



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Jukka Latvakoski

Autonomisen bussin ohjauksen mekaaninen suunnittelu ja toteutus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Konetekniikka

Insinöörityö

5.2.2019

| | |
|--|---|
| Tekijä Otsikko | Jukka Latvakoski Autonomisen bussin ohjauksen mekaaninen suunnittelu ja toteutus |
| Sivumäärä Aika | 20 sivua 5.2.2019 |
| Tutkinto | Insinööri (AMK) |
| Tutkinto-ohjelma | Konetekniikka |
| Ammatillinen pääaine | Koneautomaatio |
| Ohjaajat | Lehtori Heikki Paavilainen Konetekniikan insinööri Jalmari Matilainen |
| <p>Insinööriyön aiheena oli suunnitella ja toteuttaa autonomisesti liikkuvan bussin ohjausmekaniikka Sensible 4 Oy:lle. Aluksi ohjaus oli tarkoitus toteuttaa Volkswagen Passatin alkuperäisellä hammastangolla liittämällä siihen tarvittavat komponentit automaation saavuttamiseksi. Toteutustavasta kumminkin luovuttiin sen haasteellisuuden vuoksi.</p> <p>Uusi ohjausmekaniikka toteutettiin Parkerin EHAlla (Electro-Hydraulic Actuator). Ohjauskiinnike välittää EHAlta voiman ohjaustangolle, joka on kiinnitetty Gacha-bussin runkoon SKF:n liukulaakereilla. Ohjaustanko siirtää voiman raidetankoja pitkin pyörille ja pyörät kääntyvät. Pyörien ohjaukulmaa mitataan kahdella lineaaripotentimetrillä. Toteutustavassa hyödynnettiin Passatin alkuperäistä ohjausgeometriaa.</p> <p>Ohjauksen suunnittelu ja toteutus saatiin suoritettua määräajassa. Ohjausta testattiin onnistuneesti sekä autonosturin varassa että lattialla renkaiden paikoillaan käännettäessä. Ohjauksen toiminnallisuus käytännön tasolla voidaan testata vasta myöhemmin, kun bussi saadaan ajokuntoon voimansiirron ja ohjelmoinnin osalta.</p> | |
| Avainsanat | EHA, aiGO, Gacha, ohjausmekaniikka |

| | |
|--|--|
| Author Title | Jukka Latvakoski Mechanical Design and Assembly of Autonomous Bus Steering |
| Number of Pages Date | 20 pages 5 February 2019 |
| Degree | Bachelor of Engineering |
| Degree Programme | Mechanical and Production Engineering |
| Professional Major | Machine Automation |
| Instructors | Heikki Paavilainen, Senior Lecturer Jalmari Matilainen, Mechanical Engineer |
| <p>The objective of this Bachelor's thesis was to implement the mechanical design and assembly of an autonomous bus steering system. The thesis was commissioned by the startup company Sensible 4 Ltd. First, the aim was to use the original steering parts of Volkswagen Passat and add a servomotor and the required sensors there. The original parts of Volkswagen Passat were, however, too difficult to use, and therefore we had to find a new way to create the steering system.</p> <p>The new steering mechanism was made with the Parker Compact Electro-Hydraulic Actuator (EHA). The steering fastening transfers the power to the steering rod. The steering rod is assembled to the frame with SKF plain bearings. The steering rod transfers the power through track rods to wheels. The Volkswagen Passat's original steering geometry was utilized and copied to the new steering mechanism.</p> <p>The steering mechanism was completed within the deadline. The steering system was tested successfully on an auto crane and on the ground. The real steering testing of the bus can be carried out after the installation of the power train and the programming have been completed.</p> | |
| Keywords | EHA, aIGO, Gacha, Steering Mechanism |

Sisällys

Lyhenteet

| | | |
|-----|--|----|
| 1 | Johdanto | 1 |
| 2 | aIGO autonomisen ajamisen pilottiprojekti | 2 |
| 2.1 | Renault Twizy | 2 |
| 2.2 | Gacha-bussi | 4 |
| 3 | Ohjauksen suunnittelu | 5 |
| 3.1 | Aloitustilanne | 5 |
| 3.2 | Servomootoritoteutus | 6 |
| 3.3 | EHA-toteutuksen suunnittelu ja komponentit | 8 |
| 4 | EHA-toteutuksen kokoonpano ja testaus | 16 |
| 4.1 | Ohjauskomponenttien kokoonpano | 16 |
| 4.2 | Ohjauksen testaus | 17 |
| 5 | Yhteenveto | 19 |
| | Lähteet | 20 |

Lyhenteet

| | |
|------|---|
| aIGO | Sensible 4:n kehittämä projekti, jossa tutkitaan automaattisten ajojärjestelmien toimintaa. |
| EHA | (Electro-Hydraulic Actuator) Parkerin valmistama kompakti sähköhydraulinen sylinteri. |
| POM | Muovimateriaali, polyasetaali, jolla on pieni kitkakerroin sekä erinomainen kulutuksen kestävyys. |

1 Johdanto

Insinööriyön tavoitteena oli suunnitella ja toteuttaa Sensible 4 Oy:lle autonomisen Gacha-bussin ohjausmekaniikka. Itseohjautuvien ajoneuvojen kehitys on lähtenyt hurjalla vauhdilla eteenpäin, mutta haasteena monelle itseohjautuvia ajoneuvoja valmistavalle yritykselle ovat erityisesti vaihtelevat sääolosuhteet. Esimerkiksi kovassa lumisaateissa ajoneuvon tutkien ja antureiden on haasteellista havaita kaikkea tarpeellista ympäristöstä. Myös ajoneuvon paikantamisessa omalle kaistalleen voi olla haasteita, jos ympäristö on täysin valkoisen lumen peitossa ja antureille sopivia heijastuspintoja ei juurikaan ole.

