AJONVAKAUTUSJÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU SÄHKÖMOOTTORIPYÖRÄÄN

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Sähkötekniikan kandidaatintyö

2022

Oskari Salmi

Tarkastaja: Apulaisprofessori Niko Nevaranta

Ohjaaja: DI Alex Anttila

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Energy Systems

Sähkötekniikka

Oskari Salmi

Ajonvakautusjärjestelmän suunnittelu sähkömoottoripyörään

Sähkötekniikan kandidaatintyö

2022

41 sivua, 12 kuvaa ja 2 taulukkoa

Tarkastaja: Apulaisprofessori Niko Nevaranta

Ohjaaja: DI Alex Anttila

Avainsanat: ajonvakautusjärjestelmä, luistonesto, keulimisen tunnistus, optimaalinen luistosuhde

Tekniikan kehittyessä ja tullessa yhä merkityksellisemmäksi ratamoottoripyörissä, myös erilaisten ajonvakautusjärjestelmien (*engl. electronic stability control, ESC*) tärkeys korostuu. Kaksipyöräisen ajoneuvon ESC-järjestelmällä on kaksi merkittävää tehtävää: ajoneuvon turvallisuuden parantaminen eli hallinnan säilyttäminen sekä maksimaalisen suorituskyvyn optimoiminen. Käytännössä ESC:n toiminnan edellytyksenä on vetävän renkaan luistosuhteen määrittäminen sekä keulimisen tunnistaminen.

Tässä kandidaatintyössä perehdytään ajonvakautusjärjestelmiin, moottoripyörän dynamiikkaan ja siihen, mikä yhteys renkaan luistamisella ja kitkakertoimella on. Työssä tutkitaan tarkemmin renkaan ja ratapinnan välisen voiman sekä luistamisen yhteyttä Pacejkan mallin (*Magic Formula*) avulla. Lisäksi työssä tarkastellaan optimaaliseen luistosuhteeseen vaikuttavia tekijöitä.

J. Hyneman Centerillä (JHC) kehitetään Ukkonen-superpyörää, jonka ESC-järjestelmä on suunnittelun alaisena. Työssä tarkastellaan mistä osista ESC koostuu ja kuinka tieto järjestelmässä kulkee eri osien välillä. Anturidatan avulla saadaan tietoa moottoripyörän tilasta, minkä pohjalta ESC voi rajoittaa moottorin vääntömomenttia. Työssä pohditaan mittaus- ja säätömenetelmiä ajonvakautuksessa käytettäväksi sekä esitetään yksi mahdollinen toteutus lohkokaaviomuodossa.

ABSTRACT

Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Electrical Engineering

Oskari Salmi

Desing of a stability control system for an electric motorcycle

Bachelor's thesis

2022

41 pages, 12 figures and 2 tables

Examiner: Assistant Professor Niko Nevaranta

Supervisor: M.Sc. Alex Anttila

Keywords: electronic stability control, traction control, wheelie detection, optimal slip ratio

As technology is developing and becoming more relevant in track motorcycles, also the importance of electronic stability control (ESC) systems increases. The ESC of a two-wheeled vehicle has two important tasks: improving the safety of the vehicle, i.e. maintaining control, and optimizing maximum performance. In practice, the operation of the ESC requires the determination of the slip ratio of the driving tire and detection of wheelies.

This bachelor's thesis focuses on stability control systems and to modeling of the dynamics of a motorcycle with a viewpoint to the connection between tire slip and friction. The relationship of force between the tire and the track surface and slipping is investigated in more detail using Pacejka's model (Magic Formula). This thesis examines the factors affecting to the optimal slip ratio and how the control system can estimate it.

At the J. Hyneman Center (JHC), the Ukkonen superbike and it's ESC system is being under development. The work looks at what parts an ESC consists of and how information between different components and devices in the system is coordinated. The sensor data provides information about the condition of the motorcycle, based on which the ESC system can limit the engine's torque. The work also considers measurement and control methods needed for driving stability and introduces a block diagram of possible architecture.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

a	moottoripyörän kiihtyvyys	[m/s^2]
b	massakeskipisteen pituussuuntainen etäisyys taka-akselista	[m]
B	Pacejkan mallin parametri	[-]
C	Pacejkan mallin parametri	[-]
D	Pacejkan mallin parametri	[-]
E	Pacejkan mallin parametri	[-]
F_d	ilmanvastus(voima)	[N]
F_l	nostovoima	[N]
F_s	sivuttaissuuntainen voima	[N]
F_w	vierintävastusvoima	[N]
F_β	sivuluistokulman aiheuttama sivuttaissuuntainen voima	[N]
F_ϕ	kallistuskulman aiheuttama sivuttaissuuntainen voima	[N]
g	gravitaatiokiihtyvyys	[m/s^2]
G	gravitaatiovoima	[N]
h	massakeskipisteen etäisyys ratapinnasta	[m]
J_r	takarenkaan hitausmomentti	[kgm^2]
K	kaarevuus	[-]
m	moottoripyörän ja kuljettajan massa	[kg]
N_r	takarenkaaseen kohdistuva tukivoima	[N]
N_f	eturenkaaseen kohdistuva tukivoima	[N]
p	akseliväli	[m]
R	CAN-väylän vastus	[Ω]

r_f	eturenkaan säde	[m]
r_r	takarenkaan säde	[m]
S	käyttövoima	[N]
T_r	takarenkaan vääntömomentti	[N]
v	moottoripyörän pituussuuntainen nopeus	[m/s]
v_f	eturenkaan kehänopeus	[m/s]
v_r	takarenkaan kehänopeus	[m/s]
x	etuiskunvaimennuksen syvyys	[cm]

Kreikkalaiset

α	takarenkaan kulmakiihtyvyys	[rad/s^2]
β	sivuluistokulma	[°]
λ	pituussuuntainen luistosuhde	[-]
λ_0	optimaalinen pituussuuntainen luistosuhde 64 km/h nopeudella	[-]
λ_op	optimaalinen pituussuuntainen luistosuhde	[-]
μ	kitkakerroin	[-]
ϕ	kallistuskulma	[°]
ω_f	eturenkaan pyörimisnopeus	[rad/s]
ω_r	takarenkaan pyörimisnopeus	[rad/s]

Lyhenteet

ASR	luistonestojärjestelmä (Acceleration Slip Regulation)
ABS	lukkiutumattomat jarrut (Anti-lock Braking System)
ECU	elektroninen ohjausyksikkö (Electronic Control Unit)

ESC	ajonvakautusjärjestelmä (Electronic Stability Control)
MSC	moottoripyörän ajonvakautusjärjestelmä (Motorcycle Stability Control)
TCS	luistonestojärjestelmä (Traction Control System)

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Symboli- ja lyhenneluettelo

1 Johdanto 8
2 Katsaus ajonvakautusjärjestelmiin 10
3 Moottoripyörän fysiikkaa 12
3.1 Käyttövoiman fysikaaliset rajoitteet 13
4 Käyttövoiman ja luistamisen välinen yhteys 16
4.1 Pituussuuntainen luistaminen 16
4.2 Luisto sivuttaissuunnassa 21
4.3 Muiden tekijöiden vaikutus optimaaliseen luistosuhteeseen 22
5 Ajonvakautusjärjestelmän rakenne ja toteutus 24
5.1 CAN-väylä 26
5.2 Luistosuhteen ja keulimisen tunnistaminen 27
5.3 Mittaukset 29
5.4 Säätörakenteen mahdollinen toteutus 31
6 Johtopäätökset 35
Lähteet 37

1 Johdanto

LUT yliopiston J. Hyneman Centerillä (JHC) on kehitetty sähköistä Ukkonen-superpyörää, joka on esitetty kuvassa 1.1. Yksi projektiin liittyvistä kehitystehtävistä on ajonvakautusjärjestelmän (*engl. electronic stability control, ESC*) suunnittelu ja toteutus. ESC-järjestelmä koostuu aktiivisesta tekniikasta, joka tarkkailee moottoripyörän tilaa ja hallitsee sen toimilaitteita (Lich et al. 2015). Tässä kandidaatintyössä tutkitaan ESC:lle toteutusratkaisua. Työn tavoite on ESC:n kannalta oleellisten ilmiöiden ymmärtäminen, nykyisen kehityksen tilan kuvaaminen sekä lähtökohtien esittäminen yksinkertaisen toteutuksen tekemiseksi olemassa olevaan projektiin. Lisäksi tavoitteena on selvittää, mitä laitteita ESC-järjestelmä vaatii toimiakseen ja millaisien antureiden tuottamaa mittausdataa voidaan hyödyntää ESC:n toteutuksessa.

Kuva 1.1. Ukkonen-superpyörä nykyisessä kokoonpanossa.

Työn alussa selvitetään ESC:n merkitystä ja sen olemassa olevia toteutuksia ja sitä, missä vaiheessa näiden nykykehitys on kaksipyöräisissä ajoneuvoissa. Lisäksi tutkitaan moottoripyörän dynamiikkaa ja sen käyttäytymistä ajonvakautuksen kannalta merkityksellisissä tilanteissa. Näiden esittämiseen hyödynnetään fysikaalisia malleja. Työssä perehdytään renkaan luistamisen ja kitkakertoimen väliseen yhteyteen sekä tarkastellaan, mistä tekijöistä optimaalinen luistosuhde muodostuu, ja mitä se tarkoittaa liikettä tuottavan voiman kannalta. Lopuksi tutkitaan säätöteknistä toteutusta sekä käytännön toteutukseen liittyviä asioita.

ESC:n tarkoitus on parantaa pyörän ajettavuutta ja hallittavuutta, jotta ohjainlaitteen (kaasukahvan) tahattomasta käytöstä riippumatta pyörän hallinta säilyy kuljettajalla. Nykyisen superpyörän kokoonpanon nimellinen teho on 150 kW, joka voi aiheuttaa merkittävän riskin taitamattomalle kuljettajalle, sillä tyypillisen moottoripyörän teho on keskimäärin 20–90 kW (JHC 2020; PowerSportsGuide). Täten ESC-järjestelmä voi parantaa pyörän turvallisuutta erityisesti taitamattoman kuljettajan käytössä (Bosch Mobility Solutions 2022). Tässä yhteydessä on tärkeä mainita, että Saksassa vuonna 2011 kuolemaan johtaneista moottoripyöräonnettomuuksista 43 % on hallinnan menettämisestä johtuneita onnettomuuksia, joiden välttäminen voisi olla mahdollista aktiivisten ja turvallisuutta tehostavan ohjaustekniikoiden avulla. Laskelmien mukaan onnettomuuksista 5 % voitaisiin välttää moottoripyörän ajonvakautusjärjestelmän avulla ja yhdessä lukkiutumattomien jarrujen (*engl. anti-lock braking system, ABS*) kanssa 32 %. (Lich et al. 2015)

Ajonvakautusjärjestelmän turvallisuusnäkökulman lisäksi ESC:llä on tärkeä tehtävä pyörän menestymiseen ratakilpailuissa. Usein tavoite on kehittää ESC-järjestelmä, joka mahdollistaisi ratakilpailuissa menestymisen tukemalla kuljettajan ajamista. Toisin sanoen kilpailumenestystä halutaan parantaa pyörän teknisillä ominaisuuksilla. Järjestelmän on tarkoitus löytää tapa säännöstellä tehoa aktiivisesti siten, että on mahdollista saavuttaa maksimaalinen suorituskyky ajon eri tilanteissa.

2 Katsaus ajonvakautusjärjestelmiin

Moottoripyörien elektroniikka oli pitkään varsin yksinkertaista, kunnes vuonna 2006 Yamaha R6 julkaistiin, jolloin ohjausjärjestelmät ja niiden sisältämät funktiot muuttuivat merkittävästi monimutkaisemmiksi elektronisesti ohjatun kaasun vuoksi (Spalding 2018, 281). Ajonvakautusjärjestelmiä on toteutettu erityyppisiä ja eri tarkoituksiin, niin nelipyöräisiin kuin kaksipyöräisiinkin poltto- ja sähkömoottoriajoneuvoihin. Nelipyöräisiin ajoneuvoihin variaatioita onkin lähes yhtä monta kuin valmistajiakin, ja niiden järjestelmät on nimetty eri tavalla (NZTA 2021). Luistonestojärjestelmä (*engl. traction control system, TCS*) ja lukkiutumattomat jarrut (*engl. anti-lock braking system, ABS*) ovat usein osana ESC:tä, mikäli ajoneuvossa on sellaiset. Kaksipyöräisen ajoneuvon dynamiikka on merkittävästi monimutkaisempaa kuin nelipyöräisen, mikä vaatii ESC:ltä enemmän (Corno et al. 2013). Bosch:in kehittämä moottoripyöriin suunniteltu ESC on nimeltään Motorcycle Stability Control (MSC), joka sisältää muun muassa seuraavia ominaisuuksia: kääntymisen luistonesto (*engl. cornering traction control*), keulimisen esto (*engl. wheelie control*), jarrutuksen hallinta kaarteessa (*engl. cornering brake control*) sekä eCBS toiminto (*engl. electronically combined braking system*) (Bosch Mobility Solutions 2022; Lich et al. 2015, 469).

