



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

**JALGRATTA ELEKTROONILISE ÜLEKANDE
MODELLEERIMINE
MODELLING AND ANALYSIS OF ELECTRIC
TRANSMISSION FOR BICYCLES
BAKALAUREUSETÖÖ**

Üliõpilane: Taavi Karjel

Üliõpilaskood: 213722EAAB

Juhendaja: Martin Sarap, doktorant-
nooremteadur

Tallinn 2024

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

"13" mai 2024

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." 20.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....."20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Taavi Karjel

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Jalgratta elektroonilise ülekande modelleerimine,

mille juhendaja on Martin Sarap,

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

13. mai 2024

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

| | |
|--|----------------------------------|
| <i>Autor:</i> Taavi Karjel | <i>Töö liik:</i> Bakalaureusetöö |
| <i>Töö pealkiri:</i> Jalgratta elektroonilise ülekande modelleerimine | |
| <i>Kuupäev:</i> 13.05.2024 | <i>34 lehekülge</i> |
| <i>Ülikool:</i> Tallinna Tehnikaülikool | |
| <i>Teaduskond:</i> Inseneriteadusekond | |
| <i>Instituut:</i> Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut | |
| <i>Töö juhendaja:</i> doktorant-nooremteadur Martin Sarap | |
| <i>Sisu kirjeldus:</i> <p>Lõputöö eesmärgiks oli koostada elektroonilisele ülekandele sobilike komponentide nimekiri ja hinnata jalgratta elektroonilise ülekande potentsiaali tõhususe aspektist, võttes arvesse inimese füsioloogiat rattasõidul. Selleks koguti jalgrattasõidu kiirus- ja kõrgusandmed ning koostati tarkvaras Matlab Simulink plokk skeem, mis leiab kogutud andmete järgi elektroonilise ülekande tõhususe, energiasalvesti tühjenemise ning jalgratturi energiakulu.</p> <p>Elektrilise veomootori ja generaatori tõhusust hinnati kasutades valitud komponentidele koostatud tüüpilist tõhususgraafikut. Inimese füsioloogiast tulenevat tõhusust arvestati interpoleerides uurimustest pärinevaid andmeid.</p> <p>Leiti, et elektroonilise ülekandega sõites oleks salvestatud rattasõidu puhul kulunud ratturil 71 kcal rohkem energiat. Elektrooniline ülekanne andis ratturile energeetilise võidu vaid kindlatel tingimustel, näiteks sõites vastutuult 4 m/s. Seega järeldati, et sellisel kujul pole elektroonilise ülekande rakendamine jalgrattal mõistlik</p> <p>Edasistes töödes tasub uurida elektroonilise ülekande rakendamist kaubajalgratadel või kokkuklapitavatel jalgratadel, sest seal pole tõhusus kriitilise tähtsusega ning on eeliseid traditsioonilise kettülekandega võrreldes.</p> | |
| <i>Märksõnad:</i> jalgratas, ülekanne, Simulink, elektrooniline ülekanne, tõhusus, füsioloogia, bakalaureusetöö | |

ABSTRACT

| | |
|---|--|
| <i>Author:</i> Taavi Karjel | <i>Type of the work:</i> Bachelor Thesis |
| <i>Title:</i> Jalgratta elektroonilise ülekande modelleerimine | |
| <i>Date:</i> 13.05.2024 | 34 pages |
| <i>University:</i> Tallinn University of Technology | |
| <i>School:</i> School of Engineering | |
| <i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics | |
| <i>Supervisor:</i> Early Stage Researcher Martin Sarap | |
| <i>Abstract:</i> <p>The aim of this thesis was to create a list of components suitable for electronic transmission and to analyze the potential efficiency of electronic transmission for bicycles, considering human physiology during cycling. This involved collecting speed and altitude data from cycling by the author and developing a calculation schematic in MATLAB Simulink software to analyze the efficiency of electronic transmission, energy storage depletion, and cyclist energy expenditure based on the collected data.</p> <p>The efficiency of the driving electric motor and pedalgenerator was evaluated using efficiency graphs created for the selected components from their typical behaviour. Human physiological efficiency was considered by interpolating data from relevant studies.</p> <p>It was found that using electronic transmission would require a cyclist to use 71 kcal more energy compared to the conventional chain drive. The electronic transmission provided an energy expenditure advantage for the cyclist only under specific conditions, such as riding against a headwind of 4 m/s. Therefore, it was concluded that implementing electronic transmission on bicycles in the given scenario of a normal bicycle is not practical</p> <p>Future research should investigate the application of electronic transmission on cargo bikes or folding bikes, where efficiency is less critical and offers advantages over conventional chain drive.</p> | |
| <i>Keywords:</i> bicycle, electronic drive, Simulink, digital drive, efficiency, physiology, bachelor thesis | |