Sensible 4 on Espoossa sijaitseva suomalainen startup-yritys, joka kehittää ympärivuotiseen käyttöön tarkoitettuja autonomisia ajojärjestelmiä. Yritys on perustettu vuonna 2017, ja se työllistää noin 20 henkilöä. Yritys tekee tiivistä yhteistyötä GIM Oy:n ja Hybria Oy:n kanssa. GIM vahvistaa Sensible 4:n osaamista robotiikan, ja Hybria sähköisten voimansiirtojärjestelmien osalta.

2 aIGO autonomisen ajamisen pilottiprojekti

aIGO on yksi Sensible 4:n projekteista. Projektin tarkoitus on testata ja kehittää automatisoituja ajjärjestelmiä kaikissa sääolosuhteissa. Projektissa pilotoidaan automatisoitua julkista liikennettä.

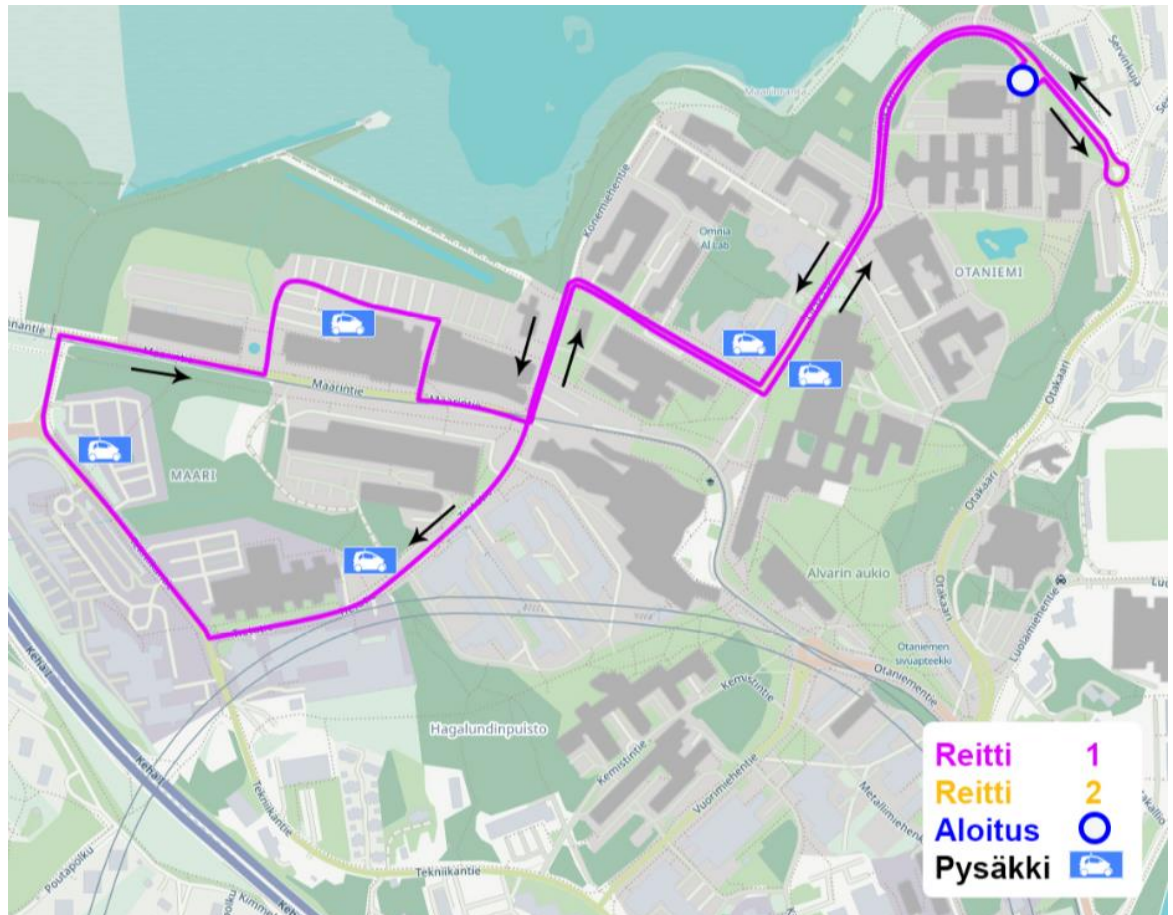
2.1 Renault Twizy

aIGO:n pilottiajoja on suoritettu Sensible 4:n automatisoimilla kahdella sähkötoimisella Renault Twizyllä Espoossa, Vantaalla ja Hämeenlinnassa. Kuvassa 1 on testialustana toimiva Renault Twizy, joka ohjaa itseään ennalta määrätyn reitin mukaan. Pilottiajojen aikana Twizyssä on aina paikalla apukuljettaja, joka voi tarvittaessa ottaa ajoneuvon ohjauksen haltuun.



Kuva 1 Sensible 4:n automatisoima Renault Twizy

Pilottiajot ovat julkisia, ja Renault Twizyn kyytiin mahtuu yksi matkustaja kerrallaan. Pilottiajoneuvot ajavat julkisen liikenteen tapaan ennalta määrätyn reitin pysäkiltä pysäkillle. Kuvassa 2 on esitetty Renault Twizyn ajoreitti Espoon Otaniemessä.



Kuva 2 Pilottiajoneuvon reitti Otaniemessä

2.2 Gacha-bussi

Gacha on autonomisesti liikennöivä bussi, joka on osa suurempaa aIGO-projektia. Gacha-bussilla julkisen liikenteen pilotoinnissa päästään lähemmäksi asiakasrajapintaa kuin kaksipaikkaisella Renault Twizyllä. Gacha-bussia rakennetaan yhteistyössä japanilaisen Muji-yrityksen kanssa niin, että Sensible 4 vastaa bussin tekniikasta ja Muji designista (YLE 2018). Bussissa on istumapaikat kymmenelle henkilölle, ja se on sähkötoiminen ja neliveto. Bussin molemmat päät ovat kääntyviä. Gachalla tullaan ajamaan pilot-tiajoja kesällä 2019. Kuvassa 3 on havainnollistava kuva siitä, miltä Gacha-bussi tulee valmiina näyttämään.