Luistonestojärjestelmä moottoripyörässä voidaan jakaa korjaavaan (*engl. reactive*) ja ennakoivaan (*engl. predictive*) toiminnallisuuteen. Korjaava järjestelmä tekee korjauksia vasta, kun pyörä alkaa luistamaan. Vastaavasti ennakoiva järjestelmä pyrkii puolestaan tekemään arvioita pyörän käyttäytymisestä eri antureiden avulla ja siten estämään tilanteen, jossa pyörä alkaisi luistamaan. Eri valmistajat käyttävät ESC:n toteutuksissa erityyppisten menetelmien yhdistelmiä riippuen sovelluskohteesta. ESC on yleisempi vain huippuluokan moottoripyörissä, mutta sen suosio kasvaa jatkuvasti halvemmissakin moottoripyörissä. (Bal 2017)

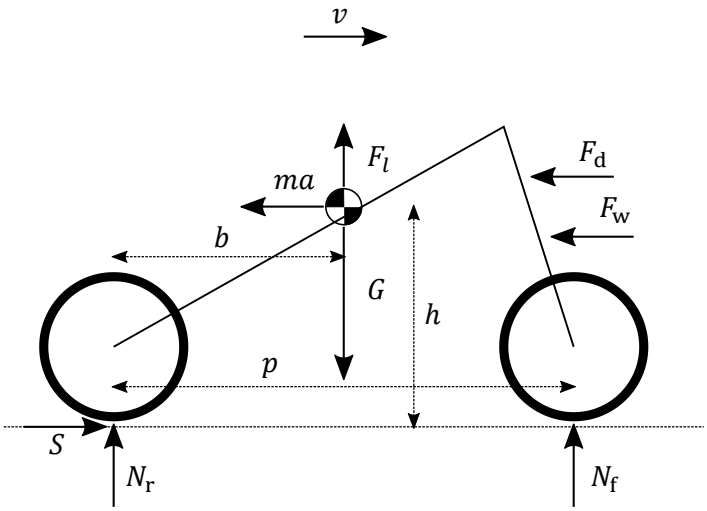
ESC-järjestelmä koostuu usein antureista ja elektronisesta ohjausyksiköstä ECU (*engl. electronic control unit*), joka kerää dataa antureilta ja ohjaa tämän perusteella moottoria ohjaavia laitteita. Moottoripyörään asennetuilta antureilta saadaan reaaliaikaista tietoa sen tilasta. Näitä tietoja ovat muun muassa pyörien pyörimisnopeudet, iskunvaimentimien syvyydet sekä moottoripyörän nopeus, kiihtyvyys ja kallistus. Usein ESC-menetelmät perustuvat yhtälöihin, jotka voidaan johtaa tunnetuista fysikaalisista ilmiöistä, jotka liittyvät

moottoripyörän dynamiikkaan. Tällöin ESC pyrkii pitämään pyörän hallinnassa antureilta saadun mittausdatan perusteella. Yksi tapa toteuttaa luistonesto kaksipyöräiseen moottoripyörään on mitata renkaiden pyörimisnopeutta ja pyörän nopeutta (Corno & Savaresi 2010, 90).

ESC:n tehtävä on säätää sekä rajoittaa moottorinohjaimelle syötettävää vääntömomenttiohjeen arvoa ja lopulta moottorin sekä vetävän renkaan vääntömomenttia. Polttomoottoripyörissä vääntömomenttia voidaan hallita muuttamalla sytytysennakkoa, sytytyksen keskeytyksillä sekä muuttamalla polttoaineen syöttöä kaasun aukeamisella (Spalding 2018, 287). Sähkömoottorin tapauksessa vääntömomenttia voidaan säätää momenttia tuottavalla ohjattavalla virtalähteellä (Pyrhönen et al. 2016, 17–31). Kun ESC-järjestelmään on liitetty jarrujärjestelmä, se voi hallita jarrujen käyttöä ja esimerkiksi jarruttaa kaarreajossa. Vauhtia voidaan myös hidastaa moottorijarrutuksella.

3 Moottoripyörän fysiikkaa

Moottoripyörän fysiikkaa voidaan kuvata fysiikan perusyhtälöin hyödyntämällä kuvassa 3.1 esitettyä vapaakappalekuvaa, jossa moottoripyörä on esitetty jäykkänä kappaleena, millä on massakeskipiste ja renkaiden ratakosketuspisteet. Vapaakappalekuvassa on myös esitetty geometriaan liittyvät parametrit sekä keskeisimmät pituus- ja pystysuuntaiset voimat.



Kuva 3.1. Moottoripyörän vapaakappalekuva pituus- ja pystysuuntaisista voimista sekä sen geometriaan liittyvät parametrit. Keskellä oleva ympyrä kuvaa moottoripyörän ja kuljettajan muodostamaa massakeskipistettä.

Kuvassa 3.1 v on moottoripyörän pituussuuntainen nopeus, b on massakeskipisteen pituussuuntainen etäisyys taka-akselista, h on massakeskipisteen korkeus ja p on akseliväli. Pituussuuntaisia voimia ovat liikettä tuottava voima eli käyttövoima S (*engl. driving force*), ilmanvastus(voima) F_d (*engl. drag force*), vierintävastusvoima F_w (*engl. rolling resistance force*) sekä kappaleen hitaudesta johtuva, kiihtyvyyden aiheuttama voima ma. Pystysuuntaisia voimia ovat gravitaatiovoima G, nostovoima F_l (*engl. lift force*) sekä renkaisiin kohdistuvat tukivoimat N_f ja N_r. Aerodynamiikka aiheuttaa moottoripyörälle ilmanvastuksen F_d ja nostovoiman F_l, jotka ovat suoraan verrannollisia nopeuden neliöön (Cossalter 2006, 92–93).

3.1 Käyttövoiman fysikaaliset rajoitteet

Kaksipyöräisen ajoneuvon ESC:n tärkeimmät ominaisuudet liittyvät moottoripyörän renkaiden luistamisen ja pyörän keulimisen tarkasteluun. Moottoripyörän hallittavuuden ja suorituskyvyn optimoinnin kannalta on olennaista, että vetävä rengas ei lähde luistamaan liikaa eikä eturengas irtoa ratapinnasta. Muihin ajoneuvoihin verrattuna moottoripyörällä on suuri painopisteen korkeuden ja akselivälin suhde, minkä vuoksi moottoripyörä on altis etupyörän nousemiselle maasta. Tämä ilmiö on merkittävä erityisesti suunniteltaessa korkean suorituskyvyn ajonvakautusta. (Corno et al. 2013, 2400) Sähkömoottori aiheuttaa vetävään renkaaseen vääntömomentin, jonka seurauksena renkaan kehällä vaikuttaa käyttövoima S. Tätä voimaa pyritään rajoittamaan siten, että kitka renkaan ja ratapinnan välillä säilyy riittävänä eikä moottoripyörä lähde keulimaan.

Mikäli moottorin tuottama voima on suurempi kuin kitkan mahdollistava vastavoima, rengas alkaa luistamaan. Kitkan lain mukaan käyttövoiman S on oltava

$$S \leq N_{\mathrm{r}}\mu, \tag{3.1}$$

jotta kitkavoimaa ei ylitetä. Yhtälössä N_{r} on takarenkaan tukivoima ja μ on ratapinnan ja takarenkaan välinen kitkakerroin. Takarenkaaseen kohdistuva tukivoima N_{r} voidaan laskea vapaakappalekuvaan perustuen yhtälöllä

$$N_{\mathrm{r}} = mg\frac{p-b}{p} + S\frac{h}{p} \tag{3.2}$$

(Cossalter 2006, 103–106). Yhtälöiden (3.1) ja (3.2) avulla saadaan raja-arvo moottorin vääntömomentin tuottamaksi käyttövoimaksi renkaassa, jolloin rengas ei lähde luistamaan

$$S \leq \frac{\mu mg\dfrac{p-b}{p}}{1-\mu\dfrac{h}{p}}. \tag{3.3}$$

Keuliminen eli renkaan irtoaminen ratapinnasta voidaan määrittää tilanteelle, jossa eturenkaan tukivoima on nolla. Tällöin eturenkaan tukivoimaksi saadaan

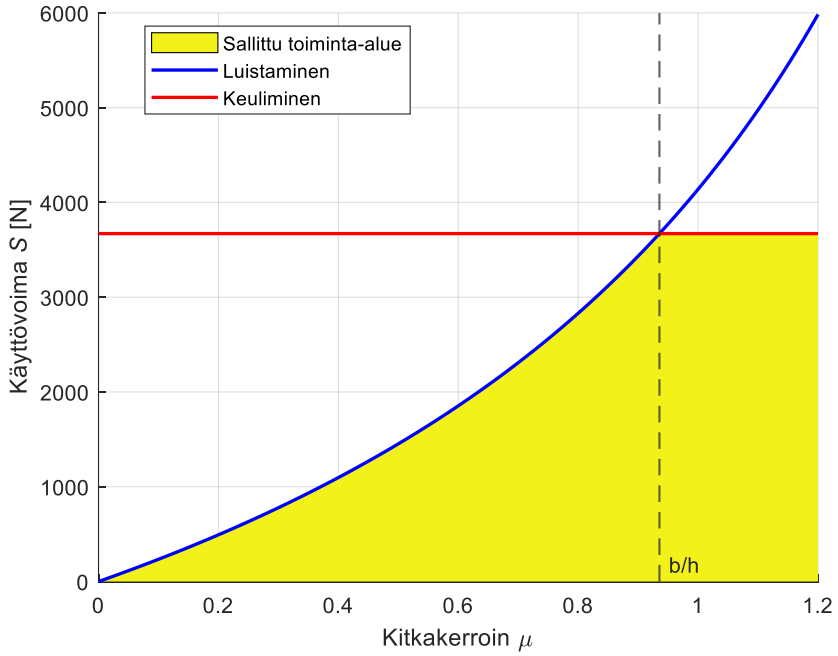
$$N_{\mathrm{f}} = mg\frac{b}{p} - S\frac{h}{p} = 0 \tag{3.4}$$

(Cossalter 2006, 114). Maksimi käyttövoimaksi S saadaan yhtälöllä (3.4)

$$S = gm\frac{b}{h}. \tag{3.5}$$

Tämän voiman avulla voidaan selvittää takarenkaaseen kohdistuva vääntömomentti, jolla pyörä alkaa keulimaan.

Kuvassa 3.2 nähdään käyttövoiman S riippuvuus kitkakertoimesta yhtälöiden (3.3) ja (3.5) mukaisesti, kun tarkastellaan rajakohtaa pidon menetykselle ja keulimiselle.



Kuva 3.2. Käyttövoiman S sallittu toiminta-alue kitkakertoimen μ funktiona, jolloin vältetään pidon menetys sekä keuliminen. Tarkastelussa moottoripyörän parametreille on annettu arvot g = 9,81 m/s^2, m = 400 kg, b = 0,58 m, h = 0,62 m ja p = 1,35 m.

Kuvan 3.2 mukaisesti rajoittavana tekijänä on luistaminen, kun kitkakerroin $\mu < \frac{b}{h}$ ja vastaavasti keuliminen, kun $\mu > \frac{b}{h}$. Keuliminen sekä luistaminen estetään, kun käyttövoima S rajoittuu käyrien alapuolelle, keltaisella korostetulle sallitulle toiminta-alueelle. Kuvasta havaitaan myös, että luistamiseen vaadittava voima riippuu kitkakertoimesta, mutta

keulimiseen vaadittava voima ei. Rajakohta $\mu = \frac{b}{h}$ määräytyy, kun yhtälöillä (3.3) ja (3.5) piirretyt käyrät leikkaavat toisensa. Tämä malli kuvaa siis käyttövoiman maksimin kitkakertoimen funktiona, jolla pitoa ei menetetä eikä moottoripyörä lähde keulimaan. Huomion arvoista on mainita, että massakeskipistettä kuvaavat parametrit b ja h riippuvat moottoripyörän ja kuljettajan asennosta.

