

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
Elektrotehnika instituut

AAV70LT

Rait Karri

**VORMELAUTO FEST 15 VEOAJAMI
ARENDAMINE JA RAKENDUS**

Magistritöö

Instituudi direktor prof. Tõnu Lehtla

Juhendaja Ph.D. Anton Rassõlkin

Lõpetaja Rait Karri

Tallinn 2015

AUTORIDEKLARATSIOON

Kinnitan, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus. Kõik selle koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud. Varem ei ole selle alusel kutse- ega teaduskraadi ega inseneri diplomit taotletud. Töö on koostatud litsenseeritud tarkvara abil.

Tallinn, 5.04.2015.a.

..... Rait Karri

AAV70LT

Vormelauto FEST 15 veoajami arendamine ja rakendus

Rait Karri, üliõpilaskood 132438AAAM, mai 2015. – 67 lk.

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

Energeetikateaduskond

Elektrotehnika instituut, elektrijamite ja elektrivarustuse õppetool

Töö juhendaja: Ph.D Anton Rassõlkin

Võtmesõnad: veoajami valik, veoajami kasutamine, ajamisüsteemi kogu efektiivsus, vormelauto, ajami töökarakteristikud, simulatsioonid, regeneratiivne pidurdus

Referaat:

Lõputöö on 67 lehel, sisaldab 13 tabelit, 6 illustratsiooni ja 8 joonist.

Lõputöö eesmärk on FSTT projekteeritava neljaratta veolise elektri vormelauto FEST 15 veoajami valimine, arendamine ja selle kasutamine lähtuvalt sellest kuidas võita FSAE sarja võistlusi.

Lõputöö ülesanne ja selle lahendus on määrava tähtsusega, kuna valitav elektriline ajamisüsteem peab olema piisavalt võimekas ja vastupidav, et võita FSAE sarja võistlusi. Ajam peab suutma täita kõiki võistlussarja reegleid ning olema kooskõlas kõigi teiste sõlmedega, et sobitada täielikult vormeliga FEST 15. Nendeks sõlmedeks on näiteks akusüsteem, planetaarülekanandesüsteem ja auto üldised mõõtmed. Ülesandele lisab veel kaalu ka asjaolu, et ajamisüsteem peab suutma töötada kõigis neljas kvadrantis ehk suutma lisaks kiirendamisele ka pidurada vormelit, et regenereerida liikumisenergiat tagasi akupaki. Niimoodi läheb vaja väiksemat akupakki ning ühtlasi suurendab see rajakiirust ja läbisõidu ulatust.

Töös on kasutada ulatuslikult simuleerimistarkvara OpimumLap ning C++ programmeerimiskeelt, et leida võimalikult täpsed lahendid ajami valikule ning selle maksimaalselt efektiivsele kasutamisele.

ATV70LT

Entwicklung und Umsetzung von elektrischen Antriebsstrang für die Formel Auto FEST15

Rait Karri, Matrikelnummer 110137AAAMM, Mai 2013. – 67 Seiten

TECHNISCHE UNIVERSITÄT TALLINN * Fakultät Elektrotechnik

Institut für Elektrotechnik

Lehrstuhl für Elektrische Antriebe und Stromversorgung

Tutor der Arbeit: Ph.D Anton Rassõlkin

Schlüsselwörter: Antriebsauswahl , Antriebs Einsatz, Effizienz des Antriebsstrangs, Formel-Auto, Elektromotoren Eigenschaften, Simulationen, regeneratives Bremsen

Zusammenfassung:

Die Diplomarbeit enthält 67 Seiten, 13 Tabellen, 6 Bilder und 8 Abbildungen.

Das Ziel der Arbeit ist es, den Motor für das von FSST geplante Elektrorennauto FEST 15 mit Allradantrieb zu wählen und entwickeln sowie den in Übereinstimmung mit den Vorschriften der FSAE-Serie zu verwenden.

Die Aufgabe der Diplomarbeit und ihre Lösung sind von entscheidender Bedeutung, da das wählbare elektrische Antriebssystem ausreichend stark und dauerhaft sein soll, um die FSAE-Serie zu gewinnen. Der Antrieb muss allen Regeln der Serie entsprechen und im Einklang mit allen anderen Knoten sein, um mit FEST 15 zu passen. Diese Knoten sind z.B. das Akkusystem, das Planetengetriebe und die Gesamtabmessungen des Autos. Jede Aufgabe bekommt immer mehr Bedeutung, da das Antriebssystem in der Lage sein muss, in allen vier Quadranten zu funktionieren inkl. Beschleunigung und Bremsung, um die Bewegungsenergie in den Akku zurückzuführen. So braucht man einen kleineren Akku, die Geschwindigkeit auf der Strecke wird höher und die Fahrt selbst – länger.

Um die Diplomarbeit fertigzustellen, wurde die Simulation-Software *OpimumLap* und Programmiersprache *C++* benutzt, so dass bestmögliche Lösungen für die Wahl des Antriebs sowie für dessen möglichst effektive Verwendung zu finden wären.

ATV70LT

Development and implementation of electric powertrain for Formula car FEST15

Rait Karri, student code 110137AAAMM, May 2015. – 67 pages

TALLINN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY * Faculty of Power Engineering

Department of Electrical Engineering

Chair of Electrical Drives and Electricity Supply

Tutor of the work: Ph.D Anton Rassõlkin

Key words: powertrain selection, powertrain use, powertrain efficiency, formula car, electrical motors characteristics, simulations, regenerative braking

Summary:

Final paper is written on 67 pages, contains 13 tables, 6 illustrations and 8 drawings.

The aim of the final paper is to choose and develop gear-drive transmission for FSTT designed FEST 15 four-wheel electric formula racing car, and use it proceeding from the purpose of winning FSAE competitions.

The task and solution of the final paper are significant since the chosen electrical gear-drive system should be powerful and durable enough to win FSAE competitions. This drive must conform to all rules of the competition and fully comply with all other units of the formula FEST 15. These units include, e.g., accumulator unit, planetary gear system and general measurements of the car. The task is even more challenging since the fact that the gear system must be also capable to work in all four quadrants, i.e. apart from speeding up, to slow down the racing car in order to regenerate kinetic energy back to accumulator. Thus, a smaller-size accumulator can be used while the racetrack speed and run are increased.

The author abundantly applied in the research a simulating program “OpimumLap” and used C++ programming language to find the most accurate solutions for the choice of the gear-drive and its maximum possible effective use.

SISUKORD

Magistritöö ülesanne	7
1. Eessõna	8
2. Lühendite ja tähiste loetelu	9
3. Sissejuhatus	12
4. FEST 15 ajamisüsteemi valiku lähtealused	16
4.1. FEST 15 uuendused võrreldes varasemaga.....	16
4.2. FEST 15 eeldatavad parameetrid.....	17
4.3. Võimsuse ja momendi esialge hinnang.....	18
4.3.1. FEST 15 kiirendus ja vajalik moment.....	19
4.3.2. FEST 15 staatiline ja dünaamiline võimsus.....	21
4.4. Ajamisüsteemi üldine kontseptsioon ja juhtumine.....	24
4.4.1. Ühe mootoriga ajamisüsteem.....	25
4.4.2. Kolme mootoriga ajamisüsteem.....	26
4.4.3. Nelja mootoriga ajamisüsteem.....	27
4.5. Veoajami valiku lähtealuste kokkuvõte	29
5. FEST 15 veoajamisüsteemi valik	31
5.1. FSAE sarjas kasutatavad mootorid	31
5.2. AMK DD5-14 mootor.....	32
5.3. AMK DD5-14 mootori esialgne sobivuse hinnang	34
5.4. FEST 15 ajamisüsteemi valiku kokkuvõte.....	36
6. AMK DD5-14 dünaamiline simuleerimine.....	38
6.1. AMK DD5-14 karakteristikud ja ajamisüsteemi kaod.....	38
6.2. Kiirenduse simulatsioon ja ülekande hinnang.....	41
6.3. Efektiivsus, energia ja ringiaeg	42
6.4. Regeneratiivne pidurdus.....	47
6.5. Punktiskoori sõltuvus kasutatavast energiast	53
6.6. Dünaamiliste simulatsioonide kokkuvõte	57
7. Kokkuvõte	59
Kasutatud kirjandus.....	64
Lisa 1	65

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
Elektrotehnika instituut

KOOSKÕLASTATUD

Prof. T. Lehtla.....

..... 2015

MAGISTRITÖÖ ÜLESANNE

Rait Karri, üliõpilaskood 132438AAAMM

Magistritöö teema: Vormelauto FEST 15 veoajami arendamine ja rakendus

Ülesanne: Lahendada elektri vormelauto FEST 15 veoajami valik ning optimeerida seda vastavalt võistlussarja reeglitele ning konkurentsieelistele.

Lähteandmed:

1. Vormelauto oodatavad parameetrid
2. Vormelauto üldine kontseptsioon
3. Vedrusmeeskonna nõuded ja eeldused
4. Akusüsteemide meeskonna nõuded ja eeldused
5. Võistlussarja FSAE reeglistik

Lahendamisele kuuluvate probleemide loetelu:

Lahendada Formula Student Team Tallinna projekteeritava neljaratta veolise vormelauto ajami valiku ja optimeerimise ning rakendamise ülesanne järgnevas mahus:

1. Leida vormelauto lähteandmete põhjal vajalik elektriajam.
2. Leida parimad lahendused regenereerivaks pidurdamiseks.
3. Hinnata parimat võimalikku lahendust auto ülekandesüsteemile.
4. Optimeerida ja leida parimaid võimalike lahendusi rajakiiruse ja kulutatud energia vahel.
5. Hinnata väljavalitud ajami suutlikust vastavalt lähteandmetele.

Magistritöö esitada eesti keeles kahes eksemplaris koos eesti- ja kahe võõrkeelse referaadiga hiljemalt 18.05.2015.

Juhendaja:

Ülesande vastu võtnud:

PhD A. Rassõlkin

Üliõpilane R. Karri

1. EESSÕNA

Lõputöö teema valik ning vajalikus on kooskõlastatud Formula Student Team Tallinna juhtkonnaga, et luua maailmaparemiku kuuluv elektri vormelauto FEST 15. Lähteandemete seadmisel võeti aluseks võistlusreeglistik ning meeskonna kogemused ja teadmised. Töö loomisel pidi pidevalt suhtlema ning kooskõlastama tegevust kõigi ala-meeskondade liikmetega, kuna ajamisüsteem puudutab auto enamus osi nagu näiteks vedrustus, elektroonikasüsteemid, kere ning jõuülekanne. Seetõttu on oluline märkida ära, et antud töö on osa ühest suurest omavahel kokku sobitatud tervikust.

Lisaks FSTT'le soovin ma tänada juhendajat PhD Anton Rassõlkinit, kes oli antud töö loomisel suureks abiks.

2. LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

a – auto varieeruv kiirendus sõltuvalt lähteülesandest (m/s^2)

ACC – kiirenduse punktide arv

A_e – aerodünaamiline protsent eeldatud parameetritest

a_k – auto kiirendus ühtlasel kiirendamisel (m/s^2)

A_r – FEST 15 ristlõike pindala (m^2)

C_d – FEST 15 õhutakistustegur

C_l – FEST 15 survejõu koefitsient

E_{aku} – FEST 15 akupaki mahutavus (kWh)

FEST 13 – FSTT aastal 2013 projekteeritud ja ehitatud FSAE klassi elektri vormelauto

FEST 14 – FSTT aastal 2014 projekteeritud ja ehitatud FSAE klassi elektri vormelauto

FEST 15 – FSTT aastal 2015 projekteeritud ja ehitatud FSAE klassi elektri vormelauto

F_k – kogu jõud leidmaks vajalikku momenti veotelgedel (N)

F_p – auto kiirendamiseks vajalik jõud ilma takistusjõududeta (N)

F_s – staatilised takistusjõud sõltuvalt kiirusest (N)

FSAE – Formula Society of Automotive Engineers, Formula Student võistlussari

FSE – Formula Student England

FSG – Formula Student Germany

FSH – Formula Student Hungary

FSTT – Formula Student Team Tallinn

F_t – FEST 15 takistus- ja survejõud leidmaks vajalikku momenti veotelgedel (N)

I – maksimaalne akupaki laadimisvool (A)

I_r – pidurdamisel mootoris tekkiv vool (A)

k – jõuülekanne ülekandearv

ke – pingekonstant, mis näitab mitu rpm muutub pöörlemiskiirus, kui tõsta pinget ühe voldi võrra (V/rpm)

KES – kestvussõidu punktide arv

kt – momendi volulusuhte muutuja (Nm/A)

k_u – kaalu ümberjaotumine (ette või taga %)

li – liidetavate arv

l_r – auto rööbe ees / taga (mm)

l_t – teljevahe (mm)

m – FEST 15 eeldatav mass koos juhiga (kg)

M_v – vajalik summaarne moment vedavatel ratastel, et tagada vajalik kiirendus (Nm)
 m_0 – FEST 15 eeldatav mass ilma juhita (kg)
 m_a – aerodünaamiline lisanduv mass sõltuvalt kiirusest (kg)
 m_a – akupaki maksimaalne mass (kg)
 M_k – maksimaalne DD5-14 mootorite arendatav moment veoratastes (Nm)
 m_{ko} – kontrolleri maksimaalne mass (kg)
 M_m – DD5-14 mootori maksimaalne moment (Nm)
 m_{mo} – mootorite maksimaalne kogumass (kg)
 M_{ratas} – ratast pidurdav moment (Nm)
 n_m – mootori pöörlemiskiirus (rpm)
 OL – OptimumLap simuleerimistarkvara
 P_2 – kahe mootori arendatav võimsus protsentuaalselt (%)
 P_4 – nelja mootori arendatav võimsus protsentuaalselt (%)
 P_a – akupaki laadimisvõimsus (kW)
 P_d – dünaamiline võimsus sõltuvalt kiirusest ja kiirendusest (W)
 P_{mo} – mootorite koguvõimsus (kW)
 PMSM – püsिमagnetitega sünkroonmootor
 P_{ratas} – ühe ratta maksimaalne mehaaniline pidurdusvõimsus (kW)
 P_s – FEST 15 vormelauto staatiline võimsus sõltuvalt kiirusest (W)
 r – ratta raadius (m)
 s_k – kiirenduse teepikkus (m)
 SKI – skid-padi punktide arv
 SPI – sprindi punktide arv
 t – kestvussõidu ringiaeg (s)
 T_{amax} – minimaalne kiirenduse aeg korda 1,5 (s)
 T_{amin} – minimaalne kiirenduse aeg
 T_{ayour} – FEST15 kiirenduse sõiduaeg (s)
 t_k – kiirenduse aeg (s)
 t_{kesk} – keskmine esikolmiku aeg (s)
 T_{kmax} – minimaalne kestvussõidu aeg korda 1,45 (s)
 T_{kmin} – minimaalne kestvussõidu aeg (s)
 T_{kyour} – FEST15 kestvussõidu sõiduaeg (s)
 T_{pmax} – minimaalne sprindi aeg korda 1,45 (s)
 T_{pmin} – minimaalne sprindi aeg (s)

T_{pyour} – FEST15 sprindi sõiduaeg (s)
 T_{smax} – minimaalne skid-padi aeg korda 1,25 (s)
 T_{smin} – minimaalne skid-padi aeg (s)
 T_{syour} – FEST15 skid-padi sõiduaeg (s)
 t_x – FSG, FSE ja FSH ajad sekundites (s)
 U_n – akupaki nominaalpinge (VDC)
 v – auto varieeruv kiirus sõltuvalt lähteülesandest (km/h)
 W_k – kogu kulutatud energia võistluse jooksul (kWh)
 W_m – kulutatud energia mootori võllil võistluse jooksul (kWh)
 v_{max} – maksimaalne auto kiirus (km/h)
 W_{me} – mootorite kulutatud elektriline energia võistluse jooksul (kWh)
 W_s – soojusenergia kadu (kWh)
 η_k – kogu ajamisüsteemi kasutegur (ülekanne, mootor, kontrollid) (%)
 η_{kt} – kontrollid kasutegur koos juhtmetes eralduva soojusega (%)
 η_m – mootorite keskmine efektiivsus (%)
 η_p – planetaarülekanne kasutegur (%)

3. SISSEJUHATUS

Tänapäeval, kus kogu ühiskond, organisatsioonid, riigid ning nende liidud töötavad pidevalt selle nimel, et Maa ning siine elu oleks jätkusuutlik on oluline uurida, kuidas seda teha kõigis valdkondades. Samas on selge, et üks suurimateks ressurside kulutajateks on tööstus ning transpordisektor. Kulutatakse nii metalle, plaste, kütust ning palju muud, kuid paljud nendest materjalidest on ümbertöödeldavad ja taaskasutatavad. Teine olukord on aga kulutatud energiaga. Nimelt ei ole fossiilsed kütused taastuvad ning seetõttu ühel päeval pole võimalik enam energiat fossiilsetest maavaradest ammutada. Jätkusuutlikuks arenguks vaja õppida kasutama ja üha enam täiustama taastuvaid energiaallikaid. Taastuvate energiaallikate kasutamine on lisaks jätkusuutlikusele ka parem meie keskkonnale, kuna päiksest toodetud elektrienergia kasutamine ei põhjusta kasutamisel jäätmete tekkimist. Kuid kindlasti ei tohiks selle juures ära unustada näiteks päiksepaneelide või elektrimootorite tootmisel tekkivat reostust ja jääke. Seetõttu on oluline rõhutada, et igat probleemi peab vaatlema võimalikult paljudest aspektidest, eriti kui otsused mõjutavad osa või tervet ühiskonda.

Üks kitsam ning kõigile mõistetav taoline sektor, mis vajab uuendamist, on transport. Piisab, et vaadata natuke enda ümber ning näha tossaivaid autosid või busse. Arvestades kui palju on maakeral nafta saadustest liikuvaid sõidukeid on selge, et üks päev pole antud viisil liikumine enam võimalik. See millal antud olukord hakkab ilmnema ei oska ühtset ning konkreetset vastust anda ka parimad teadlased. Kuid, et ennetad suuri lööke majandusele ning miks mitte ka sõdu viimase nafta pärast, on vaja juba varakult tegeleda alternatiivsete energiaallikate uurimise ning nende reaalse rakendustega. Antud tendentsi on märganud kindlasti enamus inimesi. Näiteks Eestisse on ilmunud üpris palju elektriautosid ning laadimispunkte. Samuti pakuvad juba enamus suuri autotootjaid elektriautosid. Näiteks aastal 2014 müüdi 400 000 elektriautot, siis aastaks 2016 pakutakse juba üle ühe miljoni müüdüd elektriauto aastas ehk iga aasta umbes kahekordistub elektriautode tootmine [1]. Kui vaadata, et aastal 2010 müüdi ainult 25 000 elektriautot näitab see ühiskonna kindlat suundumust. Seetõttu on tegemist väga aktuaalse teemaga, mis igajuhul vajab arendamist ja parandamist, et pakkuda ostjatele suuremat kasutajamugavust.

Elektri puhul on tegemist väga paindliku energiakandjaga. Elektri tootmise viise on palju, kui mitte öelda tohutult, võrreldes teiste energiakandjatega. Elektrit saab toota tuulest, veest,

päikesest, taastuvatest ja taastumatutest maavaradest, kuid ka puhtalt inimeste enda lihaste abil. Seetõttu on elektrilisi seadmeid võimalik ära kasutada üle kogu maa ning väga paljudes erinevas rakendustes, kuna suure tõenäosusega on igas paigas võimalik leida lahendus, kuidas elektrit toota. Seetõttu on äärmiselt oluline uurida meie meeletu kiirusega muutuv maailmas, kuidas võimalikult efektiivselt ja mugavalt ära kasutada elektrienergia eelised.

Taoliste keerukate ja mitmekülgsede probleemide lahendamine nõuab jätkusuutliku ning pidevat meeskonnatööd. Üheks selliseks organisatsiooniks on FSTT, mille puhul on tegemist organisatsiooniga, mis ühendab entusiastidest tudengeid, kelle suurim siht on saada tööstuse ning eelkõige transpordi teaduste valdkonnas maailmatasemel kogemusi, et siirduda hiljem tugeva spetsialistina palgatööle või asutada oma ettevõtte. FSTT projekteerib, ehitab ja arendab iga aasta uue FSAE vormelsarja klassi kuuluva väikevormelauto, mille väljundiks on iga aasta üle maailma toimuvad võistlused, mis annavad head tagasisidet sellest, et millisel tasemel tiim asub ning hinnata oma arengut võrreldes teiste lahendustega mujalt maailmast [2]. On oluline ära märkida, et võisteldakse nii dünaamilistel kui staatilistel aladel, et hinnata loodud autot võimalikult mitmekülgselt. Staatilised alad on disaini kaitsmine, äripresentatsioon ning maksumuse hindamine. Dünaamilistel aladeks on külj- ja pikki kiirenduse võistlus, sprint ja kestvussõit. Oluline on, et loodav lahendus oleks äärmiselt mitmekülgne ning kõik osad oleksid viimase detailini läbi analüüsitud täpselt nii nagu peab olema lõpptarbijale pakutav toode, mis antud juhul on elektriline vormelauto FEST 15.