Kuva 3 Mujin muotoilema Gacha-bussi (Sensible 4, 2018)

3 Ohjauksen suunnittelu

3.1 Aloitustilanne

Insinööriyön tekijän osalta työt alkoivat osa-aikaisena maaliskuussa 2018. Bussiin oli tässä vaiheessa suunniteltu runkoa ja voimansiirtoa. Kuvassa 4 on Gacha-bussin rungon alaosa, joka on hitsattu kokoon Metropolian jigipöydällä. Projekti oli maalausta lukuun ottamatta kuvan 4 vaiheessa, kun insinööriyön tekijä liittyi suunnitteluun mukaan. Bussin rungon etu- ja takapäähän oli asennettu Volkswagen Passatin vuosimallin 2008 keulan alustan osat pois lukien jouset, jotka oli vaihdettu Air Lift Performancen ilmajousiin. Bussi on alustaltaan symmetrinen ja molemmat päät ovat vetäviä ja kääntyviä.

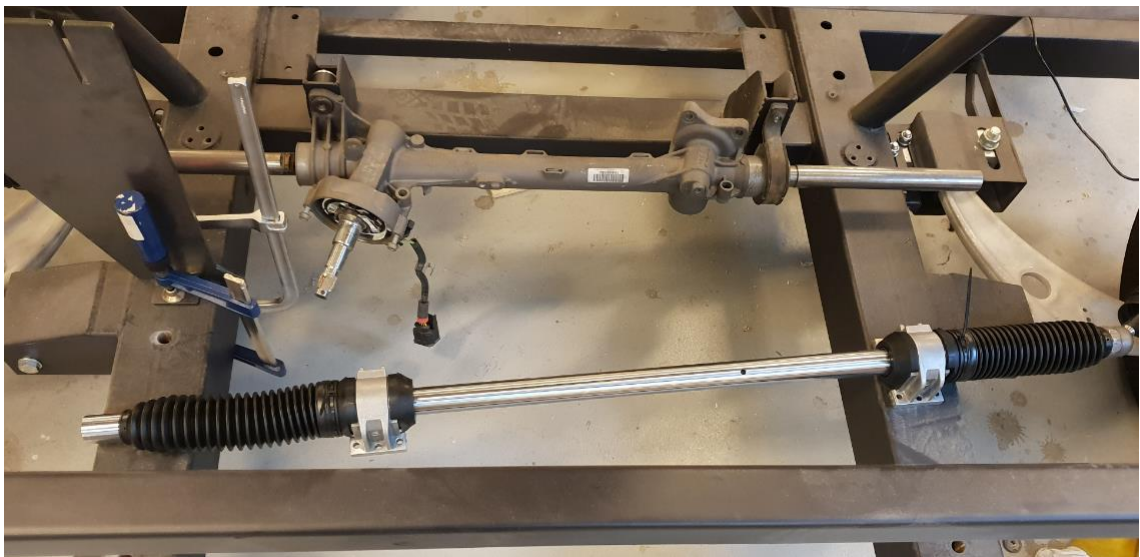
Aluksi ohjaus oli tarkoitus toteuttaa Passatin alkuperäisellä hammastangolla, johon olisi liitetty servomoottori rattiakseliin. Ohjauksen sijaintitieto puolestaan olisi kahdennettu rattiakseliin tulevalla pyörintäabsoluuttianturilla. Servomootoritoteutustavasta luovuttiin sen hankalan tilamallin takia toukokuussa 2018. Uudeksi ohjaustavaksi valikoitui sähköhydrauliseen sylinteriin perustuva ohjaus, koska sen sai sopimaan Gacha-bussiin paremmin. Sähköhydraulinen sylinteri suunniteltiin liitettäväksi hammastangon korvaavaan voimavälitystankoon.



Kuva 4 Gacha-bussin rungon alarunko ja alusta

3.2 Servomootoritoteutus

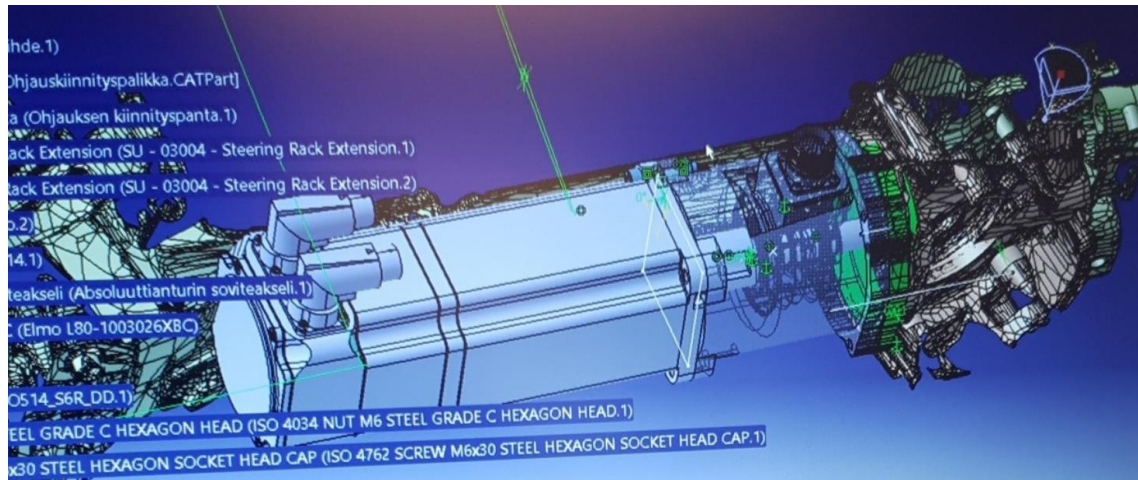
Passatin alkuperäisessä hammastangossa ohjaustehostimen kulmavaihte on 21:1. Ilman vaihdetta hammastankoa käännettäessä tarvitaan 3,5 kierrosta hammastangon käydessä ääriasennosta ääriasentoon. Kulmavaihteen päästä käännettäessä tarvitaan 73,5 kierrosta hammastangon liikuttamiseksi ääriasennosta toiseen. Sekunnin kääntönopeudella ääriasennosta toiseen tarvitaan servomootorin pyörimisnopeudeksi $73,5 \cdot 60 \text{ s} = 4410 \text{ rpm}$. Passatin alkuperäinen ohjaustehostimen moottori tuottaa 4,1 Nm väännön. Kuvassa 5 Passatin hammastanko runkokiinnikkeisiin kiinnitettynä, ja etummaisena kuvassa näkyy Gacha-bussiin suunniteltu ohjaustanko laakereineen.