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Taavi Karjel, 213722EAAB

Õppekava, peeriala: EAAB16/17, Elektroenergeetika ja mehhatroonika.

Juhendaja: doktorant-nooremteadur Martin Sarap

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Jalgratta elektroonilise ülekande modelleerimine

(inglise keeles) Modeling and Analysis of Electric Transmission for Bicycles

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Validada põhjendatud komponendid elektroonilise ülekande jaoks
2. Leida elektroonilise ülekande mõju ratturi energiakulule
3. Arvutada elektroonilise ülekande tõhusus

Lõputöö etapid ja ajakava:

| Nr | Ülesande kirjeldus | Tähtaeg |
|----|---|------------|
| 1. | Elektrijalgrataste ülevaate, inimese rattasõidu füsioloogia kirjeldamine. | 29.02.2024 |
| 2. | Mudeli koostamine | 05.04.2024 |
| 3. | Arvutuste tegemine, analüüsimine ning järelduste tegemine | 20.04.2024 |
| 4. | Juhendajale esimesele ülelugemisele saatmine | 23.04.2024 |
| 5. | Paranduste tegemine | 27.04.2024 |
| 6. | Viimistletud töö esitamine | 13.05.2024 |

Töö keel: eesti keel

Lõputöö esitamise tähtaeg: "13" mai 2024a

Üliõpilane: Taavi Karjel ".....".....20.....a
/allkiri/

Juhendaja: Martin Sarap ".....".....20.....a
/allkiri/

Programmijuht: Marek Tull ".....".....20.....a
/allkiri/

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

| | |
|---|----|
| LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE | 4 |
| ABSTRACT | 5 |
| EESSÕNA | 8 |
| 1. SISSEJUHATUS..... | 9 |
| 2. TRANSPORT ELEKTRI- JA INIMJÕUL | 10 |
| 2.1 Elektrijalgratase nüüdistase | 10 |
| 2.2 Elektrijalgratta komponendid..... | 11 |
| 2.3 Elektrooniline ülekanne..... | 13 |
| 2.4 Inimese füsioloogia rattasõidul | 15 |
| 3. KOMPONENTIDE VALIK JA MODELLEERIMINE | 19 |
| 3.1 Mootor, generaator, aku ja kontrollid | 19 |
| 3.2 Elektroonilise ülekandega jalgratta mudel | 20 |
| 4. TULEMUSED | 25 |
| 4.1 Elektroonilise ülekande tõhusus | 26 |
| 4.2 Tõhusus inimese füsioloogia vaatepunktist | 27 |
| KOKKUVÕTE | 31 |
| KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU | 32 |
| LISAD | 34 |
| Lisa 1. Matlab Simulink plokkskeem..... | 34 |

EESSÕNA

Käesoleva bakalaureusetöö teema sõnastati töö juhendaja, doktorant-nooremteadur Martin Sarapi algatusel. Töö andmed pärinevad tootjate kataloogidest, elektrimootorite testidest ja inimese rattasõidu füsioloogia uurimustest. Töö käigus koguti arvutuste läbiviimiseks sõiduandmeid töö autori poolt.

