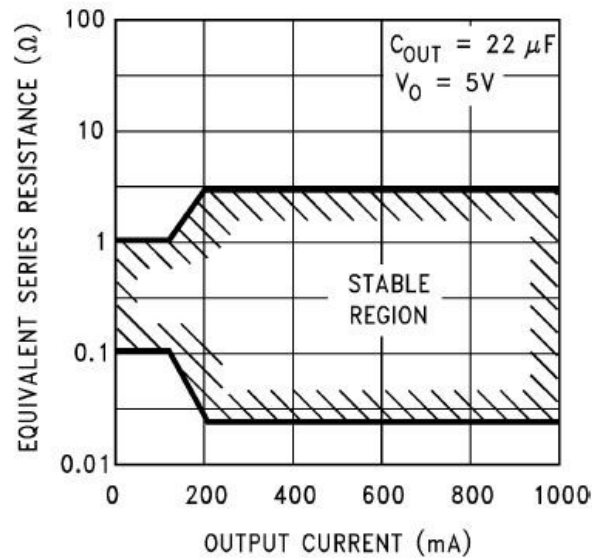


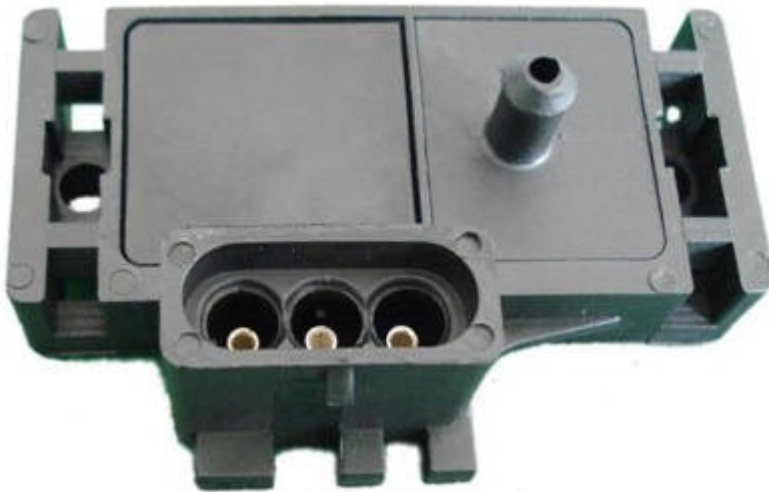
Figure 27. Output Capacitor ESR Limits

Kuva 15. Jänniteregulaattorin ulostulonapaan kytkettyjen kondensaattoreiden optimaalisen ESR-arvon yhteys ulosmenovirtaan (16, s. 16).

4.3.5 Paineanturi

Järjestelmässä hyödynnettävä säätöalgoritmi vaatii toimiakseen takaisinkytkennän, eli palautetta siitä, miten sen ohjaama fyysikaalinen suure muuttuu. Koska säätölogiikalla haluttiin ohjata ja visuaalisesti tarkastella imusarjapaineen nousua, otettiin järjestelmään käyttöön paineanturi.

Ajoneuvokäyttöön tarkoitettuja imusarjapaineantureita on saatavilla usean tyyppisiä. Valinnassa huomioitavia seikkoja ovat paineanturin mittausalue, käyttöjännite, ulostulosignaalin tyyppi, fyysinen koko sekä hankintahinta. Näiden puitteissa kokoonpanoon valittiin yleismallinen ”Delco 3 Bar map sensor”, jonka ulostulosignaalina on analoginen jännite, ja joka nimensä mukaisesti pystyy mittaamaan 3 baarin absoluuttista painetta, eli noin 2 baarin ahtopainetta. Tarvittavat tiedot valitun anturin kalibrointiin haettiin erään antureita myyvän liikkeen verkkosivustolta. (Kuva 16.)

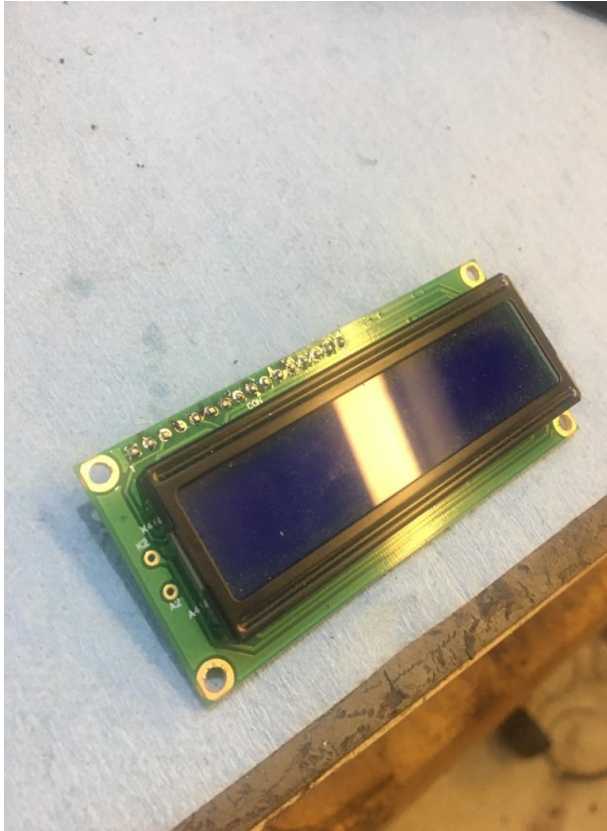


Kuva 16. Kokoonpanoon valittu paineanturi.

4.3.6 Käyttöliittymän komponentit

Käyttöliittymä toiminnallisuuden valitsemiseen, parametrien muuttamiseen sekä visuaalinen palaute käyttäjälle ovat tämän tyyppisessä projektissa helppokäyttöisyyden vuoksi välttämättömyyksiä.

Käyttöliittymän näytölle järkevimmäksi ratkaisuksi nähtiin erittäin yleinen kaksirivinen ja 16-sarakkeinen LCD-moduuli varustettuna I2C-väylälaajennusmoduulilla sen helppokäyttöisyyden ja edullisen hinnan vuoksi (kuva 17).



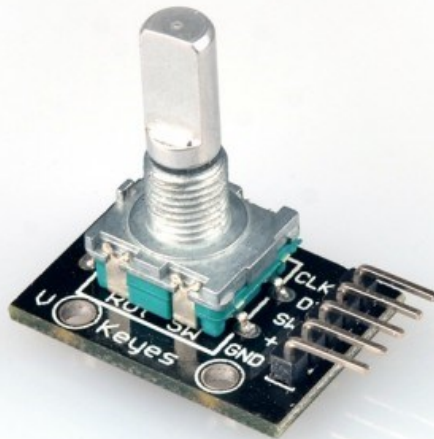
Kuva 17. LCD-moduuli.

Reaaliaikaisen nopeasti muuttuvan datan esittämiseen nestekidenäyttö soveltuu heikosti kiteiden hitauden vuoksi, toisin sanoen yllä esitetyn näytön nopea päivittäminen on käytännössä havaittu silmälle epämiellyttäväksi. Tämän takia järjestelmän komponenttistaan lisättiin OLED-tekniologialla toteutettu pienikokoinen 128x32-pikselinen I2C-väyläyhteydellä varustettu näyttö muun muassa imusarjapaineen esittämistä varten (kuva 18).



Kuva 18. 0,91" OLED-näyttö.

Käyttöliittymä vaatii luonnollisesti osakseen myös toimilaitteen, jolla käyttäjä voi antaa sille syötteitä. Aikaisempiin kokemuksiin vedoten tätä roolia suorittavaksi komponentiksi valikoitui kiertoenkooderin ja mekaanisen painikkeen sisältävä moduuli (kuva 19), joka ohjelmoinnin keinoin saadaan toimimaan käyttöliittymän loogisena monivalitsimena.

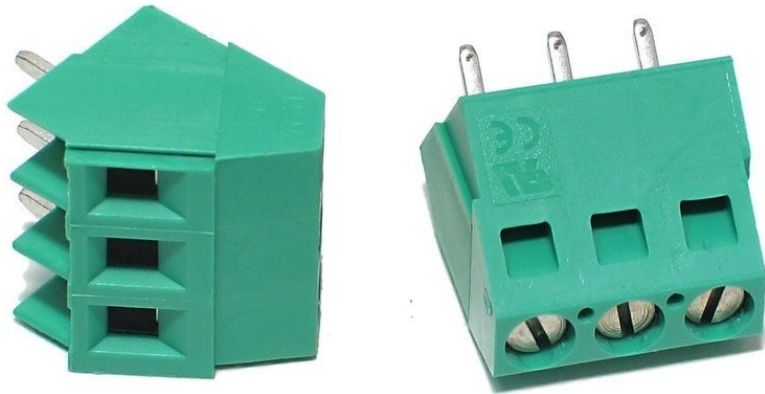


Kuva 19. Keysight KY040 -tyyppinen kiertoenkooderimoduuli.

4.3.7 Muut komponentit

Ahtopaineensäätömoduulin ja siihen liittyvien johdinten kytkentöihin soveltuviksi komponenteiksi todettiin aikaisempiin kokemuksiin pohjautuen yleismalliset läpijuotettavat ruuviterminaaliliittimet (kuva 20).

Jotta ahtopaineensäätöjärjestelmä saadaan käyttäjän niin halutessa kytkettyä pois päältä, sisällytetään siihen käyttöliittymän komponenttien läheisyyteen mekaaninen kaksiasentoinen ON/OFF -kytkin.



Kuva 20. Ruuviterminaaliliitin.

5 Ohjelmointi

Järjestelmän hardwaren määrittämisen oltua riittävällä ja uskottavalla tasolla, aloitettiin mikrokontrollerin firmwaren kehittäminen Arduino IDE:ssä C/C++ -ohjelmointikielellä.

Atmel AVR -arkkitehtuurin mukaisille mikrokontrollereille on saatavilla huomattavan suuri määrä erilaisia C/C++ -kielisiä kirjastoja, jotka nopeuttavat firmwaren kehitystä huomattavasti. Tässä työssä hyödynnettiin useita kirjastoja.

Firmwaren rakenne voidaan jakaa suhteellisen selkeästi kolmeen osaan:

- käyttöliittymä valikkorakenteineen
- anturisisäntulot
- ohjausulosmenot.

Valitut käyttöliittymän komponentit rajasivat valikkorakenteen kehittämistä. Käyttöliittymälle määritettiin seuraavia toiveita:

- suurimman saavutetun ahtopaineen lukeminen tarvittaessa
- open-loop ja closed-loop -toiminnot
- valikko, jossa ainakin parametrien säätö ja tallennus sekä toiminnon vaihto
- LCD:n taustavalon sammuus tarvittaessa
- tallennettujen parametrien esittäminen laitteen käynnistyksen yhteydessä.

Open-loop-säädöllä määritetään kiinteä pulssinleveys ahtimen hukkaportin solenoidiventtiilille, millä ahtimen tuottamaan huippupainetta saadaan muutettua. Sen sijaan closed-loop-säädön PID-algoritmilla lähdettiin tavoittelemaan pakokaasuahtimen nopeampaa heräämistä.