Kuva 5 Passatin alkuperäinen hammastanko ja sovellukseen tuleva ohjaustanko

Passatin alkuperäistä ohjaustehostimen moottoria ei voitu hyödyntää, sillä se ei tue bussiin tulevaa ohjausjärjestelmää. Niinpä Passatin alkuperäisen servomootorin tilalle oli tarkoitus kiinnittää uusi Kinavon SMH80-servomoottori (ks. Kinavo 2017). Ohjauskulman tietäminen tarkasti on äärimmäisen tärkeää autonomisessa ajamisessa, ja tämän takia mittaustulos varmennetaan kahdella erillisellä anturilla. Kinavon oman resolverin lisäksi pyörimisen mittausta kahdentamaan suunniteltiin Bei Sensorsin absoluuttianturia PHO5, joka tukee CAN-protokollaa.

Kuvassa 6 esitetään servomoottori liitettynä Passatin hammastankoon CAD-mallissa. Servomoottorin välissä on laippa, jonka sisällä on pyörimistä mittaava absoluuttianturi PHO5.



Kuva 6 Servomoottori-toteutus

Servomoottorin avulla toteutettavasta ohjauksesta kumminkin luovuttiin hankalan tila- mallin takia kolmen kuukauden suunnittelun jälkeen. Passatin alkuperäiset osat olisivat tuottaneet paljon hankaluuksia uusien osien liittämiseen. Servomoottoritoteutus olisi vaatinut myös paljon käännteistä mallinnusta ja hankalia koneistuksia, ja sitä ei olisi saatu mahtumaan sille bussissa suunniteltuun tilaan yhdessä voimansiirtopaketin kanssa.

3.3 EHA-toteutuksen suunnittelu ja komponentit

Ohjaus päädyttiin lopulta toteuttamaan Parkerin sähköhydraulisella sylinterillä, koska se saatiin sovitettua paremmin auton kokoonpanoon, ja ohjaukseen tarvittavat komponentit sopivat paremmin yhteen.

EHA-toteutus tehtiin säilyttämällä Passatin ohjausgeometria, joka noudattaa Ackermanin ehtoa. Ohjaustanko liikkuu samassa suhteessa kuin Passatin hammastanko. Ohjausta on mahdollista säätää enemmän kääntyväksi muuttamalla mekaanisten toppareiden paksuutta ja tekemällä ohjelmallinen muutos.

EHA-toteutus alkoi suunnitteleamalla sylintereille ja lineaarilaakereille kiinnikkeet, jotka sopivat jo runkoon hitsattuihin Passatin hammastankoa varten tehtyihin kiinnikkeisiin. Kiinnikkeet toteutettiin pääosin laserleikatusta 4 ja 5 mm:n paksuisista S355-teräslevyistä. Laserleikatut osat tilattiin Keravan Teräsmiehiltä. Osat sovitettiin toisiinsa palapepitekniikalla. Leikattujen osien liitoskohtiin jätettiin 0,1 mm:n välykset sopivuuden varmistamiseksi. Laserleikatut osat koottiin jigipöydällä ja TIG-hitsattiin kiinni. Kiinnikkeiden taipuminen ja kestävyys testattiin suunnitteluvaiheessa Catian FEM-työkalulla.

Hammastangon korvaava ohjaustanko tilattiin KTS-Mekanolta Vantaalta. Ohjaustangon materiaali on EN20MnV6. Materiaalia käytetään yleisesti sylinteriakseleissa ja sillä on hyvät korroosionkesto-ominaisuudet. Materiaali on erityisen kovaa ja siksi hankalaa työstää, ja tästä syystä ohjaustangon koneistus ulkoistettiin. Ohjaustangon päihin tuli M16x1.5 sisäkierteet Passatin alkuperäisten raidetankojen kiinnitystä varten. Ohjauskiinnikettä varten ohjaustankoon tehtiin 6 mm:n läpäreikä.

Ohjaustangon laakereiksi valittiin SKF:n liukulaakerit, koska laakereista haluttiin huoltovapaita ja paremmin epäpuhtautta kestäviä. Laakerit tilattiin valmiina yksikköinä, joissa POM:sta valmistettu liukupinta on alumiinisen laakeripukin sisällä. LUCR 30 PA, jonka tehtävänä on kannatella ja ohjata ohjaustankoa, kiinnitettiin ohjauksen runkokiinnikkeisiin. LUCT 20 PA puolestaan on kiinnitetty ohjauskiinnikkeen alapintaan. Se liukuu pitkin LJM20X235ESSC8/50-liukukiskoa, joka on kiinnitetty erilliseen runkokiinnikkeeseen. Näiden tehtävä on pitää ohjauskiinnikkeen liike suorassa ohjaustankoon nähden.