Töö autor soovib tänada juhendajat Martin Sarap, kes abistas andmetega ning algatas uurimisteema sõnastuse.

1. SISSEJUHATUS

Tänapäeva rohelises transpordis on populariseerinud elektrimootoriga kergliikurid. Elektrimootorite ja energiasalvestite hea kättesaadavuse tõttu on elektrijalgrattad muutunud tänavapildis normaalsuseks. Samas on uute elektrijalgrataste juures püsima jäänud sajandite vanune tehnoloogia – kettülekanne, mis on väga tõhus kuid mitmete nõrkustega. Kettülekanne on kuluosa, seda peab hooldama ning põhjustab ketiõliga lagunematute ainete reostust looduses [1]. Lisaks sellele võib keti sisse takerduda ratturi riided või maas olevad oksad ning põhjustada kukkumisi.

Kuna ketiga on ülekande suhted fikseeritud ja tihti ka piiratud, ei saa see ratturile pakkuda alati kõige optimaalsemat sõitu. Uurimused on näidanud, et inimese tõhusus rattaga sõites sõltub mitmest faktorist: väntamise võimsus, väntamiskiirus ja sõiduasend. Elektroonilise ülekandega on võimalik pakkuda ratturile igal hetkel kõige optimaalsemat väntamiskiirust- ja võimsust, sest füüsilise ühenduse asemel tagaratta ja väntade vahel on reguleeritav generaator, energiasalvesti ning elektrimootor.

Elektroonilise ülekandega lahendataks eeltoodud nõrkused: ülekannete suhe on teoreetiliselt lõputu; ülekande süsteem on hooldusvaba; elektrimootor on suletud süsteem ning puudub reostus.

Töö kirjutamise hetkel on elektrooniline ülekanne vähelevinud lahendus. Ettevõtteid, mis toodavad taolise ülekandega jalgrattaid, on maailmas üksikuid ning üldiselt pakutakse kaubaveo jalgrattaid.

Teises peatükis võetakse inspiratsiooniks elektrijalgratta ülesehitus ning modelleeritakse süsteem, kus jalgrattal puudub mehaaniline jõuülekanne. Arvutuste peamine eesmärk on leida, kui palju energiat kulub elektroonilise ülekandega sõites võrreldes tavalise kettülekandega. Arvutustel kasutatakse autori kogutud sõiduanimeid, mis sisaldavad ühe rattasõidu hetkkiirusi ja tee tõusu.

Kolmandas peatükis võetakse arvesse inimese füsioloogiast tulenev tõhusus ning selle järgi arvutatakse rattasõidu jooksul kuluv energia. Samuti arvutatakse energiasalvesti (liitiumaku või superkondensaatori) tühjenemist ja laadimist.

Arvutuslik mudel koostatakse tarkvaras Matlab kasutades Simulink simulatsioonipaketti. Muutuvat tõhusust hinnatakse algandmeid interpoleerides. Leitakse, et elektrooniline ülekanne on ratturile energiakulult mõistlik ainult kindlates olukordades. Lisas 1 on esitatud koostatud mudeli plokk skeem.

2. TRANSPORT ELEKTRI- JA INIMJÕUL

2.1 Elektrijalgrataste nüüdistase

Elektrijalgrattad on levinud toode keskkonnasõbralikus ja tõhusas transpordisektoris. Aastal 2024 hinnati Euroopa elektrijalgratta turu suuruseks 17,85 miljardit eurot, mis eeldatavalt kasvab 2029. aastaks 26,99 miljardi euroni. Aastal 2022 müüdi 22 miljonit elektrijalgratast, suurim osa sellest Saksamaal [2].