Käesolev lõputöö käsitleb FSTT arendatava elektrilise vormelauto FEST 15 ajamisüsteemi valikut, kasutamist ning selle optimeerimist, et olla maailma tasemel. Valitava ajamisüsteemi puhul on tegemist mootorist (mootoritest) ning kontrollierist koos inverteriga oleva süsteemiga. Ajamisüsteemi valiku puhul tuleb silmas pidada rohkel hulgal nõudeid ja ootusi autole. Esimese ülesandena on vaja defineerida ja lahti mõtestada, millega antud auto peab hakkama saama rajal kui väljaspool seda, milline on tema ennustatav mass, mõõtmed ning muu olulised parameetrid. Kuid kuna auto osaleb võistlussarjas, siis ei tohi ära unustada ka võistlussarja reegleid, mis seavad hulga piiranguid ja takistusi ajamisüsteemide valikul ja kasutamisel. Teisest küljest on vaja veenduda, et kui valitav mootor ja kontrollier oleksid piisavad, et toita autot vajaliku võimsuse ja momendiga, peab ta ühilduma ka kõigi teiste süsteemiga, mis on vormelil. Ei saa valida mootoreid, mida ei ole võimalik antud vedrustuse ja kerega ühendada või mida ei toeta akutehnoloogia. Kuna ajamid on seotud enamuse auto

küljes olevate alaosüsteemiga tuleb selle valikul teha koostööd pidevalt teiste liikmetega FSTT meeskonnast, et vältida infovahetusest tekkivaid vigu.

Loodav vormelauto FEST 15 on nelikveoline elektrivormel. Seetõttu on võimalik kasutada väga palju erinevaid ajamissüsteeme, juhtimisviise ning ka pidurdades regenereerida energiat tagasi akupakki. Kõige olulisem on valida piisavalt võimekas ajamisüsteem, et võita võistlusi. Kui kindlasti ei tohi ära unustada, et ajami ebakorrektnen juhtimine ning kasutamine vähendavad samuti võimalusi võita võistlusi. Ajami juhtimist ja kasutamist tuleb kindlasti vaadelda väga paljudest erinevatest aspektidest ning võistlustaktikast. Näiteks, mida kiiremini auto sõidab seda rohkem energiat kulutatakse, kuid kas nii suureneb ka regenereeritava energia kogus ja kuidas muutub efektiivsus? Kuidas on sõltuvuses raja kiirus, ülekandesuhe ja kulutatud energia? Kas mõnedes olukordades on mõistlik kasutada ainult tagumise silla vedu või pidevat nelikvedu? Küsimusi on palju.

Kuna tegemist on nii-öelda võistlusega, mis koosneb paljudest alavõistlustest, siis on oluline saavutada kokkuvõttes üldvõit. Seetõttu on oluline teada, millise taktikaga sõitma minna kõiki individuaalalasi, et teenida kokkuvõttes suurim punktiskoor. Võib tekkida olukord, kus on mõtet sõita kestvussõitu aeglasemalt, aga see-eest lõpetada võistlus kindla varuga. Selliseid küsimusi on võidusõidu maailmas palju. Järelikult peab antud töö käsitlema sellised tegevusi, mis oleksid vajalikud, et tagada ajami kõige optimaalsem kasutus. Lisaks teooriale, kuidas ajameid kasutada on vaja kindlasti tegeleda ka nende otsese juhtimisega. Näiteks veojõu kontrolli ja momenti vektorjuhtimise loomine ehk milliste algoritmide alusel juhtida sõiduki rataste momenti ja kiiruseid. Milliseid mudeleid ja andmebaase läheb meil selleks vaja ning kuidas neid ühildada kõige optimaalsemalt. Kõik see tekitab hulganisti küsimusi, millele on vaja otsida õigeid lahendusi.

Parima vastusele kõikidele eelnimetatud küsimustele annavad kindlasti reaalsed ringraja testid. Kuid sellised testid on väga ressursimahukad nii ajalises kui rahalises mõttes, mis mõlemad on tugevalt piiratud. Seetõttu tuleb suurem töö teha ära teoreetiliselt ning lõppseadistus ringrajal. Parimate teoreetiliste tulemuste saavutamiseks tuleb kindlasti ära kasutada tänapäeva arvutite ja simuleerimisprogrammide võimsust, kuid ei tohi ära unustada klassikalisi arvutusviise, et veenduda programmide arvutustulemuste õigusest. Saadud tulemusi tuleb hinnata objektiivselt, et veenduda, kas saadud tulemused on reaalselt rakendatavad või peab tegema mööndusi ning neid uuesti simuleerima. Kindlasti tuleb

arvestada asjaoluga, et saadud tulemused on mingil määral valed, kuna kõik mudelid ei vasta reaaleluliste protsessidele.

Töö ise käsitleb süsteemset ning läbimõeldud lahenduskäiku, kuidas leida vormelautole vajalik ajam ning mida sellega tegelikult teha saab. Selge on, et kusagilt peab alustama, seetõttu tuleb toetuda kogemustele ja FSAE arengule ning hinnata milliste parameetritega võidusõidukit tuleb projekteerida ja ehitada. Toetudes lähteandmetele on vaja hinnata auto võimsuskasutust seoses erinevate kiirendusomadustega, millele omakorda saavad toetuda mootorite töökarakteristikud. Tänu võimsuskasutuse hinnangule on võimalik tutvuda erinevate lahendustega ning variantidega, kuidas projekteerida nelikveoline võidusõiduauto ja seda just ajamite poolelt. Peale esialgselt valikut on äärmiselt oluline veenduda dünaamiliste simulatsioonidega, kas ajamisüsteem rahuldab eeldatavaid parameetreid. Kui antud tulemus on saavutatud, siis on vaja leida kindlasti parim lahendus, kuidas ajamisüsteemi kõige paremini kasutada, et võita võistlused. Kuna auto on väga kompleksne seade siis, tuleb ajamisüsteemi kasutust vaadelda, kuidas ta haakub auto aero-, ülekande-, juhtimis- ning teiste süsteemidega.

Töö lõppeesmärk on anda FSTT kindlaid teadmisi ja nõuandeid, millist ajamisüsteemi vajab auto FEST 15 ja kuidas tuleb seda kasutada, et saavutada võistlustel parim tulemus ning millised peavad olema edasised arengusuunad, et valitud ajamisüsteemi tulevikus veelgi paremini ära kasutada. Lisaks võistluspoolele võiks lõputöö anda kogu tiimi isikkooseisule ning teistele kõrvalistele isikutele nõuandeid ja soovitusi, kuidas valida ja kasutada kõige efektiivsemalt sõiduki elektriajamit.

4. FEST 15 AJAMISÜSTEEMI VALIKU LÄHTEALUSED

4.1. FEST 15 uuendused võrreldes varasemaga

FEST 15 puhul on tegemist neljaratta veolise süsinikkerega vormelautoga, mis vastab FSAE võistlussarja reeglistikele [2]. Sellele eelnevad elektrivormelid FEST 14 ja FEST 13 olid YASA 750 ajamissüsteemiga, mis vedas ainult tagumisi rattaid läbi LSD diferentsiaali ning auto oli ehitatud teras torudest raamile [3]. Nelja vedava rattaga vormelauto võib tunduda küll esialgu väga kaheldava väärtusega, kuid tänu antud reeglistikele on tegemist valikuga, mis hoiab loodava võidusõiduauto konkurentsisis.

- Esimeseks põhjuseks, miks kasutada nelikvedu on suhteliselt madalad rajakiirused. Maksimaalne rajakiirus ei ületa 120 km/h tänu väga tehnilistele radadele ning raja keskmine kiirus jääb 48 km/h – 57 km/h vahele [2]. Kuna enamus elektrimootoreid, mida on võimalik kasutada autodel, suudavad pakkuda madalatel pööretel suurt momenti, siis tekib koheselt probleem, et jõudu on rohkem kui haarduvust maaga ning tekib rataste libisemine ja sõidukiiruse kaotamine. Seetõttu kasutamegi neljaratta vedu, et vähendada rataste läbilibisemist.
- Teine põhjus on pidurdamisel tekkiva energia regenereerimine. Pidurdades langeb esiteljele umbes 70-75 % pidurdusjõust 1,6 G juures. Seetõttu aitaksid esimestel ratastel olevad mootorid regenereerida suurema osa energiat.
- Kolmas põhjus on märg rada. Tihitipeale tuleb võistelda ka vihmase ilmaga või märjaks kastetud rajaga (seda eriti külgiirendus võistlustel) ning seetõttu on tagaratta veolise vormeliga raske konkurentsisis püsida.

Järgmine suur uuendus on süsinikmonokokk kere. Kogu kere lamineeritakse süsinikust ühes tükis, mis peaks tegema kere nii jäigemaks kui ka kergemaks. Antud tegevus on küllaltki keeruline kuna see tegevus nõuab täiusliku CAD mudeli olemasolu, sest hilisemas faasis on väga raske sinna auke juurde teha või midagi muud modifitseerida.

Lisaks eelnimetatud uuendustele kasutatakse FEST 15 vormelil hulgaliselt FSTT poolt projekteeritud elektroonikat. Näiteks sensorika, juhtaju mootorite kontrolleri-tele,

elektrooniline elektriliste ahelate kaitstesüsteem, logimis üksus ning samuti veel telemeetria ja palju muud.

4.2. FEST 15 eeldatavad parameetrid

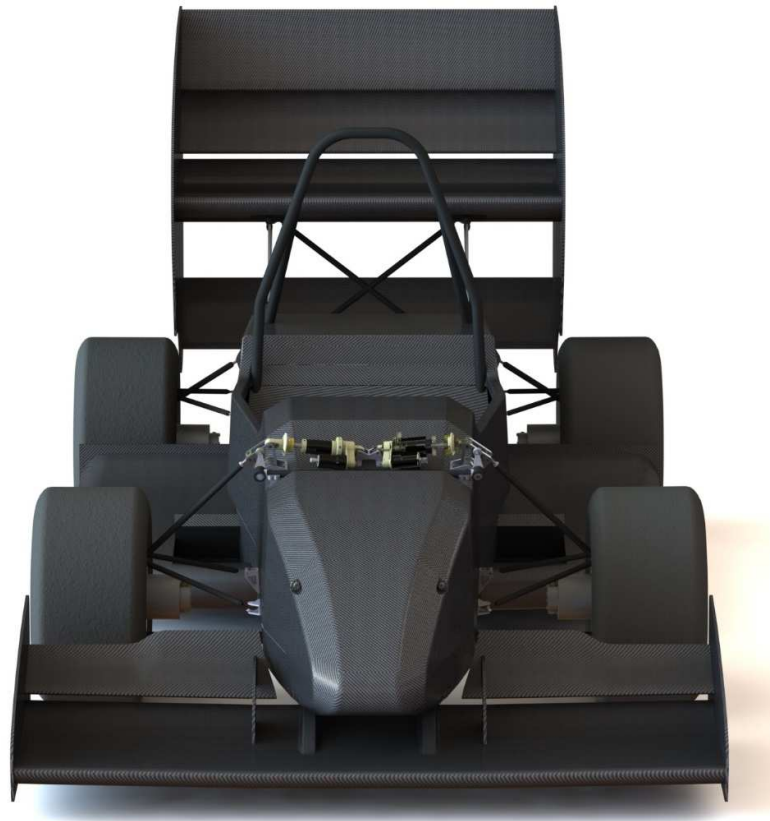
FEST 15 (Joonis 4.1) parameetrite ja eesmärkide püstitamisel on lähtunud nii võistlusreeglistikust kui ka meeskonna eelnevatest kogemusest ning seda eelkõige vormelautode FEST 14 ja FEST 13 põhjal, mille ajami valikut on kirjeldatud R. Karri bakalaureusetöös [3]. Suurimad eesmärgid on kärpida massi 10 %, minna üle nelikveolisele veosüsteemile ning võtta kasutusele süsinikkere. Tähtsamad parameetrid on toodud alljärgnevas tabelis (Tabel 4.1). Antud väärtused on lähteandmed, mistõttu võivad väärtused muutuda arendustöö käigus.

Tabel 4.1. FEST 15 eeldatavad parameetrid

Omadus	Tähistus	Väärtus	Ühik
Mass (ilma juhita)	m_0	230	kg
Mootorite koguvõimsus	P_{mo}	80	kW
Mootorite maksimaalne kogumass	m_{mo}	20	kg
Kontrolleri maksimaalne mass	m_{ko}	8	kg
Maksimaalne kiirus	v_{max}	120	km/h
Survejõu koefitsient	C_l	2,71	-
Õhutakistustegur	C_d	1,3	-
Teljevahe	l_t	1530	mm
Auto rööbe ees /taga	l_r	1210/ 1180	mm
Ristlõike pindala	A_r	1,15	m ²
Akupaki mahutavus	E_{aku}	8,4	kWh
Akupaki maksimaalne mass	m_a	65	kg

Olulisem muutus reeglistikus on ajamisüsteemi 80 kW võimsuse piirang, mis varasematel aastatel on elektrivormelitele olnud 85 kW [2]. 5 kW võimsusekao puhul on tegemist 6 % suuruse võimsuse vähenemisega, kuna eesmärgiks on aga saada kiirem auto siis tuleb erilist

tähelepanu pöörata massi vähendamise küsimustele ning võimalikult optimaalsele energia kasutusele, et hakkama saada väiksema võimsusega.



Joonis 4.1. FEST 15

4.3. Võimsuse ja momendi esialge hinnang

Võttes arvesse auto eeldatavaid parameetreid tuleb hinnata lihtsate füüsikaliste valemite abil nende parameetrite kokku sobivust ning hinnanguid vajalikule ajamisüsteemile, et rahuldada antud omadusi. Selliste arvutusmeetodite eelis on nende lihtsus, mistõttu on võimalik hinnata tunnussuursi ja –väärtusi, mille abil on võimalik otsida turult ligilähedaste tunnussuurustega ajamisüsteeme. Kuid, kuna vormelauto on äärmiselt dünaamilise karakteristikutega sõiduvahend, ei piisa järkevatel arvutustel hindamiseks lõplike suursi vaid näitavad kätte esialgse suuna.

4.3.1. FEST 15 kiirendus ja vajalik moment

FSAE võistlusel on üheks alavõistluseks kiirendusvõistlus, mille pikkus on 75 m. Kuna eesmärgiks on ehitada konkurentsivõimeline auto, mis suudaks võita ka alavõistlusi, siis selleks tuleb uurida aegu, millega läbivad võitjatiimid 75 m distantsti. Saamaks parimat teavet milliste aegadega võidetakse antud distantsti on koostatud järgnev tabel (Tabel 4.2), mis kajastab FSG, FSE ja FSH 2014 aasta võistluste tulemusi.

Tabel 4.2. Kiirenduste ajad aastal 2014 [2], [4], [5]

Koht	FSG, s	FSE, s	FSH, s
1.koht	3,359	3,439	3,45
2.koht	3,493	3,468	3,69
3.koht	3,541	3,938	3,749

Saadud tulemuste baasil leitakse aritmeetiline keskmine:

$$t_{kesk} = \frac{\sum_{i=1}^n t_x}{li}, \quad (4.1)$$

kus t_{kesk} – keskmine esikolmiku aeg (s),
 t_x – FSG, FSE ja FSH ajad sekundites (s),
 li – liidetavate arv, mis antudjuhul on 9.

Teades distantsti ning aega saab leida konstantse kiirenduse väärtuse, mis on vajalik, et antud vahemaa läbida antud ajaga:

$$a_k = \frac{2 \cdot s_k}{t_k^2}, \quad (4.2)$$

kus a_k – kiirendus ühtlasel liikumisel (m/s^2),
 s_k – kiirenduse teepikkus (m),
 t_k – kiirenduse aeg (s).

Toetudes Newtoni teisele seadusele saab avaldada jõu, mis on vajalik, et antud autot vajaliku kiirendusega kiirendada:

$$F_p = a_k \cdot m, \quad (4.3)$$

Kus F_p – auto kiirendamiseks vajalik jõud ilma takistusjõududeta (N),

m – FEST 15 eeldatav mass koos juhiga (kg).

Pannes tulemused valemitesse 4.1 - 4.3 saame keskmiseks esikolmiku ajaks on 3,57 sekundit, keskmine kiirendus $11,77 \text{ m/s}^2$ ning auto kiirendamiseks vajalik jõud ilma takistusjõududeta on 3649 N.

Lisaks puhta massi kiirendamisel mõjuvad veel ka takistusjõud, mis tulenevad õhutakistusest ning veeretakistusest, mistõttu on vaja arvestada ka nimetatud suurusi.

$$F_k = F_p + F_t, \quad (4.4)$$

kus F_k – kogu jõud leidmaks vajaliku momenti veotelgedel (N),

F_t – FEST 15 takistus- ja survejõud leidmaks vajaliku momenti veotelgedel (N)

Vajaliku kogu jõu põhjal saab leida kõigi vedavate rataste summaarse momendi, mis on vajalik, et FEST 15 läbiks 75 meetrise distantssi 3,57 sekundiga.

$$M_v = F_k \cdot r, \quad (4.5)$$

kus M_v – vajalik summaarne moment vedavatel ratastel, et tagada vajalik kiirendus (Nm),

r – vormeli ratta raadius 0,225 (m).

Kuna takistusjõud ja vormeli vajalik moment sõltuvad auto kiirusest on tulemused tabeli kujul (Tabel 4.3).

Tabel 4.3. Jõud ning momendid erinevatel kiirustel

v, km/h	a, m/s ²	F _p , N	F _t , N	F _k , N	M _v , Nm
20	11,77	3649	78	3727	839
40	11,77	3649	301	3950	889
60	11,77	3649	676	4325	973
80	11,77	3649	1192	4841	1089
100	11,77	3649	1870	5519	1242

Märkus: 1. Kasutatud õhutihedus $1,22 \text{ kg/m}^3$

Uurides arvutusandmeid selgub, et konstantse kiirenduse korral peab moment pidevalt suurenema, et tagada vajalik kiirenduse aeg. Kuid üldjuhul käituvad elektrisõidukitel kasutatavad püsिमagnetitega elektrimootorid vastupidiselt ehk väikestel pööretel rohkem momenti ja suurtel vähem. Seetõttu tuleb ajami valikul arvesse võtta, et momendi tunnusjoone väärtused oleksid suuremad kui tabelist toodud ning seda eriti madaletel pööretel, et kompenseerida võimaliku momendi puudujääki suurtel kiirustel aga ka seda, et suurtel kiirustel tekib probleem võimsuse limiidi ületamisega

4.3.2. FEST 15 staatiline ja dünaamiline võimsus

Võistlusreeglistik määrab ära maksimaalne võimsuse, mida võib akupakkidest igal ajahetkel maksimaalselt välja võtta, kuid mootoreid valides on lisaks maksimaalsele võimusele oluline hinnata ka keskmist võimsust, millega kogu ajamisüsteem peab pidevalt hakkama saama, sest on selge, et maksimaalse võimsusega ei sõideta koguaeg. Seetõttu on äärmiselt oluline hinnata milliseid võimsuseid auto tõenäoliselt tarbima hakkab, et langetada õige valik. Lisaks sätestab võistlusreeglistik, et kestvussõidu raja keskmine kiirus peab jääma vahemikku 48 km/h kuni 57 km/h, seetõttu tuleb antud kiiruste vahemiku võtta võimsuste hinnangu põhiliseks aluseks.

Staatilise võimsusega on tegu, kui vormelauto ei kiirenda ehk staatilise võimsuse arvutamisel on vaja arvesse võtta kõiki jõude, mis takistavad auto liikumist [6]. Staatilise võimsuse valem, mis vastab mootori võllile taandatud võimsusega on:

$$P_s = \frac{F_s \cdot v}{\eta_p}, \quad (4.6)$$

kus P_s – staatiline võimsus sõltuvalt kiirusest (W),
 F_s – staatilised takistusjõud sõltuvalt kiirusest (N),
 η_p – planetaarülekanne kasutegur,
 v – auto kiirus(m/s).