Ohjelmoidun valikkorakenteen toimintaperiaate on seuraava: Enkooderia pyörittämällä eli sen asentoa muuttamalla liikutaan valikossa ja muutetaan parametrejä. Enkooderin asennonmuutoksia tallennetaan muuttujaan, joka määrää kursorin sijainnin kussakin alavalikossa. Enkooderin painikkeen painallus siirtää käyttäjän kursorin osoittamaan valikon kohtaan tai poistuu siitä ja tallentaa valikon aseman muuttujaan. Jokainen valikon mahdollinen näkymä on tallennettu ohjelmamuistiin, ja suoritin hakee sieltä niitä LCD-näytölle enkooderin asennon, valikon aseman ja painikkeen painallusten perusteella. LCD:lle tulostetaan aina, kun enkooderin asema muuttuu, tai painiketta painetaan, muussa tapauksessa LCD:n näkymä pysyy stabiilina. Ohjelman pääfunktio sisältää valikkorakenteen ja se kutsuu jokaisella prosessorikierrolla anturisisäätulojen ja ohjausulostulojen funktioita. (Kuva 21.)

```

File Edit Sketch Tools Help
PertsBoost Interrupt_Junction Loop Loop_tab fanControl readPressure srlenodControl
259 counter = PWMval;
260 Print=0; //When pushed is 0 the program returns to printing
261 delay(500);
262 }
263
264 if(page==1) //Switch mode
265 {
266 pwmMenu = !pwmMenu;
267 EEPROM_writeAnything(100, pwmMenu);
268 menu=0;
269 counter = PWMval;
270 Print=0;
271 delay(500);
272 }
273
274 if(page==2) //PWM set
275 {
276 menu=2;
277 counter=0;
278 Print=1;
279 EEPROM_readAnything(20, PWMval);
280 counter=PWMval;
281 delay(500);
282 }
283
284 if(page==3) //Boost target set
285 {
286 menu=3;
287 counter=0;
288 Print=1;
289 EEPROM_readAnything(0, boostTarget);
290 counter=boostTarget*20;
291 delay(500);
292 }
293

```

Kuva 21. Näkymää valikkorakenteeseen. Muuttujat menu, pwmMenu, page ja counter ovat valikon asemaa määrittäviä muuttujia.

PID-algoritmi otettiin firmwareassa käyttöön suosituilla Brett Beauregard'n Arduino PID -kirjastolla. Kirjasto sisältää useita oleellisia ohjelmitavia parametreja algoritmin säätöön, muun muassa P-, I-, ja D-parametrit, päivitysjaksonaika, ulostulon rajat, säädön suunta, P-on-error/P-on-measurement, mode: AUTO/MANUAL sekä useita muita. Firmwaren alustuksessa määritettiin käyttöön kaikki edellä erikseen mainitut. Käyttöliittymällä muutettavissa ovat PID-parametrit ja ulostulon rajat. Mikäli muita parametreja täytyy muuttaa, se tehdään muuttamalla firmwarea ja uudelleenohjelmoimalla mikrokontrolleri. Käytetty kirjasto laskee P-on-error -moodissa kaavalla, joka on esitetty luvussa 4.2.

Paineanturin lukemaa päätettiin suodattaa säätöalgoritmien luotettavamman toiminnan varmistamiseksi.

```

overP = absP-atmosphericP; //Absolute pressure to overpressure

if (Pcounter < 10){
    aveP += overP;
    Pcounter++;
}
else {
    aveP /= Pcounter+1;
    if (aveP>maxBoost) maxBoost = aveP;
    pidP = aveP*multiplier;
    oledP = aveP;
    aveP, Pcounter = 0;
}

```

Esimerkkikoodi 1. Paineanturin mittaussuureiden yksinkertainen suodatus ottamalla kymmenestä paineen mittauksesta keskiarvo.

Firmwarea kehitettiin käytännössä koko opinnäytetyöprosessin ajan, ja sen kehittäminen jatkuu myös opinnäytetyöprosessin jälkeen.

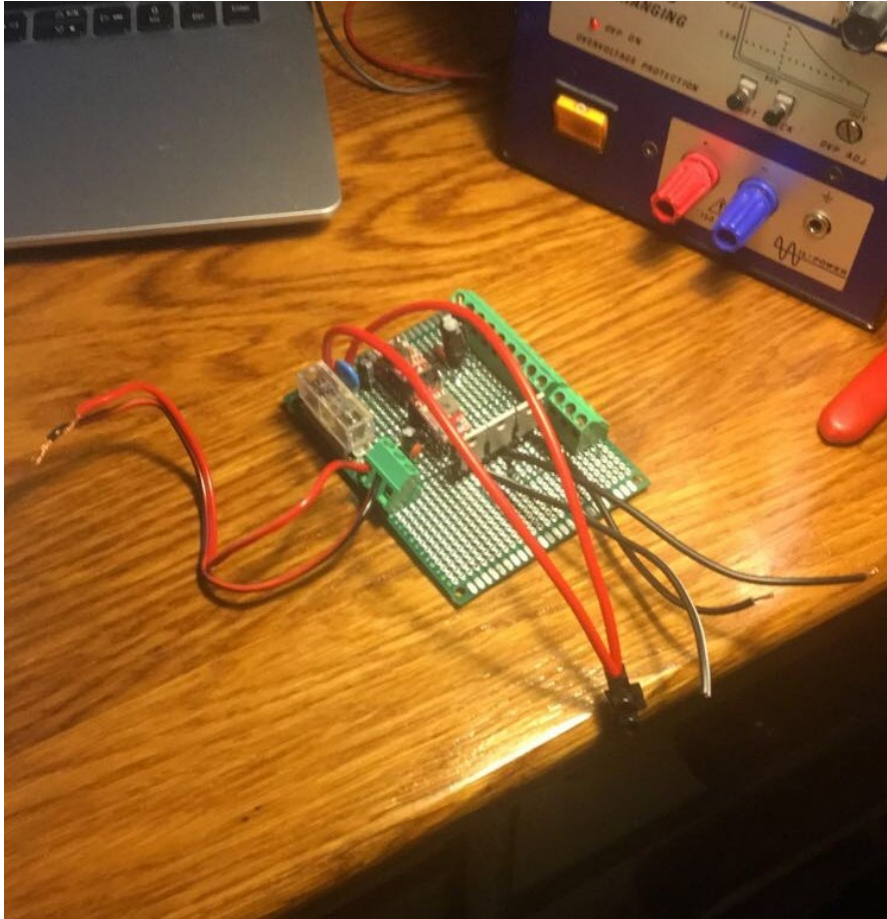
6 Prototyyppi

Tuotekehitys on yleensä monivaiheinen prosessi, johon kuuluu vaatimusmäärittelyn ja suunnittelun lisäksi valittujen tekniikoiden ja komponenttien testausta sekä monia muita osa-alueita kartoitettavaksi. Tässä luvussa kuvataan aiemmissa luvuissa esitettyjen tekniikoiden käytännön kokeiluja sekä järjestelmän firmwarent kehittämistä prototyypin muodossa.

6.1 Prototyyppimoduuli

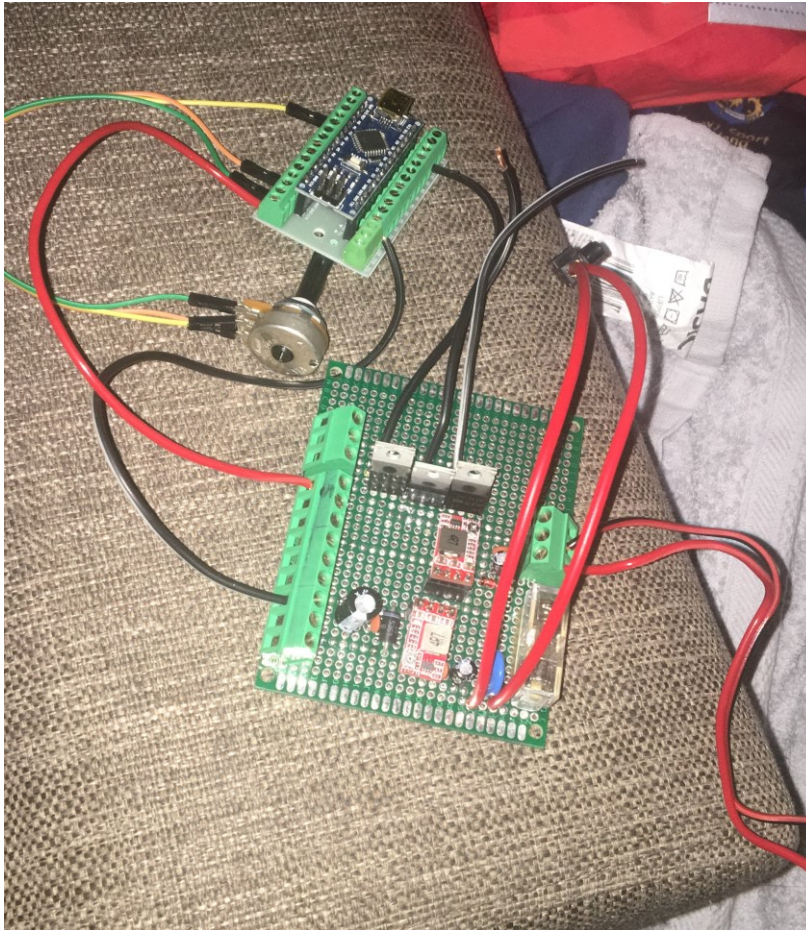
Aikaisemmin esitettyjen tekniikoiden toimintaa käytännössä haluttiin kokeilla samankaltaisilla, mutta heti saatavilla olevilla komponenteilla järjestelmän peruseriaatteen toimivuuden selvittämiseksi.

Yleinen tapa elektroniikkamoduulien tuotekehityksessä on toteuttaa ensin piirilevyn prototyyppi niin kutsuttuun yleiskytkentälevyyn komponentteja juottamalla. Tässäkin työssä toimittiin kyseisellä tavalla. (Kuva 22.)



Kuva 22. Prototyypimoduuli koottuna.

Prototyyppi sisälsi kokeiluluontoisesti 5 VDC ja 12 VDC -jännitteenalentajamoduulit ja kolme MOSFET-ohjauspiiriä sekä tarvittavan määrän ruuviterminaleja johdinkytöntöjä varten. Järjestelmään kuuluva kehitysalusta asennettiin jälkimarkkinoilta hankittuun ruuviterminaalimoduuliin ja se yhdistettiin prototyypimoduuliin suojaetuilla kuparijohtimilla (kuva 23).