Elektrijalgratadel on võrreldes teiste transpordivahenditega järgnevad eelised. Elektrijalgrattaga liiklemine on väga keskkonnasõbralik – kui kasutada auto asemel igapäevaseks liiklemiseks elektrijalgratast, saab üks inimene vähendada enda aastast süsihappegaasi heidet kuni 225 kg võrra [3]. Võrreldes tavalise jalgrattaga saab elektrijalgrattur pikema perioodi peale rohkem füüsilist koormust, sest sõidul saabub füüsiline kurnatus hiljem ning see innustab ratturit sõitma kaugemale ja rohkem [4]. Elektrijalgratas võrreldes tavalise jalgrattaga võimaldab rohkem sõita neil inimestel, kel on kehvem füüsiline vorm või muud terviseprobleemid [3]. Elektrijalgrattaga saab liigelda jalgrattateel, mida ei saa teha näiteks mootorrattaga.

Nõrkused on aga järgnevad. Elektrijalgratas on raskem kui tavaline jalgratas, seega see vajab rangemaid reegleid pidurdussüsteemile. Elektrijalgratas kiirendab kiiremini kui tavaline jalgratas, mis võib autojuhtidele ja jalakäijatele olla ootamatu – ohtliku olukorra tekkimine liikluses on suurem [3]. Jalgrattasõidu infrastruktuur ei ole igas asukohas piisav, et pakkuda sõitjale turvatunnet ja kiiret kohalejõudmist. Turvalised ja kvaliteetsed elektrijalgrattad võivad maksta mitu tuhat eurot, mis ei ole nii mõningale huvilisele rahaliselt võimekas [3].

Elektrijalgrattas kombineeritakse elektrimootorite tõhusus ning traditsiooniline jalgrattasõit. Enamik turul müüdavaid jalgrattaid on koostatud järgmistest osadest:

- Energiasalvesti: enamjaolt on elektrijalgrattal energiasalvestuseks liitium-ioon aku, mida paigaldatakse modulaarselt raamile, raami sisse, või ka näiteks sadulaposti sisse.
- Mootor: elektrijalgratastes kasutatakse üldiselt harjavabu alalisvoolumootoreid [5]. Need paigutatakse kas jalgratta keskjooksu asemele või ratta sisse (nii esi- kui ka tagaratta jooksu kohale). Ratta sisse ehitatud mootorid jagunevad veel nii: ülekandega ning ilma ülekandeta.

- Elektriabi: mõnedel turul saadaval olevatel elektrijalgratastes on keskjooksus olemas sensorid, mis mõõdavad väntamise jõudu ja/või kiirust. Selle järgi kontrollitakse elektrimootorit, mis siis abistab ratturit edasiliikumisel. Levinud on lahendus, kus abistamise tugevust saab reguleerida.
- Aku haldussüsteem: tarvilik on ka aku seisukorda jälgida. Selleks on kasutusel aku laetuse taset mõõtvad süsteemid ning nutikad laadijad.
- Ekraan ja juhtnupud: tihti on elektrijalgratastel olemas ekraan, millelt saab jälgida aku taset, kiirust ja muid olulisi mõõtmisi. Juhtnupud on selleks, et juhtida kiirusesätteid või sõidu abistamise sätet.

Elektrijalgratate valik on suur ning lahendusi pakutakse laiale tarbijaskonnale, kel võib olla tavapärasest erinev sõiduharjumus. Näiteks on Velomarket jalgrattapoes müügil järgnevad elektrijalgrattad: jämeda rehaviga linnajalgratas pakiraamiga; kahe- või kolmerattaline kastijalgratas; *gravelbike* ehk kruusal sõitmiseks mõeldud jalgratas; esi- ja tagarattavedrustusega maastikuratas; *fatbike* ehk eriti laia rehaviga maastikuratas liivas või mudas sõiduks.

Populaarsete ettevõtete elektrijalgratta sõiduulatused jäävad vahemikku 40 kuni 150 km, mis sõltub valitud aku mahtuvusest ning sõiduharjumustest. Selliseid sõiduulatusi lubavad näiteks tootjad Ampler Bikes, Giant ja Bosch.