4 Käyttövoiman ja luistamisen välinen yhteys

Renkaan ja ratapinnan välinen vuorovaikutus on tärkeä tekijä ESC:n luistoneston suunnittelussa. Yhtälön (3.3) ja kuvan 3.2 avulla on havainnollistettu, kuinka käyttövoima rajoitetaan siten, että luistamista ei tapahdu. Tässä luvussa kuitenkin havaitaan luistamisen olevan välttämätöntä, jotta kitkakerroin renkaan ja ratapinnan välillä olisi suurempi kuin nolla. Tällöin rengas vaatii tietyn määrän luistoa, jolloin se on tehokkaimmillaan ja saavuttaa maksimaalisen pidon (Spalding 2018, 281).

Rengas voi luistaa sekä pituus- että sivuttaissuunnassa (Cossalter 2006, 50–51). Takarenkaan pituussuuntainen luistosuhde λ (*engl. slip ratio*) voidaan laskea yhtälöllä

$$\lambda = \frac{\omega_\mathrm{r} \cdot r_\mathrm{r} - v}{v}, \tag{4.1}$$

missä ω_r on takarenkaan pyörimisnopeus ja r_r on sen säde (Cossalter 2006, 56; Bonci et al. 2020, 112872; Corno et al. 2013, 2400). Yhtälöstä nähdään, että luistosuhde λ kuvaa sitä, kuinka paljon kovempaa rengas pyörii suhteessa moottoripyörän pituussuuntaiseen nopeuteen v. Renkaan säde ei ole täysin vakio, ja sille voidaan estimoida efektiivinen säde, joka riippuu muun muassa sen pystysuuntaisesta kuormituksesta N_r ja jäykkyydestä (Metzler 2019, 179–180).

4.1 Pituussuuntainen luistaminen

Lähtökohtaisesti moottoripyörän renkaan ei haluta luistavan liikaa. Liian suuri luisto johtaa ei-maksimaaliseen kiihdytykseen sekä vakauden menettämiseen (Corno et al. 2013, 2400). Renkaan dynamiikkaa voidaan mallintaa niin sanotun Pacejkan mallin avulla (Bonci et al. 2020, 112874; Cossalter 2006, 52) sekä muodoltaan yksinkertaisemman Burckhardtin mallin avulla (Dousti et al. 2015). Pacejkan malli on yleisesti käytössä renkaan kulutuspinnan ja ratapinnan välisen vuorovaikutuksen simuloinnissa, ja sitä käytetään esimerkiksi MATLAB ja Adams Software -ohjelmissa (MathWorks 2022c; Bonci et al. 2020, 112874). Empiirisen tutkimuksen pohjalta muodostetusta Pacejkan mallin yleisestä muodosta käytetään kirjallisuudessa nimitystä *Magic Formula*, jolla voidaan kuvata erittäin hyvin renkaan ja

ratapinnan välisen vuorovaikutuksen pituus- ja sivuttaissuuntainen voima. Pacejkan mallin yleinen muoto on

$$S(\lambda) = D\sin\{C\arctan[B\lambda(1-E) + E\arctan(B\lambda)]\}, \quad (4.2)$$

minkä avulla saatavalla kuvaajalla käyttövoimaa S tai sen kerrointa kuvataan y-akselilla ja luistosuhdetta x-akselilla. (Cossalter 2006, 52; Zhang et al. 2014, 477) Parametrit B, C, D ja E voidaan määrittää kokeellisesti kunkin renkaan ja ratapinnan yhdistelmälle. Parametri B muuttaa käyrän jyrkkyyttä origon ympärillä, C vaikuttaa asymptoottiseen arvoon, kun luisto lähestyy ääretöntä, D määrittää käyttövoiman tai käyttövoiman kertoimen maksimiarvon ja E määrittää käyrän kaarevuutta lähellä huippua ja samalla huipun sijaintia (Cossalter 2006, 52).

Käyttövoiman määrittämiseksi Bonci et al. (2020) sekä MathWorksin Simscape kirjastosta löytyvä *Tire-Road Interaction* malli esittää arvot Pacejkan mallin parametreille, erään renkaan ominaisuuksien ja rataolosuhteiden yhdistelmälle (MathWorks 2022c). Nämä on annettu taulukossa 4.1.

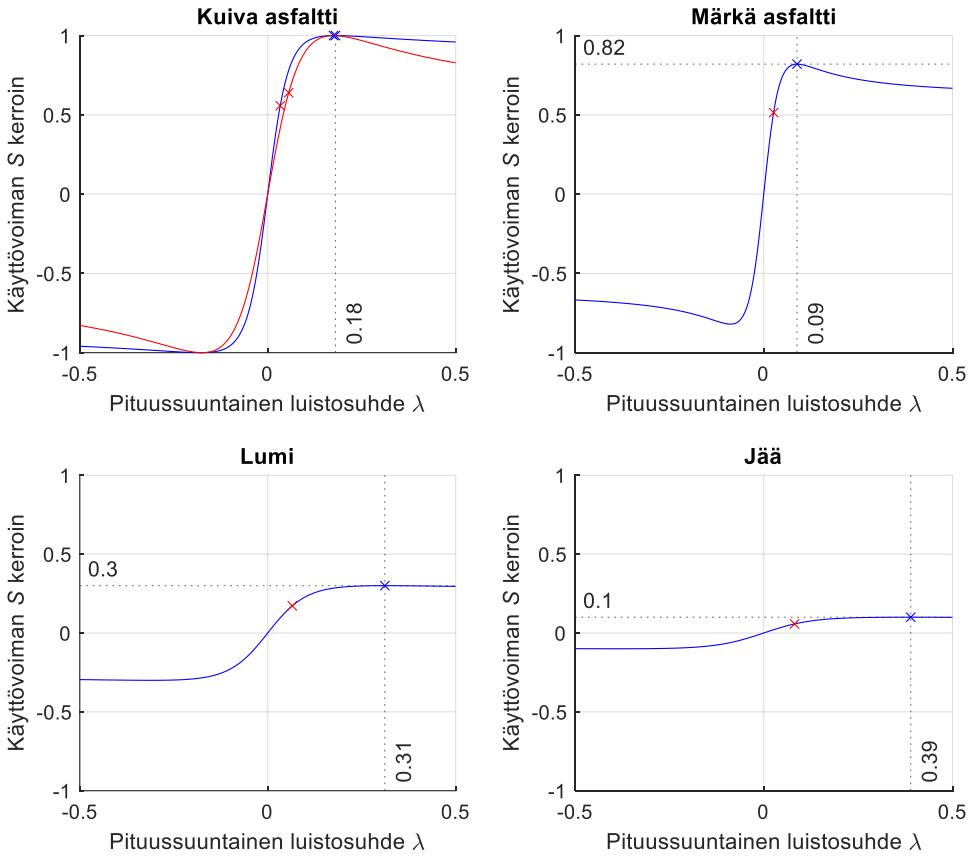
Taulukko 4.1. Bonci et al. (2020) julkaisussa mainitut sekä MathWorksin mallissa käytetyt Pacejkan mallin parametrien arvot eri rataolosuhteille (MathWorks 2022c).

Rataolosuhde	*B*	*C*	*D*	*E*
Bonci et al. (2020) Kuiva asfaltti	8,189	1,612	2012,3	-0,082
Kuiva asfaltti	10	1,9	1	0,97
Märkä asfaltti	12	2,3	0,82	1
Lumi	5	2	0,3	1
Jää	4	2	0,1	1

Taulukon 4.1 parametri D kuvaa käyrän maksimiarvoa, jolloin sen arvoon vaikuttaa myös se, esitetäänkö y-akselilla voiman absoluuttinen suuruus vai sen kerroin. Tämän vuoksi Bonci et al. (2020) esittämä parametri D eroaa merkittävästi MathWorksin arvosta.

Kuvassa 4.1 on taulukon 4.1 arvoilla ja Pacejkan mallin (4.2) avulla piirretyt kuvaajat, joissa esitetään käyttövoiman S kerroin luistosuhteen λ funktiona erilaisissa olosuhteissa. Bonci et al. (2020) arvoille oleva käyrä skaalataan sen maksimiarvolla, jotta käyrän huippukohta osuu 1 kohdalle. Käyttövoiman kerroin kuvaa kitkan määrää suhteessa kuivaan asfalttiin. Yhtälön (3.1) mukaisesti kitkan mahdollistava käyttövoima S riippuu tukivoimasta N_r ja

kitkakertoimesta μ, joiden tulon suuruinen voima vaikuttaa vetävän renkaan ja ratapinnan välillä. Täten voidaan ajatella, että käyttövoiman kerroin vastaa kitkakerrointa (Cossalter 2006, 60), mikä riippuu siitä, miten Pacejkan mallin parametri D on määritetty.



Kuva 4.1. Pituussuuntaisen luistosuhteen λ ja käyttövoiman S välinen yhteys Pacejkan mallilla eri rataolosuhteissa eräälle renkaalle. Kuvaajiin on lisätty positiivisen luistosuhteen puolelle sinisellä x-merkillä kohdat, jossa saavutetaan suurin pito sekä punaisella x-merkillä polvikohdat. Punainen käyrä vastaa Bonci et al. (2020) arvoja.

Kuvasta 4.1 nähdään renkaan luistosuhteen yhteys käyttövoiman kertoimeen. Tässä työssä tarkastellaan oikeaa puolitasoa, jolloin moottoripyörän kiihtyvyys on positiivinen. Vasemman puolitason käyrä kuvaa jarrutustilanteen, joka on oikean puolitason käyrän peilikuva origon suhteen. Kuvasta havaitaan renkaan luistamisen olevan välttämätöntä, jotta voidaan tuottaa liikettä tuottavaa voimaa. Keskellä kuvaajia on kohta, jossa rengas ei luista yhtään eli luistosuhde on nolla. Tällöin käyttövoiman kerroin on nolla, eikä rengas kehitä

käyttövoimaa. Kaikille rataolosuhteille yhteistä on se, että kitkakertoimen havaitaan kasvavan aluksi melko lineaarisesti renkaan luiston kasvaessa nollakohdasta, jolloin ollaan likimain lineaarisella alueella. Tällä alueella käyttövoiman kertoimen derivaatta on suurimmillaan.

Muiden rataolosuhteiden käyttövoiman kerrointa voidaan verrata kuivan asfaltin olosuhteeseen, jolloin saavutaan kertoimen maksimiarvo D, joka saa arvon yksi. Muilla olosuhteilla kertoimen arvo jää alle yhteen. Esimerkiksi jäisissä olosuhteissa käyttövoiman kertoimen suurin arvo eli parametrin D arvo on 0,1, joten käyttövoima jää kymmenesosaan kuivaan asfalttiin verrattuna.

Valituilla parametreilla käyttövoiman kertoimen maksimiarvo saavutetaan kuivalla asfaltilla 0,18 luistosuhteella. Tätä suuremmalla luistosuhteella käyttövoimaa ei saada kasvatettua, vaikka rengas pyörisi kovempaa. Myös Guodong et al. (2013) mainitsevat kitkakertoimen kasvavan luistosuhteen kasvaessa, mutta luiston edelleen kasvaessa tietyn rajan ylitse käyttövoima heikkenee. Kun käyttövoima saavuttaa maksiminsa, tätä vastaavaa luistosuhdetta kutsutaan optimaaliseksi luistosuhteeksi λ_{op} (*engl. optimal slip ratio*) (Guoxing et al. 2015, 2). Optimaalinen luistosuhde kuvan 4.1 renkaalle kuivalla asfaltilla olisi edellä saatu 0,18, jonka ESC pyrkii pitämään, kun halutaan tuottaa maksimaalinen käyttövoima. Vastaavalla analogialla ABS-järjestelmä pyrkii säilyttämään optimaalisen luistosuhteen -0,18 saavuttaakseen lyhimmän mahdollisen pysähtymismatkan (Hoseinnezhad & Bab-Hadiashar 2011, 1).