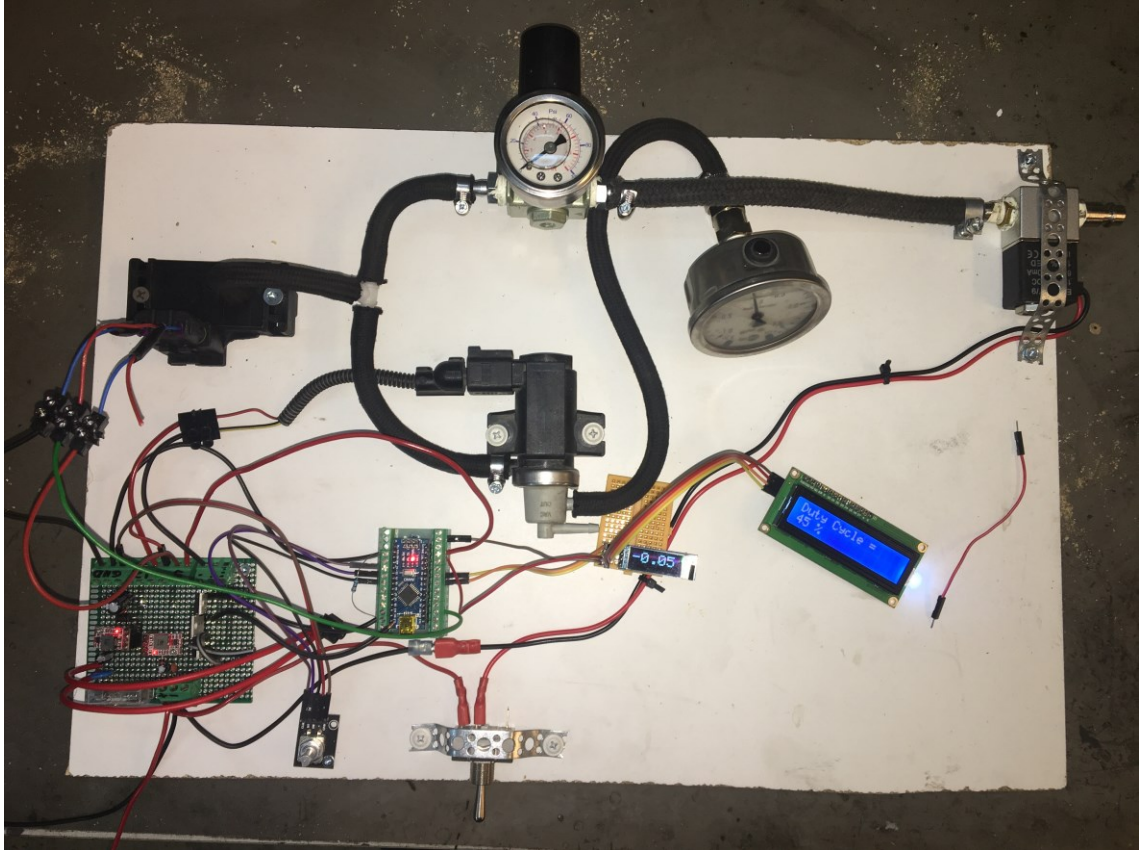
Kuva 23. Järjestelmän elektronikkamoduulin prototyyppi. Taaempaa Arduino Nano -kehitysalusta ruuviterminaalimoduulissa.

6.2 Prototyypin ohjelmointi

Järjestelmälle luotu firmware ajettiin kehitysalustan mikrokontrollerin ohjelmamuistiin Arduino IDE:llä USB-kaapelin välityksellä. Prototyypin testauksen aikana firmwarea päivitettiin useita kertoja.

6.3 Testaus

Järjestelmän testausta varten rakennettiin pneumaattinen testipenkki, jotta varsinkin solenoidiventtiilin ohjausta ja sen pneumaattista käytöstä päästiin kokeilemaan realistisesti (kuva 24).



Kuva 24. Pneumaattinen testipenkki komponentteineen sekä järjestelmän prototyyppi.

Testipenkin alustaksi otettiin sopiva pala puulastulevyä ja siihen kiinnitettiin puuruuveilla kiinni suurin osa komponenteista. Testipenkin tarvitseman paineen tuottaa autotalli-kompressori. Testipenkki sisältää ahtopaineensäädinjärjestelmän lisäksi solenoidiventtiilin paineen katkaisua varten, mittarillisen paineregulaattorin imusarjapaineen nousun simulointia varten, sekä erillisen painemittarin, joka kuvastaa solenoidiventtiilin kautta hukkaportille ohjattavaa painetta.

Testipenkillä saatiin viitteitä PID-algoritmin säätöön. Oleellinen huomio oli se, että algoritmin integroiva termi I vie ennen pitkää ulostulon arvon ylärajaan, kun sisääntulo eli paineanturin mittaama imusarjapaine pysyttelee kaukana säätöarvosta. Käytännössä tällainen tilanne syntyy aina, kun ajoneuvolla ajetaan matalalla moottorikuormituksella, jolloin ahdin ei tuota merkittävää ahtopainetta. Ratkaisuna integroiva termi säädettiin toistaiseksi nolnaan. Lisäksi testipenkillä osoitettiin, että kuvassa keskellä esiintyvä N75-solenoidiventtiili, joka alkuperäisessä sovelluksessaan ohjaa hukkaporttia alipaineella, ei pysy stabiilina ylipainetta ohjatessaan. Täten komponenttien hankintalistalle lisättiin toisen tyyppinen N75, joka on alkuperäisessä käyttökohteessaan tarkoitettu ylipaineen ohjaamiseen (kuva 25).



Kuva 25. Ylipaineen ohjaamiseen tarkoitettu N75-solenoidiventtiili, joka hankittiin testipenkillä suoritettujen kokeiden jälkeen.

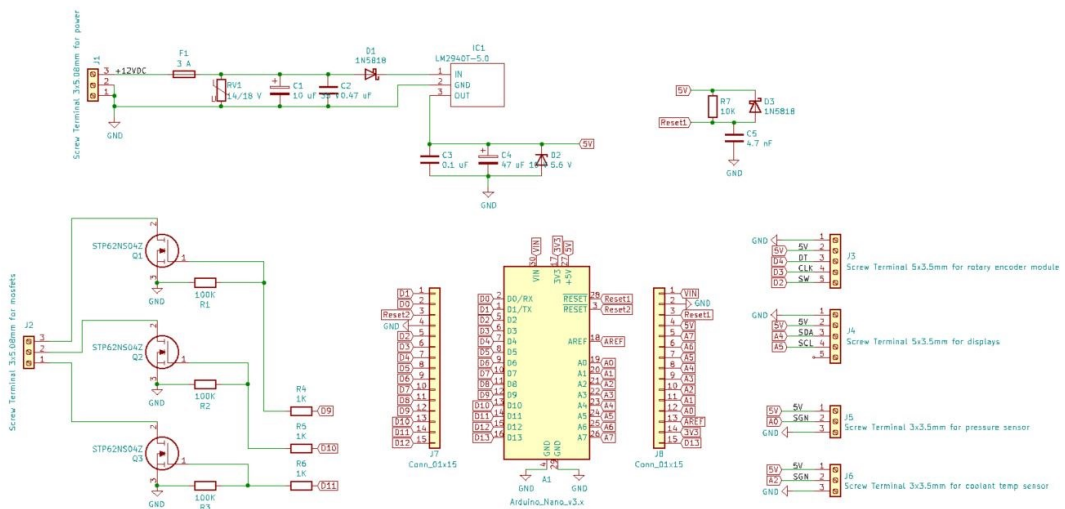
Testausta päätettiin jatkaa myöhemmin tarkemmin järjestelmämoduulin ensimmäisellä revisiolla.

7 Ensimmäinen revisio

7.1 Suunnittelu

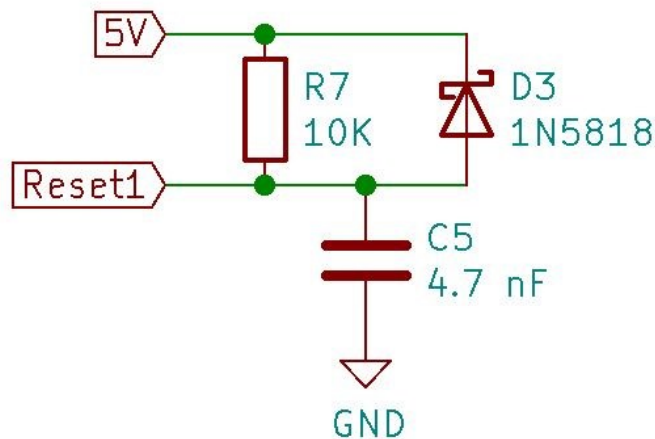
7.1.1 Elektroniikka

Prototyypillä suoritettujen kokeilujen jälkeen oli aika siirtyä suunnittelemaan järjestelmämoduulin piirilevyä, joka sisältää paikat kaikille neljännessä kappaleessa esitetyille elektronisille komponenteille oheispiireineen sekä aikaisemmin esittelemättömiä piirejä. Kokonaiskytkentäkaavio luotiin KiCadilla (kuva 26).



Kuva 26. Järjestelmämoduulin kokonaiskytkentäkaavio.

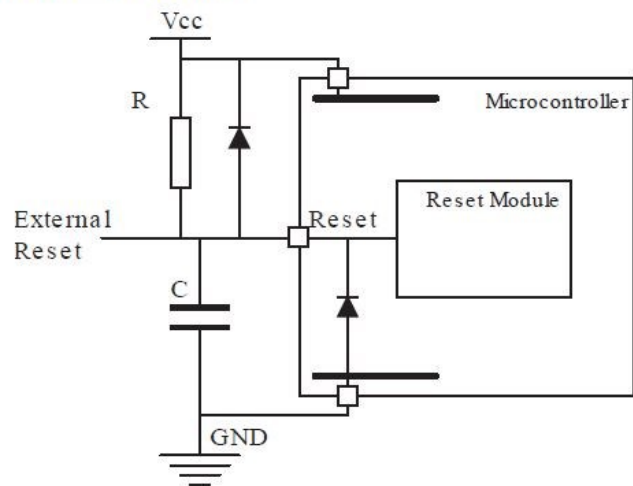
Kokonaiskytkentäkaavion luominen KiCadilla oli suhteellisen helppoa: etsitään hakemisesta yleismallinen tai spesifinen komponentti ja tarvittaessa määritetään sille nimi, arvo ja footprint eli sen piirilevyiltä varaama tila ja nastojen geometrinen asettelu. Komponenttien numerointi tapahtui automaattisesti. Yhteydet komponenttien välille luotiin johdinvivoilla, tai labeleilla eli verkkotunnuksilla (kuvat 26 ja 27).



Kuva 27. Mikrokontrollerin resetoitinastan EMC-piirin kytkentäkaavio. Vasemmalla johtimien päässä "5V"- ja "Reset1"-verkkotunnukset, joiden avulla ohjelma osaa yhdistää muualla sijaitsevat samoin merkatut piirin solmut toisiinsa.

Järjestelmään valitun mikrokontrollerin valmistaja on toimittanut datalehden, jossa käsitellään AVR-arkkitehtuurin 8-bittisten mikrokontrollerien EMC:tä eli elektromagneettista yhteensopivuutta. Datalehden tarkoituksena on siis ohjata suunnittelijoita kohti ratkaisuja, joilla vähennetään mikrokontrollerin tuottaman ja vastaanottaman sähkömagneettisen häiriön, eli EMI:n, vaikutusta sen omaan ja muiden lähistöllä sijaitsevien elektronisten laitteiden toimintaan (16, s. 3). Dokumentista voidaan päätellä, että varsinkin nopeasti ja jatkuvasti kytkeytyvien suurien kuormien piireissä johdinten induktiiviset ominaisuudet tuottavat EMI:tä. Tässä työssä tämäntyyppistä ilmiötä voidaan suhteellisen voimakkaasti olettaa esiintyvän ainakin solenoidiventtiilin ohjauspiirissä. Datalehden mukaan kaikissa Atmelin valmistamissa 8-bittisissä AVR-mikrokontrollereissa kaikki I/O-nastat on suojattu clamp-diolein ESD:ltä eli staattisen sähkön korkeajännitteisiltä purkauksilta. Sen sijaan reset-nastoilta vastaavan tasoinen suojaus puuttuu. Koska reset-nastat voivat uudelleenkäynnistää prosessorin, on MCU:n ja koko järjestelmän toiminnalla suurempi alttius EMI:lle niiden kautta. Datalehti antaa yleispätevän suosituksen reset-nastojen EMC-piirille ja sen komponenttien arvoille (kuvat 27 ja 28).