Kuna staatiline võimus sõltub kiirusest on arvutuste tulemused esitatud tabeli kujul (Tabel 4.4).

Tabel 4.4. FEST 15 staatiline võimsus

v, km/h	F _s , N	P _s , W
10	10	29
20	29	168
30	63	547
40	113	1308
50	178	2575
60	254	4410
70	345	6988
80	451	10440
90	571	14870
100	704	20370
110	851	27086

Märkus: Võimsuse arvutamisel kasutatud jõuülekanne kasutegur η_p on 0,96, mis on saadud FSTT jõuülekanne meeskonnalt.

Dünaamiline võimus on auto kiirendamiseks kasutatav võimus, mis lisandub staatilisele võimusele, et hinnata kogu auto kasutatavat võimsust [6]. Dünaamilise võimsuse arvutamisel on vaja arvesse võtta kiirendust, auto kiirust ning ka auto massi. Lisaks staatilisele massile tuleb arvesse võtta ka tiibade poolt tekitatavat aerodünaamilist koormust, mis langeb vertikaalselt autole, kuid lisanduv mass on sõltuvusest auto kiirusest. Dünaamilise võimsuse valem, mis vastab mootori võllile taandatud võimsusega on:

$$P_d = \frac{(m+m_a) \cdot a \cdot v}{\eta_n}, \quad (4.7)$$

kus P_d – dünaamiline võimsus sõltuvalt kiirusest ja kiirendusest (W),

m – auto mass koos juhiga (kg),

m_a – aerodünaamiline lisanduv mass sõltuvalt kiirusest (kg),

a – auto kiirendus (m/s^2),

v – auto kiirus (m/s).

Tabel 4.5. FEST 15 dünaamiline võimsus

v, km/h	m _a , kg	a, m/s ²			
		2	4	6	8
		P _d , W			
10	2	1805	3609	5414	7218
20	6	3659	7318	10976	14635

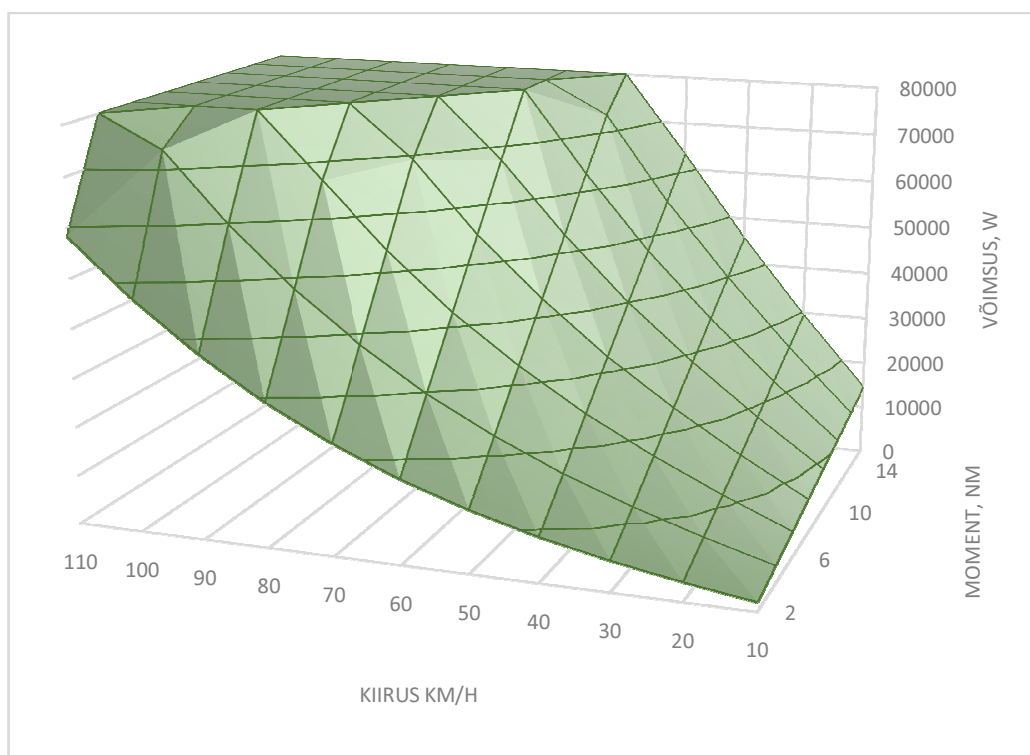
v, km/h	m _a , kg	a, m/s ²			
		2	4	6	8
30	14	5630	11259	16889	22519
40	24	7730	15461	23191	30922
50	39	10088	20176	30263	40351
60	54	12640	25280	37919	50559
70	75	15589	31178	46767	62355
80	96	18797	37595	56392	75190
90	121	22469	44938	67407	89876
100	150	26606	53211	79817	106422
110	181	31245	62491	93736	124981

- Märkused:
1. m_k väärtus on võetud OL tarkvarast, kus survejõu koefitsient on 2.71
 2. m on 313 kg

Dünaamilise võimsuse tabelit (Tabel 4.5) uurides selgub, et suurem osa võimsusest kulub kindlasti auto kiirendamisele kui võrrelda seda staatilise võimuse tabeliga (Tabel 4.4). Näiteks kiirusel 110 km/h tarbib vormel staatilist võimsust umbes 27 kW, kuid dünaamilist võimust tarbib FEST 15 samal kiirusel kui autot kiirendada ainult 2 m/s² juba 31 kW. Kuna võistlusreeglistik näeb ette, et akust võetav võimsus ei tohi ületada 80 kW, on vaja hinnata pärast mootori valikud kindlasti ka seda kui palju sellest võimsusest täpselt jääb alles nii-öelda auto liigutamiseks ehk kui suur on kogu süsteemi kasutegur mis arvestab kui palju soojust eraldub kontrollis, jõuülekanes ja mootoris endas. Võib kindlasti väita, et mootoritest väljavõetav võimsus ei ole enam sellisel juhul 80 kW vaid hulga väiksem, kuid see sõltub juba konkreetsest veoajamist.

Koguvõimsuse jooniselt mis käsitleb tarbitavat võimsus mootori võllil (Joonis 4.2) saab lugeda, kui palju tarbib auto nii staatilist kui ka dünaamilist võimsust üheaegselt. Näiteks, kui auto sõidab 50 km/h ning kiirendab seejuures 10 m/s² tarbib auto 53 kW mootori võllil. Järeldus, et võimsuse poolest võiks kiirenda ka kiiremini kuid samas tähendab see, et mootorite arendatav moment peab olema oluliselt suurem. Aga 100 km/h tunnis liikuv auto saab kiirenda ainult umbes 4 m/s², et mitte ületada lubatud kasutatavat võimsust ainuüksi mootori võllil, arvestamata süsteemi kasutegurit. Antud arvutuste järeldusena tuleb tõdeda, et kui soovida autole head kiirendust peavad mootorid olema suutlikud madalatel kiirustel arendama suurt momenti, mis aga peab suurtel kiirustel vähenema kuna võimsus on piiratud.

Kuid väga oluline on vähendada ka staatilise võimsuse osakaalu, sest selle arvelt on võimalik suurendada dünaamilist võimsust. Tuleb ära märkida, et 100 km/h sõitev FEST 15 raiskab liiga palju staatilist energiat, olles samas suurusjärgus nagu tavaline sõiduauto, kuid kaalub 4-5 korda vähem. Teise näitena, näiteks Formula BMW klassi autodel on tiibade ja kogu auto õhutakistusjõud 2 korda väiksem kui hetkel FEST 15 seetõttu on see oluline koht, mida tuleb arendada. Antud andmed pärinevad OL simulatsioonides Honda Civic 1999 ja Formula BMW autodega.



Joonis 4.2. Tarbitav koguvõimsus sõltuvalt kiirusest ja kiirendusest

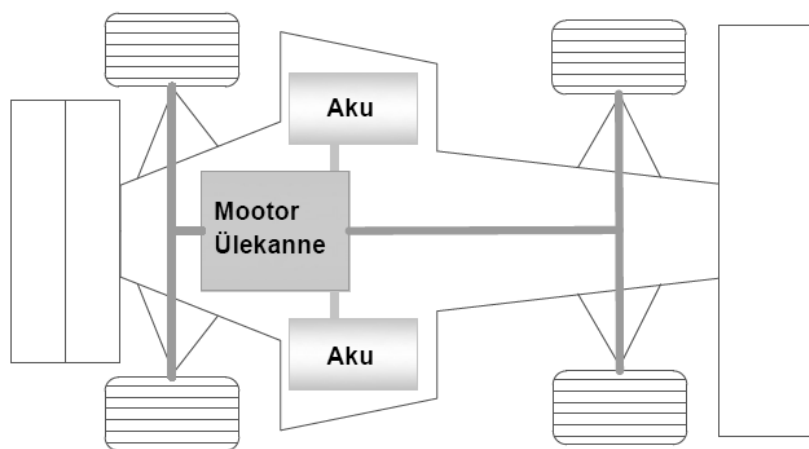
4.4. Ajamisüsteemi üldine kontseptsioon ja juhtumine

Ajamisüsteem peab suutma vedada kõiki nelja vormelauto ratast, regeneerima pidurdades energiat, kaaluma maksimaalselt 28 kg (va ühendusjuhtmed, akupakk ning jahutussüsteem) ning täitma kõiki peatükis 4.3 (Võimsuse ja momendi esialge hinnang) esitatud nõudeid. Kuid antud lähteandmed ei määra veel kuidas ja kuhu paigaldada elektrimootoreid ning kui palju elektrimootoreid on mõtet kasutada. Võimalik on kasutada ühte, kahte, kolme või nelja mootorit märkides seejuures ära, et antud lahendusi on proovitud Formula Student sarjas [4],

[12]. Järgnevas analüüsis on välja jäätud kahe ajamiga lahendust. Kuna kui kasutada esimesel ja tagumisel teljel eraldiseisvaid mootoreid langeb see kokku osaliselt kolme ajamiga süsteemiga. Ehk on vaja pikki mehaanilisi ja keerulisi ülekandesüsteeme ning millele lisandub paigutamise probleem, sellest kõigest saab täpsemalt lugeda peatükis 4.4.2.

4.4.1. Ühe mootoriga ajamisüsteem

Ühe mootoriga ajami kontseptsioon (Joonis 4.3) on lihtne oma juhtimissüsteemide poolest. Ühe mootoriga süsteemis on auto korrektseks liigutamiseks vaja anda kontrollerile informatsiooni ainult ühe mootori kohta, et millist momenti soovitakse saada. Seda, kui kiiresti peab iga ratas pöörlema ning milline moment igasse rattasse jõuab lahendab ära juba mehhaaniline süsteem (ülekanded ja diferentsiaalid).



Joonis 4.3. Ühe mootoriga ajamisüsteem

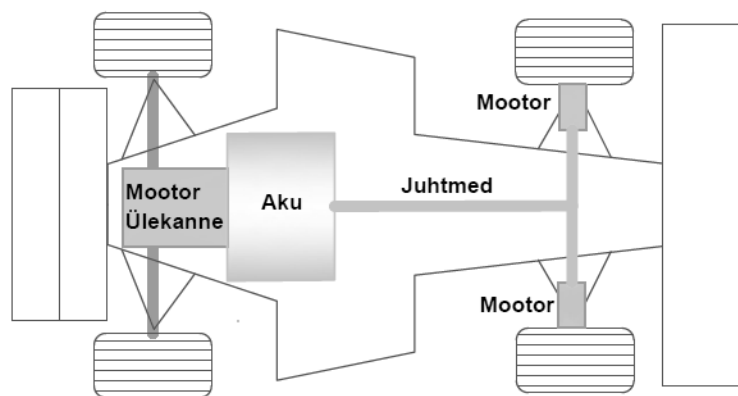
Ühe mootoriga ajamisüsteemi paigutamine väikevormelisse on äärmiselt keeruline. Selleks, et raja kiirus oleks maksimaalne peab auto massikeskme kõrgus olema võimalikult lähedal maapinnale. Niisiis peab juht, olles üks raskemaid elemente sõitval autol, istuma võimalikult auto keskel ja madalal. Seetõttu ei saa aga auto keskele paigutada suurt mootorit. Kui mootor paigutada auto tagumisse ossa, on vaja pikki ning raskeid mehaanilisi ülekandesüsteeme esimesse veosilda, mis nõuavad palju ruumi. Samuti on vajalik paigutada vähemalt kaks diferentsiaali, mis jällegi vajavad ruumi ning lisavad palju massi. Mootori esiossa paigutamine ei ole samuti võimalik, kuna seal asetsevad juhi jalad ning kere pikendamine

tõstab oluliselt auto massi ning gabariite, mis FSAE keerulistel ning kitsastel radadel pole aktsepteeritav. Lisaks eelloetletule tuleb veel juhti kaitsta liikuvate mehaaniliste osade eest, mistõttu tuleb paigaldada rasked turvised. Tänu keerulisele mehaanilisele süsteemile, vajalikule ohutusele ja ruumipuudusele on vaja juht kindlasti paigutada kõrgemale mis ei ole aga vastuvõetav. Lisaks on probleem akupakiga paigutusega. Dünaamilisest seisukohast peavad rasked elemendid asuma võimalikult auto keskel, et tagada vedrustuse optimaalseim töö, kuid kui paigutada mootor vormeli keskele ning seejärel akud auto äärtesse vähendab FEST 15 rajasuutlikust.

Ühe mootoriga ajamisüsteeme kasutatakse laialdaselt tänavasõidu autodes aga antud lahendus ei mahu ära väikevormel autosse FEST 15, ilma et ei kannataks rajasuutlikus. Süsteemi eeliseks on selle lihtne juhtimisalgoritm, kuid tänapäeva arvutustehnika olemasolu tõttu on keerulised ning reaalaraja juhtimissüsteemid suhteliselt kergesti teostatavad.

4.4.2. Kolme mootoriga ajamisüsteem

Kolme mootoriga ajamisüsteemis asetsevad kaks mootorit auto esiosas (kere küljes või rataste sees) ning üks mootor auto tagaosas (Joonis 4.4). Teoreetiliselt oleks võimalik ka vastupidine lahendus, kuid siis oleks jällegi probleem paigutamisega, kuna üks suur mootor peab asetsema jalgade juures.



Joonis 4.4. Kolme mootoriga ajamisüsteem

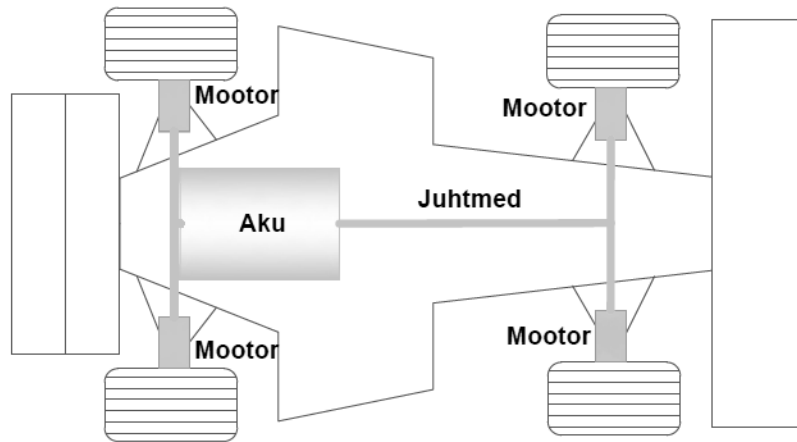
Vormeli tagumise veotelje mootor peab vedama mõlemat ratast, seetõttu on vaja kasutada ka diferentsiaali, et jaotada õigesti rataste kiirust ja momenti ning nii mootor kui ka jõuülekanne on vaja paigutada auto sisemusse. Kuna FEST 15 üldkontseptsioon näeb ette, et võimalusel paigutada aku auto kesk - ja tahaossa, nõuab antud lahendust jällegi kere pikendamist, mis on kitsa ja väga tehnilise raja tingimistest halb valik. Seetõttu on antud lahendus problemaatiline.

Esimestele veoratastele on aga ette nähtud mõlemale üks mootor. Paigutada võib need kere külge või rataste sisse. Kui paigutada nad kere külge on jällegi vaja aga pikki ülekandesüsteeme mootorite ja rataste vahele. Paigutades mootorid rataste sisse on ruumi kokkuhoiu poolest kindlasti üks parimaid, kuna puuduvad pikad ja rasked ülekandesüsteemid, kuid see nõuab suurt pingutust, et välja arendada kompaktne ja töökindel planetaarülekanne.

Kuna auto tagumist veotelge veab üks mootor ning esimeste rataste jaoks on mõlemale üks mootor, on tegemist mootortitega, mille võimsused ja tüüp on erinevad. Erinevaid mootorid tähendavad erinevaid võimuse ja momendi karakteristikuid, mistõttu on komplitseeritud nende mootorite sünkroonne juhtimine ning seda eriti kurvilisel ja tehnilisel rajal, kus pidevalt kiirus ning kurvi raadius muutub, mis on jällegi antud süsteemi suur miinus. Tänu erinevatele ajami süsteemidele auto ees – ja tagaosas, mis nõuavad palju ressursi ja projekteerimist, ei ole antud süsteemi mõttekas kasutada, kuna saadavavat eelist ei ole oodata.

4.4.3. Nelja mootoriga ajamisüsteem

Nelja mootoriga süsteemi puhul on iga ratta vedamiseks eraldiseisev mootor (Joonis 4.5). Mootorid võivad asetseda kas auto kere küljes või rataste sees. Kere küljes asetsevate mootorite kasutamine pole mõistlik tänu rasketele ja ruuminõudlikele jõuülekande süsteemidele nagu on kirjeldatud eelmises peatükis (4.4.2). Rattasisesed mootorid koos ülekandesüsteemiga peavad olema väga väiksed, kuna FEST 15 kasutab ainult 10 tolliseid rattaid, kuhu lisaks mootorile on vaja paigutada ka pidurisüsteem ja vedrustuse kinnitused, mistõttu on ratta sees väga vähe ruumi. Problemaatilisemaks kohaks rattasisestel mootoritel on asjaolu, et nad suurendavad vedrustamata massi osakaalu. Suur vedrustamata massi osakaal võrreldes vedrustatud massiga pärsib auto rajasuurlikust ning korrektsest vedrustuse tööd.



Joonis 4.5. Nelja mootoriga ajamisüsteem

Kuna vormelauto on küllaltki sümmeetriline ja kaalujaotus on igas auto nurgas umbes 25 % ning massikese väga madal (ca 230 mm), seega on võimalik kasutada igas rattas samasuguseid mootoreid. Pidurdades langeb esimesele teljele umbes 75% auto kaalust, seetõttu võiks kaaluda variant, et esimesel teljel oleksid suuremad mootorid kui tagumisel teljel, et regenereerida rohkem energiat. Kuid antud tegevus pole vajalik kuna akupaki laadimisvõimsus on liiga väike, et pidurdamisel tulevat energiat tagasi võtta. Täpsemalt on antud olukorda alalüüsisitud peatükis 6.4. Kui kõik mootorid on samasugused, on vaja arenda välja ainult üks ülekanne, mis mahub vormeli ratta sisse ning seda saab kasutada igas vormeli nurgas. Lisaks lihtsustatud arendustegevusele on lihtsustatud ka juhtimine, kuna kõikidel mootoritele on sarnased karakteristikud.

Kui iga ratas on individuaalselt kontrollitav, siis saab välja arendada kõige parema rataste läbilibisemist takistava süsteemi ning momendi jaotamise süsteemi. Antud süsteemid suurendavad kindlasti rajasuutlikust ning aitavad juhil toime tulla ala - ja üle juhitavusega erinevatele radadel.

Lisaks juhtimisele ning projekteerimiseeliste tuleb silmas pidada ka lihtsustatud hooldust ja tagavaraosade olemasolu. Kuna igas rattas asetsev veosüsteem on identne, siis on vaja ainult häid teadmisi ühe süsteemi hooldusest ja remondist ning varuosasid ei peaks olema iga erineva süsteemi jaoks eraldi. Küll tuleb aga mainida, et igas rattas asetsevad keerulised süsteemid võivad vähendada auto üldist töökindlust, kuna liikuvate osade arv on tunduvalt suurem, kui vähemate mootoritel korral ning see vähendab tõenäoliselt auto töökindlust.

Järgneval pildil (Joonis 4.6) on esitletud kuidas näeb välja rattasisene mootor reaalsel FSAE klassi vormelil.