Lumisissa sekä jäisissä olosuhteissa optimaalinen luistosuhde (0,31 ja 0,39) on kuvan 4.1 mukaisesti merkittävästi suurempi kuin kuivissa ja märissä olosuhteissa (0,18 ja 0,09). Dousti et al. (2015), Hoseinnezhad & Bab-Hadiashar (2011), Urda et al. (2015) sekä Shahabi et al. (2021) julkaisuissa optimaalinen luistosuhde kuitenkin pienenee siirryttäessä kuivalta asfaltilta, lumisille tai jäisille olosuhteille. Dousti et al. (2015) määrittävät myös Burckhardtin mallilla optimaaliseksi luistosuhteeksi pienemmän arvon lumisille ja jäisille olosuhteille kuin kuivalle asfaltille. Kuvassa 4.1 havaittiin optimaalisen luistosuhteen olevan lumella ja jäällä suurempi kuin kuivalla asfaltilla. Täten MathWorksin parametrien arvot optimaalisen luistosuhteen määrittämiseen vaikuttavat kyseenalaisilta erityisesti lumisissa ja jäisissä olosuhteissa. Tosin, edellä esitettyjen julkaisujen mukaan lumella ja jäällä käyttövoima ei pienene sen maksimikohdan jälkeen niin merkittävästi luistosuhteen kasvaessa kuin kuivalla asfaltilla. Täten optimaalisen luistosuhteen arvioiminen liian suureksi ei ole niin

suuri virhe lumisissa ja jäisissä olosuhteissa kuin kuivalla asfaltilla. Koska myös MathWorksin Pacejkan mallin parametrit perustuvat kokeellisiin tutkimuksiin, ei niiden määrittämiseen ole yhtä oikeaa vaihtoehtoa (MathWorks 2022c).

Joskus kustannukset jonkin suureen kasvattamiselle eivät ole siitä saatavan hyödyn arvoisia, joten halutaan löytää paras kompromissi (Satopää et al. 2011). Joissakin tilanteissa maksimaalisen käyttövoiman saavuttaminen ei välttämättä ole optimaalisin vaihtoehto. Säädön suunnittelussa voidaan optimaalisen luistosuhteen lisäksi hyödyntää lineaarisen alueen loppuvaiheella olevaa luistosuhdetta. Lineaarisen alueen jälkeen käyttövoiman kertoimen derivaatta alkaa pienenemään, eikä luistosuhteen kasvattaminen lisää enää merkittävästi käyttövoiman suuruutta. Lineaarisen alueen loppua on vaikea määrittää, joten otetaan tarkasteluun polvikohta. Polvikohta on kaarevuuden K maksimi

$$K(\lambda) = \frac{S''(\lambda)}{(1 + S'(\lambda)^2)^{3/2}} \tag{4.3}$$

(Satopää et al. 2011, 167). Yhtälöllä (4.3) on määritetty kuvan 4.1 ja taulukon 4.2 polvikohdan arvot. Seuraavassa taulukossa on esitetty luistosuhde käyttövoiman kertoimen maksimi- ja polvikohdassa eri olosuhteilla.

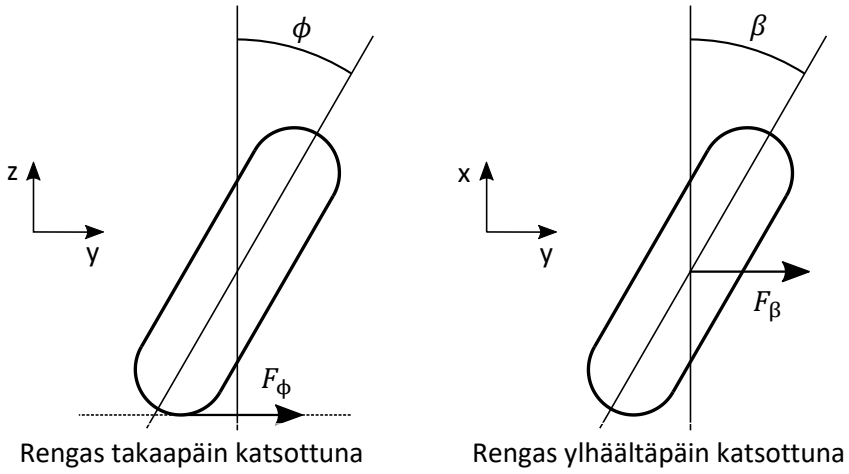
Taulukko 4.2. Luistosuhde λ säätösuunnittelun kannalta kiinnostavissa käyttövoiman kohdissa eri rataolosuhteille.

Käyttövoiman:	Kuiva asfaltti		Märkä asfaltti	Lumi	Jää
	MathWorks	Bonci et al. (2020)			
Maksimiarvo (optimaalinen luistosuhde)	0,181	0.175	0,089	0,312	0,389
Polvikohta	0,033	0.056	0,026	0,065	0,082

Taulukon 4.2 optimaalisen luistosuhteen arvot asettuvat kesäisissä rataolosuhteissa välille 0,1–0,3, jota pidetään luistosuhteen kannalta stabiilina alueena, ja jolla useimmat ABS-järjestelmät pyrkivät pitämään luistosuhteen (Hoseinnezhad & Bab-Hadiashar 2011, 1).

4.2 Luisto sivuttaissuunnassa

Sivuttaissuuntainen voima F_s (*engl. lateral force*) voidaan määrittää myös Pacejkan mallin avulla, mutta eri parametreilla. Sivuttaissuuntainen luisto (*engl. lateral slip*) kuvataan renkaan kallistuskulman ϕ (*engl. camber angle*) sekä sivuluistokulman β (*engl. sideslip angle / slip angle*) avulla (Bonci et al. 2020, 7; Cossalter 2006, 60–63). Kulmat on esitetty kuvassa 4.2.



Kuva 4.2. Kuvat esittävät kallistuskulman ϕ, sivuluistokulman β sekä niistä aiheutuvat sivuttaissuuntaiset voimat F_ϕ ja F_β. z-suunta on ylöspäin ja x-suunta renkaan kulkusuuntaan päin. Havainnollistavista syistä sivuluistokulma on liioitellusti tuotu esille.

Sivuttaissuuntainen voima F_s aiheutuu moottoripyörän kallistuskulman ϕ sekä sivuluistokulman β aiheuttamista voimista F_ϕ ja F_β. Sivuttaissuuntainen luistaminen määritetään sivuttaissuuntaisen ja eteenpäin suuntautuvan nopeuden suhteena, mikä vastaa tangenttia sivuluistokulmasta β (Pacejka & Besselink 2012, 4).

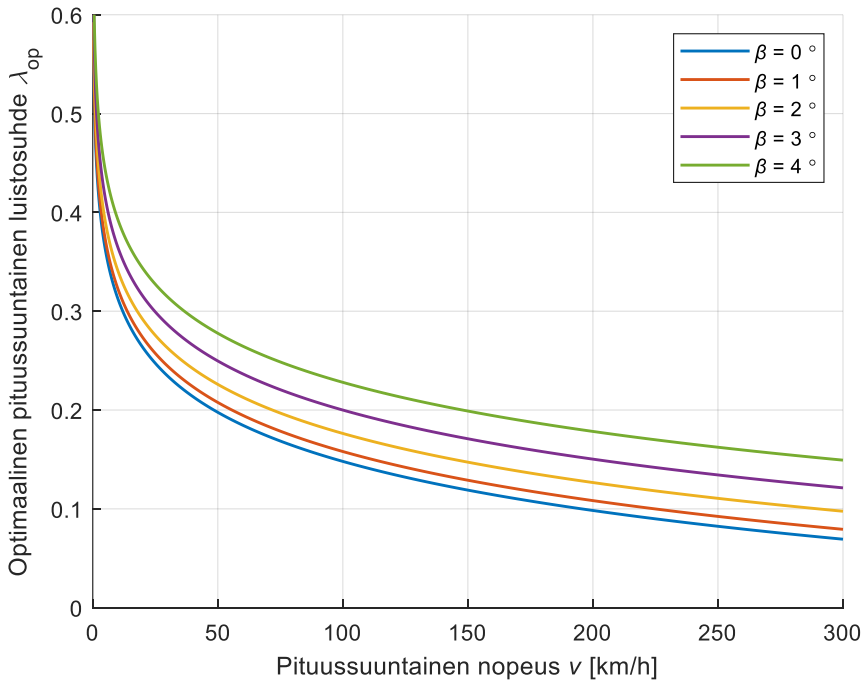
Renkaan suorituskykyä voidaan mitata kaarrejäykkyydellä (*engl. cornering stiffness*), joka kertoo, kuinka paljon rengas kykenee tuottamaan voimaa sivuluistokulmaa β kohti. Tietyllä sivuluistokulman arvolla suuremman kaarrejäykkyyden omaava rengas tuottaa suuremman sivuttaisvoiman F_s (Vorotovic et al. 2013, 1).

4.3 Muiden tekijöiden vaikutus optimaaliseen luistosuhteeseen

Optimaalinen luistosuhde on riippuvainen myös muista tekijöistä kuin olosuhteista. Luvussa 4.1 tarkasteltiin tilannetta, jossa moottoripyörän sivuluistokulma β oli nolla ja nopeus oletettiin vakioksi. Optimaalisen luistosuhteen ennustaminen on ratkaisevan tärkeää ajoneuvon ESC-järjestelmälle (Guoxing et al. 2015, 1). Magic Formulan pohjalta on muodostettu yhtälö (4.4), jonka avulla on arvioitu muun muassa ABS-järjestelmän ohjaimelle optimaalista luistosuhdetta λ_{op} seuraavalla tavalla

$$\lambda_{\mathrm{op}} = \lambda_0 + 0{,}165 \cdot \log\left(\frac{64}{3{,}6 \cdot v}\right) + 0{,}01 \cdot \beta^{1{,}5}, \tag{4.4}$$

missä λ_0 esittää optimaalista luistosuhdetta 64 km/h nopeudella kyseisellä olosuhteella, v on ajoneuvon pituussuuntainen nopeus [m/s] ja β on renkaan sivuluistokulma (Guoxing et al. 2015, 2; Liu 1996, 202). Kuvassa 4.3 on esitetty yhtälön (4.4) mukainen optimaalinen luistosuhde λ_{op} kuivalle asfaltille viidellä eri sivuluistokulmalla β. Valitaan λ_0 arvoksi 0,18, joka vastaa optimaalista luistosuhdetta kuivalla asfaltilla kuvan 4.1 mukaisesti.



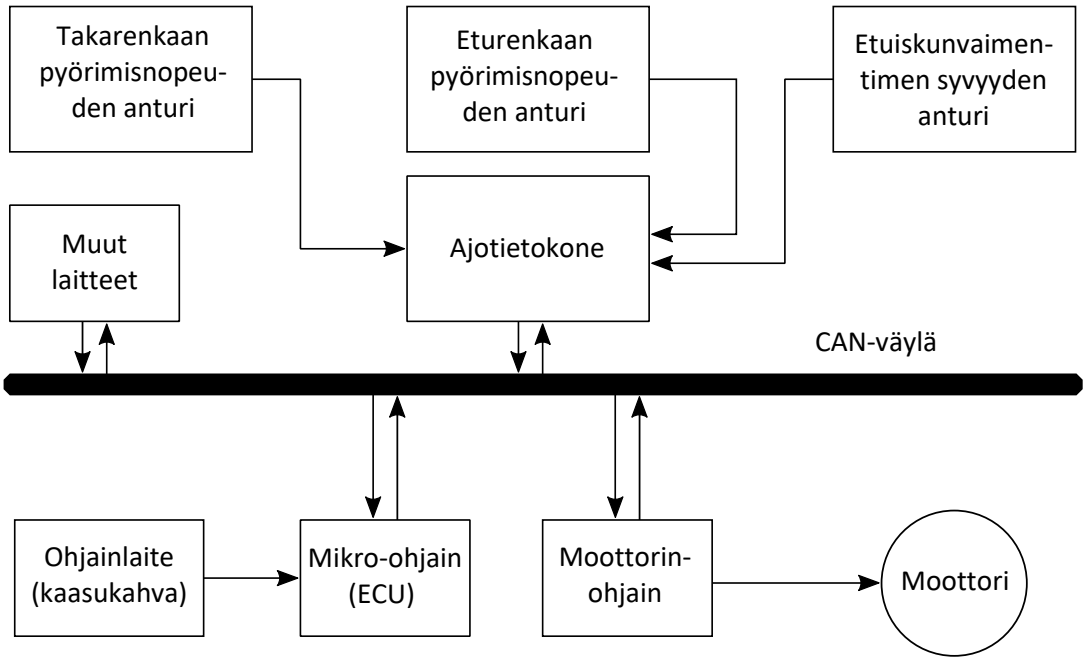
Kuva 4.3. Optimaalinen luistosuhde pituussuuntaisen nopeuden v [km/h] funktiona eri sivuluistokulmilla β.