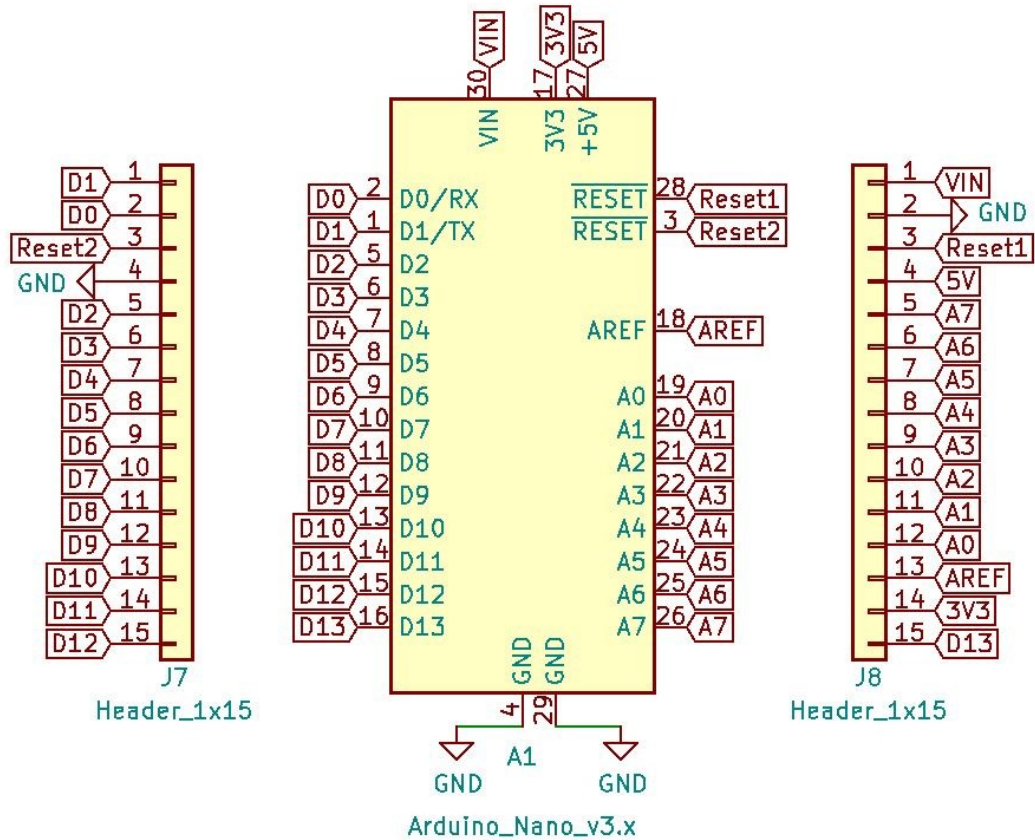
Figure 4-7. Recommended Reset Pin Connection



Kuva 28. Kuvakaappaus Atmelin suosittelemasta oheispiiristä AVR-mikrokontrollerin reset-nas-talle EMC-vaatimusten täyttämiseksi. (17, s. 17.)

Vaikka tässä työssä suunniteltavaan järjestelmään ei ensisijaisesti sisällytetty ulkoista reset-painiketta, koska järjestelmä voidaan resetoita virtapainikkeella, suunniteltiin MCU:n stabiliteetin takaamiseksi moduulin piirilevyyn datalehden suosittelema reset-piiri.

Toinen huomionarvoinen seikka kytkentäkaaviossa ovat kaksi ylimääräistä 2,54 millimet-rin rasterin piikkirimaa. Piikkirimojen avulla järjestelmä voidaan helposti kytkeä muihin elektroniikkamoduuleihin, esimerkiksi relekorttiin. Piikkirimojen tarkoituksena siis on jär-jestelmän laajennuksen mahdollistaminen ja esimerkiksi mikrokontrollerin pinnien hel-pompi luku mittalaitteilla. (Kuva 29).



Kuva 29. Kuvakaappaus kehitysalustan ja piikkirimojen kytkentäkaavioista.

Moduuliin päätettiin sisällyttää kolme erillistä, mutta identtistä MOSFET-piiriä, jotta järjestelmää on varaa kehittää joutumatta muuttamaan moduulia.

Ruuviterminaalikytkennät lisättiin kahdelle viiden voltin anturille (kuva 30). Ruuviterminaalikytkennät lisättiin myös akkujännitteelle ja maadoitukselle sekä MOSFET-piirien siisäntuloille.



Kuva 30. Järjestelmämoduuliin kytkeytyvien anturiliitinten kytkentäkaavio.

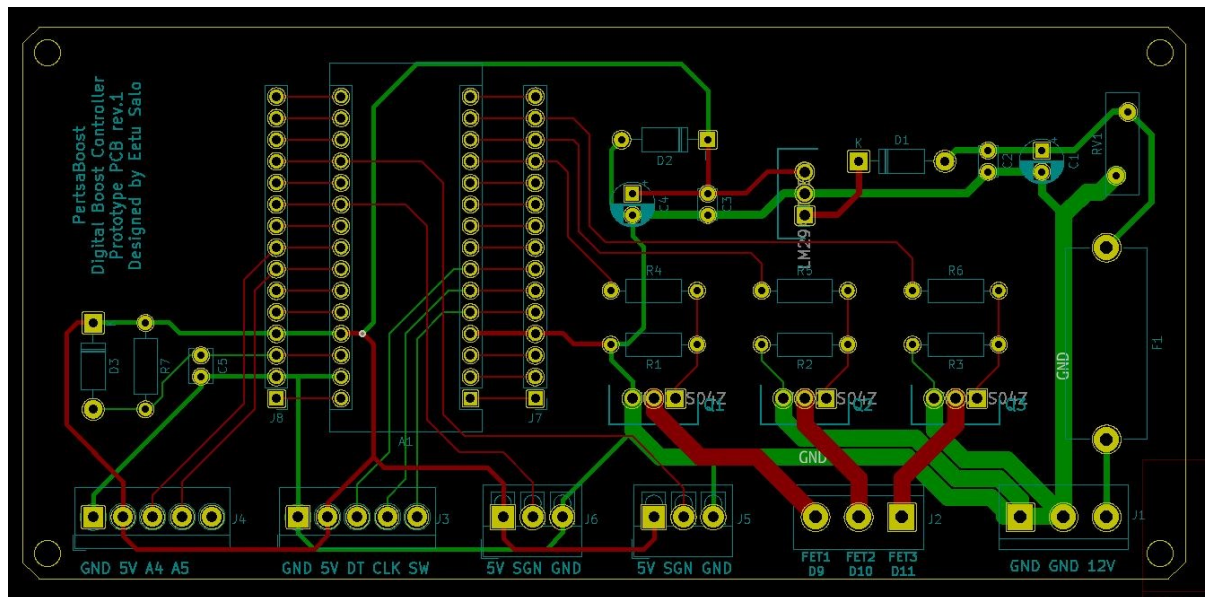
Ruuviterminaalikytkennät lisättiin myös käyttöliittymän komponenteille (kuva 31).



Kuva 31. Ruuviterminaalikytkennät käyttöliittymän komponenteille. Terminaalista J4 jätettiin yksi napa kytkemättä, jolloin käyttäjä voi halutessaan kytkeä sen hyppyjohtimella johonkin kehitysalustan nastoista.

Kytkentäkaavio vietiin ohjelmiston sisällä PCB:n suunnittelutyökaluun, jossa piirilevylle muun muassa rajattiin ääriviivat, valittiin johdinkerrosten lukumäärä, lisättiin levyn pinnalle tekstiä, aseteltiin komponentit ja piirrettiin piirin eri solmujen välille kytkentäkaavion mukaiset johtimet. Piirilevyjohdinten mitoituksessa käytettiin PCB:n prototyypiluonteen vuoksi ylimitoitusta, myöskään tilankäyttö ei ollut niille rajoittava tekijä. Komponenttien tilankäyttöliseen sijoitteluun ei kiinnitetty ylimäärin huomioita, vaan suunnitteluohjelman tarjoamien footprinttien väleihin jätettiin reilusti tilaa. Komponenttien footprintit oli

aikaisemmin valittu siten, että kaikki komponentit ovat läpijuotettavia eli THT-tyyppisiä kasausvaiheen juotosprosessin helpottamiseksi. (Kuva 32.)



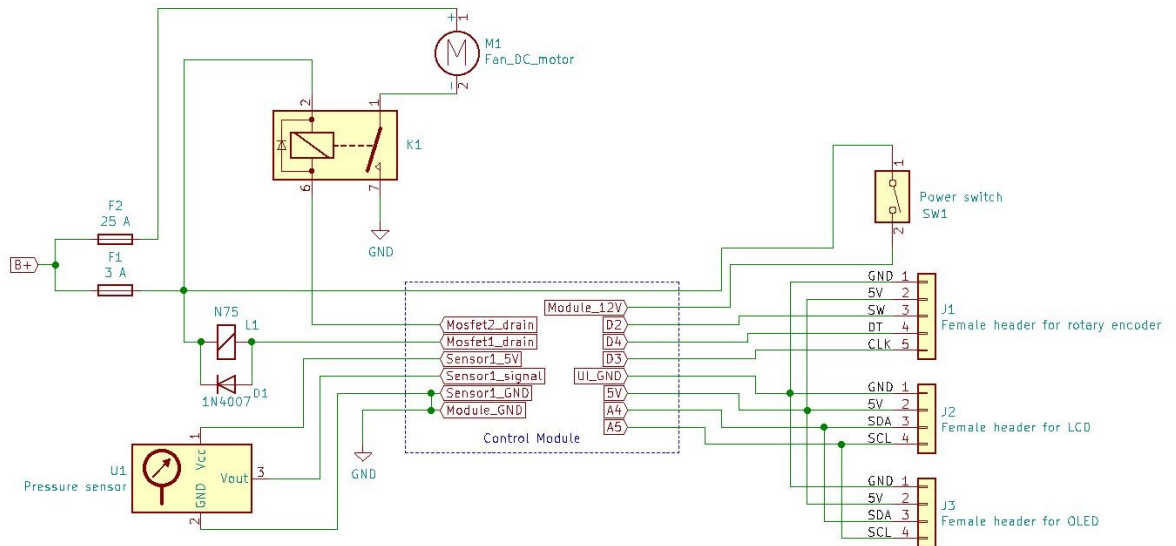
Kuva 32. Järjestelmämoduulin PCB:n layout-kuva. Punaiset johtimet ovat PCB:n kuvasta katsottuna ylemmässä kerroksessa, vihreät ovat alemmassa.