Joonis 4.6. Rattasisene mootor [7]

Nelja erineva mootoriga süsteemis on problemaatilisi kohti, mis nõuavad korralikku analüüsi, eriti vedrustuse ning jõukande seisukohast, kuid kindlasti on antud lahendus parim, mida saab kasutada vormelautol FEST 15. Piisavalt kompaktne süsteem, kus puuduvad pikad jõuülekanne süsteemid ning tänu, millele saab raske akupaki paigutada auto keskele ilma, et peaks suurendama oluliselt auto kere mõõtmeid. Suurimaks eeliseks on aga võimalikult ideaalse juhtimisalgoritmi väljatöötamine, kus igit ratast on võimalik varustada just sellise momendiga nagu on vaja auto ideaalseks toimimiseks rajal.

4.5. Veoajami valiku lähtealuste kokkuvõte

FEST 15 on nelikveoline FSAE võistlusklassi kuuluv vormelauto. Eelnevalt tulenevalt leiti, et parim lahendus, kuidas teostada nelikveolist vormelautot, on paigutada igasse rattasse eraldi mootorid. Sellise lahendusega ei pea olema pikki, keerukaid ja raskeid mehaanilisi ülekanDESüsteeme, mis asetsevad rataste ja mootori vahel. Kõik see aitab kokku hoida ruumi,

massi ning arendustegevust. Teine ning olulisem eelis on, et sellise lahendusega saab igat ratast koormata just sellise momendiga nagu rada hetkel vajab ning seetõttu on võimalik välja arendada võimalikult ideaalne juhtimismudel, mis otseselt suurendab rajakiirust. Probleemaatilisem olukord on aga nimelt võimsuse kasutamisega. Kuna akudest välja võetav võimsus ei tohi ületada 80 kW, siis vastavalt võimsusarvutustele ei piisa sellest võimsusest, et pidevalt ühtlaselt kiirendada. Selleks, et sõita 75 m distantis 3,57 s, peaks konstante kiirendus olema 12 m/s^2 , siis täituks 80 kW ainuüksi mootori võllil juba kiirusel 60 km/h. Seetõttu peavad mootorid olema võimelised madalatel kiirustel suutelised kiirendama veel kiiremini kui 12 m/s^2 , et puudujääki kõrgetel kiirustel kompenseerida. Samuti tuleb vähendada staatilist kasutatavat võimsust, et selle arvelt suurendada dünaamilist võimsust, mis kulub otseselt kiirendamiseks, mitte takistusjõudude ületamiseks.

5. FEST 15 VEOAJAMISÜSTEEMI VALIK

Lähtuvalt eelmises peatükis (4) kirjeldatud hinnangutele tuleb valida vormelautole FEST 15 parim ajam, mida FSTT on võimalik turult saada. Tänu pikaajalisele kogemusele FSAE sarjas, on oluline ära märkida, kuidas saada võimalikult häid komponente autole, selleks peab olema ette näidata võistlustelt häid tulemusi, sest vastasel juhul tehased ja müüjad keelduvad tarnimast oma süsteeme nõrkadele ning mitte konkurentsivõimelistele tiimidele. FSTT'1 on ette näidata väga häid tulemusi eelnevatel hooaegadel. Näiteks aastal 2014 võideti Formula Student Italy võistlus. Formula Student Electric - World Ranking [8] edetabelis asetseb FSTT 4 kohal, mistõttu on tegemist maailma absoluutsesse tippu kuuluva meeskonnaga, kuna maailmas on umbes 500 tiimi. Antud koht annab hea positsiooni läbirääkimiste alustamiseks.

5.1. FSAE sarjas kasutatavad mootorid

Lisaks läbiviidud vajalike võimsuste ja momentide analüüsile, hinnangutele ja tiimi positsioonile maailmas on vaja õppust võtta ning analüüsida, milliseid mootoreid kasutavad maailmas teised tipptiimid. On selge tipptiimide kasutatavad ajami lahendused peavad olema piisavalt töökindlad ning võimekad, et toime tulla antud võistlussarja omapäradega. Kuna targad õpivad teiste vigadest, tuleb vältida kehvadel positsioonidel olevate tiimide ajamilahendusi.

Järgnevas tabelis (Tabel 5.1) on toodud seitsme maailma parima tiimi poolt kasutatavad mootorid [8]. Selgub, et neli neist kasutavad firma AMK mootoreid, kaks isearendatud mootoreid ning ülejäänud kaks Magnet Motorsi ja Boschi mootoreid. Tuleb ära märkida, et kõik mootorid on PMSM tüüpi ning sama tüüpi mootorit et on FSTT kasutanud ka kaks aasta. Kuna FSTT plaanib osta mootoreid, langeb ära mootorite ise välja arendamine. Samuti ilmneb, enamuse nelikveolisi vormelid kasutavad AMK mootoreid. Seetõttu võib eeldada, et antud mootorid saavad hakkama FSAE sarja vajalike nõuetega kõige paremini ning on piisavalt töökindlad, et lõpetada võistlused.

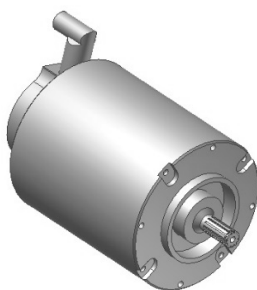
Tabel 5.1. FSAE sarjas kasutatavad mootorid [4], [9], [10]

Tiimi nimi	Mootori nimi ja tüüp	Mootorite arv	Mootorite koguvõimsus, kW	Maksimaalne pöörlemiskiirus, RPM
ETH Zürich	AMZ M4 (AMK), PMSM	4	148	19200
TU Delft	AMK, PMSM	4	120	20000
Karlsruhe Institute of Technology	Isearendatud PMSM	4	120	20000
Fachhochschule München	Magnet Motor PMSM	2	85	4000
Westfälische Hochschule Zwickau	Isearendatud PMSM	2	Teadmata	19000
Universität Stuttgart	AMK DT5-14, PMSM	4	100	20000
Technische Universität Bergakademie Freiberg	Bosch SMG 138/80, PMSM	2	80	15000

5.2. AMK DD5-14 mootor

Saamaks täpsemat informatsiooni AMK mootorite kohta tuli pidada läbirääkimisi mootorite tootjaga, kes asub Saksamaal, kuna internetis ja kataloogides puudub igasugune informatsioon antud mootorite kohta. Läbirääkimiste edu aluseks oli FSTT kõrge koht maailma edetabelis ning tiimi stabiilsus.

AMK DD5-14 mootori puhul on tegemist 3 faasilise vedelikjahutusega PMSM, mis on arendatud välja väga dünaamiliste olukordade jaoks, kus koormus peab pidevalt muutuma. Lisaks on mootori sisse ehitatud enkooder, temperatuuriandur ning kell, et saada ajaliselt dateeritud ning adekvaatset infot mootoris toimuva kohta. Järgneval joonisel (Joonis 5.1) on toodud mootori väliskuju ilma jahutusümbriseta.



Joonis 5.1. AMK DD5-14 mootori väliskuju ilma jahutusümbriseta

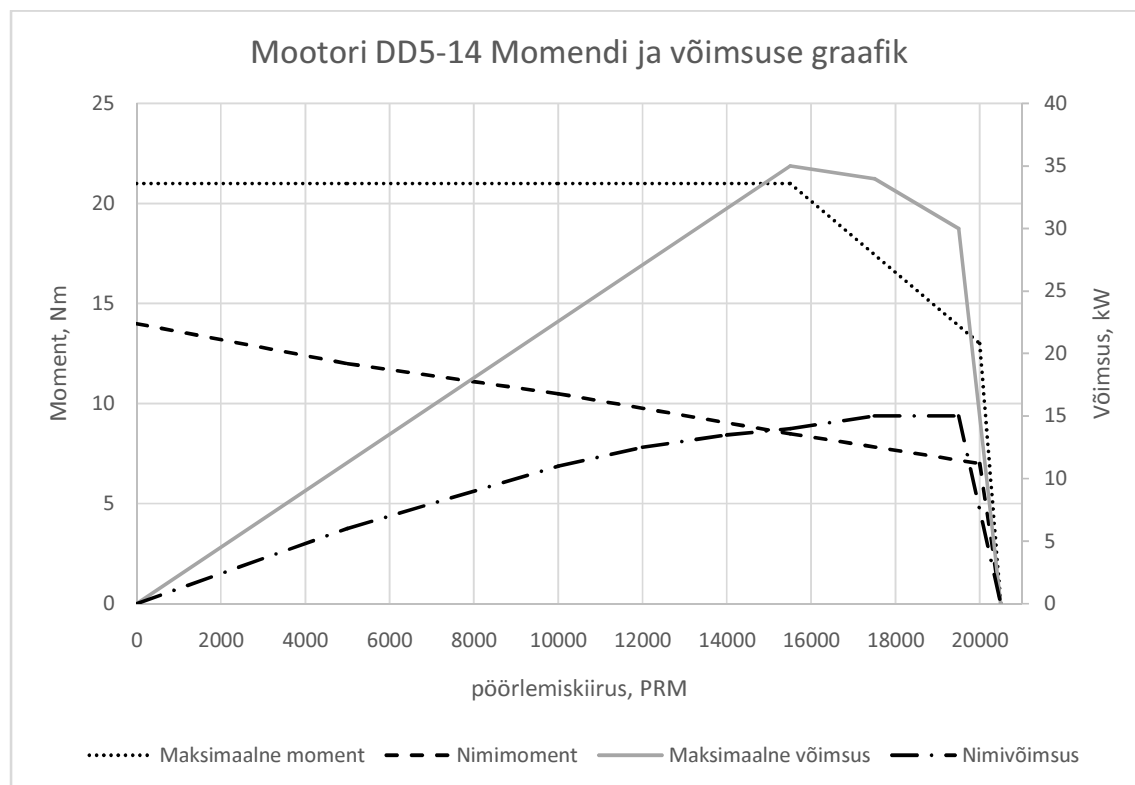
Mootori põhiparameetrid on esitatud tabelis 5.2, kus andmed on antud 5 % täpsusega kuna tootja on nii märkinud. Palju mootori infot on konfidentsiaalne ning seda ei ole lubatud ühelgi moel avaldada. Seetõttu ei saa esitleda kõiki parameetreid ja tehnilisi jooniseid mis aitaksid lugejal saada parimat ülevaadet AMK mootorist aga kuna töö suurim eesmärk on veenduda mootori sobivuses autole, ei oma tähtsust antud andmete välja toomine vaid lõplikud simulatsioonide tulemused, kus on antud infot kasutatud.

Tabel 5.2. DD5-14 põhiparameetrid

Parameetri nimi	Parameetri väärtus	Parameetri ühik
Maksimaalne võimsus	35	kW
Nimivõimsus	12,3	kW
Maksimaalne moment	21	Nm
Nimimoment	9,8	Nm
Mass (ilma jahtuskorpuseta)	3,7	kg
Maksimaalne vool	100	A
Nimivool	41	A
Maksimaalne pinge	600	V
Mootori korpuse pikkus	135	mm
Korpuse diameeter	96	mm

Lisaks põhiparameetritele on oluline vaadata mootori tööarakteristikuid. Järgneval joonisel (Joonis 5.2) on esitatud mootori mehhaanilise võimsuse ja momendi tunnusjooned. Nimimomendi ja nimivõimsuse tunnusjooned esitlevad väärtusi mida mitte ületades on mootor võimeline pidevalt töötama ilma, et ta kuumeneks üle. Maksimaalse momendi ja

võimsuse tunnusjooned näitavad väärtusi mida on üldse DD5-14 mootoritega võimalik saavutada.



Joonis 5.2. DD5-14 momendi ja võimuse graafik

5.3. AMK DD5-14 mootori esialgne sobivuse hinnang

Mootori valimise esimeseks etapiks oli uurida ja võrrelda milliseid mootoreid kasutavad teised tiimid mis võistlevad FSAE sarjas ning antud võrdluse tulemusel selgus, et turul on ainult üks konkurentsivõimeline mootor, mis tõenäoliselt sobib nelikveolisele vormelautole. Kuid, lisaks turul pakutavatele võimalustele tuleb anda esialgne hinnang, kas tegelikult DD5-14 mootor sobib meie vormelautole FEST 15 vastavalt peatükis 4 (FEST 15 ajamisüsteemi valiku lähtealused) kirjeldatud eeldustele ja hinnangutele. Esialgne hinnang on kirjeldatud läbi lihtsate valemite ning seisukohtade, võtmata arvesse täpseid dünaamilisi simulatsioone ning eeldusel, et kõik neli mootorit on koormatud ühtlaselt.

Et määrata mootorist ratastesse ülekantavat momenti tuleb leida ülekande tegur, mis leitakse mootori maksimaalse pöörlemiskiiruse juures ning võttes arvesse, et auto peab suutma sõita 120 km/h.

$$k = \frac{n_m \cdot 120 \cdot \pi \cdot r}{v \cdot 1000}, \quad (5.1)$$

kus k – jõuülekanne ülekandearv,
 n_m – mootori pöörlemiskiirus (RPM),
 r – ratta raadius (m),
 v – auto kiirus (m/s).

Arendatav moment kõigis veoratastes kokku on arvutatav järgmise valemiga.

$$M_k = 4 \cdot M_m \cdot k, \quad (5.2)$$

kus M_k – maksimaalne DD5-14 mootorite arendatav moment veoratastes (Nm),
 M_m – DD5-14 mootori maksimaalne moment (Nm),

Pannes vastavad väärtused valemitesse 5.1 ja 5.2 saame, et ülekandearv peaks olema 14,49 ning maksimaalne arendatav moment seetõttu 1217 Nm. Vajaliku momendi hinnangust (4.3.1) selgus, et kiirusel 20 km/h on vaja 839 Nm ning 100 km/h 1242 Nm. Seetõttu jääb maksimaalne arendatav moment veoratastes (1217 Nm) nende väärtuste. Kuna madalatel kiirustel on nii-öelda üle umbes 400 Nm sai täidetud ka eeldus, mis sai leitud peatükis (4.3.2). Selle arvelt saab seega madalamatel kiirustel kiirenda veel kiiremingi kui ettenähtud 12 m/s². Antud eeldus käsitles asjaolu, et suurematel kiirustel peame vähendama kiirenduse väärtus ning seega momenti, et mitte ületada 80 kW piiri. Vaadeldes DD5-14 momenti ja võimuse graafikut (Joonis 5.2) selgub, et mootori tööarakteristik vastab samuti antud ootustele, kus madalatel pööretel on koheselt võimalik saavutada maksimaalset momenti. Seetõttu on täidetud ka vajaliku momendi eeldus, kui kasutatakse nelja DD5-14 tüüpi mootorit.

Teiseks ajamivaliku eelduseks oli, et minimaalne süsteemi võimsus peab olema 80 kW, kuid kasutades nelja DD5-14 mootorit, on maksimaalne koguvõimsus 140 kW, mis võib paista tugeva üle dimensiooneerimisega, kuid tuleb arvestada, et sellist võimsust arendavad mootorid ainult lühiajalist ja ülekoormatud olukorras. Kuid pidevalt arendatava koguvõimsus on 49,2 kW. Seetõttu jääb 80 kW nende mõlema väärtuse vahele, mis on küllalti õige lähenemine, sest kui me võtaksime aluseks pideva võimsuse FEST 15 arendamisel, võib tekkida selge aladimensioneerimise oht ning lisamassi olemasolu.

Kolmandaks oluliseks eelduseks on dimensioonide sobivus. Maksimaalne mootorite kogumass ei tohi ületada 20 kg, kuid DD5-14 mootorite puhul on see 14,8 kg ilm jahutuskorpusega. Tõenäoliselt ei ületa see väärtus ka koos jahutuskorpustega antud massi, kuna need valmistatakse plastikust. Oluline on ka füüsiliste ruumimõõtmete sobivus. FEST 15 puhul kasutatakse 10 tolliseid rattaid, mistõttu on velje sisemine diameeter ca 250 mm, aga mootori diameeter on ainult 96 mm. Seetõttu on võimalik kindlasti mootorit ratta sisse paigutada.

5.4. FEST 15 ajamisüsteemi valiku kokkuvõte

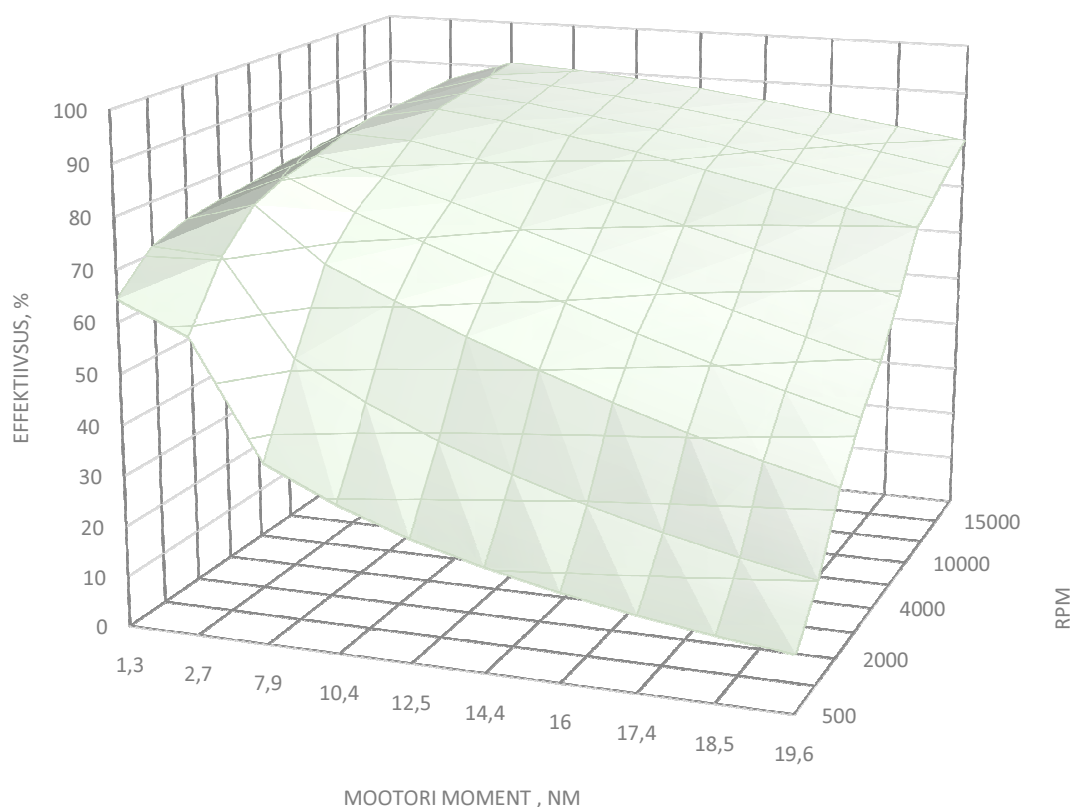
Parim veoajamisüsteem, mida FSTT saab turult osta on AMK DD5-14 mootoritel põhinev tervik. DD5-14 (PMSM) mootorid on vedelikjahutusega kõrgdünaamilised mootorid, mis mahuvad ära FEST 15 ratta sisse ning nende kogumass on ainult 14,8 kg. Konstantne võimsus, mida nad suudavad arendada on 49,2 kW ning maksimaalne võimsus lausa 140 kW. Ülekandearvuga 14,49 on maksimaalne saavutatav summaarne moment 1219 Nm. Kuna sai eeldatud, et moment peab jääma umbes vahemikku 800-1200 Nm, siis piisab ka antud suurusest ja võimsusest. Lisaks kõigele sellele, toetavad valiku õigust ka mootori tööarakteristikud (Joonis 5.2), mis tõttu on madalatel pööretel koheselt saavutatav maksimaalne moment, mida läheb ühtlasi vaja, et tagada tänu võimsuspiirangule auto vajalik kiirendus. Lisaks vajalikele jõudlusomadustele on olulised ka mootori maksimaalne pinge (600 V) ning vool (100 A), mis sobivad kokku ka akusüsteemidega, mida FEST 15 puhul kasutatakse. Lisaks mootoritele pakub AMK ka inverteerid ja kontrollereid, mis on just välja arendatud antud mootorite jaoks. Ühtlasi ühilduvad antud kontrollereid kõigi FEST 15 andmesidesüsteemidega ning juhtimisvõimalustega, kuid täpsemalt antud töös neid ei käsitleta.

Tuginedes esialgsetele sobivus hinnangutele on selge, et AMK DD5-14 mootorid võivad sobida FEST 15 autole. Kuid nende täpseks kasutamiseks on vaja uurida mootorite ja auto käitumist dünaamilistes olukordades ning hinnata kriitiliselt nende võimsuse ja energia kasutust, võttes arvesse mootori tööarakteristikud, võistlusreeglitiku ning tootjapoolseid täpsustavaid andmeid.