Kuvasta 4.3 nähdään nopeuden kasvaessa optimaalisen luistosuhteen pienenevän. Moottoripyörän lähtiessä liikkeelle voidaan sallia hetkellisesti jopa yli 30 % luistosuhde. Pyörän kääntyessä sivuluistokulma β kasvaa, jolloin optimaalinen luistosuhde myös kasvaa. Kyseessä on nelipyöräisen ajoneuvon ABS-järjestelmälle arvioitu optimaalinen luistosuhde, jossa eturengas kääntyy, joten sivuluistokulma ei ole niin merkittävässä roolissa moottoripyörän takarenkaan optimaalisen luistosuhteen estimoinnissa.

Kitkakertoimen arvoon ja siten optimaaliseen luistosuhteeseen vaikuttavat myös esimerkiksi rengaspaine, lämpötila, ilmassa oleva pöly tai ilmankosteus (Vorotovic et al. 2013, 68; Guoxing et al. 2015, 1). Rengaspaineen muutosta ei useinkaan ole huomioitu optimaalista luistosuhdetta arvioitaessa, vaikka sillä on havaittu olevan vaikutusta useassa tutkimuksessa (Guoxing et al. 2015, 1). Pacejkan mallin parametrien tulo BCD on käyrän gradientti origossa, ja se määrittää luistosuhteen jäykkyyden (*engl. stiffness*) (Cossalter 2006, 52–58). Mitä jäykempi rengas on kyseessä, sitä jyrkempi on käyrän lineaarinen alue ja sitä vähemmän rengas luistaa kehittääkseen suuremman voiman. Renkaan jäykkyys vaikuttaa renkaan kulumiseen. Mitä enemmän renkaan on luistettava kehittääkseen riittävän suuren käyttövoiman, sitä enemmän rengas kuluu ajettaessa (Cossalter 2006, 60). Pienemmällä rengaspaineella saavutetaan suurempi kitkakerroin, jolloin myös optimaalinen luistosuhde pienenee ja rengas luistaa vähemmän saavuttaakseen suuremman käyttövoiman. Vastaava ilmiö havaitaan rengaspainetta kasvatettaessa yli nimellisen, mutta vain huomattavasti pienemmässä mittakaavassa. (Guoxing et al. 2015, 3) Vaikka löysempi rengas kasvattaa kitkakerrointa, se kasvattaa myös vierintävastusvoimaa F_{w} (Cossalter 2006, 54–56). Pidempään ajettaessa liian alhainen rengaspaine voi aiheuttaa vakavia seurauksia renkaan ylikuumentuessa (Toma et al. 2017, 128).

5 Ajonvakautusjärjestelmän rakenne ja toteutus

ESC-järjestelmä vaatii toimiakseen laskentakykyä. Ajonvakautus perustuu ohjainlaitteen signaalin säätöön ESC:n avulla, joka antaa lopullisen vääntömomenttiohjeen moottorinohjaimelle. ESC käyttää hyödyksi laskennassa moottoripyörässä olevien antureiden mittausdataa. Tutkimuksen alkuvaiheessa selvitettiin säädön vaatiman laskennan toteuttamista ajotietokoneessa tai moottorinohjaimessa, mutta päädyttiin lisäämään erillinen yksikkö, jossa laskenta toteutetaan. Kuvassa 5.1 on lohkokaaviokuva ESC:n mahdollisesta toteutuksesta Ukkosessa.



Kuva 5.1. Mahdollinen ESC:n toteutus lohkokaaviona.

Kuvasta 5.1 nähdään, että ajotietokone, mikro-ohjain, moottorinohjain sekä mahdolliset muut laitteet on liitetty CAN-väylään (*engl. controller area network*), jonka kautta tieto kulkee eri yksiköihin. Tämä kokonaisuus muodostaa ESC:n. Ohjainlaite eli kaasukahva on ensimmäinen osa, joka antaa käskyn moottoripyörän liikkeelle saattamiseksi. Kaasukahva toimii sähköisesti, jonka lähdöstä saadaan sen asennosta riippuva analoginen jännitesignaali. Turvallisuusnäkökulmasta kaasukahvassa on hyvä olla kytkin, joka kertoo analogisen jännitesignaalin lisäksi digitaalisena signaalina, onko kaasukahvaa ylipäätänsä käännetty. Ilman ESC:tä ohjainlaitteen signaali välittyisi suoraan moottorinohjaimelle ja täten

vääntömomentiksi moottorille. Tässä työssä mikro-ohjain toimii ECU:na ja käsittelee ohjainlaitteelta sekä ajotietokoneelta saatuja tietoja. Muut samaan CAN-väylään liitetyt laitteet, esimerkiksi akunhallintajärjestelmä tai laturi, eivät suoranaisesti osallistu ESC:n tehtävään, joten niitä ei tarkastella tarkemmin. Ukkosen nykyisessä kokoonpanossa käytössä oleva ajotietokone (AiM MXL2, kuva 5.2) mahdollistaa käytettyjen signaalien keräämisen ja tallentamisen (Aim Technologies 2022).

Kuva 5.2. Ukkosen nykyisessä kokoonpanossa oleva AiM MXL2 ajotietokone (vasemmalla) sekä Sevcon Gen5 S9 moottorinohjain (oikealla).

Ukkosessa oleva AiM MXL2 ajotietokone saa kuvan 5.1. mukaisesti tietoa antureilta, jota se voi lähettää CAN-väylään. AiM MXL2:ssa on sisäänrakennettuna kiihtyvyysanturi ja gyroskooppi sekä siihen on mahdollista liittää GPS-moduuli (Aim Technologies 2022). Aim MXL2:n matematiikkakanavien (*engl. math channels*) sekä moottorinohjaimen Sevcon Gen5 S9 (kuva 5.2) ohjelmoinnin mahdollisuudet osoittautuivat rajallisiksi, ja tämän vuoksi varsinaisen säädön laskenta toteutettaisiin ulkoisella laitteella.

Monia mikro-ohjaimia (esimerkiksi Arduino, C2000, STM32) on mahdollista ohjelmoida C/C++:lla sekä graafisessa MATLAB / Simulink ympäristössä, jossa on mahdollisuus kääntää ohjelma mikro-ohjaimelle ja käyttää hyväksi Stateflow-kirjastoa ohjelmarakenteiden tekemiseen (MathWorks 2013a, 2013b, 2019, & 2022b). Prototyyppivaiheessa olisi kätevää käyttää valmista levyä, josta löytyy tarvittava mikrokontrolleri, ohjaimet, tulo- ja lähtöliittimet ja muut toiminnan vaatimat komponentit.

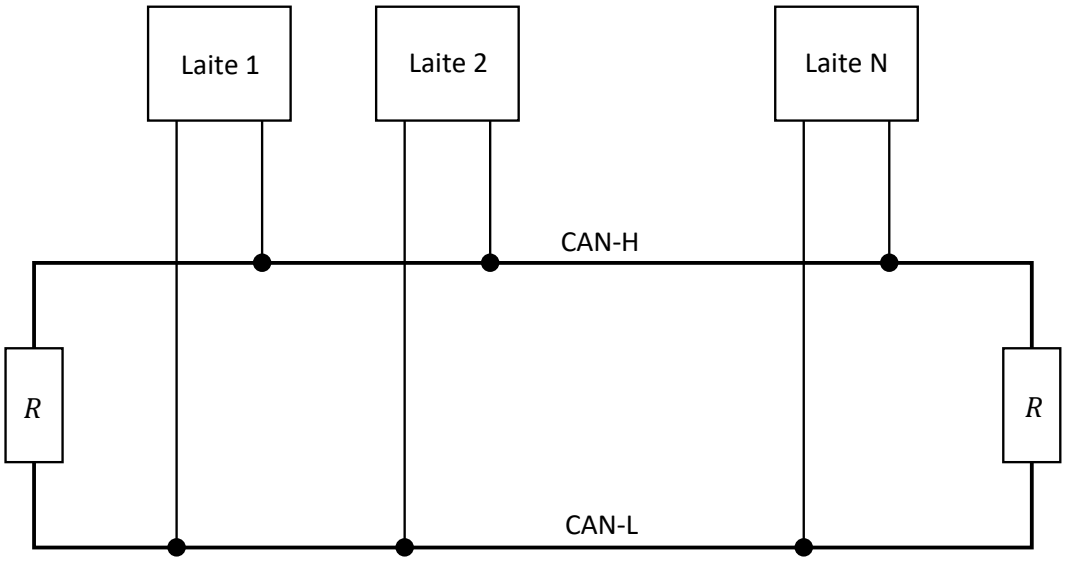
Vaihtoehto mikro-ohjaimelle on kaupallinen ajoneuvoihin tarkoitettu ohjausjärjestelmä. Tällaisia järjestelmiä ovat esimerkiksi AEM EV:n tai Ecotron Corp:in ajoneuvon ohjauslaitteet

(Aemev 2022; Ecotron Corp 2022). Ecotron Corpin laitteiden ohjelmointiin voidaan hyödyntää EcoCoder toolboxia MATLAB / Simulink ympäristössä (MathWorks 2022a).

ESC:n toteutuksessa on hyvä miettiä myös käytettävien laitteiden ja niiden välisten johdotuksien määrää. Useiden yksiköiden käyttö voi tehdä järjestelmästä monimutkaisemman ja mahdollisesti vikaantuvien laitteiden määrä kasvaa. Ongelmatilanteissa vian paikallistaminen voi olla vaikeampaa sekä järjestelmä voi viedä enemmän tilaa ja lisätä moottoripyörän massaa.

5.1 CAN-väylä

CAN-väylä on hyvin yleisesti käytetty kenttäväylä ajoneuvokäytöissä (Pfeiffer et al. 2003, xv). Tiedonsiirto Ukkosessa olevien elektronisten laitteiden välillä on toteutettu CAN-väylän avulla. CAN-väylä mahdollistaa siihen kytketyille laitteille datan lähettämisen ja vastaanottamisen. Tiedot saadaan kaikille laitteille merkittävästi vähemmällä johdotusten määrällä. Mikro-ohjain voi vastaanottaa ja lähettää tietoa CAN-väylään. Varsinainen CAN-väylä koostuu kuvan 5.3 mukaisesti kahdesta johtimesta: CAN-H ja CAN-L, jotka on yhdistetty kummastakin päästä usein 120 Ω vastuksella R (Pfeiffer et al. 2003, 217).



Kuva 5.3. CAN-väylän periaatekuva. CAN-väylään kytkettävät laitteet kytketään CAN-H ja CAN-L johtimiin.

Data CAN-väylälle lähetetään kehyksenä (*engl. frame*), jonka alussa on viestin tunniste (CAN-ID) eli tunnistusbitit (*engl. identifier bits*). Peruskehysmuodossa CAN-ID on 11-bittinen, mutta se voi olla myös laajennettu esimerkiksi 29-bittiseksi. Korkein lähetysprioriteetti on laitteella, jonka CAN-ID on pienin. Loput kehyksestä sisältävät vähintään varsinaisen datan, muuta tietoa ja lopetusbitit. (Pfeiffer et al. 2003, 204–223)

CAN-väylälle lähetettävälle datalle asetetaan tietty taajuus (päivitystiheys), jonka välein datapaketti lähetetään laitteelta väylälle. Ukkosen nykyisessä kokoonpanossa käytössä olevan väylän nopeus on 500 kb/s, joka vastaa 62,5 kB/s. Täten millisekunnin aikana saadaan siirrettyä 62,5 tavua tietoa. Väylän kapasiteetin riittävyyteen vaikuttaa siinä kulkevan tiedon määrä ja päivitystiheys. Sopiva päivitystiheys riippuu siitä, kuinka tiheästi mittausdataa tarvitsee lukea sekä ohjaussignaalia moduloida riittävän nopean säädön toteuttamiseksi. Lisäksi antureilla on jokin rajallinen taajuus, jonka välein anturin arvo voi vaihtua tai se voi lähettää pulssin, riippuen anturista. Tämä asettaa rajan, jota nopeammin anturidataa ei ole hyödyllistä lähettää CAN-väylälle. Tässä yhteydessä voidaan myös mainita, että datamäärät ovat merkittävästi kasvaneet erilaisissa ajoneuvokäytöissä, minkä vuoksi CAN-väylän päälle on kehitetty CAN-FD (*engl. flexible data rate*) protokolla, joka antaa mahdollisuuden korkeampiin bittinopeuksiin sekä muuttuvapituisen datakentän käyttöön (Lorenz 2013, 1).