2.2 Elektrijalgratta komponendid

Elektrijalgratta üks hinnalt kallis osa on aku. Hea massi ja energiamahutuvuse suhtega liitium-ioon aku võib maksta varuosana enam kui 300 eurot. Paigaldatakse erineva pingega akusid, enamasti 36 V kuni 52 V. Nõrgaks küljeks on akude puhul nende külmakindlus, mass (teevad jalgratta mõned kilogrammid raskemaks) ning mõnede jalgrataste tootjate puhul pole võimalik tarbijal iseseisvalt akut vahetada, sest need on disainitud raami sisse. Pliiakusid üldiselt jalgratastel ei kasutata. Neil on energiatihedus väiksem ja mass on liiga suur.

Selle töö raames uuritakse ka superkondensaatori potentsiaali elektrijalgratastel. Kondensaatoritel põhinevad elektrijalgrattad pole tänapäeval eriti levinud lahendus, kuid leidub ettevõtteid, kes sellist põhimõtet arendavad ja turundavad. Näiteks on kondensaatoritel põhineva elektrijalgratta välja arendanud prantsuse ettevõtte Pi-Pop, kes lubab jalgratturile liikumist alustades või tõusul sõites lühikest elektrilist abi [6]. Peale selle on kondensaatoritega katsetanud ka ettevõtte Anod, kes on koostanud nii-öelda hübriidjalgratta – kasutusel on liitiumaku ning superkondensaatorid koos [6], [7].

Superkondensaatorite eelistest räägib järgnev lõik.

Kondensaatori eluiga on pikem – energia salvestatakse laengute näol elektrostaatiliselt ning see ei tingi materjalide kulumist kondensaatoris. Liitiumakus salvestatakse energia aga elektrokeemiliselt ning elektrolüütide lagunemine ja energiamahuvuse langemine iga laadimistsükliga on paratamatu. Kondensaatori eluiga võimaldab üle miljoni laadimistsükli, liitiumaku loetakse ära kasutatuks ligikaudu kümne tuhande laadimistsükli täitudes [8]. Kondensaatoritel on laiem töötamise temperatuurivahemik. Kui liitiumaku energiamahuvus väheneb märgatavalt $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ juures ning ülekuumenemine toimub temperatuuril $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, siis kondensaator töötab temperatuuridel $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ kuni $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ [8]. Kondensaatorid on tõhusamad – tänu väiksemale sisetakistusele muutub kondensaatoris vähem energiat soojuseks [8]. Liitiumakude tõhusus on üldiselt alla 90% kuid kondensaatorid on kuni 98% tõhusad. Liitiumakud on märgatavalt süttimis- ja plahvatusohtlikumad [8]. Võimsus – superkondensaatorid võimaldavad ligi sada korda kiiremat laadimist ja tühjenemist.

Siiski on enamik elektrijalgrattad liitiumakuga, mille eelised on järgmised: energiamahuvus – liitiumakude energiatihedus on palju suurem. Näiteks tippklassi liitiumaku energiatihedus on 650 Wh/l ning superkondensaatoril 10 Wh/l [8]; liitiumakud tühjenevad iseeneslikult vähem. Kuu aja jooksul kaob liitiumakus ligikaudu 10% salvestatud energiast. Kondensaator tühjeneb sama aja jooksul ligi 30% [8]. Samas on superkondensaatorid loodussõbralikumad, sest nende tootmiseks ei ole tarvis haruldasi metalle ning kondensaatoreid saab suures mahus taaskäidelda.

Nagu eelnevalt mainitud, kasutatakse elektrijalgratustes enamasti harjavaba alalisvoolumootoreid. Esimestel elektrijalgratastel kasutati ka harjadega alalisvoolumootoreid, kuid nende mehaaniline kulumine ja suurem energiakadu jäi ajale jalgu. Alalisvoolumootorite karakteristikud pakuvad jõulist pöördemomenti ning täpset kiiruse juhtimist.

Jalgratastel paigaldatakse mootor kas tagajooksu kohale, esijooksu kohale või keskjooksu kohale. Esijooksu sisse paigaldatud mootoriga on hooldus küll lihtsam, kuid esivedrustusele lisatud mass suurendab sõitmisel juhtimise etteaimatamatust [9], mistõttu selle kasuks siin uurimuses ei otsustata.