6. AMK DD5-14 DÜNAAMILINE SIMULEERIMINE

6.1. AMK DD5-14 karakteristikud ja ajamisüsteemi kaod

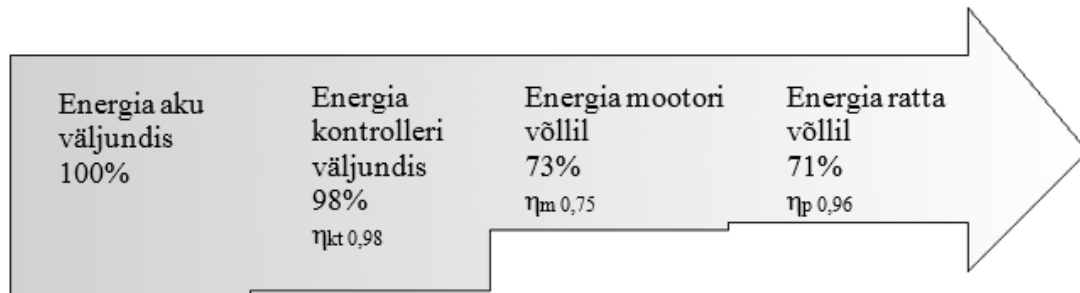
Mootori kasutegur on tugevalt sõltuvuses arendatavast momendist ning pöörlemiskiirusest seetõttu on antud informatsioon esitletud graafiku kujul (Joonis 6.1) ning see informatsioon pärineb tootjalt. Seda graafikut vaadeldes selgub, et mootori efektiivsus võib olla isegi nii madal nagu 10 % ning kõige rohkem umbes 90 %.



Joonis 6.1. AMK DD5-14 efektiivsuse kaart

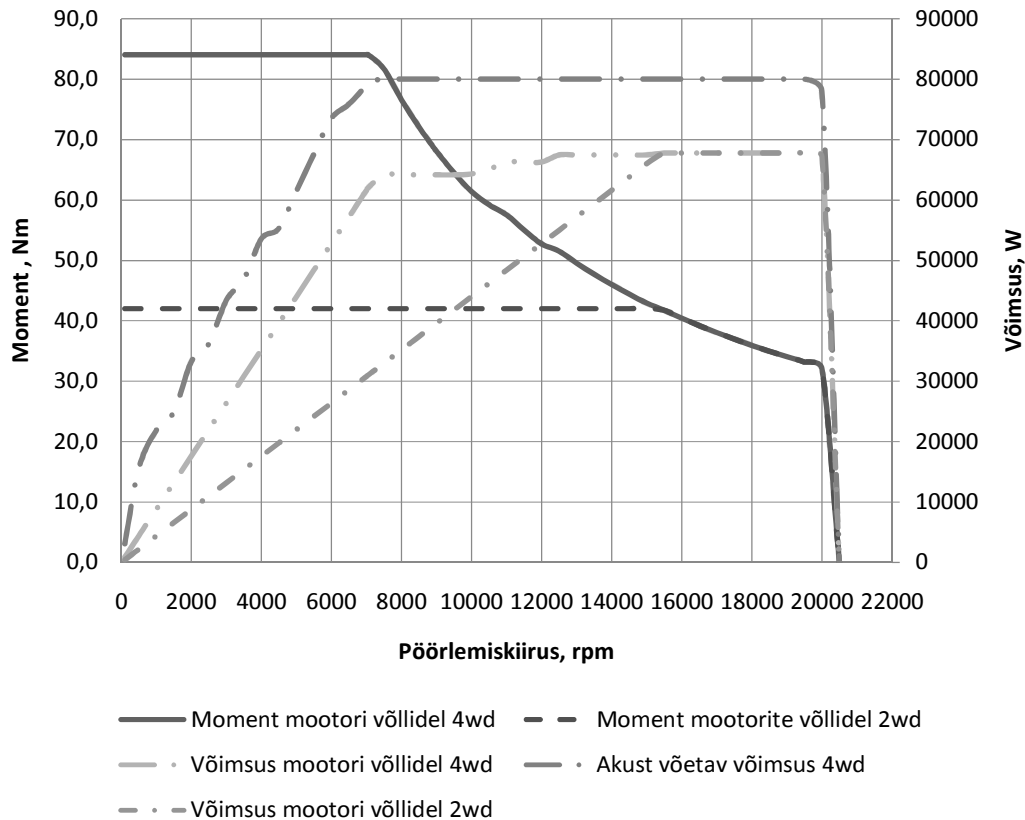
Lisaks kadudele mootoris esineb ajamisüsteemis teisigi kadusid mida on vaja kindlasti arvestada, sest FEST 15 võib kasutada maksimaalselt igal ajahetkel ainult 80 kW akudest võetavad võimsust. Selleks, et hinnata, kui palju akust võetavast võimsusest jõuab lõpuks

ratta võllile tuleb sellest lahutada planetaarülekande-, mootori-, kontrolleri- ja elektrienergiaülekandekaod (Joonis 6.2). Kontrolleri kasutegur η_{kt} koos juhtmetest eralduva soojusega on 98 %, mis on tootjapoolne informatsioon, mistõttu läheb ainult 2 % ainult soojuseks, aga mootorite kasutegur on tegelikult varieeruv, sõltuvalt sellest, kuidas mootorit koormata, aga keskmine kasutegur η_m on umbes 0,75. Peale mootorit on veel planetaarülekanne, mille kasutegur on η_p 0,96. Kuna antud graafikut (Joonis 6.2) ja väärtusi on vaja, et leida maksimaalsed võimsused ja momendid ratta- või mootori võllidele, mis on vaja sisestada simuleerimistarkvarasse OL, pole joonisel kuvatud kõiki kadusid mis autol esinevad. Lisaks kirjeldatud kadudele esinevad veel õhu- ja veeretakistuskaod, kuid need ei jää antud töös käsitlemata, kuna OL tarkvara võtab need dünaamiliselt arvesse. Lisaks esinevad veel kaod akus. Kuid antud töö käsitleb energia voogu alates aku väljundist, lähtuvalt kokkulepitule, pole seda ka siin esitletud, vaid on jäätud akumeeskonna hooleks.



Joonis 6.2. Ajamisüsteemi kaod

Selleks, et simuleerida FEST 15 käitumist raja OL tarkvaraga on vaja teada, kui suur on maksimaalne moment ja võimsus mootori võllil või ratta võllil. Ajamisüsteemi kadude ja võistlusreeglistiku järgi saab tuletada need vajalikud võimsuse ning momendi graafikud.



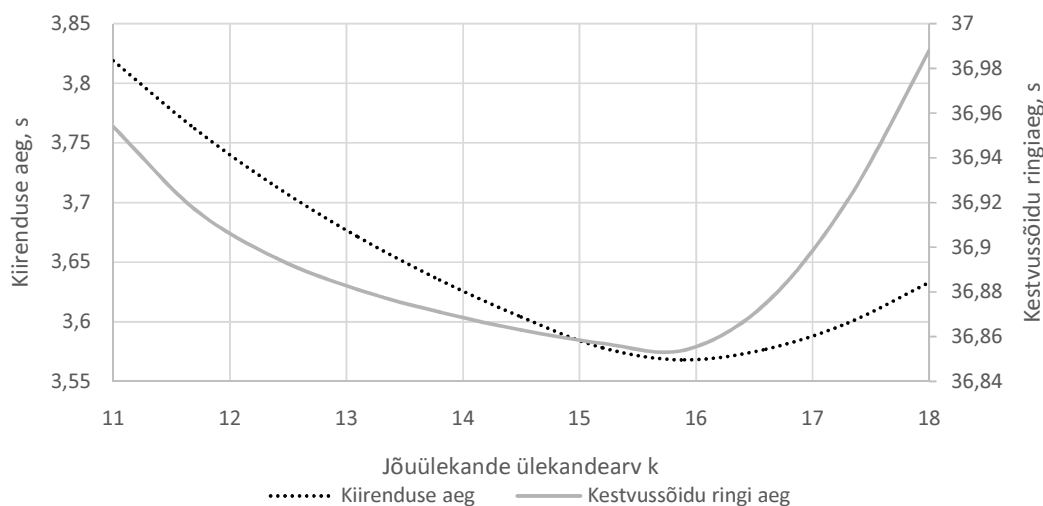
Joonis 6.3. FEST 15 tarvitav ning arendatav võimsus ja moment

Joonis 6.3 kirjeldab, millist võimsust ning momenti on võimalik saavutada mootori võllidel kokku ehk nelja mootori summaarne moment ja võimsus (4wd) või kahe mootori summaarne moment ja võimsus (2wd) eeldusel, et kõik on võrdselt koormatud. Ühe ja kahe telje vedu on toodud eraldi välja, kuna võistlusolukord võib nõuda ainult kahe mootori kasutamist. Joonte arvutamise aluseks on võetud DD5-14 mootori võimsuse graafik (Joonis 5.2), mis kirjeldab maksimaalset võimsust ja momenti mootori võllil. Sellele võimsusele on lisatud kaod, mis tekivad mootoris elektrienergia mehhaaniliseks energiaks muundamisel, vastavalt keskmisele efektiivsusele antud pööretel, mille andmed pärinevad mootori efektiivsuse kaardilt (Joonis 6.1). Järgnevalt on lisatud ülekande ja kontrolleri kaod, mis on 2 %. Tarbitavat koguvõimsust kirjeldab käesoleval joonisel (Joonis 6.3) akust võetava võimsuse tunnusjoon. Mootori võimsus võllil on leitav võlli nurkkiiruse ja momendi korrutisena. Elektrimootoril on kiirusest null kui nimikiirus saavutatav konstantne moment ning seejärel jääb võimsus konstantseks ning moment hakkab seetõttu pöördvõrdelisel vähenema. Kuid kuna akupaki pinge muutub pidevalt tänu kiirendamisele ja pidurdamisele on tegelikult nimikiirus samuti muutuv suurus. Kuna reeglistik ei luba akust võtta rohkem kui 80 kW, siis tuleb leida pöörlemiskiirus, mille

juures mootor ja kontrollid seda maksimaalse momendi juures tarbima hakkab. Tänu võimsuspiirangule on see pöörlemiskiirus 7050 pöört minutis mis on väiksem kui nimikiirus milleks on 12 000 pöört minutis. Alates 7500 rpm'ist on arvatud, milline saab olla maksimaalne võimsus mootori võllidel kokku, võttes arvesse kõik kaod. Sellise arvutuse tulemusena on saadud vastavad tunnusjooned, mida ühtlasi on kasutatud OL tarkvaras auto edasiseks simuleerimiseks.

6.2. Kiirenduse simulatsioon ja ülekande hinnang

Parima ülevaate sellest, kas ajamsüsteem saab hakkama dünaamilise koormusega ning auto piisava kiirusega kiirendamisega, annab kiirenduse võistluse simuleerimine. Nagu peatükis 4. FEST 15 ajamsüsteemi valiku lähtealused kirjeldatud eeldustel, tuleb parimas konkurentsile olemiseks läbida 75 meetrine distants ajaga 3,57 sekundit. Seetõttu tuleb hinnata, millise ülekandearvuga ollakse selles konkurentsile. Ülekandearvu valikul ei tohi arvestama jätta asjaolu kuidas antud väärtus mõjutab ka kestvussõidu ringiaegu. Järgnev graafik (Joonis 6.4) kirjeldab kuidas mõjutab ülekandearv FEST 15 kestvussõidu ja kiirenduse aegu. Saadud tulemused on leitud OL tarkvaraga, mille andmed on võetud peatükkidest 4, 5 ja 6.



Joonis 6.4. Ülekandearv versus ringiaeg

Jooniselt ülekandearv versus ringiaeg selgub, et tõesti on võimalik saavutada kiirenduse aeg 3,57 s, kui ülekandearv oleks 15,9. Antud ülekandearv on parim ka kestvussõidu ringiajale

(kestvussõidu rajaks on valitud FSH 2014 aasta rada). Kuid tuleb tõdeda, et ülekande arv mõjutab suhtarvus palju rohkem kiireduasaega kui ringiaega. Näiteks, kui ülekande arv oleks, 13,8 siis kiirenduse aeg oleks 3,64 s, mis on kümnendiku võrra aeglasem võrreldes ülekandearvuga 15,9, mis teeb ca 2 % sõiduajast, aga ringiaeg muutub ainult 0,05 %.

6.3. Efektiivsus, energia ja ringiaeg

Käesoleva töö eesmärgiks on lisaks ajamisüsteemi valikule hinnata, kuidas saaks kõige optimaalsemalt kasutada ajamisüsteemi vormelil FEST 15, et võita võistlusi. Seetõttu tuleb vaadelda kui palju kulub autol energiat sõltuvalt rajakiirusest, massis, tiibade suurusest ja ülekandearvust võttes pidevalt arvesse mootorite efektiivsust. Kuna aga võistlused võidab meeskond, kes kogub kõikide alade lõikes kõige rohkem punkte, tuleb ringiajad arvutada ümber ka punktideks, et näha tegeliku tulemust.

Leidmaks, kui palju energiat kulutab FEST 15 kogu kestvussõidu jooksul, sõltuvalt erinevatest muudetavatest parameetritest, tuleb parima tulemuse saavutamiseks tarvikul kasutada sõiduki simuleerimistarkvara, mis suudab arvestada ka mootori töökarakteristikutega, erinevate takistusjõududega ning aerodünaamiliste omadustega. Järgnevates tabelites (Tabel 6.1-Tabel 6.5) toodud ringiajad ning kulutatud energia mootori võllil on leitud OL tarkvarga. Kuid efektiivsuse hindamiseks ei piisa antud tarkvarast, kuna mootori kasutegur on tugevalt sõltuvuses arendatavast momendist ning pöörlemiskiirusest, mida tõestab ka mootori efektiivsuse kaart (Joonis 6.1). Seetõttu tuli kirjutada C++ keeles programm, mis arvutab välja FEST 15 keskmise mootorite kasuteguri rajal. Lähteandmed, mida programm töötles on võetud OL tarkvara simulatsioonide katseandmetest.

Mootori kasutegurit arvutava programmi tööpõhimõte on hinnata ja anda väärtus igas rajapunktis liikuva auto mootorite efektiivsusele. Nagu eelnevalt mainitud, sõltub mootorite kasutegur väga palju, sellest, milline on mootorite moment ja pöörlemiskiirus, aga kuna vormelauto kiirendab ja pidurdab väga palju, on äärmiselt oluline leida võimalikult paljudes rajapunktides mootorite kasutegur. Programm töötab järgnevalt: lähtuvalt OL tarkvarasse sisestatud mootorite töökarakteristikute (Joonis 6.3) järgi leiab OL kestvussõidu rajal 5670 punkti (ca 153 punkti sekundi kohta) ning neile vastava mootorite pöörlemiskiiruse ja momendi. Kui on teada, milline on antud punktis pöörlemiskiirus ja moment leiab programm

vastavalt efektiivsuse kaardile (Joonis 6.1), milline on antud kohas mootorite efektiivsus. Kõikidest rajapunktidest leitud üksikute efektiivsuste alusel leitakse keskmine efektiivsus, mis on ühtlasi ka arvutuste ja programmi väljundiks. Programmikood C++ keeles on esitatud lisas 1.

Arvutused (6.1 – 6.3) kirendavad lahenduskäiku kuidas on leitud energiakogused mida FEST 15 kestvussõidu ajal tarbib. Arvutuste andmed W_m on võetud OL tarkvara simulatsioonide tulemustest ning mootori kasutegur η_m on leitud lisas 1 toodud programmi abil.

$$W_{me} = \frac{W_m * 100}{\eta_m}, \quad (6.1)$$

kus W_m – kulutatud energia mootori võllil (kWh),
 W_{me} – mootorite kulutatud elektriline energia (kWh),
 η_m – mootorite keskmine efektiivsus (%).

$$W_s = \frac{W_{me} * 100}{\eta_k} - W_m, \quad (6.2)$$

kus W_s – soojusenergia kadu (kWh),
 η_k – kontrolleri kadu (%).

$$W_k = W_s + W_m, \quad (6.3)$$

kus W_k – kogu kulutatud energia võistluse jooksul (kWh).

Järgnevad tabelid (Tabel 6.1-Tabel 6.5) võtavad kokku eelnenud arvutused ning OL simulatsioonide tulemused ning neis on muudetud ainult esimeses tulpas oleva suuruse väärtust ning sellest lähtuvalt leitud kõik mis järgnevatest tulpades on. Ülejäänud parameetrid mida on arvutusteks vaja läinud, on 100% eeldatavatest suurustest (peatükk 4.2).

Tabel 6.1. Mootorite efektiivsuse sõltuvus võimsusest nelikveo puhul

P_4 , %	t, s	η_m , %	W_m , kWh	W_s , kWh	W_k , kWh
100	36,87	76,84	8,99	2,95	11,94
90	37,07	78,42	8,56	2,58	11,14
80	37,33	81,32	8,1	2,06	10,16
70	37,65	83,14	7,57	1,72	9,29

60	38,05	84,77	6,98	1,42	8,40
----	-------	-------	------	------	------

Efektiivsuse sõltuvus võimsuse tabelist (Tabel 6.1) selgub üsna palju kõnekaid kohti. Kui sõita kestvussõit 100 % võimsusega, siis kogu energia kulu on 11,91 kWh, kuid plaanitav akupaki suurus on 8,4 kWh (võimalik maksimaalne väljavõetav energia), seetõttu on puudujääk võrreldes plaanitava suurusega lausa 41 % ehk selle osa peaks ideaalis kompenseerima regeneratiivne pidurdus. Kui antud juhul pidurdamine ei tööta, siis saab terve kestvussõidu sõita umbes 60 % võimsusega, mis langetab ringiaega 1,18 sekundit. Sõites väiksema võimsusega, töötavad mootorid efektiivsemas alas, kui 100 % koormamise puhul on mootorite kasutegur 76,84 %, siis 60 % võimsuse korral 84,77 % ehk lausa 7,9 % rohkem, mis lubab suuremat säästu. Kui 40 % vähem võimsust lisab ringiajale 1,18 sekundit, mis protsentuaalselt kiireimast ringist on 3 % kaotust, siis energiat võidetakse mootori võllil 22 % ning koguenergiat lausa 29 %, kuna ringiaeg ei muutu väga palju, siis energia kokkuhoid on arvestatav.

Tabel 6.2. Mootorite efektiivsuse sõltuvus ülekandearvust

k_p	t, s	$\eta_m, \%$	W_m, kWh	W_s, kWh	W_k, kWh
12,089	36,91	72,78	8,94	3,59	12,53
13,089	36,89	75,05	8,96	3,22	12,18
14,089	36,89	76,84	8,99	2,95	11,93
15,089	36,87	78,37	9,00	2,72	11,72
16,089	36,85	79,77	8,86	2,47	11,33

Tabel efektiivsuse sõltuvus ülekandearvust (Tabel 6.2) kirjeldab, kuidas muutub mootorite efektiivsus sõltuvalt ülekandest ning kogu energia kulu, kui kasutada erineva suurusega ülekande väärtuseid kestvussõidu FSH rajal. Ülekande arvu vahemikuks on valitud 12,089 – 16,089, kuna planeeritav ülekandearv on 14,089. Ülekandearvu väärtus tuleneb jõuülekande meeskonnalt, kuna see on suurim ülekandemehhanism, mis mahub FEST 15 käändtelje ja ratta sisse planetaarülekande seisukohast. Objektiivse hinnangu andmiseks on vaja kindlasti vaadelda ka suuremaid ja väiksemaid ülekandearve, et leida uued suunad ja eesmärgid auto arenguks ja võimalikuks seadistamiseks. Arvutustest võib järeldada, et mida suurema ülekandearvuga sõita seda suurem on mootorite efektiivsus. Kui ülekandearvuga 12,089 sõitev auto kulutab 12,53 kWh energiat, siis 16,089 ülekandearvuga auto ainult 11,33 kWh, mis on 10 % säästu. Seejuures muutub ka ringiaeg 0,06 sekundi võrra kiiremaks, mis kogu

sõidu (36 ringi) peal tähendab 2,16 sekundit võitu. Seetõttu on eriti oluline, et FEST 15 kasutaks võimalikult suurt ülekandearvu, et säästa energiat ning sõita kiiremini.