5.2 Luistosuhteen ja keulimisen tunnistaminen

Luistosuhteen määrittämiseksi tarvitaan tieto takarenkaan pyörimisnopeudesta ω_r sekä ajoneuvon pituussuuntaisesta nopeudesta v. Ajoneuvon pituussuuntaisen nopeuden määrittämiseen voidaan hyödyntää moottoripyörän eturenkaaseen asennettua pyörimisnopeutta mittaavaa anturia, sillä käyttökelpoista kaupallista pituussuuntaisen nopeuden mittausanturia ei ole olemassa (Corno et al. 2013, 2401). Ajoneuvon pituussuuntaista nopeutta v voidaan estimoida seuraavasti

$$v = \omega_\mathrm{f} \cdot r_\mathrm{f}, \tag{5.1}$$

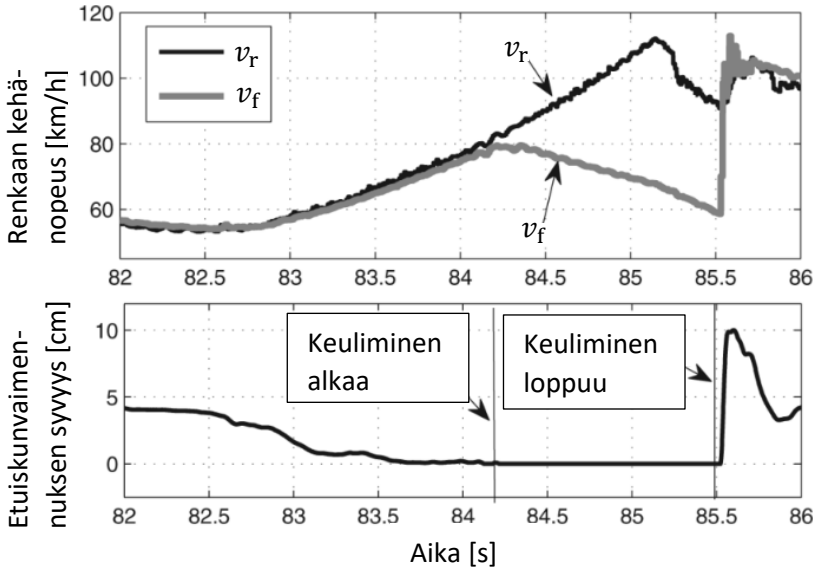
missä ω_f on eturenkaan pyörimisnopeus ja r_f on sen säde. Tässä on huomioitava eturenkaan luistaminen tai mahdollinen nouseminen irti ratapinnasta moottoripyörän keuliessa. Eturenkaan noustessa ilmaan, sen nopeus kuitenkin hidastuu kuvan 5.4 mukaisesti ja tällöin yhtälön

(4.1) mukaan luistosuhde kasvaa ja ESC tekee virheellisen tulkinnan takarenkaan luistosuhteesta, mutta turvalliseen suuntaan.

Ajoneuvon pituussuuntaisen nopeuden estimointia voidaan parantaa käyttämällä anturifuusiolähestymistapaa (*engl. sensor fusion approach*), joka hyödyntää renkaan pyörimisnopeudesta saatua dataa sekä pituussuuntaisen kiihtyvyysanturin dataa. Anturifuusion avulla estimointitulos on usein tarkempi, koska kahden mittalaitteen tulokset voidaan yhdistää ja niiden rajoitteet voidaan kompensoida (Corno et al. 2013, 2401) erilaisten matemaattisten operaatioiden avulla. Esimerkiksi Gorno et al. (2013) selvittivät pituussuuntaisen nopeuden estimointiin täydentävää suodatinta (*engl. complementary filter*) sekä Kalman suodatinta (*engl. Kalman filter*). Artikkelissa Gorno & Savaresi (2010) ehdottavat myös moottoripyörän pohjaan asennettavaa optista anturia, jolla voitaisiin määrittää pituussuuntainen nopeus.

Yhtälöllä (3.4) oli esitetty, että moottoripyörä keulii, kun eturenkaan tukivoima N_f on nolla. Keulimista voidaan arvioida myös anturifuusion avulla, esimerkiksi hyödyntämällä tietoa iskunvaimennuksen syvyydestä, renkaiden pyörimisnopeuksista sekä ajoneuvon keulimiskulmasta (*engl. pitch angle*) (Corno et al. 2013, 2404). Menetelmää voidaan hyödyntää Ukkosessa, etuiskunvaimennuksen syvyyttä sekä etu- ja takarenkaan pyörimisnopeutta mittaavien antureiden sekä AiM MXL2:n gyroskoopin kulma-anturin avulla (Aim Technologies 2022). Kulma-anturi ei yksinään riitä, joten tarvittaisiin muita antureita, jotta keulimiskulma voitaisiin määrittää, (Corno et al. 2013, 2404) sillä ratapinnan kaltevuus ei ole tiedossa.

Kuvassa 5.4 on esitetty esimerkkidataa moottoripyörän etu- ja takapyörien nopeuksista sekä etuiskunvaimentimen syvyydestä keulimistilanteessa. Kuvassa etu- ja takarenkaiden pyörimisnopeudet esitetään renkaiden kehänopeuksina v_f ja v_r [km/h].



Kuva 5.4. Esimerkkidataa renkaiden kehänopeuksista ja etuiskunvaimennuksen syvyydestä ajan funktiona, kun moottoripyörä alkaa keulimaan ja keuliminen päättyy. Kuvaan on muokattu tekstit suomen kielelle. (Corno et al. 2013, 2404) © 2013 IEEE

Kuvasta 5.4 havaitaan moottoripyörän alkaessa keulimaan eturenkaan kehänopeuden v_f hidastuvan suhteessa takarenkaan kehänopeuteen v_r. Tämän tarkkaa ajankohtaa on kuitenkin vaikea määrittää kehänopeuksien perusteella. Kuvasta 5.4 nähdään myös moottoripyörän alkaessa keulimaan etuiskunvaimentimen olevan lähes maksimipituudessaan (syvyys pienimmillään), joten iskunvaimentimen syvyyden arvossa ei tapahdu merkittävää muutosta keulimisen alkaessa. Eturenkaan tukivoiman ollessa hyvin pieni, voi moottoripyörän hallittavuus olla jo kyseenalaista. Käyttövoimaa on täten syytä rajoittaa jo ennen eturenkaan irtoamista ratapinnasta. Keulimisen havaitseminen ei ole täysin yksiselitteistä, mutta sen todennäköisyyttä voidaan arvioida.

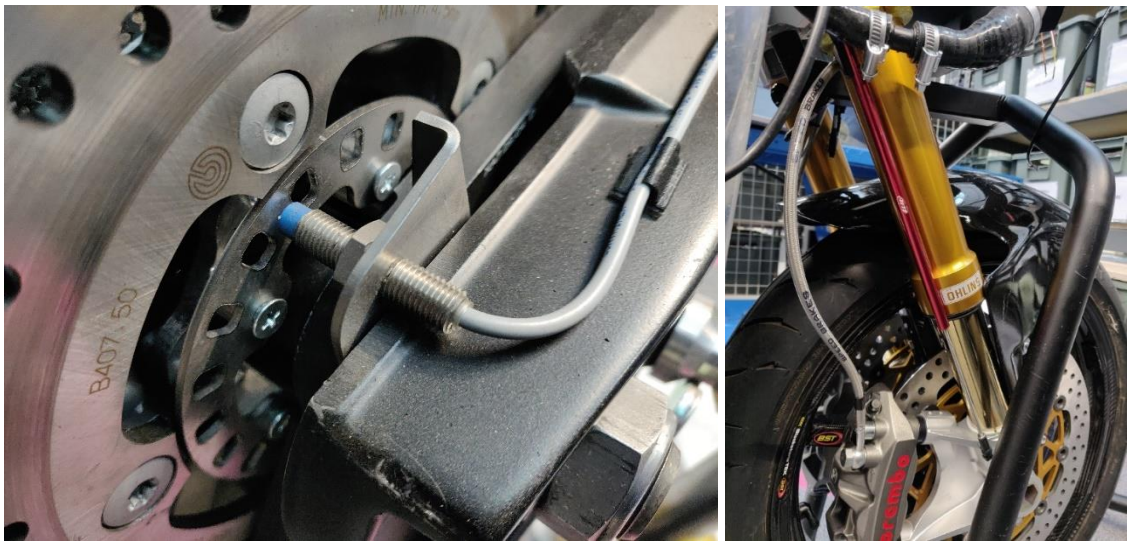
5.3 Mittaukset

Anturidatan avulla voidaan määrittää moottoripyörän fysikaalisia suureita, joita ESC-järjestelmä tarvitsee. Dataa moottoripyörän tilasta saadaan siihen asennetuilta antureilta.

Sivuluistokulman β mittaavat anturit ovat kalliita ja tilaa vieviä, joten suure ei ole helposti mitattavissa (Busnelli et al. 2017, 1). Pyörän gyroskoopin kallistuskulman ϕ tiedosta voidaan arvioida sivuluistokulman suuruutta, mutta silloin ratapinnan kaltevuus pitää olla

tiedossa. Kuten luvussa 4.3 todettiin, sivuluistokulman mittaus ei ole välttämätöntä moottoripyörän ajonvakautuksen toteuttamiseen.

Ukkosessa takarenkaan pyörimisnopeutta ω_r mitataan kuvassa 5.5 näkyvän induktiivisen nopeusanturin ja renkaan akseliin asennetun metallisen reikälevyn avulla. Eturenkaan pyörimisnopeus ω_f mitataan vastaavalla tavalla. Anturi on AiM Infoteckin Inductive Contrinex car speed sensor, release 1.00, joka on yhteensopiva käytettävän AiM MXL2 ajotietokoneen kanssa (Aim Infotech a).



Kuva 5.5. Takarenkaan pyörimisnopeuden mitta-anturi (vasemmalla) ja etupään iskunvaimennuksen syvyyttä mittaava anturi (oikealla).

Renkaan kanssa samalle akselille asennetun reikälevyn avulla voidaan laskea renkaan pyörimisnopeus. Reikälevyssä on 20 reikää, joiden välillä on metallia. Anturin siirtyessä reiän kohdalta metallin kohdalle saadaan anturilta signaali, jolloin kokonaisen kierroksen aikana muodostuu 20 pulssia. Tällöin kahden pulssin välillä akseli kiertyy $\frac{\pi}{10}$ [rad]. Moottoripyörän nopeuden ollessa 20 km/h ja renkaan säteen ollessa 0,25 m, pulssien väliseksi ajaksi saadaan 14 ms. Moottoripyörän nopeuden kasvaessa pulsseja saadaan tiheämpään.

ESC:n säädössä hyödyntämän pyörimisnopeuden arvon määrittämiseen voisi olla syytä käyttää useammalla kuin yhdellä pulssivälillä määritettyä pyörimisnopeutta. Tällöin voidaan vähentää yksittäisen virheellisen mittauksen sekä mahdollisten häiriöiden vaikutusta. Suodatukseen voisi käyttää esimerkiksi aritmeettisen keskiarvon suodatinta, liukuvan keskiarvon suodatinta tai mediaanisuodatinta (He, 2011). Aritmeettisessa keskiarvosuodatuksessa

näytejonon pituus, jolta keskiarvoa lasketaan, valitaan siten, että kaistanleveys on riittävä (alipäästösuodin). Pyörimisnopeuden laskentaan tulisi tällöin lisää viivettä.