Laakeripukkeihin mallinnettiin tiivistekiinnikkeet ja ne tulostettiin ABS-muovista Ultimaker 2+ 3D-tulostimella. Tiivistekiinnikkeet liimattiin epoksiliimalla nitriitistä valmistettujen pyyhkijätiivisteiden kanssa laakeripukkeihin. Pyyhkijätiivisteet estävät epäpuhtautta pääsemästä laakeripinnoille ohjaustangon tehdessä edestakaista liikettä. Tiiviste-kiinnikkeisiin tehtiin kiinnityspinta ohjausakselin suojakumia varten. Suojakumi suojaa ohjaustankoa lokasuojan koloista mahdollisesti tulevalta epäpuhtaudelta.

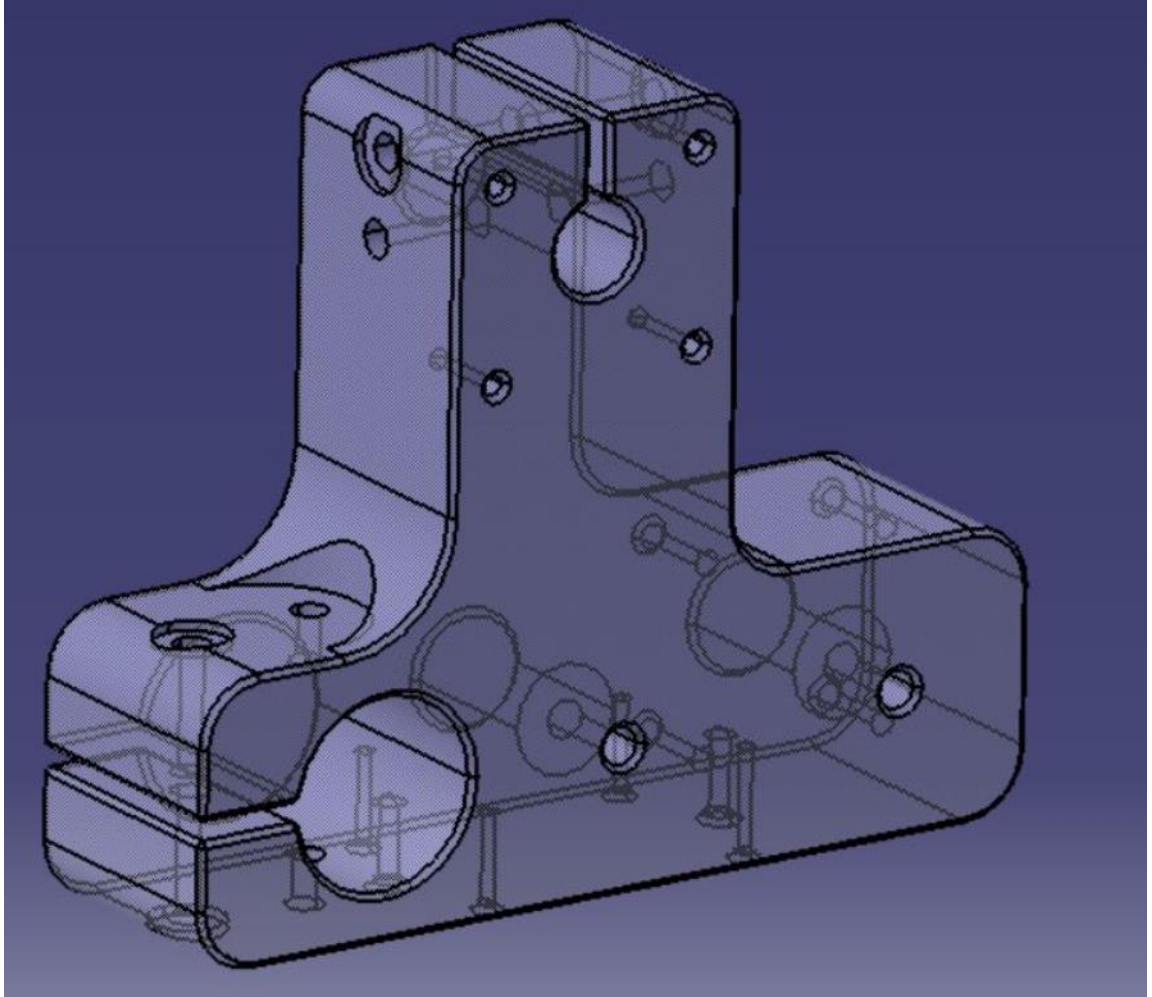
EHA-toteutuksen komponentit

Ohjauksen runko rakennettiin 4 ja 5 mm:n paksuisista laserleikatuista S355-teräslevyistä, sekä 20 x 1.5 mm:sestä teräsputkesta. Laserleikatut teräslevyt tilattiin Keravan Teräsmiehiltä. Valmiit teräslevyt sovitettuna toisiinsa kuvassa 7.



Kuva 7 Laserleikattuja ohjauksen osia

Kuvassa 8 on ohjauskiinnike, joka välittää voiman EHA:lta ohjaustangolle. Ohjauskiinnike valmistettiin 5083 alumiinista. Ohjauskiinnikkeen topparit tilattiin Keravan Teräsmiehiltä levyosina.