PCB:n layoutin suunnittelun jälkeen siitä luotiin Gerber-tiedosto, joka lähetettiin tilauksessa ulkomaalaiselle PCB-valmistajalle.

Kokoonpanoon tarvittu komponentit tilattiin tunnetuista kotimaisista ja ulkomaisista elektroniikkatukusta.

7.1.2 Johtosarjat

Jotta valittujen komponenttien ja suunniteltujen moduulien vieminen työpöydältä ajoneuvoon olisi mahdollisimman selkeää, on järkevää suunnitella asennukseen vaadittavat johtosarjat etukäteen. Lisäksi järjestelmän kokoaminen testausvaiheessa lopullista kokoonpanoa vastaavaksi on luotettavien testisimulointien kannalta välttämätöntä. (Kuva 33.)

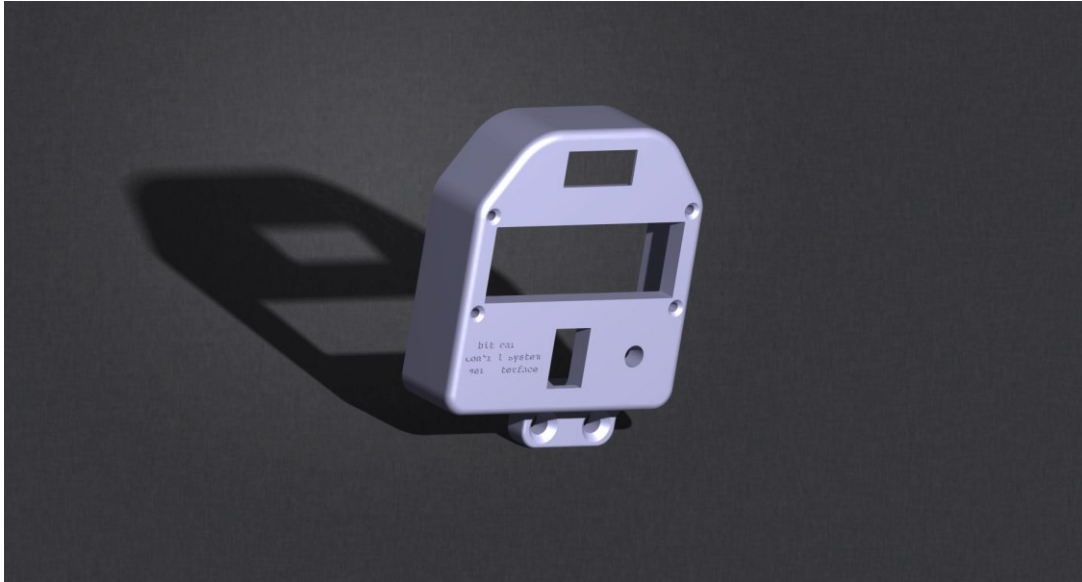


Kuva 33. Järjestelmän johtosarjojen kytkentäkaavio. ”Control Module” -laatikon vasemmalla puolella oleva osaa moottoritilan puoleista johtosarjaa, oikealla puolella oleva osaa auton sisätiloihin käyttöliittymän koteloon sijoitettavaa johtosarjaa.

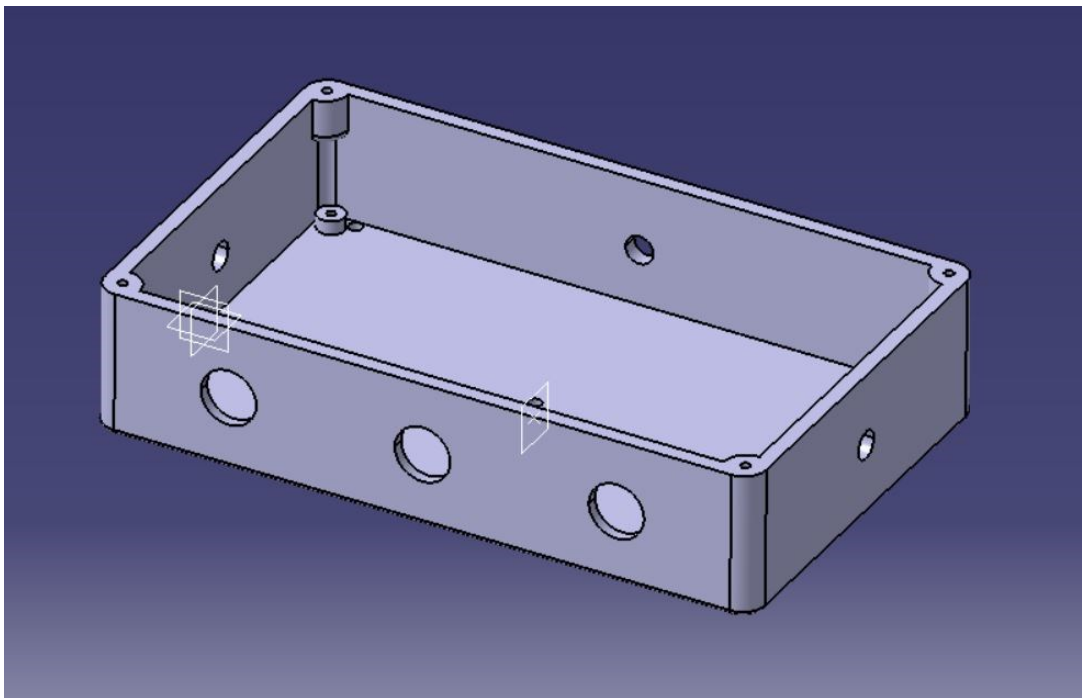
7.1.3 Kotelointi

Jotta tässä työssä suunniteltujen ja käytettyjen elektronisten moduulien asentaminen käyttöön ajoneuvoympäristössä olisi mahdollisimman toimintavarmaa ja esteettistä, suunniteltiin soveltuvat koteloinnit 3D-tulostettaviksi muovista. Suunnittelussa otettiin huomioon kaikkien kokoonpanoon valittujen komponenttien fyysiset mitat ja käytettävyys. 3D-mallinnukset suunniteltiin CATIA V5 -ohjelmistolla.

Alla kuvat 34–36 koteloinnin osista.



Kuva 34. Käyttöliittymän komponenttien kotelo CAD-suunnitteluohjelmassa.



Kuva 35. Järjestelmämoduulin kotelo suunnitteluohjelmassa.

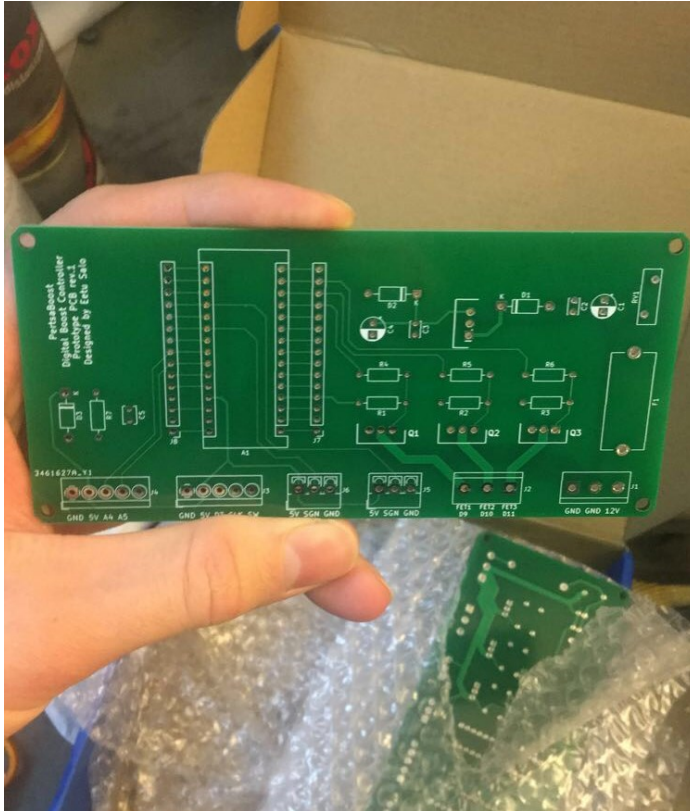


Kuva 36. Järjestelmämoduulin kotelon kansi suunnitteluohjelmassa.

7.2 Valmistus

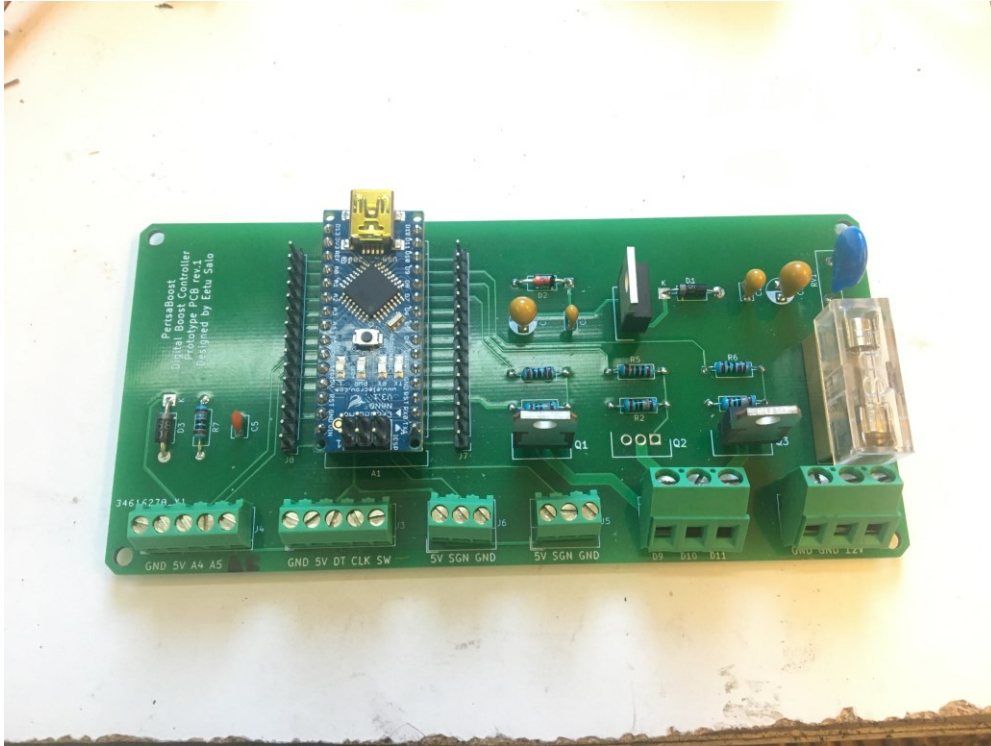
7.2.1 Järjestelmämoduuli

PCB:t saapuivat reilun viikon kuluttua tilauksesta (kuva 37). Ne olivat täysin tilauksen mukaisia ja niiden laatu oli erinomainen, myös kaikki footprintit olivat sopivia. Komponenttien saavuttua aloitettiin järjestelmämoduulin kokoaminen.



Kuva 37. Toimituspakkauksesta otettu PCB.