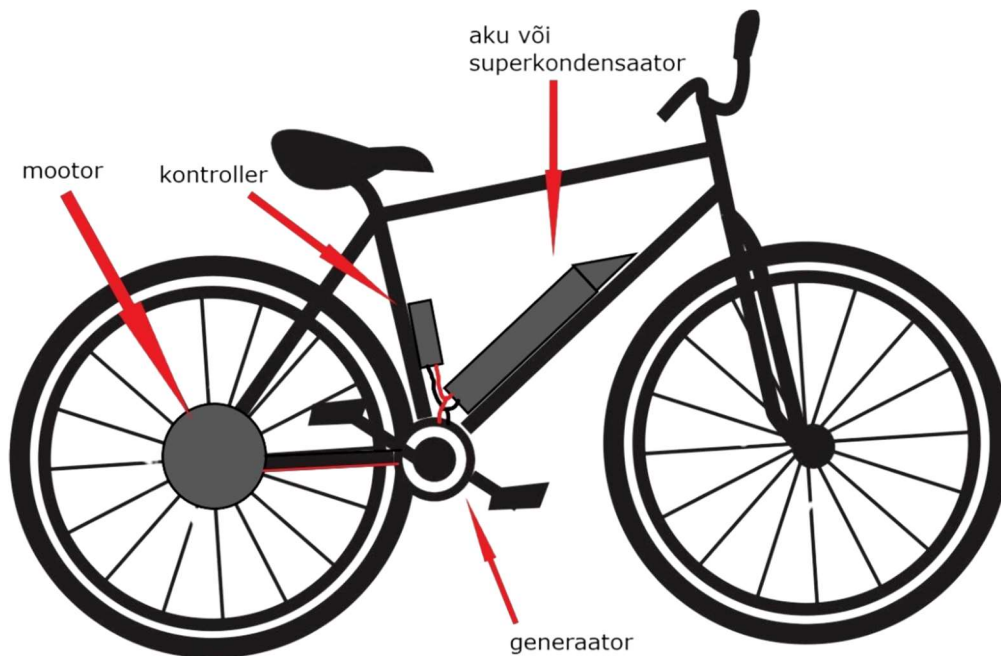
Tagajooksu sisse paigaldatud mootoriga on jalgratas stabiilsem, kuid tagaratta hooldus on märksa keerulisem [9]. Kuid elektroonilise ülekande puhul ei mõjuta tagarattas olev mootor hooldust, sest ketiga ei pea tegelema.

Viimaste aastate jooksul on populaarsemaks muutunud ka keskjooksule paigaldatud mootoriga lahendus. Suurim erinevus eelnevatest on see, et jõudu ei rakendata rattale, vaid jalgratta väntade pöörlemisele, millega säilitatakse loomulik sõidukogemus [9]. Samas on see süsteem keerukam ja kallim.

Selle uurimuse kontekstis kasutatakse keskjooksu mootorit generaatorina ning vedav mootor planeeritakse tagajooksu sisse.

Erinevusena praegu turul levinud elektrijalgratatest on elektroonilise ülekandega jalgrattal täielikult puudu füüsiline ühenduslüli vântade ja tagaratta vahel. Põhikomponendid on järgmised (Joonis 2.1):

- Generaator keskjooksu kohal
- Elektrimootor tagajooksu sees
- Kontroller
- Energiasalvesti (kas liitiumaku või superkondensaatorid)



Joonis 2.1 Elektroonilise ülekandega jalgratta põhikomponendid [10]

2.3 Elektrooniline ülekanne

Elektroonilise ülekandega jalgratta tööpõhimõte on:

1. Jalgrattur vântab, mis genereerib vântadega ühendatud generaatoris elektrit.
2. Generaatoris tekkiv elekter on signaaliks kontrollerile.
3. Vastavalt olukorrale otsustatakse kontrolleris, kuhu elektrivool generaatorist liigub – energiasalvestisse või otse mootorisse. Samuti antakse käsk aku või kondensaatori juhtimiseks – kas toimub laadimine või tühjenemine.