Kuva 8 Ohjauskiinnikkeen Catia-malli

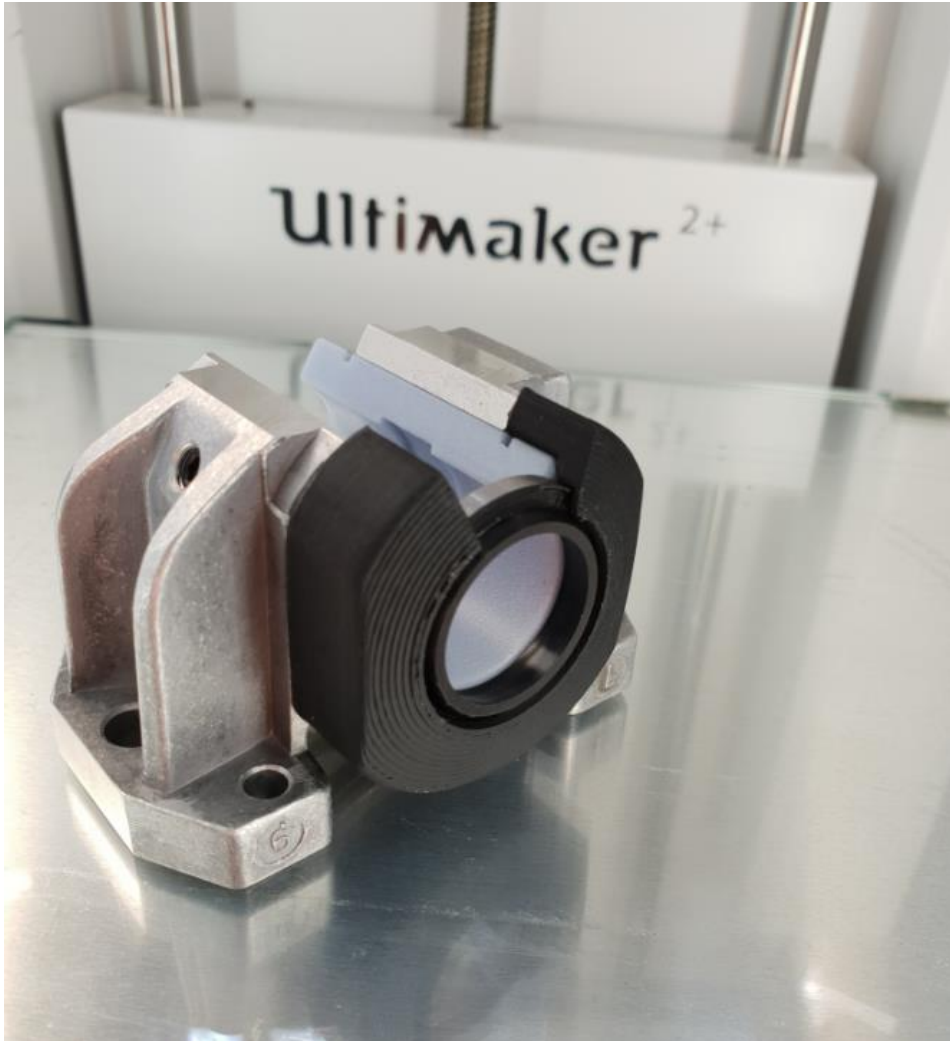
Kuvassa 9 näkyy bussin ohjaustangot laakereineen. Ohjaustankojen tehtävä on välittää EHALta tuleva voima raidetangoille, jotka kääntävät ajoneuvon pyöriä. Ohjaustankojen materiaali on kovakromattua männänvarsitankoa EN20MnV6, ja ohjaustangon halkaisija on 30 mm.



Kuva 9 Ohjaustangot ja laakerit

Kuvassa 9 näkyvät myös ohjauksessa käytettävät laakerit SKF:n LUCR 30 PA, LUCT 20 PA, sekä liukukisko LJM20X235ESSC8/50. Ohjaustangon suojakumit ovat kooltaan 32 x 250 mm, ja ne on kiinnitetty 3D-tulostettuihin tiivistekiinnikkeisiin.

LUCR 30 PA:han ja LUCT 20 PA:han tulostettiin Ultimaker 2+ 3D-tulostimella ABS-muovista kiinnikkeet pyyhkijätiivisteille. Tiivisteet ovat nitriittikumia. Kuvassa 10 näkyy tiiviste ja kiinnike sovitettuna LUCT 20 PA:han.



Kuva 10 SKF:n liukulaakeri LUCT 20 PA, johon on 3D-tulostettu tiivisteelle kiinnike

Ohjauksen sijaintitietoa varten OEM:ltä tilattiin akselitoimiset IXTHUS KTC-lineaaripotentimetri. Lineaaripotentimetrin suojausluokka on IP65 ja mittausmatka 175 mm. Potentiometri antaa vastuksen 0–20 Kohm väliltä. Potentiometrejä tuli kaksi kappaletta molempiin ohjauksiin, ja näin mittausulos saadaan kahdennettua. Kuvassa 11 näkyy lineaaripotentimetrit sovitettuna laserleikattuun kiinnikkeeseen.



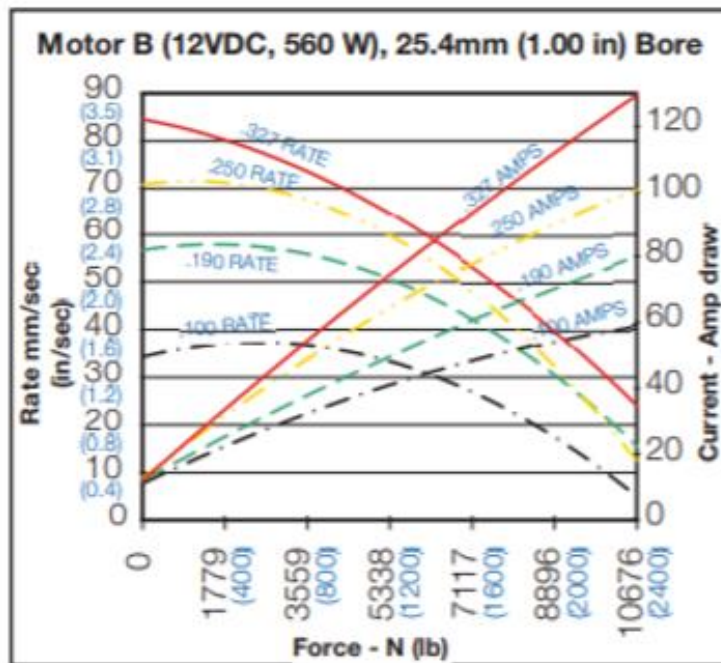
Kuva 11 Ixthus KTC-lineaaripotentimetrit