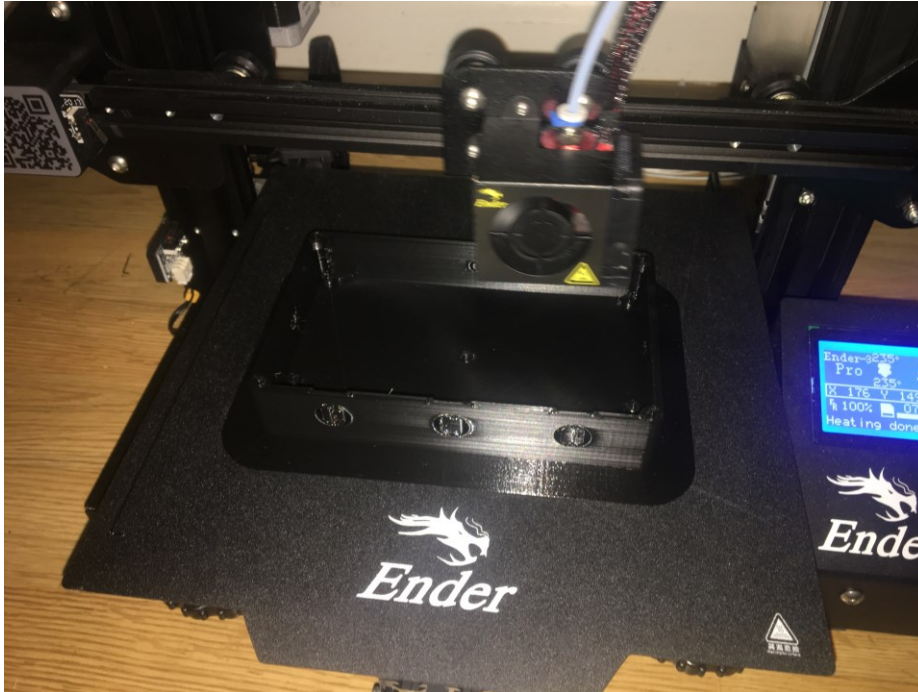
Komponenttien juottamiseen käytettiin laadukasta juotostinaa ja lämpötilasäädettävää juotosasemaa. Juottamisen jälkeen kytkentöjen johtavuus käytiin läpi yleismittarilla. (Kuva 38.)



Kuva 38. Järjestelmämoduuli koottuna lukuun ottamatta keskimmäistä kanavatransistoria.

7.2.2 Kotelointi

Koteloinnin 3D-mallinnukset vietiin Cura Ultimaker -ohjelmaan, jossa niistä luotiin G-koodimuotoiset tiedostot, jotka vietiin muistikortilla Creality Ender 3 Pro -tulostimelle valmistettaviksi. Materiaalina koteloinnille käytettiin PETG-muovilankaa, joka kokemukseen perustuen todennäköisesti tulee kestäämään ajoneuvoympäristön lämpötilaolosuhteet kiittävästi. (Kuva 39.)



Kuva 39. Järjestelmämoduulin kotelon 3D-tulostus.

7.2.3 Johtosarjat

Järjestelmämoduulin kokoamisen jälkeen valmistettiin käyttöliittymän ja järjestelmämoduulin välinen johtosarja. Keinukytkimelle käytettiin $1,0 \text{ mm}^2$:n johdinta, +5 VDC:lle ja GND:lle $0,50 \text{ mm}^2$:n johdinta ja lopuille piirin solmuille $0,22 \text{ mm}^2$:n johdinta. Johtimet mitoitettiin noin 800 mm pituisiksi, ja ne vietiin lähes koko pituudeltaan nylon-kudossukan läpi, sekä päistä vedonpoistajien läpi. Käyttöliittymän päässä johtimien päähän juotettiin piikkirimaliittimet. Näytöille ja kiertokennoille valmistettiin kotelon sisälle lyhyempi johtosarja soveltuvin piikkirimaliittimin. (Kuva 40.)



Kuva 40. Käyttöliittymän kotelo johtosarjoiheen ja komponentteineen takaa nähtynä. Kotelon takaosa jää avoimeksi.

7.3 Testaus

Testausvaiheessa kaikki edellisissä luvuissa kootut järjestelmän osat koottiin aikaisemmin luvussa 6.3 esiteltyyn testipenkkiin testauksia varten.

Testattavia asioita olivat:

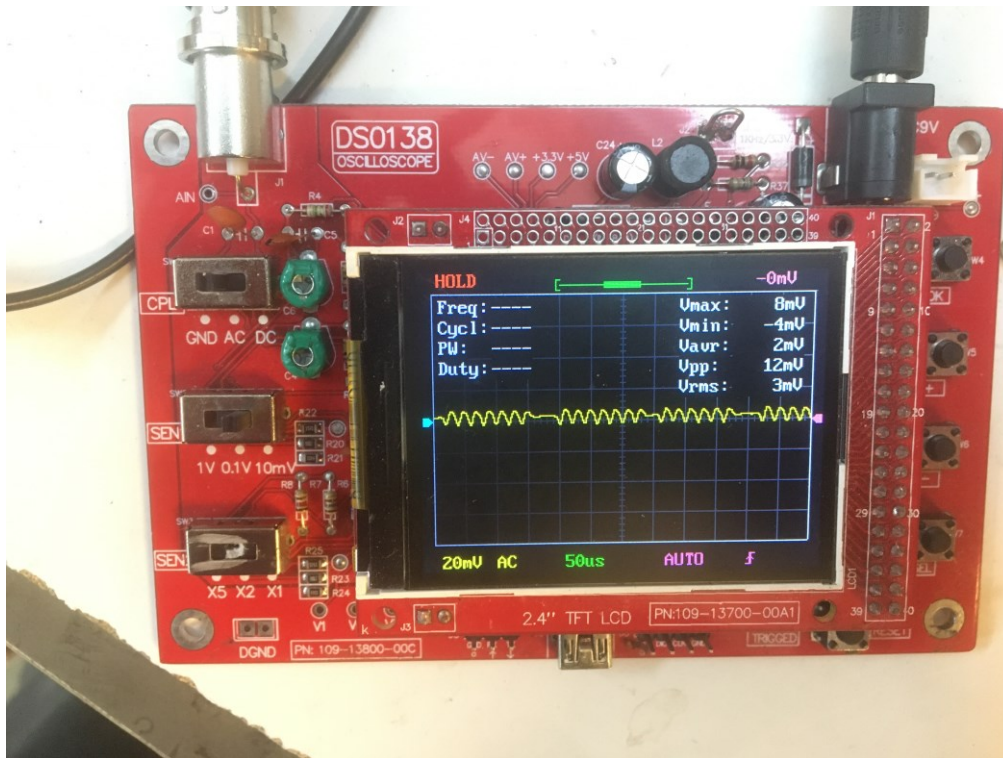
- yleinen toimintavarmuus
- reguloidun jännitteen taso ja tasaisuus
- virrankulutus
- regulaattorin lämpeneminen
- MOSFETien lämpeneminen
- N75:n napojen jännite käytön aikana (flyback-diodin olemassaolon selvittäminen)
- säätöalgoritmin toiminta.

Tutkimusvälineinä käytettiin testipenkkiä, digitaalista yleismittaria, digitaalista oskilloskooppia ja infrapunalämpömittaria.

7.3.1 Sähköinen ja terminen testaus

Yleinen toimintavarmuus tuli todetuksi testipenkissä: järjestelmälle tuotiin 14,4 voltin sisäntulojännite DC-sähkölähteellä ja se jätettiin rakennuksen sisätiloihin noin tunniksi siten, että solenoidiventtiin pulssinleveys oli vakaa 50 %. Testijakson aikana ei ilmennyt ongelmia.

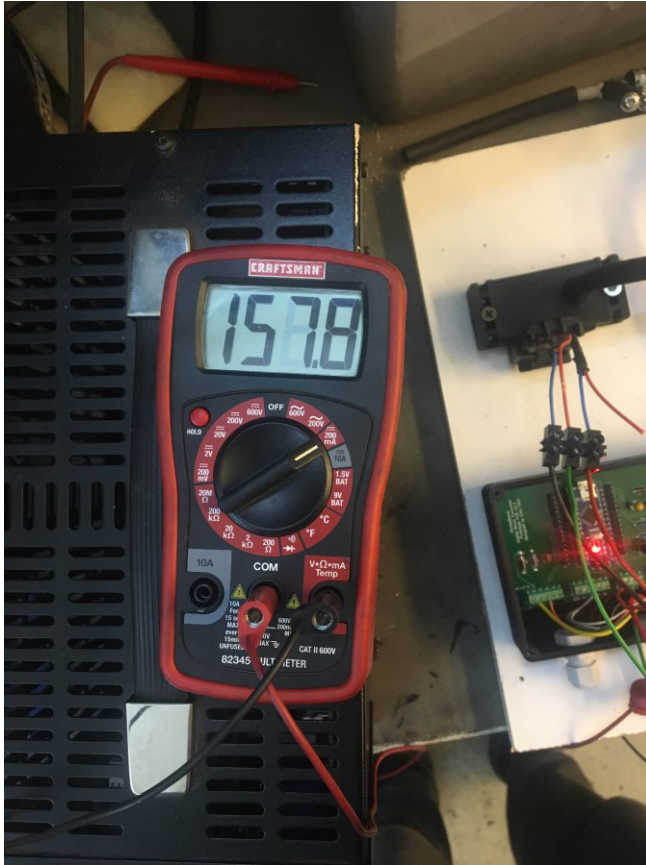
Reguloidun jännitteen tasoa tutkittiin yleismittarilla: jännite pysytteli muutaman millivoltin päässä tasan viidestä voltista. Reguloidun jännitteen rippeleitä tutkittiin oskilloskoopilla (kuva 41).



Kuva 41. Reguloidun +5 VDC -jännitteen kuvaaja oskilloskoopin näytöllä järjestelmän toimiessa.

Oskilloskoopitestillä havaittiin jännitteen rippelin olevan vain noin 12 millivolttia, joka on nimellisestä jännitteestä vain noin 0,24 %. Havaitun rippelin voidaan olettaa syntyneen käytetyssä tasasähkölähteessä. Jännitteen rippeli oli siis erittäin alhainen ja siten turvallisella tasolla.

Järjestelmän virrankulutuksen selvittämistä varten sähkölähteen ja järjestelmämoduulin väliin asetettiin yleismittari mittaamaan sähkövirtaa solenoidiventtiin ollessa kytkettynä irti järjestelmästä.



Kuva 42. Virranmittaus milliampeereissa yleismittarilla.

Virrankulutus pysytteli kaikissa tilanteissa alle 200 milliampeerin. Tähän viitaten järjestelmämoduulin lasiputkisulakkeen suositelluksi arvoksi valittiin 1 A.

Jänniteregulaattorin lämpenemisen tutkiminen on oleellista, sillä lineaariset regulaattorit käytännössä muuttavat ylimääräisen potentiaalin lämmöksi resistanssin kautta. Jänniteregulaattorin lämpötila mitattiin infrapunalämpömittarilla noin 15 minuutin toiminnan jälkeen moduulin oltua kotelossaan ilman kantta noin 15 celsiusasteen huoneessa. (Kuva 43.)