Tabel 6.3. Mootorite efektiivsuse sõltuvus aerodünaamilisest koormusest

Ae %	t, s	η_m , %	W_m , kWh	W_s , kWh	W_k , kWh
110	36,75	76,92	9,20	3,00	12,20
100	36,85	76,84	8,99	2,95	11,93
90	37,01	76,74	8,77	2,89	11,66
80	37,15	76,64	8,57	2,84	11,42
70	37,28	76,55	8,37	2,79	11,16

Tabelis efektiivsuse sõltuvus aerodünaamilisest koormusest on kirjeldatud, kuidas mootorite efektiivsus ja energiakulu sõltub erinevatest aerodünaamilisest olukordadest. 100 % väärtuseks on võetud olukord, kus survejõu koefitsient on 2,71 ja õhutakistustegur 1,3 ning ristlõike pindala suurus 1,15 m². Vastavalt protsendile on mõlemat väärtust vähendatud või suurendatud võrdse protsendi võrra. Antud tulemused on olulised, kuna tiibade sätteid saab enne sõite muuta, seetõttu on vaja teada, kui palju aega ja energiat erinevate seadingutega võidab või kaotab. 100 % seadingu korral on ringiaeg 36,75 sekundit ning kogu kulutatud energia 12,20 kWh ning seejuures on mootorite kasutegur 76,92 %, kuid vähendada survejõudu ning seetõttu õhutakistust 30 %, suureneb ringiaeg 0,53 sekundit, mis kestvussõidu peale teeb 19,08 sekundit. Seejuures väheneb energiakasutus, aga 1,04 kWh, mis on tervelt 8 % võrreldes 1 % aja kaotusega. Tuleb ära märkida, et muutes tiibade sätteid ei saa kahjuks alati muuta takistus ja survejõudu sarnaste protsentide järgi, kuid mõlemad muutuvad koos. Kuid projekteerides uusi tiibasi saab kõige edukamalt vähendada takistus koefitsiendi väärtust, ehk antud tabel on vajalik ka edasisteks projekteerimisteks.

Tabel 6.4. Mootorite efektiivsuse sõltuvus massist

m, kg	t, s	η_m , %	W_m , kWh	W_s , kWh	W_k , kWh
333	37,08	76,70	9,22	3,05	12,27
313	36,87	76,84	8,99	2,95	11,93
293	36,65	77,00	8,74	2,84	11,58
273	36,41	77,18	8,49	2,74	11,23
253	36,14	77,37	8,24	2,63	10,87

FEST 15 planeeritav mass koos juhiga (75 kg) on hetkel 313 kg, kuid parimatel tiimidel on auto mass koos juhiga ca 250 kg. Seetõttu on äärmiselt oluline, et millist edu antud tiimid võrreldes meiega võisteldes omavad ning samas uurida ka FEST 15 edasiarenduse võimalusi. Kui FEST 15 mass on 313 kg, siis kulutatav energia kogus on 11,93 kWh ning efektiivsus 76,84 %. Kuid kui auto mass oleks 253 kg, siis efektiivsus oleks parem ainult 0,53 %, kuid kogu kulutatud energia on koguni 1,06 kWh väiksem, mis moodustab hetkel kavandatavast akupaki suurusest koguni 13 %. Tegemist on väga suure numbriga arvestades, kui ühe kWh mass on umbes 7,7 kg. Kuigi väiksem mass ei mõjuta oluliselt mootorite efektiivsust, siis mõjutab see tugevalt kogu tarbitavat energiat.

Tabel 6.5. Mootorite efektiivsuse sõltuvus võimsusest tagaveo puhul

P_2 , %	t, s	η_m , %	W_m , kWh	W_s , kWh	W_k , kWh
100	38,16	71,20	7,5	3,25	10,75
90	38,45	71,20	7,07	3,06	10,13
80	38,83	76,63	6,59	2,19	8,78
70	39,38	79,13	6,01	1,74	7,75

Tabel 6.5 kirjeldab, kuidas sõltuvad ringiajad ja kogu kulutatud energia olukorras, kus kasutatakse ainult tagumistes ratastes asuvaid DD5-14 mootoreid. Kahe mootori kogu momendi ja võimsuse tunnusjooned on esitletud ka FEST 15 tarvitav ning arendatav võimsus ja moment joonisel (Joonis 6.3). Antud olukord võib esineda juhtudel, kui juhtub midagi ühega mootoritest ning varuosade puudusel ei saa kõiki mootoreid kasutada. Seetõttu on vaja teada, kuidas auto käitub sõites ainult 2 mootoriga, mis asetsevad ühel teljel. 100 % võimsusega sõites oleks ringiaeg 38,15 sekundit, mis on 1,29 sekundit ringipeale aeglasem, kui sõita nelikveoline masinaga, lisaks sellele on efektiivsus koguni 7,6 % väiksem. Kuid tuleb ära märkida, et isegi sellise seadmisega sõites ei jätkuks ilma regeneratiivse pidurdamiseta energiat täisvõimsusel sõites, kuna niimoodi kulub energiat 10,75 kWh. Küll, aga sõites kahe mootoriga ning 80% võimsusega, on võimalik sõit ilma regeneratiivse pidurduseta lõpetada.

Läbiviidud simulatsioonide tulemusena ning andmete analüüsimisele selgus äärmiselt vajaliku informatsiooni FEST 15 seadistamiseks rajal ning selle edasiseks arendamiseks. Olulisem järeldus on võimsuse kasutamise kohta, kuna vormelauto valmib eeldatavate parameetritega, siis ei ole võimalik kestvussõitu sõita 100 % võimsusega, kui ei kasutata regeneratiivset

pidurdamist, mis võib olukorda leevendada. Kuna simulatsioonidel ja tegelikul auto käitumisel on kindlasti vahe sees, siis on vaja antud andmete paikapidavust kontrollida ka testide käigus, kuid ilma teoreetilise eelduseta võtaks see oluliselt kauem aega, kuna vormeliga saab sõita ca 30 minutit ning seejärel tuleb seda tunde laadida. Seetõttu täitis antud punkt oma eesmärgi ning annab kätte suuna võistlus- ning testinseneridele.

6.4. Regeneratiivne pidurdus

Eelmises peatükis (6.3) ilmnis, et FEST 15 pole võimeline 100 % võimusega sõitma tervet kestvussõitu, kui akupaki mahtuvus on 8,4 kWh (võimalik maksimaalne väljavõetav energia), kuna energiat läheks sellisel juhul vaja 11,94 kWh ehk puudujääk on ca 42 % hetke akupaki mahutavusest. Tuleb ära märkida, et täisvõimsusega on võimalik sõita külgiirendus -, kiirendusvõistlust ning kvalifikatsiooni. Seetõttu on vaja hoolikalt hinnata, kui palju energiat on võimalik pidurdades tagasi saada ning kuidas antud süsteemi on võimalik realselt kasutada FSAE reeglitele vastaval vormelautol.

Regeneratiivne pidurdus annab tulemusi olukordades, kus toimuvad pidevad kiirendused ja aeglustused. Näiteks kui auto sõidaks punktist A punkti B ühtlase kiirusega oleks tagasisaadav energia null, kuna ei toimu pidurdusi. FSAE radadel on aga suurel hulgal kurve, ning seetõttu on pidurdamine vältimatu mistõttu on aga võimalik saada pidurdades energiat tagasi. Pidurdades on võimalik tagasi võtta osa auto liikumisse suunatud energiast, sest sõidu ajal kulutatakse energiat kõikide takistusjõudude ületamiseks ning osa eraldub auto süsteemides soojusena. Uuringud näitavad, et see energia osa, mida on võimalik tagasi võtta on 16 % kuni 63 % ning keskmine väärtus on 30 % [11]. Kuid tuleb märkida, et antud väärtus vähendab ka fakti, et auto kasutab regeneratiivset pidurdamist koos tavaliste piduritega. Sellist lahendust peab kasutama ka FEST 15.

Regeneratiivne pidurdamine tervikuna on väga kompleksset lahendust vaja probleem, mis peab arvestama väga paljude erinevate auto komponentidega. Tänu sellele pidurdusele on vaja vähem koormata mehaanilisi pidureid ning seetõttu on vaja uurida, millist momenti suudavad mootorid pidurdades arendada, sõltuvalt vormeli liikumiskiirusest. Olukorra teeb keeruliseks veel asjaolu, et vastavalt FSAE reeglitele pole lubatud kasutada mehaanilises pidurisüsteemis elektrooniliselt kontrollitavat pidurduse jõu jagamise süsteemi või ABS'i sellisel meetodil, mis takistab rataste blokeerimist [2]. Kuid näiteks ABS sarnast seadet võib kasutada, kui

alates mingist piduriterõhu limiidist võid rikkest tingituna saab rattaid blokeerida puhtalt piduripedaali vajutusega. Vormelautol on aga kriitilise tähtsusega, et pidurid oleksid igal ajahetkel tasakaalus ning seetõttu ei tohi elektriliste ja mehaaniliste pidurite koostoimimine põhjustada ühtegi jõnksatust, ega järsku pidurdusjõu muutust. Kuna regeneratiivsel pidurdamisel liigub energia tagasi akusse, siis on vaja jälgida, et selle käigus ei ületataks akupaki maksimaalselt laadimisvoolu. Kõik see teeb ülesande äärmiselt keerukaks ning eeldab kõigi vormelitiimi alameeskondade koostööd ning juurutamist. Kuna ma olen töötanud ka FSTT pidurite insenerina, siis on minu ülesandeks analüüsida, milliseid momente suudavad elektrimootorid pidurdades arendada. Akumeeskonna ülesanne on pidurdusenergia leidmine, mida on võimalik akudesse tagasi laadida.

FEST 15 peab suutma pidurdada kuni 16 m/s^2 selleks, et püsida võistlustel teravaimas konkurentsisis. Selle saavutamiseks peab ühe esimese ratta pidur olema suuteline arendama momenti 458 Nm ning tagumise ratta pidur 155 Nm (käesolevad suurused on pärit FSTT pidurisüsteemide meeskonnalt). Ilmneb, et 75 % kogu pidurdus koormusest langeb esimesele teljele seetõttu tuleb kindlasti arvestada, et esimesi mootoreid on võimalik pidurdades rohkem koormata kui tagumisi.

Esimeseks eesmärgiks on vaja hinnata, kui suure võimsusega on võimalik akupakki laadida ning lähtuvalt sellest, leida maksimaalne ühe DD5-14 mootori pidurdusvõimsus.

$$P_a = \frac{U_n \cdot I}{1000}, \quad (6.4)$$

kus P_a – akupaki laadimisvõimsus (kW),

U_n – akupaki nominaalpinge (VDC),

I – maksimaalne akupaki laadimisvool (A) .

Selgub, et akupaki laadimisvõimsus P_a on umbes 20 kW. Kuna pidurdamisel jaotub ette 75 % kaalust ning 25 % taha, siis tuleb seda arvestada ning koormata mootoreid proportsionaalselt, kuna nad peavad töötama paralleelset mehaaniliste piduritega. Lisaks tuleb arvestada ka ajamisüsteemi kasutegurit, kuna enne kui võimsus jõuab ratastest lõpuks akusse, esinevad kaod, mille väärtuseks on võetud 25 %. Antud väärtus on suurusjärgus poolest kooskõlas ajamisüsteemi kogu kasuteguriga, kuid selle suurus on äärmiselt raske täpselt määrata ning seetõttu on võetud selleks 25 %, mis peaks andma küllaltki adekvaatse hinnangu.

$$P_{ratas} = \frac{P_a}{2 \cdot \eta_k} \cdot \frac{k_u}{100} \quad (6.5)$$

kus P_{ratas} – ühe ratta maksimaalne mehaaniline pidurdusvõimsus (kW),
 k_u – kaaluümberjaotumine (ette või taha %),
 η_k – kogu ajamisüsteemi kasutegur (ülekanne, mootor, kontroller) (%) .

Esimese ratta mootori maksimaalne mehaaniline pidurdusvõimsus on 10,125 kW ning tagumise ratta mootori maksimaalne mehaaniline pidurdusvõimsus on 3,375 kW.

Teades kui suur on ühes rattas maksimaalne pidurdusvõimsus, siis on võimalik leida, kui suure momendiga suudab mootor rattast pidurdada, kuid madalatel kiirustel, kus võimsused on väiksed tuleb jälgida, et tekkiv vool ei ületaks 100 A, mis on DD5-14 mootori maksimaalne vool. Järgmistes arvutuses on kasutada üksjagu konstante, mille väärtuseid ei ole lubatud FSTT avaldada.

$$I_r = \frac{P_{ratas} \cdot 1000}{n \cdot k_e} \cdot (1 - C), \quad (6.6)$$

kus I_r – pidurdamisel mootoris tekkiv vool (A),
 k_e – pingekonstant, mis näitab mitu rpm muutub pöörlemiskiirus, kui tõsta pinget ühe voldi võrra (V/rpm),
 n_m – mootori pöörlemiskiirus (rpm),
 C – koond muutuja, mis iseloomustab mootori elektrilise võimsuse muutumist mehhaaniliseks võimsuseks, kuid selle muutuja täpsem sisu ei kuulu avaldamisele.

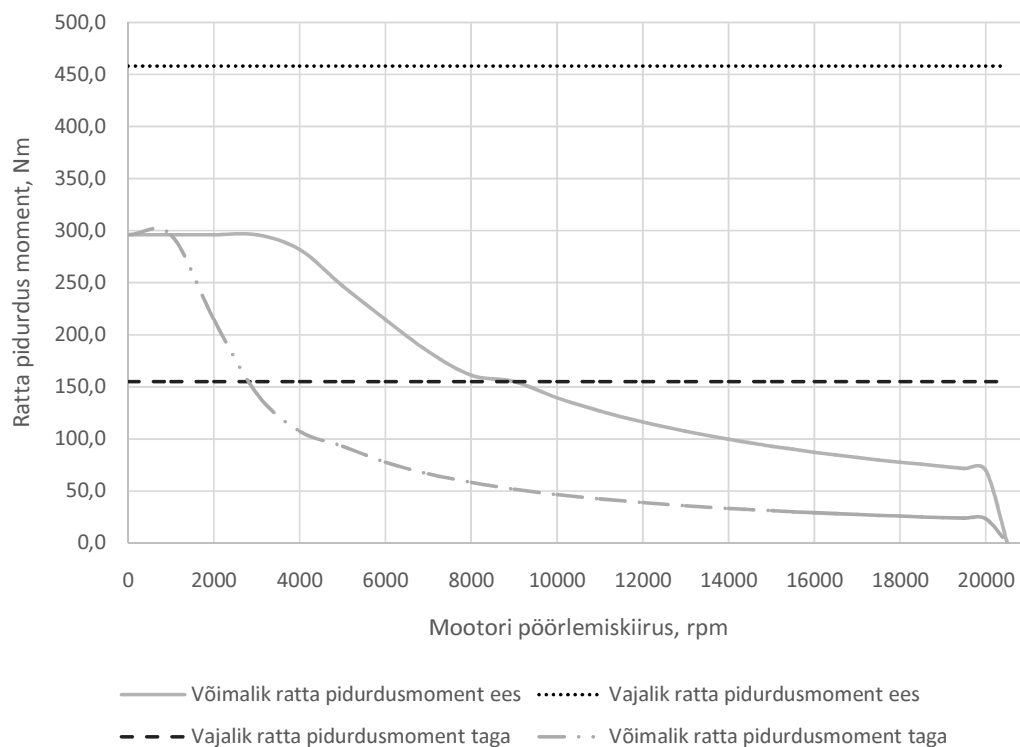
Lähtuvalt mootoris tekkivast maksimaalselt voolust on võimalik arvutada moment, mida mootor suudab ratta võllil tekitada.

$$M_{ratas} = I_r \cdot k \cdot kt, \quad (6.7)$$

kus M_{ratas} – rattast pidurdav moment (Nm),
 k – ülekanne arv (14,089),
 kt – momendi voolusuhte muutuja (Nm/A).

Muutuja kt puhul on tegemist suurusega, mis iseloomustab, kuidas mootori moment sõltub voolust, kuid sõltuvalt mootori mudelist ei ole tegemist konstandiga vaid muutub koos voolu suurusega, aga sõltuvalt konfidentsiaalsusest pole seda lubatud avaldada.

Joonis 6.5 võtab kokku kõik arvutused, mis vastavad valemitele 6.4 kuni 6.7. Graafikust järeldub, et mootorid suudavad autot pidurada kõrgetel pöörlemiskiirustel oluliselt väiksema momendiga kui madalatel kiirustel. See tuleneb asjaolust, et akupakki saab laadida ainult 20,25 kW, aga vastavalt mehaanilise võimsuse arvutusele, kus korrutatakse ratta pöörlemiskiirus ning moment ja selgub, et kui pöörlemiskiirus suureneb, siis peab moment vähenema, et võimsus jääks samaks. Seetõttu saabki kõrgetel pööretel pidurada vähese momendiga. Jälgides graafikul joont vajalik ratta pidurdusmoment ees, selgub, et mootori poolt maksimaalselt arendatav pidurdusmoment ei jõua kunagi selle väärtuseni. Seetõttu on vaja kõik vahepealne osa kompenseerida mehaanilistel piduritel. Kuid vastupidine olukord on kui vaadelda näitajaid, mis käivad tagumise ratta kohta. Nimelt mootori pöörlemiskiirusel 3000 rpm ehk ca 30 km/h tunnis suudab tagumises rattas olev mootor pidurada juba vajaliku momendiga, mis on ette nähtud ehk ideaalses olukorras ei oleks vaja kasutada enam mehaanilisi pidureid. Siit järeldus, esimesel teljel on vaja pidevalt rakendada lisaks elektrilistele piduritele ka mehaanilisi aga tagumisel teljel mitte. See seab pidurdusmeeskonnale ning ajamisüsteemi seadistamisele palju piire. Näiteks kui kasutada pidurdades antud graafikut, siis kindlasti muutub aeglustades alla 30 km/h pidurite tasakaal, kuna tagumised pidurid töötavad blokeerimise piiril tänu elektrilistele piduritele aga esimesed mitte.



Joonis 6.5. Rataste pidurdusmoment sõltuvalt mootori pöörlemiskiirusest

Võimalikke lahendusi antud olukorra lahendamiseks on mitmeid. Üheks lahenduseks oleks kasutada suuremat laadimisvõimsust kannatavat akusüsteemi või kondensatoreid. Tänu suurenenud laadimisvõimsusele saab koormata elektrimootoreid kõrgema momendiga ning seetõttu ühtlustada momendigraafikuid. Kuid tuleb ära märkida, et maksimaalne mootorist väljuv vool saab olla 100 A, mis ühel esimesel mootoril on täidetud kui kiirus on alla 20 km/h ehk ikkagi jääks madalatel kiirustel probleemiks see, et esimesed mootorid ei suuda piisavalt autot pidurdada. Kuid suurema laadimisvõimsuse tõttu on võimalik pidurdada suurema momendiga kõrgetel kiirustel ja nii säästa rohkem energiat. Teiseks lahenduseks on vähendada tagumise ratta elektriliste pidurite momenti proportsionaalselt esimese ratta pidurdusmomendiga niimoodi, et see ei ületaks kunagi tagumise ratta vajalikku pidurdamise momenti. Nii oleksid mehaanilised ja elektrilised pidurid kogu aeg tasakaalus.

Eelnevalt kirjeldatud probleem esineb ainult madalatel kiirustel. Kõrgemalt kiirustelt pidurdades esineb ka teinegi lahendust vajav asjaolu. Nimelt kuna pidurdamist alustatakse alati suurematelt kiirustelt siis vastavalt pidurdusmomendi graafikule (Joonis 6.5) tuleb kiiruse langedes koormata mootoreid suurema momendiga ning seetõttu hoida

laadimisvõimsust konstantsena. Kui aga elektrilised pidurid jälgiks antud graafiku (Joonis 6.5) tunnusjooni ja kui alguses rakendatud mehaaniliste pidurite jõud ei muutu, hakkavad aeglustades rattad blokeerima. Siis peab juht vähendama survet piduripedaalile, et vältida auto külglibisemisse sattumist. Seetõttu oleks ideaalses olukorra mõistlik elektrooniliselt vähendada mehaaniliste pidurite rakendusjõudu, et mitte lasta ratastel blokeerida. Kuna tegemist on aktuaalse probleemiga, on käesolev graafik ideaalne pidurdus- ning ajamimeeskonnale, et välja töötada mehaaniline süsteem koos elektroonilise pidurdusjõu jagajaga ning ajamiseadistus, et leida olukorrale lahendus. Kuid antud probleemi lahendus ei kuulu antud lõputöö hulka, vaid hinnang antud probleemi olemasolule ja lahendusele.