Kuvassa 12 näkyy Parker Compact EHA (Electro-Hydraulic Actuator), kompakti sähköhydraulinen sylinteri, joka toimii kahteen suuntaan tasavirtamoottorin pyörittämän pumpun toimesta. Tämänkaltaisia sylintereitä on saatavilla useilla eri optioilla. Gachabussin ohjaukseen valittiin EHA, joka toimii 24 V:n jännitteellä ja on teholuokaltaan 560 W.



Kuva 12 EHA, Sähköhydraulinen sylinteri (Parker 2011)

Sylinterin iskunpituus on 203 mm, työntövoima on 10675 N ja vetovoima 7120 N. Kuormittamattomana sylinteri liikkuu 85 mm/s. Kuvassa 13 laskeva punainen viiva osoittaa ohjaukseen valitun EHA:n nopeusvoimasuhdetta. Punainen lineaarisesti nouseva viiva kuvaa virtavoimasuhdetta.



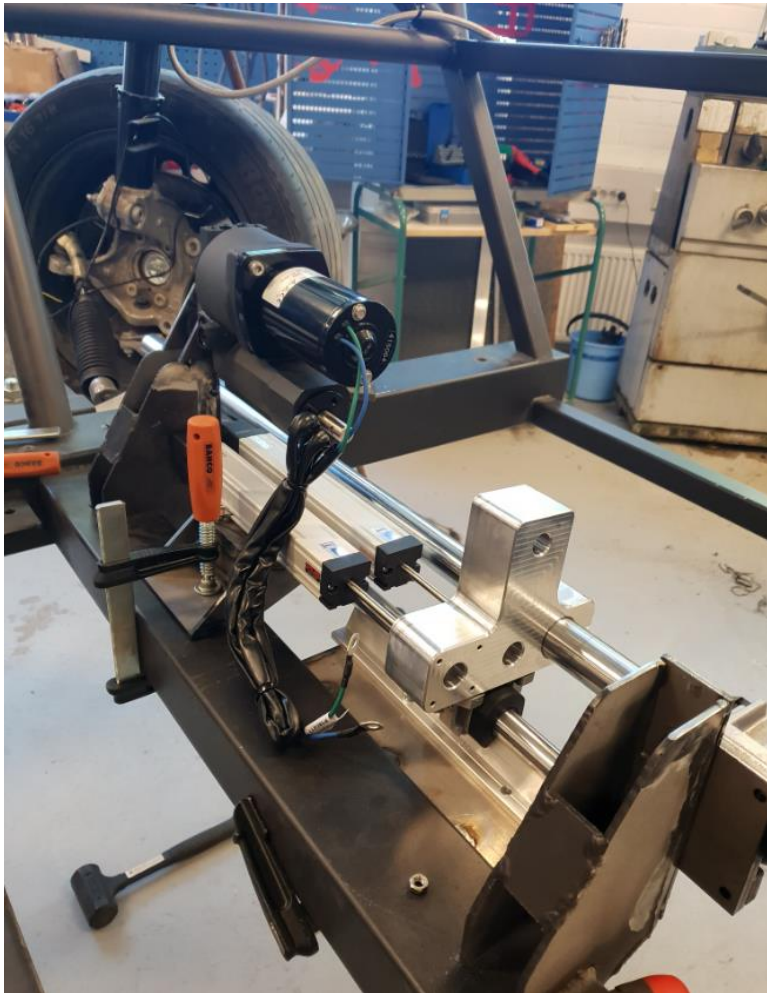
Current draw for Motor C (24VDC, 245 W) and Motor D (24VDC, 560 W) will be approximately $\frac{1}{2}$ of Amp draw shown above.

Kuva 13 EHA:n tekniset tiedot

4 EHA-toteutuksen kokoonpano ja testaus

4.1 Ohjauskomponenttien kokoonpano

Kun kaikki tilatut komponentit saapuivat, ryhdyttiin laakereiden ja EHA:n kiinnityksiä kohdistamaan paikoilleen. Levyosat hitsattiin runkoon kiinni kohdistamalla kaikki komponentit ohjausakselin mukaan. EHA:n alkuperäinen kiinnitysreikä, 6.4 mm, porattiin 8 mm:n suuruiseksi. Kuvassa 14 näkyvät ohjauksen komponentit sovitettuna paikoilleen ennen hitsausta. Levyosat kiinnitettiin runkoon TIG-hitsauksella, pois lukien liukukiskon kiinnike, joka kiinnitettiin pulttiliitoksilla. Myös muut komponentit, kuten laakerit ja EHA, liitettiin paikoilleen pulttiliitoksilla.