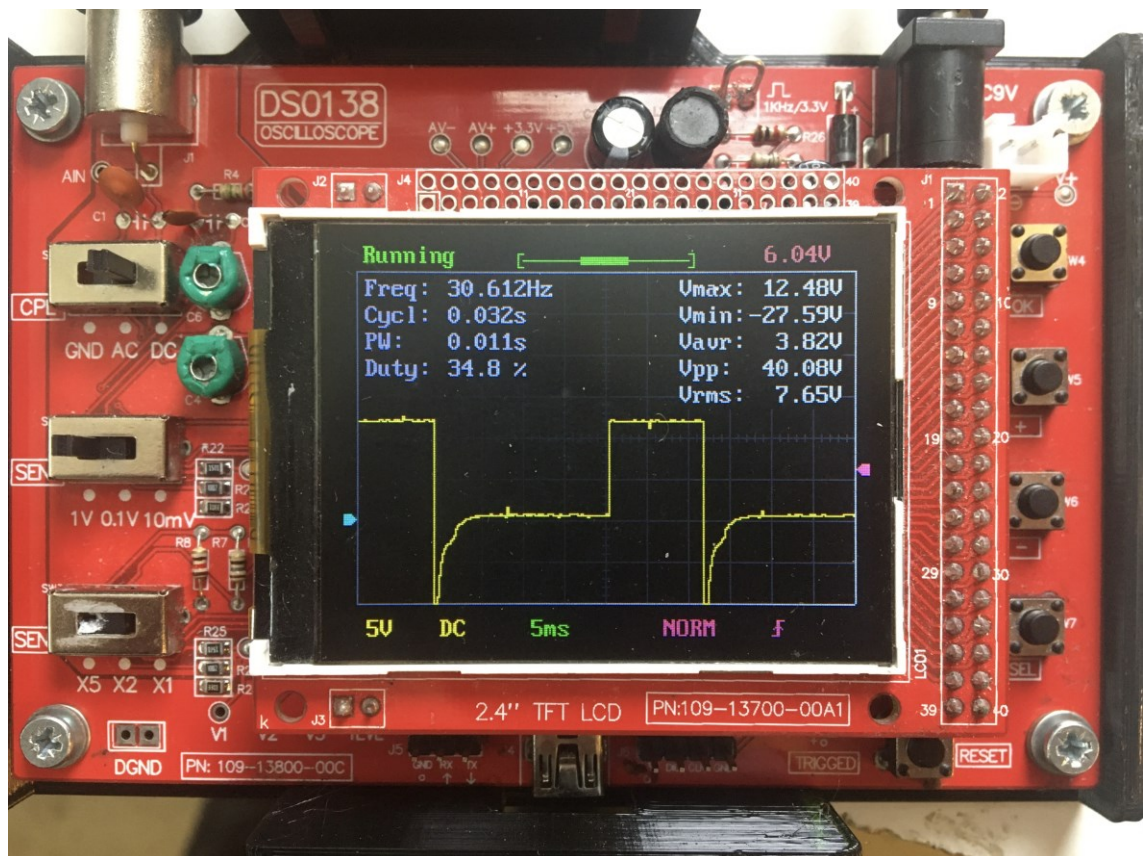
Kuva 43. Jänniteregulaattorin pinnan lämpötilan mittaustulos infrapunälämpömittarin näytöllä.

Maksimilämpötilaksi mitattiin noin 77 celsiusastetta, mikä on vielä suhteellisen kaukana komponentin valmistajan ilmoittamasta 150 celsiusasteen maksimilämpötilasta (16, s. 4). Kuitenkin toimintavarmuuden takaamiseksi regulaattoriin päätettiin kiinnittää lämpösiili.

Solenoidiventtiiliä ajavan MOSFETin lämpenemistä tutkittiin samoin, kuin jänniteregulaattorin lämpenemistä. 15 minuutin ajon jälkeen pulssinleveyden oltua noin 50 %:ssa, oli MOSFETin pinnan lämpötila noussut vain noin 13 celsiusta huoneenlämpöön verrattuna, mikä ei aiheuttanut toimenpiteitä.

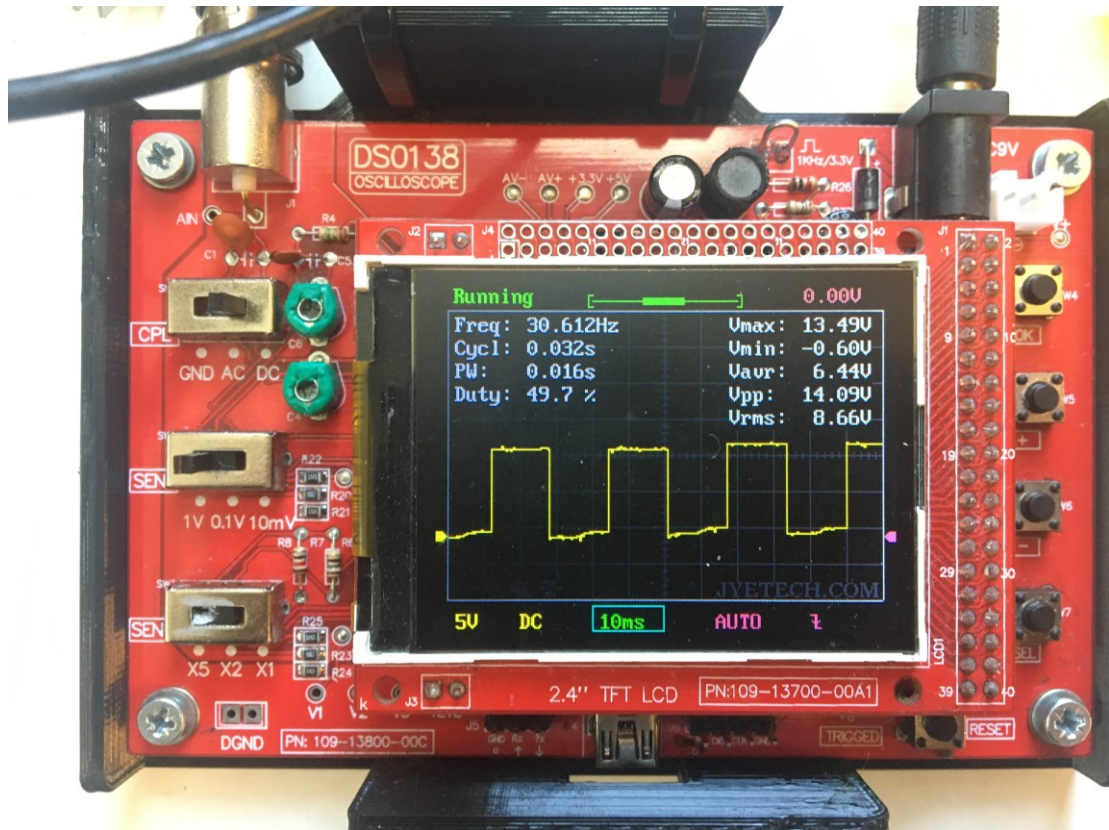
Työssä käytetylle N75-solenoidiventtiilille ei ollut verkkolähteistä saatavilla datalehteä, joten sen ominaisuuksia täytyi selvittää. Merkittävin selvityksen kohde oli solenoidin sisäisen flyback-diodin olemassaolo, sillä solenoidin induktiiviset ominaisuudet saattavat käytössä vahingoittaa sitä ohjaavaa elektronista kytkintä, mikäli piiri ei sisällä diodia.

Solenoidiventtiin napoihin kytkettiin oskilloskoopi järjestelmämoduulin ajaessa sitä noin 35 % pulssinleveydellä. (Kuva 44.)



Kuva 44. Oskilloskooppikuvaaja solenoidiventtiin navoista.

Oskilloskoopin näytöltä voidaan lukea, että jännite solenoidin yli putoaa lähes -30 volttiin. Tämä on seurausta siitä, että MOSFETin kytkeytyessä erittäin nopeasti johtamattomaan tilaan, pyrkii kelan magneettikenttä yhä ylläpitämään sen läpäisevää sähkövirtaa, jolloin kelan napoihin syntyy alkuperäiseen käyttöjännitteeseen nähden erimerkinen jännite. Flyback-diodilla voidaan lähes täysin päästä eroon kyseisestä ilmiöstä. Solenoidin johtiin liitettiin 1N4007-mallinen yleisdiodi ja vastaava oskilloskooppimittaus toistettiin. (Kuva 45.)



Kuva 45. Oskilloskooppikuvaaja solenoidiventtiilin navoista flyback -diodin kytkemisen jälkeen.

Yllä olevasta oskilloskooppikuvaajasta nähdään, että negatiivisesta jännitepudotuksesta päästiin lähes täysin eroon, mikä lisää ehdottomasti ohjaavan MOSFETin toimintavarmuutta.

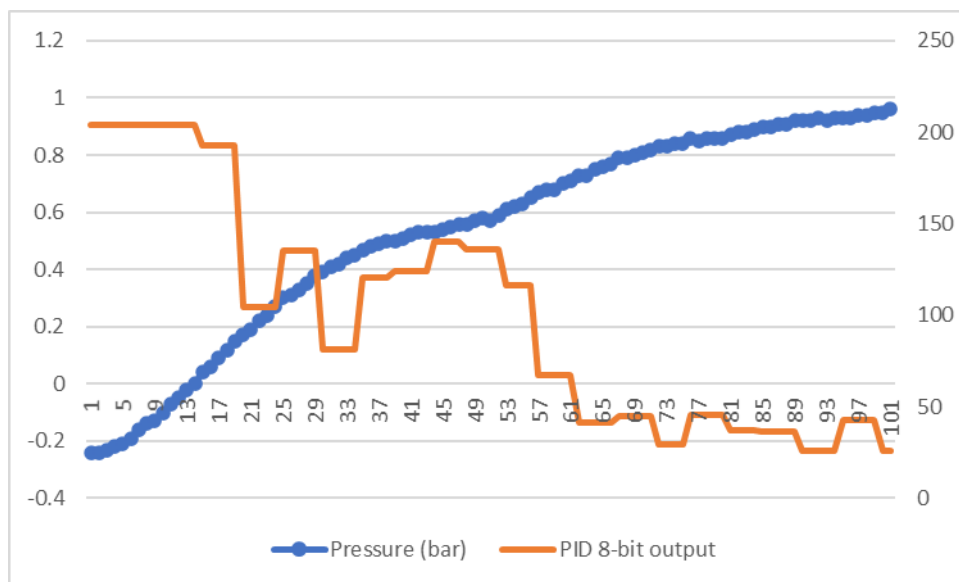
7.3.2 Säätoalgoritmin toiminta

Järjestelmään sisällytetyn säätoalgoritmin toimintaa suunnitellulla tavalla testattiin testipenkissä. Luvussa 6.3 tutkitun perusteella algoritmin I-termi asetettiin nolnaan ja loogisia säätojä lähdettiin hakemaan muilla parametreilla.

Algoritmile haettiin manuaalisesti kokeilemalla sopivat totuudenmukaiset parametrit ja ne asetettiin käyttöliittymällä:

- BoostTarget = 1,0 bar -> pidTarget = 1,0*20,00
- Kp = 16,00
- Ki = 0,0
- Kd = 0,5
- LowLimit = 10,2 % pulssinleveydestä
- HighLimit = 80,0 % pulssinleveydestä.