Iskunvaimentimen syvyyttä voidaan mitata kuvassa 5.5 näkyvällä punaisella sylinterillä. Anturi mittaa kahden pisteen välistä siirtymää lineaarisella potentiometrillä, jonka toiminnan maksiminopeudeksi on ilmoitettu 10 m/s. Datalehti ilmoittaa kyseisen anturin toistettavuuden (*engl. repeatability*) olevan pienempi tai yhtä suuri kuin 0,01 mm. (Aim Infotech b)

5.4 Säätörakenteen mahdollinen toteutus

Luvun 4 havaintojen pohjalta voidaan päätellä, että moottorin vääntömomentin aiheuttaessa renkaan kehälle suuremman voiman kuin mitä optimaalisella luistosuhteella saavutetaan, renkaan pyörimisnopeus kiihtyy ja kitkakerroin pienenee entisestään. Mikäli vääntömomenttia ei rajoiteta, seuraa renkaan runsas luistaminen. Toinen tekijä on keuliminen, joka voidaan myös estää rajoittamalla vääntömomenttia.

Maksimaalinen voima renkaan ja ratapinnan välillä saavutetaan optimaalisella luistosuhteella. Guoxing et al. (2015) mukaan parhaimman jarrutusvaikutuksen aikaansaamiseksi ABS-järjestelmät käyttävät usein optimaalista luistosuhdetta ohjauksen tavoitteena (*engl. control target*).

Yksi suosituimmista ajoneuvojen aktiivisista turvajärjestelmistä on ASR (*engl. acceleration slip regulation*), jota käytetään laajalti nelipyöräisissä sähköajoneuvoissa parantamaan kiihtyvyyttä. Luistosuhteen säätö voidaan toteuttaa PID-säätimellä, jonka tulosignaalina on todellisen luistosuhteen ja optimaalisen luistosuhteen erotus $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_{\mathrm{op}}$. Guodong et al. (2013) vertailevat tutkimuksen simulaatioissa PID-säätöä ja sumean logiikan säätöä (*engl. fuzzy logic control*) luistosuhteen hallitsemiseksi. Ajoneuvon dynamiikan mukaisesti renkaan alkaessa luistamaan, pyörän kulmakiihtyvyys α ja luistosuhde λ kasvavat hyvin nopeasti. Täten kulmakiihtyvyyttä voidaan hyödyntää sumean logiikan säädössä, sillä se antaa indikaation siitä, että onko ajoneuvo jossain määrin luistossa. (Guodong et al. 2013, 1–4)

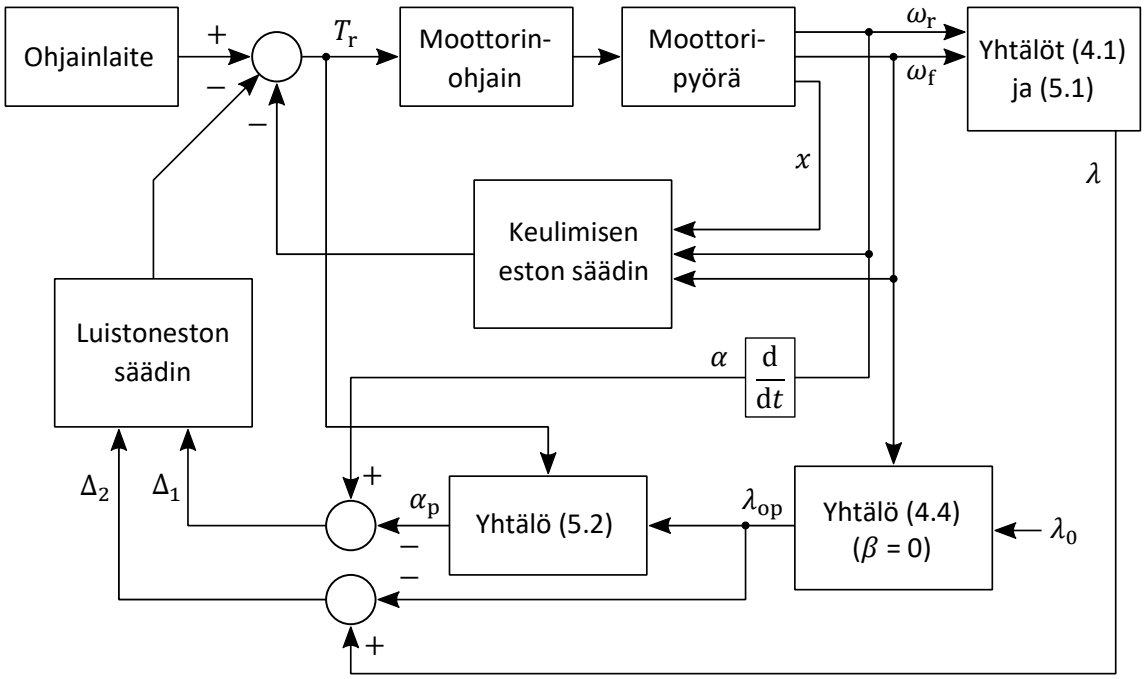
Sumean logiikan säätömenetelmän mukaisesti ohjaimen lähtöön eli moottorin vääntömomenttiin vaikuttaa kaksi tulosignaalia. Guodong et al. (2013) käyttävät tulosignaaleina vetävän renkaan todellisen kulmakiihtyvyyden ja kulmakiihtyvyyden raja-arvon erotusta $\Delta_1 =$

$\alpha - \alpha_{\mathrm{p}}$ sekä todellisen luistosuhteen ja optimaalisen luistosuhteen erotusta $\Delta_2 = \lambda - \lambda_{\mathrm{op}}$. Sen hetkistä kulmakiihtyvyyttä kuvaa α ja kulmakiihtyvyyden raja-arvoa (*engl. threshold angular acceleration*) α_{p}. Luistosuhteen λ derivaatan lähestyessä nollaa, kulmakiihtyvyyden kynnysarvo voidaan esittää seuraavasti

$$\alpha_{\mathrm{p}} = \frac{T_{\mathrm{r}}}{J_{\mathrm{r}} + m r_{\mathrm{r}}^2 \cdot \left(1 - \lambda_{\mathrm{opt}}\right)}, \tag{5.2}$$

missä T_{r} on takarenkaan vääntömomentti ja J_{r} on sen hitausmomentti. Sumean logiikan säätimen toiminta perustuu teoreettisen johtamisen ja käytännön kokemuksen pohjalta muodostettuihin tulojen ja lähdön jäsenyysfunktioihin (*engl. membership functions*), jotka koostuvat osajoukoista (*engl. fuzzy subsets*) sekä sumeaan sääntötaulukkoon (*engl. fuzzy rules*). Tulot Δ_1 ja Δ_2 määräävät niiden jäsenyysfunktioiden jäsenyysasteen (*engl. degree of membership*). Mikäli kulmakiihtyvyys on pienempi kuin kulmakiihtyvyyden raja-arvo (eli $\Delta_1 < 0$), tiedetään vetävän renkaan pidon olevan kunnossa, ja näin ollen sumean logiikan sääntötaulukossa tulon Δ_1 vaikutus säätimen lähtöön on sellainen, että se ei pienennä vääntömomenttiohjetta moottorinohjaimelle. (Guodong et al. 2013, 2–4)

Kuvassa 5.6 esitetään lohkokaavio mahdollisesta säätörakenteesta Ukkoseen, mikä perustuu edellä esitetyn sumean logiikan säädön menetelmään sekä aiemmin esiteltyihin yhtälöihin.



Kuva 5.6. Lohkokaavio Ukkosessa mahdollisesti käytettävästä säätörakenteesta.

Kuvan 5.6 säätörakenteen lohkokaaviossa ohjainlaitteelta tulevaa vääntömomenttiohjetta moottorinohjaimelle korjataan liiallisen luistamisen tai keulimisen estävillä säätimillä, jotka vähentävät moottorinohjaimelle syötettävää vääntömomenttiohjeen arvoa poikkeustilanteessa. Johtuen ilmiöiden epälineaarisuudesta, sumean logiikan säätömenetelmä on yksi varteenotettava vaihtoehto säätimien toteutuksessa. Säätimien takaisinkytkentöinä on etuiskunvaimennuksen syvyys x sekä etu- ja takarenkaan pyörimisnopeudet ω_f ja ω_r. Parametreiksi säätöjärjestelmään syötetään hitausmomentti J_r, massa m, olosuhteen optimaalinen luistosuhde λ_0, etu- ja takarenkaan säteet r_f ja r_r sekä muita vakioita kuten välityssuhde.

Kaksi erilaista sumeaan logiikkaan perustuvaa säätöjärjestelmää saman tehtävän suorittamiseen voivat suorittaa sen eri tavoilla riippuen useista suunnittelijan malleihin liittyvistä valinnoista (Lilly 2010, 1). Sumeaa logiikkaa voidaan hyödyntää monimutkaisissa prosesseissa, joita olisi vaikea tai mahdoton hallita millään muulla tavalla, ja sen toimintaa voidaan verrata ihmisen päättelyprosessiin (Lilly 2010, 9). Tämän vuoksi on erityisen hyödyllistä päästä testaamaan erilaisia malleja käytännössä. Alkuvaiheessa Ukkosen säätömenetelmän kehitys voisi olla hyvä aloittaa perinteisemmän PID-säätimen avulla ja siitä saatujen

mittauksien pohjalta aloittaa kehittämään sumean logiikan säätömenetelmän jäsenyysfunktiota sekä sääntötaulukkoa.

Suunniteltaessa ESC:n päivitystiheyttä sekä säädön suorituskykyä on huomioitava, kuinka paljon optimaalinen luistosuhde saadaan mahdollisesti ylittää, jotta vääntömomenttia ehditään rajoittamaan riittävän nopeasti. Liian hidas säätö voi johtaa ajoneuvon hallinnan menettämiseen sekä ei-maksimaaliseen kiihdytykseen. ESC:n kehittämisessä olisi syytä ottaa huomioon myös muita poikkeustilanteita kuin luistaminen ja keuliminen. Tällaisia tilanteita ovat muun muassa ajoneuvon kallistuminen ajettaessa kaarteessa, moottorijarrutus, ratapinnan epätasaisuus tai tilanne, jossa moottoripyörällä jarrutetaan ja kaasutetaan samaan aikaan.

6 Johtopäätökset

Tässä kandidaatintyössä tehtiin katsaus ajonvakautusjärjestelmiin sekä tarkasteltiin moottoripyörän dynamiikkaan liittyviä ilmiöitä. Renkaan ominaisuuksista johtuen rengas luistaa hieman, jotta moottoripyörä voi kehittää kitkaa ja sitä kautta käyttövoiman renkaan ja ratapinnan välille. Toisin sanoen luistaminen ja syntyvä kitka on välttämättömyys moottoripyörän kiihdyttämiseksi. Tämän luistamisen ja voiman yhteydelle on olemassa Pacejkan malli, jonka parametrien arvot riippuvat renkaan ominaisuuksista sekä rataolosuhteista.

Tilanteet, joissa moottoripyörä kiihdyttää maksimaalisesti, täytyy hallita, sillä korkean teholuokan moottoripyörissä renkaan ja ratapinnan välinen voima voi ylittää kitkan mahdollistaman voiman, jolloin rengas alkaa luistamaan hallitsemattomasti. Maksimaalinen käyttövoima saadaan, kun renkaan luistosuhde on yhtä suuri kuin optimaalinen luistosuhde. Optimaalinen luistosuhde riippuu monesta asiasta, kuten olosuhteesta, ratapinnan kunnosta, renkaan lämpötilasta, rengaspaineesta, sivuluistokulmasta sekä itse moottoripyörän nopeudesta, joten yhdellä parametrijoukolla alustettu säätötoteutus ei ole ratkaisuna. Turvallinen lähtökohta on kuitenkin pitää 20 % luistoa hyväksyttävänä, mikäli olosuhteet ovat ratakilpailulle tyypilliset. Kiihdytyksessä täytyy tehdä poikkeus ja sallia hetkellisesti suurempi luisto maksimaalista kiihdytystä varten. Nopeuden kasvaessa luistosuhdetta rajoitetaan enemmän.