Hinnang selle, kuidas elektrilised pidurid suudavad arendada pidurdusmomenti, on vaja lisaks hinnangut selle millise, osa liikumisenergiat on võimalik regeneratiivse pidurdamisega tagasi akudesse laadida. Kuna antud ülesanne oli lahendamiseks FSTT akusüsteemide meeskonnale, siis on järgnev info nendelt pärit. Laadimisenergia leidmise aluseks võetud andmed on pärit FSH 2014 rajalt, mida logis FSTT eelnev vormelauto FEST 14. Seetõttu kirjeldavad need andmed kõige paremini vormelauto kiirusi, täpseid kiirendusi ja aeglustusi FS rajal. Nendeks andmeteks on auto kiirus, pikikiirendus, kaalu ümberjaotus ja staatiline mass. Vastavalt sellele infole on leitud energia kogus, mis kulutatakse auto kiirendamiseks ning ühtlase kiirusega sõitmiseks. Teise poolena on leitud kineetiline energia, mis on võimalik pidurdades tagasi võtta. Kuid kõige selle juures on arvestatud ka asjaoluga, kui suur saab olla akupaki laadimisvõimsus. Kõige selle tulemusena selgus, et keskmine regenereeritav energia, mis on võimalik tagasi mootori võllile saada on ainult 15-20 % sellest, mis auto kulutas. Kuid uurimisrühm märkis, et väga oluline oli seejuures sõitja tegutsemine ja raja iseloom. Kui teha väga järsk maha pidurdusi täpselt enne kurvi ning hoida autot libisemise eest on võimalik isegi regenereerida lausa 5 % rohkem energiat. Seetõttu tuleb tulevastel testidel kindlasti analüüsida sõitja käitumist ning vaadata selle mõju energia kogusele, mida õnnestub tagasi võtta ning seeläbi õpetada sõitjaid targemalt roolis tegutsema, et antud suurust tõsta.

Eeldusel, et tagasi mootori võllile on võimalik võtta 20 % kulutatud energiast ja keskmine efektiivsus on seejuures 75 % ning akupaki kavandatav mahutavus on 8,4 kWh selgub, et kogu energia, mida sõidu kestel saab kasutada on 9,66 kWh ehk regenereeritakse 1,26 kWh, mis ei ole sugugi väike suurus. Tänu sellele on võimalik sõita kestvussõitu umbes 75 % võimsusega (Tabel 6.1) ehk 15 % suurema võimsusega kui ilma regeneratiivse pidurduseta, mis kogu sõidu arvestuses annab umbes 21 sekundit edu.

6.5. Punktiskoori sõltuvus kasutatavast energiast

Eelnevates peatükkides kirjeldatud tulemustena selgus, et kui akupaki mahutavus on 8,4 kWh (võimalik maksimaalne väljavõetav energia), siis ei ole võimalik saavutada parimat aega kestvussõidus ilma, et peaks vähendama võimsust, alandama auto massi või kärpima tiibade suurus. Kuid ei tohi ära unustada, et FSAE võistlused on kompleksed võistlused ning kõige olulisem on saavutada võit üldkokkuvõttes. Kuna ajamisüsteemi potentsiaali maksimaalne ärakasutamine mõjutab eelkõige edu dünaamilistel aladel, siis on oluline uurida, kuidas kõigi nelja dünaamilise ala saavutatav punktisumma sõltub kasutatavast energia kogusest.

Selge on see, et kui me suurendame akupaki mahutavust, siis suureneb ka aku ja seetõttu kogu vormeli mass. Kuid see pärsib otseselt ringiaegu ja ka kulutatud energiat. Kiirenduse, skid-pad'i (külkkiirendus), sprindi olukorras on oluline ära märkida, et antud etapid on väga lühikesed, siis nendel aladel on seda parem, midagi väiksem on akupakk. Näiteks sprindis kulutatakse energiat umbes 1 - 1,5 kWh ning teistel aladel veelgi vähem, aga kuna võistluste ajal peab kasutama täpselt sama akupakki, siis kindlasti ei saa kestvussõitu minna sõitma nii väikse akuga. Mida suurem on kestvussõidus akupakk seda rohkem tuleb ka energiat kaasas vedada, et antud massi liigutada ning teisest küljest, kui on väiksem akupakk, siis tuleb võimsust piirata. Ehk jääb õhku küsimus, kus on siis optimum?

Antud optimumi leidmise eeldusteks on võetud, et auto normaalmass on 313 kg ning aku mahutavus 8,4 kWh ja kõik ülejäänud andmed on toodud eeldatavate parameetrite tabelis (Tabel 4.1). Iga ära võetav või lisanduv kWh kaalub 7,74 kg. Seetõttu suureneb või väheneb kõigil aladel aku mass sõltuvalt kulutatavast energiast. Arvestatud on kogu kulutatava energia järgi, seetõttu on arvesse võetud ka kõik kaod, mis tekivad mootorites, kontrollis, juhtmetes kui ka ülekandesüsteemis ning seda sõltuvalt sellest, milline on mootorite käitumine rajal (täpsemalt on seda kirjeldatud peatükis 5). Kuna antud arvutused on eelnevalt läbi viidud, ei ole mõtet neid uuesti välja tuua. Lisaks kadudele sisaldab kasutatava energia kogus regeneratiivse pidurdamise tulemusena tagasi saadavat energiat. Kõik tulemused, milliseid ringiaegu on võimaik saavutada, on välja toodud järgmises tabelis (Tabel 6.6). Kiirenduse, skid-padi ja sprindi ajad on simuleeritud maksimaalsete mootorite võimsustega, kuid kestvussõidu aegade simuleerimisel on vähendatud mootorite võimsust, et mitte ületada kogu

energiat mida on võimalik kasutada. Antud tabelist on selgelt näha, et mida väiksem akupakk seda kiiremad on ajad, välja arvatud kestvussõidus, kus mootorite võimsus on piiratud. Kuid olulisem küsimus on seejuures, milline all olevatest kombinatsioonidest on parim, et kindlustada üldvõit. Selleks tuleb uurida saavutatavaid punkte.

Tabel 6.6. Ringiaegade sõltuvus akupaki suurusest

Kogu kulutatav energia, kWh	Akupaki mahutavus, kWh	Vormeli mass, kg	Kiirenduse aeg, s	Skid- Pad'i aeg, s	Sprindi aeg, s	Kestvussõidu aeg, s
12	10,43	329	3,69	5,060	37,030	1333,08
11	9,57	322	3,66	5,050	36,960	1337,76
10	8,70	315	3,63	5,040	36,890	1346,40
9	7,83	309	3,61	5,035	36,820	1355,76
8	6,96	302	3,58	5,025	36,750	1370,88
7	6,09	295	3,55	5,020	36,670	1389,96

FSAE sarja reeglite kohaselt on võimalik leida, kui palju punkte on võimalik antud aegadega saada [2].

$$ACC = 71,5 \cdot \left[\frac{\left(\frac{T_{amax}}{T_{ayour}} - 1 \right)}{\left(\frac{T_{amax}}{T_{amin}} - 1 \right)} \right] + 3,5, \quad (6.8)$$

kus ACC – kiirenduse punktide arv,

T_{amax} – minimaalne kiirenduse aeg korda 1,5 (s),

T_{amin} – minimaalne kiirenduse aeg (s),

T_{ayour} – FEST15 kiirenduse sõiduaeg (s).

$$SKI = 47,5 \cdot \left[\frac{\left(\left(\frac{T_{smax}}{T_{syour}} \right)^2 - 1 \right)}{\left(\left(\frac{T_{smax}}{T_{smin}} \right)^2 - 1 \right)} \right] + 2,5, \quad (6.9)$$

kus SKI – skid-padi punktide arv,

T_{smax} – minimaalne skid-padi aeg korda 1,25 (s),

T_{smin} – minimaalne skid-padi aeg (s),

T_{syour} – FEST15 skid-padi sõiduaeg (s).

$$SPI = 142,5 \cdot \left[\frac{\left(\frac{T_{pmax}}{T_{pyour}} - 1 \right)}{\left(\frac{T_{pmax}}{T_{pmin}} - 1 \right)} \right] + 7,5 , \quad (6.10)$$

kus SPI – sprindi punktide arv,

T_{pmax} – minimaalne sprindi aeg korda 1,45 (s),

T_{pmin} – minimaalne sprindi aeg (s),

T_{pyour} – FEST15 sprindi sõiduaeg (s).

$$KES = 250 \cdot \left[\frac{\left(\frac{T_{kmax}}{T_{kyour}} - 1 \right)}{\left(\frac{T_{kmax}}{T_{kmin}} - 1 \right)} \right] + 50 , \quad (6.11)$$

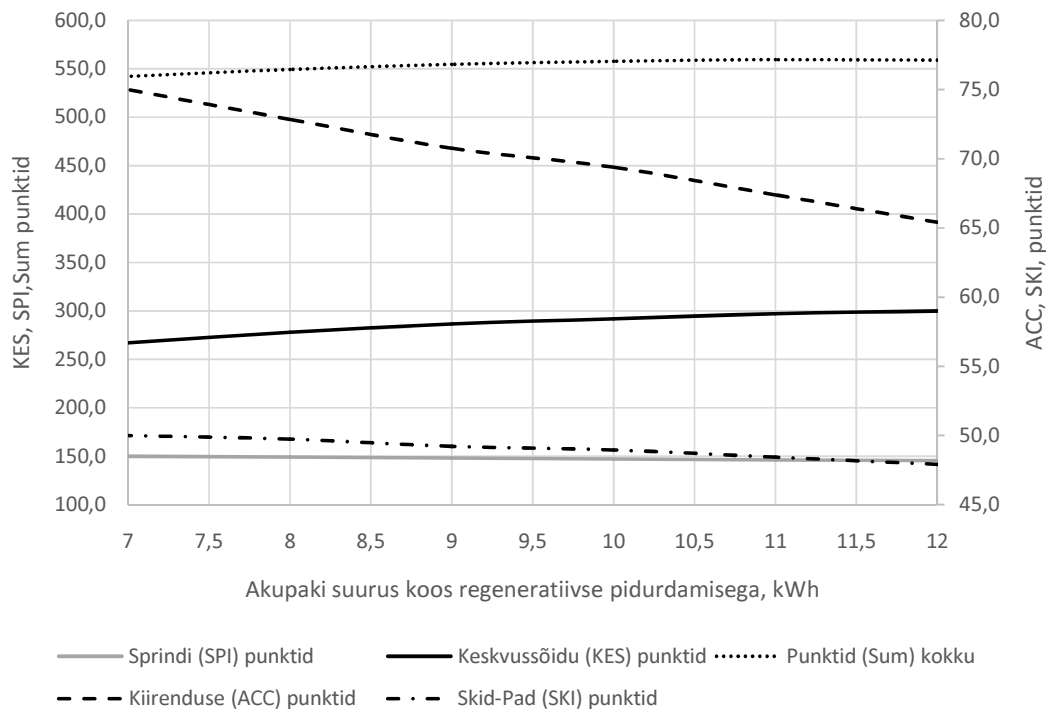
kus KES – kestvussõidu punktide arv,

T_{kmax} – minimaalne kestvussõidu aeg korda 1,45 (s),

T_{kmin} – minimaalne kestvussõidu aeg (s),

T_{kyour} – FEST15 kestvussõidu sõiduaeg (s).

Kõikides arvutustes on minimaalne aega eeldusel, et FEST 15 sõidab võistluse kõige kiirema aja. Lähtuvalt ringiaegade tabelile (Tabel 6.6) on läbiviidud arvutuste tulemused välja toodud all oleval joonisel (Joonis 6.6).



Joonis 6.6. Saavutatavad punktid

Vaadeldes saavutatavate punktide joonist (Joonis 6.6) selgub, et tegelikult summaarsed punktid ei sõltu väga sellest, kui suur on akupakk. Punktide vahe 7 kWh korral ja 12 kWh korral on ainult 17 punkti, mis on küllaltki marginaalne vahe, arvestades, et kogu võistluse tulemusena on võimalik koguda 1000 punkti. Eraldi välja tuues, on võimalik parimat tulemust saavutada, kui kasutada 11 kWh energiat, mis teeb akupaki suuruseks ca 9,5 kWh ning alates sellest suurusest hakkab kogu punktide arv vähenema ning seetõttu pole kindlasti otstarbekas minna suurema akupaki peale, et sõita kestvussõitu 100 % võimsusega. Nagu oli eeldatud, et väiksemate mahutavuste korral on võimalik saavutada parimaid üksikalade tulemusi (va. kestvussõit), siis nii ka on. Näiteks väiksema akupaki korral kaotaksime ainult 17 punkti üldkokkuvõttes, aga seetõttu võiksime saavutada lisaks 3 alavõitu, siis kindlasti on see üks võimalus, kuidas uhkemalt triumfeerida. Näiteks kui kaotaksime kiirendusvõistlusel lausa 10 punkti, mis on väga suur osa, arvestades, et kokku jagatakse seal ainult 75 punkti. Kestvussõidu puhul kaotaksime juba ca 30 punkti, kui läheksime rajale 6,09 kWh akupakiga 10,43 kWh asemel. Siin kohal tuleb ära märkida, et kõige suuremaks probleemiks on, kuidas võistlus võita ja kas üldse suudetakse kestvussõit lõpetada. Üldjuhul saab FSAE sarjas probleemiks just see asjaolu, sest tehnika on keeruline ja kipub üripis palju lagunema. Seetõttu, kui minna rajale suurema ja raskema akuga, siis on seal ka tunduvalt rohkem aku

elemente, nendevahelisi ühendusi, elektroonikat ja ka kinnitusi mis võivad hakata tõrkuma või puruneda ja langetada meeskonna konkurentsist. Seetõttu tuleb kindlasti hinnata, kas suurem akupakk on üldse konkurentsivõimeline.

Uuringu tulemusena selgus, et suurem akupakk ei pruugi tuua edu üldkokkuvõttes, kuna raskem auto ei anna eelist üksikaladel (va. kestvussõit) ning lisaks kasvab süsteemide keerukus ja katki minemise oht. Samuti on võimalik väiksema akupakiga saavutada üksikaladel rohkem võite ning seetõttu tõsta meeskonna edu ja moraali.

6.6. Dünaamiliste simulatsioonide kokkuvõte

Dünaamilised simulatsioonid annavad tegelikku teavet, kas AMK DD5-14 mootorid sobivad vormelile FEST 15 ning kuidas neid on kõige parem kasutada ja juhtida, kooskõlastada muude auto komponentide ja sõlmedega. Selliste simulatsioonide eelduseks on võimalikult täpselt valitud lähteandmed nagu auto mass, õhutakistus- ja survejõutegurid, akupaki mahutavus, rataste diameetrid, ülekandearv jne, kuid ka mootorite karakteristikud ja efektiivsus. Kuna mootorite kasutegur sõltub suuresti sellest, milline on mootorite poolt arendatav pöörlemiskiirus ning moment (Joonis 6.1), siis on see üheks alusteks koos mootori töökarakteristikutega (Joonis 6.3), mille alusel saab läbi viia simulatsioone. Selgus, et parim ülekandearv, mis mootori ja ratta vahel kasutada on 15,9 ning see on märksa suurem kui alguses arvatud 14,49, et saavutada vajalik kiirendus ja rajakiirus. Samuti mõjub suurem ülekandearv hästi ka mootorite efektiivsusele, tõstes seda antud väärtusega umbes 3 %. Samas tuli tõdeda, et vormeli massi ja tiibade vähendamine ei tõsta oluliselt mootorite efektiivsust, kuid mõlema väärtuse vähendamine annab märgatava energia kokkuhoidu kui kasutada DD5-14 mootoreid. Näiteks 50 kg massi kärpimine hoiab kokku ühe kWh energiat. Kuid kui kärpida oluliselt massi, ei jätku ka siis plaanitavast akupaki (8,4 kWh) energiast, et sõita 100 % võimusega, mida antud mootorid ja võistlusreeglistik lubaks. Kui sõita ainult eelnevalt akupakki laetud energiaga peaks kestvussõidu võimust kärpima kuni 60 %, kuid antud probleemi aitab leevendada regeneratiivne pidurdamine. Kui antud pidurdamine töötaks, siis oleks võimalik akudesse tagasi laadida umbes 1,3 kWh energiat, mistõttu oleks kestvussõitu võimalik sõita kuni 21 sekundit kiiremini.

FSAE võistlused on väga kompleksed võistlused ning seetõttu ei saa vaadata ainult seda, kui kiiresti saab sõida kestvussõitu, sest suurema akupakiga väheneb kiirendusvõistluse, skidpad'i ja sprindi aeg. Analüüsi tulemusena selgus, et kõige rohkem punkte oleks võimalik kõikidelt alavõistlustelt kokku koguda, kui akupaki suurus oleks 9,4 kWh, kuid punktide vahe võrreldes 6 kWh akupakiga oleks ainult 17 punkti. Seetõttu tuleb märkida, et suur akupakk toob küll edu kestvussõidus, kuid vähendab seda muudel aladel ning kokkuvõttes ei avalda suurt mõju kogu punktiskoorile.

7. KOKKUVÕTE

Tänapäeval on väga aktuaalsed teemad, mis käsitlevad ressursisäästlikumat tarbimist ning alternatiivseid viise, kuidas kogu ühiskond peaks ja saaks edasi elada, sest selge on see, et hetkel kulutab ühiskond Maal olevaid ressursse liiga kiiresti ning seda tuleviku arvelt. Seetõttu on väga oluline uurida ka transpordi sektorit, mis valdavalt kasutab energiana fossiilseid kütuseid. Elekteriga töötavad sõidukid on alternatiiviks fossiilseid kütuseid kasutavale transpordile. Elekter on väga universaalseks viisiks kuidas energiat kasutada, edasi kanda ja ka salvestada. Elektrit on võimalik toota väga paljudest erinevatest allikatest nagu näiteks tuulest, veest, päikesest, merelainetest ja üldse kõigest, mis vähegi liigub. Seetõttu on võimalik elektrienergiat toota pea igal pool maakeral.

Käesolev töö keskendub neljaratta veolise FSAE klassi vormelauto FEST 15 veoajamisüsteemi valikule ja selle kasutamisele, kuid samuti annab uurimistöö ülevaate ka sellest, kuidas elektrisõiduki ajami kasutamine autol on kooskõlastatud kõigi ülejäänud sõlmedega ning kuidas saaks ajami tööd otseselt ja kaudselt paremaks muuta, kui ülejäänud komponente teisiti projekteerida ja ehitada. Töö põhirõhk langeb konkreetse väljavalitud ajamisüsteemi kasutamisele ja juhtimisele, kuid selle eelduseks on õigesti püstitatud lähteülesanne ning ootused, millega mootorid ja kontrollid peavad hakkama saama. Seetõttu on vaja mõista eelkõige FSAE võistlussarja olemust ning reeglistikku. FSAE võistlussarja puhul on tegemist tudengitele mõeldud tootearendusvõistlusega, mille väljundiks on reaalne vormelauto. Võistlused ise koosnevad nii dünaamilistest kui ka staatilistest alavõistlustest. Staatilised alad on disaini kaitsmine, äripresentatsioon ning maksumuse hindamine. Dünaamilisteks aladeks on külj- ja pikikiirendusvõistlus ning sprint ja kehvussõit. Seetõttu on oluline, et loodav lahendus oleks äärmiselt mitmekülgne ning kõik osad oleks viimase detailini läbi analüüsitud, täpselt nii nagu peab olema lõpptarbijale pakutav toode.

FEST 15 on nelikveoline FSAE võistlusklassi vormelauto. Parimaks lahenduseks, kuidas teostada nelikveolist vormelautot, on paigutada igasse rattasse eraldi mootorid. Sellise lahenduse puhul ei pea olema pikki, keerukaid ja raskeid mehaanilisi ülekandesüsteeme, mis asetsevad rataste ja mootori vahel. Kõik see aitab kokku hoida ruumi, massi ning arendustegevust. Teine ning olulisem eelis on, et sellise lahendusega saab igat ratast koormata just sellise momendiga nagu rada hetkel vajab ning seetõttu on võimalik välja arendada

võimalikult ideaalne juhtimismudel, mis otseselt suurendab rajakiirust. Probleemaatilisem olukord on, aga nimelt võimsuse kasutamisega. Kuna akudest välja võetav võimsus ei tohi ületada reeglistiku järgi 80 kW, siis vastavalt võimsusarvutustele ei piisa sellest võimsusest, et pidevalt kiirendada ühtlase kiirendusega [2]. Üheks suurimaks eelduseks on, et 75 m distantis tuleb läbida 3,57 s ning seda seetõttu, et auto kiirendus oleks vähemalt sama hea kui hetkel maailma parimatel tiimidel antud sarjas. Seetõttu peaks konstantne kiirendus olema terve distantsi vältel vähemalt 12 m/s^2 , kuid problemaatiliseks saab piiratud võimsus. Nimelt täituks 80 kW juba kiirusel 60 km/h kui kiirendada kiirendusega 12 m/s^2 . Seetõttu peavad mootorid olema võimelised madalatel kiirustel suutelised kiirendama veel kiiremini kui 12 m/s^2 , et puudujääki kõrgetel kiirustel kompenseerida. Samuti tuleb vähendada staatilist kasutatavat võimsust, et selle arvelt suurendada dünaamilist võimsust, mis kulub otseselt kiirendamiseks mitte takistusjõudude ületamiseks. Näiteks 100 km/h sõitev FEST 15 kulutab 20 kW võimsust takistusjõudude ületamiseks, olles samas suurusjärgus nagu tavaline sõiduauto, kuid kaalub 4-5 korda vähem. Teise näitena võib tuua, et Formula BMW klassi autodel on tiibade ja kogu auto õhutakistusjõud 2 korda väiksem kui hetkel FEST 15, seetõttu on see oluline koht, mida tuleb arendada.