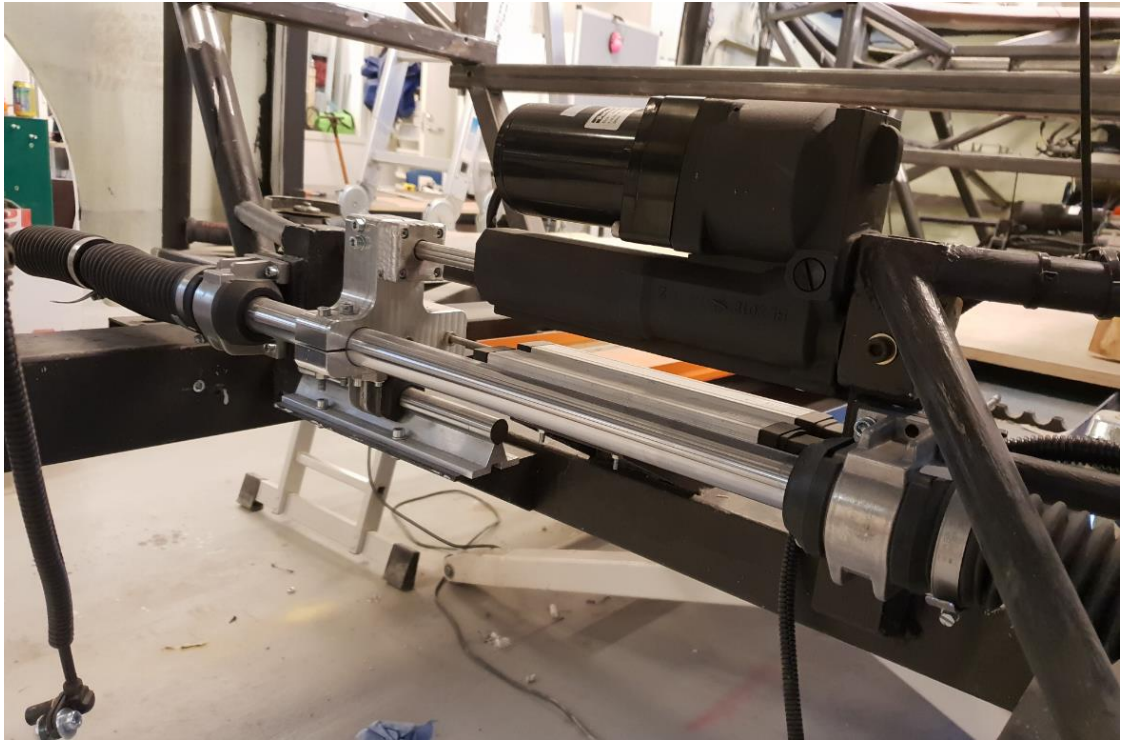
Kuva 14 Komponenttien sovitus ennen hitsausta

4.2 Ohjauksen testaus

Kokoamisen jälkeen ohjausta testattiin. Gacha-bussin runko nostettiin autonosturilla ilmaan, ja ohjauksen liikkuvuutta kokeiltiin ajamalla sylinteriä toppareita vasten. Samalla katsottiin, kuinka paljon pyörät kääntyvät todellisuudessa. Myös ohjauskulmien karkea säätö tehtiin tässä vaiheessa. Bussin ohjausta testattiin myös rungon ollessa maassa, renkaita käännellen. Molempien testaustapojen jäljiltä todettiin, että ohjaus toimii odotetulla tavalla. Varsinaista käyttökokemusta ohjauksen toimivuudesta saadaan kuitenkin vasta siinä vaiheessa, kun Gacha-bussin testiajot alkavat keväällä 2019 bussin valmistuttua ajokuntoon myös muilta osin. Kuvissa 15 ja 16 näkyy testausvalmis lopputulos, kun kaikki komponentit ovat kiinnitettyinä paikalleen.



Kuva 15 Kokoonpano valmiina testattavaksi, takaa kuvattuna



Kuva 16 Kokoonpano valmiina testattavaksi, edestä kuvattuna

5 Yhteenveto

Gacha-bussin ohjausta lähdettiin suunnittelemaan servomootoritekniikan pohjalle, mutta suunnitteluvaiheessa tekniikka päädyttiin vaihtamaan. Syynä tähän oli Passatin alkuperäisten osien ja servomootorin haasteellinen yhteensovittaminen. Tämän vuoksi ohjaus toteutettiin lopulta EHA-tekniikalla, koska sen sai parhaiten sovitettua bussin muuhun kokoonpanoon ja muotoon.

Ohjauksen suunnittelu ja toteutus sisälsi monipuolisesti erilaisia työvaiheita, kuten ohjausmekaniikan Catia-mallintamista, tiivisteikiinnikkeiden 3D-tulostamista, levyosien hitaamista, komponenttien valintaa ja asentamista.

Ohjaus vaikutti testauksen jälkeen toimivalta, mutta käytännötoimivuudesta saadaan lisätietoa samalla kun Gacha-bussilla aloitetaan suorittamaan testiajoja. Projekti ei ole vielä täysin valmis, vaan käyttökokemusten myötä ohjausjärjestelmää tullaan parantamaan. Lisäksi valmista bussia täytyy saada tarkastella kokonaisuutena, jotta muutoksia voidaan tehdä kokonaisuutta silmällä pitäen.

Lähteet

Sensible 4. 2018. aIGO Public Transportation Pilot Project. Verkkoaineisto. <https://www.sensible4.fi/aigo>. Luettu 14.2.2019

YLE. 2018. Japanilaisen designjätti Mujin Suomen-suunnitelmat tarkentuivat: luvassa muun muassa robottibussi. Verkkoaineisto. <https://yle.fi/uutiset/3-10484613>. Luettu 24.1.2019

Parker. 2011. Instruction Manual. Verkkoaineisto. <http://www.parker.com/Literature/Hydraulic%20Pump%20Division/Oildyne%20EHA/Compact%20EHA%20Instruction%20Manual%20HY22-3200B%207-13.pdf>. Luettu 11.9.2018.

Kinavo. 2017.AC Synchronous Servo Motor Catalogue. Verkkoaineisto. http://www.kinavo.com/en/upload/down/month_1807/20180704215628535.pdf. Luettu 2.5.2018