Moottoripyörän tilaa mitataan ajonaikana, jotta ESC-järjestelmä voi toimia. Luistosuhteen määrittämiseen tarvitaan tieto ajoneuvon pituussuuntaisesta nopeudesta, jonka estimointiin voidaan hyödyntää renkaiden pyörimisnopeuksista saatua mittausdataa. Nopeuden estimointiin on myös muita menetelmiä, kuten anturifuusiot, joita yhdistämällä voidaan saavuttaa parempi arvio todellisesta nopeudesta. Keulimisen tunnistamiseen voidaan puolestaan hyödyntää muun muassa renkaiden pyörimisnopeuksista, iskunvaimennuksen syvyydestä sekä ajoneuvon gyroskoopilta saatua mittausdataa. Keulimisen rajan määrittäminen vaatii käytännön kokeita, joiden avulla voidaan tuntea paremmin ajoneuvon hallittavuus eturenkaan tukivoiman pienentyessä. Työssä pohdittiin, kuinka tieto kulkee ECS-järjestelmässä, ja missä sen vaatima laskenta toteutetaan. Tähän vaihtoehtona esitettiin ulkoista mikro-ohjainta tai valmista kaupallista ohjausjärjestelmää.

Työssä suunniteltiin alustava ESC:n lohkokaavio, joka voisi toimia säätömallin kehityksen pohjana. Luiston sekä keulimisen rajan määrittäminen ei ole yksiselitteistä, minkä vuoksi

ESC:n toteuttamiseen ehdotetaan sumean logiikan säätömenetelmää perinteisen PID-säädön tilalle. Olosuhteiden moninaisuuden vuoksi erityisesti sumean logiikan säätömallin kehittäminen tarvitsee simulointia ja käytännön osaamistaitoa sekä testausta.

Ajonvakautusjärjestelmään on myös mahdollista lisätä muita toiminnallisuuksia, kuten moottorijarrutus sekä renkaan kulumisen hidastaminen ja ylikuumenemisen estäminen korkeaa suorituskykyä vaativissa ratakilpailuissa. Esimerkiksi optimoitaessa renkaan kulumista ja maksimaalista suorituskykyä, Pacejkan mallin polvikohtaa voidaan hyödyntää tavoiteltavan luistosuhteen määrittämisessä.

Lähteet

Aemev. 2022. EV Vehicle Control Units AEM EV. https://www.aemev.com/products/ev-vehicle-control-units.Viitattu 29.7.2022.

Aim Infotech, a. Inductive Contrinex car speed sensor Release 1.00 AiM Infotech. https://support.aimshop.com/product-documentation/bike-sensors/pdf/Speed/CData.pdf. Viitattu 12.4.2022.

Aim Infotech, b. Car/bike linear potentiometer diameter 9,5 Release 1.02 AiM Infotech.

Aim Technologies. 2022. Aim MXL2 Aim Technologies. https://www.aimtechnologies.com/aim-mxl2/.Viitattu 5.7.2022.

Baffet, G., Charara, A. & Lechner, D. 2009. Estimation of vehicle sideslip, tire force and wheel cornering stiffness. Control Engineering Practice, Vol. 17, nro. 11, s. 1255–1264. https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2009.05.005. Viitattu 29.7.2022.

Bal, S. 2017. What Is Motorcycle Traction Control & How It Works? https://carbiketech.com/motorcycle-traction-control-system-works/. Viitattu 19.1.2022.

Bosch Mobility Solutions. 2022. Motorcycle stability control (MSC). https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/solutions/driving-safety/motorcycle-stability-control/. Viitattu 18.1.2022.

Bonci, A., Longhi, S. & Scala, G.A. 2020. Towards an All-Wheel Drive Motorcycle: Dynamic Modeling and Simulation. IEEE Access, Vol. 8, s. 112867–112882. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3002685. Viitattu 9.2.2022.

Busnelli, F., Panzani, G., Corno, M. & Savaresi, S. M. 2017. Two-wheeled vehicles black-box sideslip angle estimation. IEEE 56th Annual Conference on Decision and Control (CDC), s. 351–356. https://doi.org/10.1109/CDC.2017.8263689. Viitattu 1.8.2022.

Corno, M., Panzani, G. & Savaresi, S.M. 2013. Traction-Control-Oriented State Estimation for Motorcycles. IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 21, nro. 6, s. 2400–2407. https://doi.org/10.1109/TCST.2013.2238539. Viitattu 21.2.2022.

Corno, M. & Savaresi, S. M. 2010. Experimental Identification of Engine-to-Slip Dynamics for Traction Control Applications in a Sport Motorbike. European Journal of Control, Vol. 16, nro. 1, s. 88–108. https://doi.org/10.3166/ejc.16.88-108. Viitattu 2.12.2021.

Cossalter, V. 2006. Motorcycle Dynamics. 2nd edition. LULU. ISBN 13: 9781430308614.

Dankan, G. V. & Ramachandra A. C. 2017. Slip Ratio Control of Anti-Lock Braking System with Bang-Bang Controller. International Journal of Computer Techniques, Vol. 4, nro. 1. https://oaji.net/articles/2017/1948-1514029908.pdf. Viitattu 26.7.2022.

Dousti, M., Baslamisli, S. C., Onder, E. T. & Solmaz, S. 2015. Design of a Multiple-Model Switching Controller for ABS Braking Dynamics. Transactions of the Institute of Measurement and Control, Vol. 37, nro. 5, s. 582–595. https://doi.org/10.1177/0142331214546522. Viitattu 5.8.2022.

Ecotron Corp. 2022. VCU – Vehicle Control Unit ECOTRON. https://www.ecotrons.com/vcu-2/. Viitattu 25.1.2022.

Fernández, J., Vargas, M., García, J., Carrillo, J. & Aguilar, J. 2019. Low-Cost FPGA-Based Electronic Control Unit for Vehicle Control Systems. Sensors 2019, Vol. 19, nro. 1834. https://doi.org/10.3390/s19081834. Viitattu 2.12.2021.

Guodong, Y., Shanbao, W. & Xianjian J. 2013. Optimal Slip Ratio Based Fuzzy Control of Acceleration Slip Regulation for Four-Wheel Independent Driving Electric Vehicles. Mathematical Problems in Engineering, Vol. 2013, s. 1–8. https://doi.org/10.1155/2013/410864. Viitattu 29.7.2022.

Guoxing, L., Tie W., Ruiliang Z., Fengshou G. & Jinxian S. 2015. An Improved Optimal Slip Ratio Prediction considering Tyre Inflation Pressure Changes. Journal of Control Science and Engineering, Vol. 2015, s. 1–8. https://doi.org/10.1155/2015/512024. Viitattu 29.7.2022.

He, C. 2011. The digital filter method designing of angular rate of the servo control system in low speed. Proceedings of 2011 International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology, s. 4890–4893. https://doi.org/10.1109/EMEIT.2011.6024059. Viitattu 29.7.2022.

Hoseinnezhad, R. & Bab-Hadiashar, A. 2011. Efficient Antilock Braking by Direct Maximization of Tire–Road Frictions. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 58, nro. 8, s. 3593–3600. https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2081951. Viitattu 26.7.2022.

JHC. 2020. Electric Superbike. https://jhynemancenter.com/ukkonen/. Viitattu 8.12.2021.

Lich, T., Block, W.G., Prashanth, S.N. & Heiler, B. 2015. Motorcycle Stability Control - The Next Generation of Motorcycle Safety and Riding Dynamics. SAE International journal of engines, Vol. 9, nro. 1, s. 491–498.

Lilly, J. H. 2010. Fuzzy Control and Identification. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken. ISBN 978-0-470-54277-4.

Liu, Z. 1996. Mathematical Models of Tire-Longitudinal Road Adhesion and Their Use in the Study of Road Vehicle Dynamics. Journal of Beijing Institute of Technology, Vol. 5, nro. 2, s. 193–204. http://journal.bit.edu.cn/jbit/en/article/id/19960216. Viitattu 5.8.2022.

Lorenz, T. 2013. Automotive and industrial use cases for CAN FD. CAN Newsletter, nro. 1. https://can-newsletter.org/uploads/media/raw/965a7b8526563428cafd370c9d492897.pdf. Viitattu 5.8.2022.

MathWorks. 2013a. Arduino Support from Simulink. https://www.mathworks.com/hardware-support/arduino-simulink.html. Viitattu 9.12.2021.

MathWorks. 2013b. Embedded Coder Support Package for TI C2000. https://www.mathworks.com/hardware-support/ti-c2000-embedded-coder.html. Viitattu 2.8.2022.

MathWorks. 2019. stateflow. https://www.mathworks.com/help/stateflow/ref/stateflow.html. Viitattu 27.7.2022.

MathWorks. 2022a. EcoCoder. https://www.mathworks.com/products/connections/product_detail/ecocoder.html?s_tid=srchtitle. Viitattu 25.1.2022.

MathWorks. 2022b. STMicroelectronics Hardware Support from Simulink. https://www.mathworks.com/products/hardware/stm32.html. Viitattu 2.8.2022.

MathWorks. 2022c. VisibleBreadcrumbs. https://www.mathworks.com/help/physmod/sdl/ref/tireroadinteractionmagicformula.html. Viitattu 9.2.2022.

Metzler, M. 2019. Automotive applications of explicit non-linear model predictive control. University of Surrey. https://doi.org/10.15126/thesis.00853174. Viitattu 29.7.2022.

NZTA. 2021. Electronic stability control identification. https://vehicleinspection.nzta.govt.nz/virms/entry-certification/technical-bulletins/esc-id. Viitattu 19.1.2022.

Pacejka, H. B. & Besselink, I. 2012. Tire and Vehicle Dynamics. 3rd edition. Elsevier. ISBN: 978-08-097016-5.

Pfeiffer, O., Ayre, A. & Keydel, C. 2003. Embedded Networking with CAN and CANopen. Revised First Edition. Copperhill Technologies Corporation. Greenfield. ISBN 978-0-9765116-2-5.

PowerSportsGuide. How Much HP Does a Motorcycle Have? https://powersportsguide.com/motorcycle-horsepower/. Viitattu 29.7.2022.

Pyrhönen, J., Hrabovcová, V. & Semken, R. S. 2016. Electrical Machine Drives Control: An Introduction. John Wiley & Sons, Incorporated. New York. ISBN 9781119260455.

Satopää, V., Albrecht, J., Irwin, D & Raghavan, B. 2011. Finding a “Kneedle” in a Haystack: Detecting Knee Points in System Behavior. 2011 31st International Conference on Distributed Computing Systems Workshops, s. 166–171. https://doi.org/10.1109/ICDCSW.2011.20. Viitattu 31.7.2022.

Shahabi, A., Kazemian, A.H., Farahat, S. & Sarhaddi, F. 2021. Wheel slip ratio regulation for investigating the vehicle’s dynamic behavior during braking and steering input. Mechanics & Industry, Vol. 22, nro. 17. https://doi.org/10.1051/meca/2021016. Viitattu 31.7.2022.

Spalding, N. 2018. MotoGP Technology. 3rd edition. Gomer Press Limited. Llandysul. ISBN 978-1-9998856-0-1.

1, M. Andreescu, C. & Stan, C. 2017. Influence of tire inflation pressure on the results of diagnosing brakes and suspension. 11th International Conference Interdisciplinarity in

Engineering, Vol. 22, s. 121–128. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.03.019. Viitattu 5.8.2022.

Urda, P., Cabrera, J., Castillo, J. and Guerra, A. 2015. An Intelligent Traction Control for Motorcycles. 24th International Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks. University of Málaga. Graz. https://core.ac.uk/download/pdf/132742984.pdf. Viitattu 26.7.2022.

Vorotovic, G. S., Rakicevic, B. B., Mitic, S. R. & Stamenkovic, D. D. 2013. Determination of Cornering Stiffness Through Integration of A Mathematical Model and Real Vehicle Exploitation Parameters. FME Transactions, Vol. 41, nro. 1, s. 66–71. https://www.researchgate.net/publication/298152171_Determination_of_cornering_stiffness_through_integration_of_a_mathematical_model_and_real_vehicle_exploitation_parameters. Viitattu 31.7.2022.

Zhang, X., Xu, Y., Pan, M. & Ren, F. 2014. A vehicle ABS adaptive sliding-mode control algorithm based on the vehicle velocity estimation and tyre/road friction coefficient estimations. Vehicle System Dynamics, Vol. 52, nro. 4, s. 475–503. https://doi.org/10.1080/00423114.2013.864775. Viitattu 1.8.2022.