Parim veoajamisüsteem, mida FSTT saab turult osta on AMK DD5-14 mootoritel põhinev terviklahendus. DD5-14 (PMSM) mootorid on vedelikjahutusega kõrgdünaamilised mootorid, mis mahuvad ära FEST 15 ratta sisse ning nende kogumass on ainult 14,8 kg (ilma jahutuskorpusteta). Konstantne nimivõimsus mida 4 mootorit suudavad arendada on 49,2 kW ning maksimaalne võimsus lausa 140 kW. Seetõttu võib väita, et mootorid pole ei üle- ega aladimensioneeritud, kuna 80 kW lubatud võimsus jääb selle vahele. Ülekandearvuga 14,49, mis on vajalik selleks, et auto sõidaks maksimaalselt 120 km/h ning maksimaalne saavutatav summaarne moment 1219 Nm. Kuna sai eeldatud, et moment peab jääma umbes vahemiku 800-1200 Nm (sõltuvalt kiirusest), siis piisab ka antud suurusest ja võimsusest. Lisaks kõigele sellele, toetavad valiku õigust ka mootori tööarakteristikud (Joonis 5.2), kuna madalatel pööretel on koheselt saavutatav maksimaalne moment, mida läheb ühtlasi vaja, et tagada tänu võimsuspiirangule auto vajalik kiirendus. Lisaks vajalikele jõudlusomadustele on olulised ka mootori maksimaalne pinge (600 V) ning vool (100 A), mis sobivad kokku ka akusüsteemidega, mida FEST 15 puhul kasutatakse. AMK DD5-14 mootorite kasuks räägivad ka nende tulemused FSAE sarjas. Nimelt kasutavad 3 maailma parimat tiimi [8] just neid mootoreid. Seetõttu saab eeldada, et mootorid on vastupidavad ning saavad hakkama võistlussarja eripäradega.

Dünaamilised simulatsioonid annavad tegelikku teavet, kas AMK DD5-14 mootorid sobivad vormelile FEST 15 ning kuidas neid on kõige parem kasutada, juhtida ja kooskõlas muude auto komponentide ja sõlmedega. Selliste simulatsioonide eelduseks on võimalikult täpselt valitud lähteandmed nagu auto mass, õhutakistus- ja survejõutegurid, akupaki mahutavus, rataste diameetrid, ülekandearv jne, kuid ka mootorite karakteristikud ja efektiivsus. Kuna mootorite kasutegur sõltub suuresti sellest, milline on mootorite poolt arendatav pöörlemiskiirus ning moment (Joonis 6.1), siis on vaja seda väga täpselt uurida. Näiteks võib mootorite efektiivsus olla minimaalselt ainult 10 % ning maksimaalselt 90 %. Tänu sellele muutub oluliselt ka võimsus, mis jõuab lõpuks ratta ja mootori võllile. Kõige sellega on vaja arvestada, et saada võimalikult täpsed võimsus- ja momendijooned, mis jõuavad mootori võllile (Joonis 6.3), et läbi viia korrektseid simulatsioone.

Esimese punktida sai hinnatud, milline ülekandearv on vormelile FEST 15 parim, et saavutada parim rajakiirus ja kiirendusaega. Selgus, et parim ülekandearv, mis mootori ja ratta vahel kasutada, on 15,9, see on märksa suurem, kui alguses arvatud 14,49, et saavutada vajalik kiirendus ja rajakiirus (Joonis 6.4). Samuti mõjub suurem ülekandearv hästi ka mootorite efektiivsusele, tõstes seda antud väärtusega umbes 3 %. Lisaks ülekandearvule sai hinnatud kuidas mass ja auto aerodünaamilised elemendid avaldavad mõju mootorite keskmisele efektiivsusele ja kogu kulutatud energiale. Tuli tõdeda, et vormeli massi ja tiibade vähendamine ei tõsta oluliselt mootorite keskmist efektiivsust, kuid mõlema väärtuse vähendamine annab märgatava energia kokkuhoidu kui kasutada DD5-14 mootoreid. Näiteks 50 kg massi kärpimine hoiab kokku ühe kWh energiat ning seejuures paraneks kogu kestvussõidu aeg lausa 26 sekundit. Samas kui kärpida tiibasi 30 % oleks võimalik kokku hoida umbes 0,8 kWh, aga seejuures suureneks kestvussõidu aeg 16 sekundit. Kuid olulisem küsimus oli selles, kas kavandatava akupaki suurusega jätkub energiat, et sõita täisvõimsusel kestvussõit. Selgus, et isegi kui kärpida oluliselt massi, ei jätkuks plaanitavast akupaki (8,4 kWh) energiast, et sõita 100 % võimusega, mida antud mootorid ja võistlusreeglistik lubaks. Kui sõita ainult eelnevalt akupakki laetud energiaga peaks kestvussõidu ajaks kärpima võimsust kuni 40 %. Sellise võimsuse vähendamisega väheneks ringiaeg ainult 3 %. Kõige selle juures suureneb mootorite keskmine efektiivsus 8 % ning auto kogu energia sääst lausa 29 %.

Üheks eesmärgiks oli, aga miks kasutada nelikveolist vormelit, on regeneratiivne pidurdamine, kuna aeglustades 1,6 G juures langeb esimestele ratastele 75 % auto kaalust.

Seetõttu on võimalik esimestes ratastes olevate mootoritega oluliselt paremini energiat regenereerida. Uuringu tulemusena selgus, et auto liikumiseks kulutatud energiast on 15-20 % võimalik tagasi saada mootori võllidele, arvestades seejuures mootori töökarakteristikutega ning võimsusega millega on võimalik akupakki laadida. Seetõttu on võimalik regenereerida ca. 1,3 kWh energiat ning sõita kestvussõitu 21 sekundit kiiremini, mis on küllaltki suur võit. Kuid selle saavutamise muudab keerukaks võistlusreeglistik, mistõttu pole lubatud kasutada otseseid pidurdusjõudu jagavaid süsteeme mehaaniliste ja elektriliste pidurite vahel. Seetõttu peavad piduripedaali vajutamisega töötama elektrilised ja tavalised pidurid korraga kuna ainuüksi elektrilistest piduritest ei jätku, et autot piisavalt kiiresti aeglustada. Küll võib aga kasutada nii-öelda ABS süsteeme mis peavad aga alates migist hetkest suutma pidureid blokeerida. Kuid analüüsi tulemusena selgus, et kõrgetel pööretel saab tänu vähesele akupaki laadimisvoolule pidurdada mootoritega olulistel väiksema momendiga kui madalate kiirustel. Selleks, et võimalikult palju energiat tagasi võtta, eeldusel et laadimisvõimsus jääb konstantseks, peavad pidurdamise käigus elektrilised pidurid arendama kiiruse vähendades rohkem momenti ning mehaaniliste pidurite osakaal peab vähenema, et rattad ei blokeeriks (Joonis 6.5). See on asjaolu, mis teeb pidurite tasakaalu seadistamise väga keeruliseks.

FSAE võistlused on väga kompleksed võistlused ning seetõttu ei saa vaadata ainult seda kui kiiresti saab sõida kestvussõit, vaid peab arvestama ka teiste alavõistlustega, et saavutada võit üldkokkuvõttes. Kui minna sõitma suurema akupakiga on selge, et kestvussõitu saab sõita suurema võimsusega, kuid seetõttu tuleb lõivu maksta teistel alavõistlustelt, kuna siis suurenevad kiirendusvõistluse, skid-pad'i ja sprindi ajad. Analüüsi tulemusena selgus, et kõige rohkem punkte oleks võimalik kõikidelt alavõistlustel kokku koguda, kui akupaki suurus oleks 9,4 kWh. Nii võiks võita võrreldes 6 kWh akupakiga 17 punkti, mis on küllaltki väike vahe arvestades, et nelja dünaamilise alavõistluse peale oleks võimalik koguda 575 punkti ning üldkokkuvõttes 1000 punkti. Kuid kui sõitma minna raskema akupakiga pole tõenäoliselt võimalik võita teisi alavõistlusi peale kestvussõidu. Näiteks 9,5 kWh versus 6 kWh akuga kaotaks kiirendusvõistlusel 10 punkti, mis maksimaalsest saadavast 75 punktis on väga suur osa. Tuleb märkida, et suurem akupakk (9,5 kWh) toob küll edu kestvussõidus, kuid vähendab seda muudel aladel ning kokkuvõttes ei avalda suurt mõju kogu punktiskoorile. Lisaks sellele on suuremas akupakis rohkem komponente, mis võivad võistluse käigus tõrkeid tekitada ning seetõttu väheneb kogu auto töökindlus.

Edasiste arendustena on kindlasti vaja esmajärgus vähendada auto massi, kuna maailma paremikke kuuluvad sama klassi vormelid kaaluvad umbes 50 kg vähem. Vähendades massi oleks võimalik sõita veel kiiremini ning seejuures säästa palju energiat, mistõttu pole vaja enam niisuurat akusüsteemi. Massi vähendamise tegi käesoleva vormeli puhul keeruliseks asjaolu, et FSTT ehitab aastal 2015 oma esimest nelikveolist vormelauto ning samuti mindi toruraamilt üle süsinikkiust monokokk kerele. Kahjuks nii suurte muutuste tõttu on raske prognoosida kõigi üksikute sõlmede lõplikku massi ning seejuures veel mõelda kuidas seda kärpida. Lisaks sellele tuleb kindlasti uurida, kuidas oleks võimalik üle minna veel suuremale ülekandearvule, et tõsta rajakiirust ning mootorite efektiivsust. Kuid seejuures ei tohi ära unustada ka tiibade suurusi, sest kui väheneb auto mass, siis pole enam vaja nii suuri tiibasi, et säilitada sama suurt kurvikiirust.

Kokkuvõtteks võib öelda, et antud lõputöö täitis kõik oma püstitatud eesmärgid. Sai leitud elektivormelautole FEST 15 veoajam, mis analüüsi tulemusena on suuteline hoidma FSTT meeskonda konkurentsist ka tulevasel 2015 hooajal. Lisaks sellele annab töö väga konkreetseid juhiseid, kuidas ajameid rajal kasutada kooskõlas kõigi muude komponentidega ja sõlmedega, et saavutada maksimaalne edu. Samuti selgus üsna palju problemaatilisi ning edasisi uuringuid vajavaid probleeme, kuidas autot edasi arendada. Seetõttu on lõputöö ülesanne täidetud täielikult.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. Transport Evolved kodulehekülg <http://www.transporevolved.com>. Vaadatud 05.02.2015.a.
2. Institution of Mechanical Engineers Formula Student kodulehekülg <http://www.formulastudent.com> Vaadatud 05.02.2015.a.
3. Karri, R. Väikevormelauto FEST13 mootori valik. Bakalaureusetöö. – Tallinn: TTÜ elektriainete ja jõuelektronika instituut, 2013. – 38 lk.
4. Formula Student Germani kodulehekülg <https://www.formulastudent.de> Vaadatud 09.02.2015.a.
5. Formula Student Hungary kodulehekülg <http://fshungary.hu/> Vaadatud 09.02.2015.a.
6. Lehtla, T. Elektriainid. – Tallinn: TTÜ elektriainete ja jõuelektronika instituut, 2007. – 201 lk.
7. MCU on Eclipse kodulehekülg <http://mcuoneclipse.com/> Vaadatud 14.02.2015
8. Formula Student Electric - World Ranking kodulehekülg <http://mazur-events.de/fs-world/?cl=2> Vaadatud 14.02.2015
9. WHZ Racing Team kodulehekülg <http://www.whz-racingteam.de/> Vaadatud 16.02.2015.a.
10. Munich Motorsport kodulehekülg <http://www.munichmotorsport.de/> Vaadatud 16.02.2015.a.
11. Rassõlkin, A. Research and Development of Trial Instrumentation for Electric Propulsion Motor Drives. Thesis on Power Engineering. – Tallinn: TUT Faculty of Power Engineering, 2014. – 127p.
12. Formula North kodulehekülg <http://www.formulanorth.com/> Vaadatud 2.04.2015

Mootori kasutegurit arvestab programm

```

#include <stdio.h>
#include <cmath>
FILE *CopyZeiger;
float effkokku=0;
int rpmlugeja;
int Nmlugeja;
float voimsusk;
float soojus;
float soojuskokku=0;

//leitakse vastavalt pöoretele ja momendile lugeja mida hiljem kasuteguri arvutamiseks
void leiapoore(float *rpm,float *Nm, int i)
{
    float R,N;
    R=*(rpm+i);
    N=*(Nm+i);
    fprintf(CopyZeiger," Rpm = %.0f   Nm = %.0f \n",R,N );
    voimsusk=R*0.10471975499*N; // võimsuse leidmine . rad/s * moment

//pöörde lugeja leidmine

    if (R<=500)
    {
        rpmlugeja=0;
    }
    else if (R<=1000)
    {
        rpmlugeja=1;
    }
    else if (R<=2000)
    {
        rpmlugeja=2;
    }
    else if (R<=3000)
    {
        rpmlugeja=3;
    }
    else if (R<=4000)
    {
        rpmlugeja=4;
    }
    else if (R<=6000)
    {
        rpmlugeja=5;
    }
    else if (R<=10000)
    {
        rpmlugeja=6;
    }
    else
    {
        rpmlugeja = 9;
    }

// momendi lugeja leidmine

```

```

if (N<=1.3)
{
    Nmlugeja=0;
}
else if (N<=2.7)
{
    Nmlugeja=1;
}
else if (N<=5.4)
{
    Nmlugeja=2;
}
else if (N<=7.9)
{
    Nmlugeja=3;
}
else if (N<=10.4)
{
    Nmlugeja=4;
}
else if (N<=12.5)
{
    Nmlugeja=5;
}
else if (N<=14.4)
{
    Nmlugeja=6;
}
else if (N<=16)
{
    Nmlugeja=7;
}
else if (N<=17.4)
{
    Nmlugeja=8;
}
else if
(N<=18.5)
{
    Nmlugeja=9;
}
else
{
    Nmlugeja = 10;
}
}

```

```
void main()
```

```

{
//üldandmed
  int i;
  int k=5670; //andmete suurus ungari raja

  float eff;
  float efektiivus,kesksoojusw;
  CopyZeiger = fopen("andmed1.txt","w"); //andmefaili tekitamine

// Effisensi tabel/ pind
  float N00[10]={ 64.37 , 71.33 , 73.64 , 74.7 ,
75.43 , 76.57 , 77 , 77.08 , 77.56 , 78.14};
  float N01[10]={ 58.42 , 70.48 , 77.57 , 80.4 ,
82.01 , 83.92 , 85.16 , 85.44 , 85.97 , 86.5};
  float N02[10]={ 44.94 , 60.81 , 73.35 , 78.82 ,
81.94 , 85.43 , 88.2 , 88.88 , 89.71 , 90.44};
  float N03[10]={ 35.59 , 51.9 , 67.02 , 74.26 ,
78.54 , 83.42 , 87.58 , 88.65 , 89.84 , 90.86};
  float N04[10]={ 29.14 , 44.78 , 61.01 , 69.41 ,
74.57 , 80.62 , 85.93 , 87.34 , 88.86 , 90.16};
  float N05[10]={ 24.17 , 38.71 , 55.22 , 64.39 ,
70.24 , 77.3 , 83.73 , 85.48 , 87.37 , 88.98};
  float N06[10]={ 20.41 , 33.76 , 50.04 , 59.65 ,
65.99 , 73.88 , 81.33 , 83.42 , 85.66 , 87.59};
  float N07[10]={ 17.31 , 29.400 , 45.1 , 54.87 ,
61.55 , 70.1 , 78.56 , 80.97 , 83.56 , 85.81};
  float N08[10]={ 14.82 , 25.75 , 40.67 , 50.41 ,
57.28 , 66.34 , 75.7 , 78.4 , 81.34 , 83.91};
  float N09[10]={ 12.810 , 22.67 , 36.72 , 46.3 ,
53.25 , 62.67 , 72.77 , 75.75 , 79.02 , 81.91};
  float N10[10]={ 11.170 , 20.050 , 33.21 , 42.51 ,
49.44 , 59.09 , 69.82 , 73.06 , 76.63 , 79.83};

//ungari andmeid OL Tarkvarast
*/
// 100% võimsus
  float rpm[1][5670]={}; // andmed rajapunkti pöörlemiskiiruse kohta
  float Nm[1][5670]={}; // andmed rajapunkti momendi kohta

// 90% võimsus
  float rpm[1][5670]={}; // andmed rajapunkti pöörlemiskiiruse kohta
  float Nm[1][5670]={}; // andmed rajapunkti momendi kohta

// 80% võimsus
  float rpm[1][5670]={}; // andmed rajapunkti pöörlemiskiiruse kohta
  float Nm[1][5670]={}; // andmed rajapunkti momendi kohta

// 70% võimsus
  float rpm[1][5670]={}; // andmed rajapunkti pöörlemiskiiruse kohta
  float Nm[1][5670]={}; // andmed rajapunkti momendi kohta
  */

// 60% võimsus
  float rpm[1][5670]={}; // andmed rajapunkti pöörlemiskiiruse kohta
  float Nm[1][5670]={}; // andmed rajapunkti momendi kohta

```

```

// väljakutsumine et leida pööretele ja momendile vastav efektiivsus
for (i=0;i<k;i++)
{
leiapoore(*rpm,*Nm,i);

fprintf(CopyZeiger," erpm lugeja = %i Nm lugeja= %i\n",rpmlugeja,Nmlugeja );
    if(Nmlugeja==0)
    {
        eff=N00[rpmlugeja];
    }
        else if(Nmlugeja==1)
        {
            eff=N01[rpmlugeja];
        }
            else if(Nmlugeja==2)
            {
                eff=N02[rpmlugeja];
            }
                else if(Nmlugeja==3)
                {
                    eff=N03[rpmlugeja];
                }

else if(Nmlugeja==4)
{
eff=N04[rpmlugeja];
}
    else if(Nmlugeja==5)
    {
        eff=N05[rpmlugeja];
    }
        else if(Nmlugeja==6)
        {
            eff=N06[rpmlugeja];
        }
            else if(Nmlugeja==7)
            {
                eff=N07[rpmlugeja];
            }
                else if(Nmlugeja==8)
                {
                    eff=N08[rpmlugeja];
                }
                    else if(Nmlugeja==9)
                    {
                        eff=N09[rpmlugeja];
                    }
                        else // juhul kui Nm lugeja 10
                        {
                            eff=N10[rpmlugeja];
                        }

fprintf(CopyZeiger," eff = %.2f\n",eff );
soojus=(voimsusk*100/eff)-voimsusk;
fprintf(CopyZeiger," voimsus = %.0f soojus = %.0f \n\n",voimsusk,soojus );
//võimsused ühe mootori kohta.
effkokku=effkokku+eff;
soojuskokku=soojuskokku+soojus;
// printf("effkokku = %.2f\n\n",effkokku);
}

```

```
// andemete väljastamine

    //kogueffektiivsus effkokku/k

    effektiivus=effkokku/k; //keskmine efektiivsus
    kesksoojusW=soojuskokku/k; //keskmine soojus
    printf("effektiivus = %.2f\n\n",efektiivsus); // prindi efektiivsus
    fprintf(CopyZeiger,"effektiivus = %.2f\n\n",efektiivsus); //prindi faili efektiivsus
    fprintf(CopyZeiger,"keskmine soojus W = %.2f\n\n",kesksoojusW); // prindi faili soojus

}
```