Imusarjapaineen nousua simuloitiin manuaalisesti testipenkin paineregulaattorilla ja mitattu paine sekä algoritmin laskema pulssinleveys tulostettiin PC:n sarjaportille USB-kaapelin avulla, jossa ne kerättiin suoraan Excel-taulukkoon tarkastelua varten. (Kuva 46.)



Kuva 46. Testipenkissä ajetun säätöalgoritmitestin tulostetut arvot esitettynä kuvaajassa. X-akselilla mittauskertojen järjestysluvut: mittauskertojen väli oli 10 millisekuntia. Vasemman reunan pystyakselilla mitattu paine baareina, oikean reunan pystyakselilla PD-algoritmin ulostulo 8-bittisenä kokonaislukuna.

Paine nostettiin noin sekunnissa -0,2 baarista 1 baariin. Koska säätöalgoritmin mittaus-ajanjakso oli 50 millisekuntia ja arvojen tulostusajanjakso oli 10 millisekuntia, näyttää algoritmin ulostulon kuvaaja kantikkaalta. Ulostulon arvo lähtee halutulla tavalla noin 80 % pulssinleveydestä, ja on lopussa pulssinleveyden alarajassa mittaussuureen päästyä hyvin lähelle tavoitearvoa. Testipenkin hukkaporttia simuloiva painemittari näytti mittauksen lopussa noin 0,7 baarin painetta. Saavutettua säätötarkkuutta voidaan kuvaajan perusteella pitää kohtuullisena.

Yllä suoritetussa simuloinnissa on käytössä PD-säädin, koska I-termi on säädetty nol-
laan. Tämän säätimen haittana on myös pelkälle P-säädölle tyypillinen pysyvä asento-
virhe ja sitä kautta alttius tasaisen tilan häiriöille. Lisäksi derivaiva termi korostaa helposti
korkean taajuuden häiriöitä. Edellä mainitun johdosta kyseinen säädin on teollisuudessa
harvinaisempi, kuin PID- tai PI-säätimet. (11, s. 72 ja 78.)

Testipenkkisäädön ongelmana on se, että säädin ei todellisuudessa hallitse mitattavaa
suuretta. Lisäksi pakokaasuahtimen tuottama ahtopaine riippuu voimakkaasti moottorin
kuormituksesta, mikä ennestään tekee algoritmin säätöjen hakemisesta hankalampaa.
Algoritmin säätöjen hakeminen jatkuu opinnäytetyöprosessin jälkeen, kun järjestelmä
saadaan asennettua ajoneuvoon. Lisäksi integroiva termi pyritään valjastamaan käyt-
töön ehtolauseita hyödyntäen.

8 Kehitysehdotukset

Tämän opinnäytetyön edetessä syntyi runsaasti kehitysehdotuksia järjestelmän eri osa-
alueille.

Kehitysehdotuksia hardwarelle:

- kaasupolkimen asentoanturi tarkemmin optimoidun ohjauksen mahdollis-
tamiseksi
- kehitysalustan päivittäminen malliin, jossa on enemmän ohjelmamuistia:
Arduino Nano Every tai Seeeduino Xiao
- PCB:n kehittäminen: akkujännitteen mittauspiiri, voltage clamp -diodit ja
virranrajoitusvastukset käytössä oleville mikrokontrollerin nastoille, pintalii-
toskomponenttien käyttö läpijuotettavien sijasta, enemmän ruuvitermi-
naleja analogisisäntuloille, relay driver -IC-piirien käyttö suurtehokana-
vatransistorien tilalla tai lisäksi
- kiertoenkooderin päivittäminen I2C-väylään liitettävään malliin
- LCD-valikkonäytön päivittäminen OLED-tyyppiseen näyttöön

Kehitysehdotuksia firmwarelle:

- ahtopaineprofiilit valikkoon ajoneuvon erilaisia käyttötilanteita varten
- PID-algoritmin I-termin käyttöönotto ahtopaineen noustua tietyn raja-arvon
yli kaasupolkimen asennosta riippuen

Kehitysehdotuksia käyttökohteille:

- vesi-metanoliruiskutusumpun ohjaus
- dieselmoottorin hehkutulppien ohjaus

9 Yhteenveto

Tässä opinnäytetyössä suunniteltiin, valmistettiin ja testattiin digitaalelektroniikkaa hyödyntäen uudelleenohjelmoitava käyttöliittymällä varustettu elektroninen järjestelmä, jolla voidaan automatisoida sähköisiä toimilaitteita ajoneuvoympäristössä. Järjestelmään sisällytettiin työn aikana ahtopaineensäätö PID-algoritmia hyödyntäen sekä jäähdyttimen puhaltimen ohjaus. Idea työn aiheeseen syntyi, kun tarkasteltiin vaihtoehtoja harrasteajoneuvon sähköisten toimilaitteiden automatisointiin.

Työssä kartoitettiin ajoneuvojen tavanomaisten sähköjärjestelmien haasteita elektronikan komponenttien näkökulmasta, mikä otettiin huomioon järjestelmän kehityksessä. Järjestelmän teknisen rakenteen selkeydyttyä valmistettiin prototyyppi, jolla testattiin ahtopaineensäädön mahdollisuutta PID-algoritmilla. Tämä toteutettiin varta vasten valmistetulla pneumaattisella testipenkillä. Prototyypillä opitun perusteella suunniteltiin järjestelmämoduulin ensimmäinen revisio, jossa käytettiin ajoneuvokäyttöön tarkoitettuja puolijohdekomponentteja. Järjestelmämoduulille suoritettiin sähköisiä, termisiä ja toimintatestejä, jotta varmistuttiin sen oikeanlaisesta toiminnasta. Elektroniikan suunnittelun jälkeen järjestelmämoduulille ja käyttöliittymälle suunniteltiin ja 3D-tulostettiin koteloinnit.

Järjestelmään sisällytetty käyttöliittymä mahdollistaa eri parametrien helpon hallinnan ilman tarvetta mikrokontrollerin uudelleenohjelmoinnille, mikä helpottaa järjestelmän käyttöä ja manuaalista säätöä. Järjestelmä voi toimia muiden ajoneuvon elektroniisiin järjestelmiin nähden itsenäisesti, joten se on helppoa asentaa eri-ikäisiin ja -tyyppisiin ajoneuvoihin. Järjestelmän asentaminen ajoneuvoon jouduttiin työn laajuuden vuoksi jättämään pois tästä opinnäytetyöstä. Järjestelmän käytöstä ajoneuvoon asennettuna tullaan tulevaisuudessa saamaan lisää tietotaitoa, mitä tullaan hyödyntämään seuraavan revision suunnittelussa ja valmistuksessa.

Opinnäytetyön aikana saatiin jatkoa ajatellen hyödyllistä oppia monelta ennestään tutulta sekä uudelta tekniikan osa-alueelta. Yhtenä merkittävimmistä opituista asioista voidaan pitää PCB-piirilevysuunnittelua, jossa lähdettiin liikkeelle ilman aikaisempaa kokemusta. Kaikki työn alussa asetetut tavoitteet saavutettiin kiitettävästi. Järjestelmää voidaan kokonaisuudessaan pitää luotettavana ajoneuvoympäristöön asennusta varten.

Lähteet

- 1 Analoginen vs. digitaalinen tiedonsiirto. 2003. Verkkoaineisto. Aalto-yliopisto. <http://legacy.spa.aalto.fi/sig-legacy/digis/luento1/anadigi.html>. Luettu 24.2.2021.
- 2 Inductive Flyback and Flyback Diodes. Verkkoaineisto. Digilent Inc. <https://learn.digilentinc.com/Documents/390>. Luettu 20.3.2021.
- 3 Arvikar, Pankaj. 2018. Supercharging and Turbocharging. Verkkoaineisto. <https://www.slideshare.net/PankajArvikar1/supercharging-and-turbocharging>. Luettu 4.4.2021.
- 4 Parviainen, Heikki. 2011. Energiatekniikka. Turbohtaminen. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Luettu 23.2.2021.
- 5 Turbocharger Wategate. ASE. <https://www.freeasestudyguides.com/engine-turbocharger-wastegate.html>. Luettu 23.2.2021.
- 6 Westfall, Chad. 2014. How It Works: Wastegates Explained. Diesel Army. <https://www.dieselarmy.com/engine-tech/how-it-works/how-it-works-wastegates-explained/>. Luettu 23.2.2021.
- 7 Parviainen, Heikki. 2011. Ajoneuvomoottorit. Autonmoottoreiden jäähdytysjärjestelmät. Luentomoniste. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Luettu 23.2.2021.
- 8 Solenoid Valve Working Principle. Your electrical guide. <https://www.yourelectricalguide.com/2017/12/what-is-solenoid-valve.html>. Luettu 24.2.2021.
- 9 Virtapiirit. Verkkoaineisto. MAOL ry. <https://maol.fi/materiaalit/kpm/lml3/ea/je/virtapiirit/>. Luettu 25.2.2021.
- 10 COBB 3-Port Electronic Boost Control Solenoid. Cobbtuning.com. https://www.oakos.com/product_docs/COB-752750.pdf. Luettu 24.2.2021.
- 11 Harju, Timo & Marttinen, Arto. 2000. Sääätötekniikan koulutusmateriaali. Verkkoaineisto. Control CAD. https://www.automaatioseura.fi/site/assets/files/1426/pid_kirja_1-1.pdf. Luettu 5.4.2021.
- 12 Self-Protecting MOSFETs Deliver Improved Reliability in the Harsh Environment of Automotive Applications. 2015. Verkkoaineisto. Diodes Inc. <https://www.diodes.com/design/support/technical-articles/self-protecting-mosfets-deliver-improved-reliability-in-the-harsh-environment-of-automotive-applications/>. Luettu 20.2.2021.

- 13 ATmega328P 8-bit AVR Microcontroller with 32K Bytes In-System Programmable Flash DATASHEET. 2015. Verkkoaineisto. Atmel Corporation. https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-AT-mega328P_Datasheet.pdf. Luettu 26.2.2021.
- 14 FETs (Field-Effect Transistors). 2018. Verkkoaineisto. Digi-Key Electronics. <https://www.digikey.com/eewiki/pages/viewpage.action?pageId=49414403>. Luettu 20.2.2021.
- 15 STP62NS04Z N-channel clamped 12.5 mΩ, 62 A, TO-220 fully protected MESH OVERLAY™ Power MOSFET. 2009. Verkkoaineisto. STMicroelectronics N.V. <https://www.st.com/en/power-transistors/stp62ns04z.html>. Luettu 21.2.2021.
- 16 LM2940x 1-A Low Dropout Regulator. 2014. Verkkoaineisto. Texas Instruments Inc. https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2940-n.pdf?ts=1617597790943&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F. Luettu 21.2.2021.
- 17 AVR 8-bit Microcontrollers AVR040: EMC Design Considerations APPLICATION NOTE. 2016. Verkkoaineisto. Atmel Corporation. http://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/atmel-1619-emc-design-considerations_application_note_avr040.pdf. Luettu 26.2.2021.

Arduino-koodin URL-osoite

<https://github.com/salonperts/DCCS>.