Nii antakse jalgrattale edasiviiv jõud elektrimootorist ilma füüsilise kett-ülekangeta. Sellisel lahendusel oleks füüsilise ülekanne üle mitu eelist:

- Ülekandesüsteemil ei ole tarvis hooldust. Üldiselt on harjavabad elektrimootorid tehasesst suletud süsteemid, mis ei nõua kasutades varuosade vahetust. Jalgratta ketti aga tuleb puhastada, õlitada ning iga 3000 km läbisõidu järel vahetada.
- Lõputu ülekanne suhete valik - kui traditsioonilisel jalgrattal on tavaliselt 3, 9 või 12 käiku, siis generaatorit ja mootorit saab lõputult varieerida. Samuti on hammasrattad füüsilisel ülekannel kuluosad.
- Müra - elektrooniline ülekanne on eeldatavalt vaiksem kui kettülekanne.

Elektroonilise ülekandega saaks vältida kettülekanne mitmeid nõrkkohti:

- Turvalisus - kettülekanne võivad takerduda jalgratturi riided või sõidutrajektoril olevad objektid (puuoksad, taimed vms) ning tekitada ohtliku olukorra. Samuti võib jalgratturit vigastada keskjooksul pöörlevad hammasrattad, mis on teravad. Vananenud ja hooldamata jalgrattakett võib sõidu ajal puruneda ning põhjustada kukkumise.
- Mitmed jalgratta ketiõlid sisaldavad polütetrafluoroetüleenit, mis on inimesele mürgine ja keskkonnale kahjulik aine. PTFE laguneb väga aeglaselt, saastab vett ning püsib loomade ja inimeste organismis [11].
- Kettülekanne tõhusus ei ole püsiv. Jalgrattakett kuludes venib ning sellepärast tõhusus langeb.
- Jalgrattakett on kuluosa ning väljavahetatud kett ei pruugi jõuda taaskäitlemisse. Sama probleem on aktuaalne ka hammasrattaste puhul, mis samuti on kuluosad.

Kõige olulisem eeltoodud voorustest on siiski hooldusvaba töö. Näiteks vähendaks see oluliselt renditeenuse pakkuja hoolduskulusid rendielektrijalgratate ülalpidamisel.

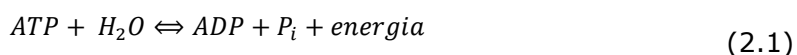
Siiski on elektroonilisel ülekannel ka negatiivseid külgi võrreldes traditsioonilise ülekandega elektrijalgrattaga. Esiteks on selle juhtimissüsteem märgatavalt keerulisem ja kallim. Teiseks on tarvis kaks elektrimasinat (mootor ja generaator), mis samuti suurendab jalgratta hinda aga ka massi.

2.4 Inimese füsioloogia rattasõidul

Inimese lihasjõu kasutamist saab vaadata kui sisepõlemismootori analoogi. Inimese puhul on kütuseks toit ja jook, millest kasulik energia läheb jalgratta vântade ringi ajamisele ning ülejäänud energia kehasoojuseks. Sarnaselt sisepõlemismootorile läheb ka inimesel 20 kuni 30% kasutatud kütusest jalgratta edasiviimiseks [12].

Siit selgub ka elektroonilise ülekande üks võimalik suur tugevus – nimelt saab energiasalvestiga aidata jalgratturil ületada sõidutrajektoori osa, kus nõutud vântamisvõimsus on väga kõrge. Suure tõusu puhul peab jalgrattur vântama võimsusega 500 W või enam ning isegi tugev jalgrattur peaks vastu sellele vaid paar minutit [12].

Lühiajaliste suurte pingutuste ajal on lihase peamiseks tarbeks ATP (adresiintrifosfaat), mille energia vabanemist kirjeldab valem 2.1 [13].



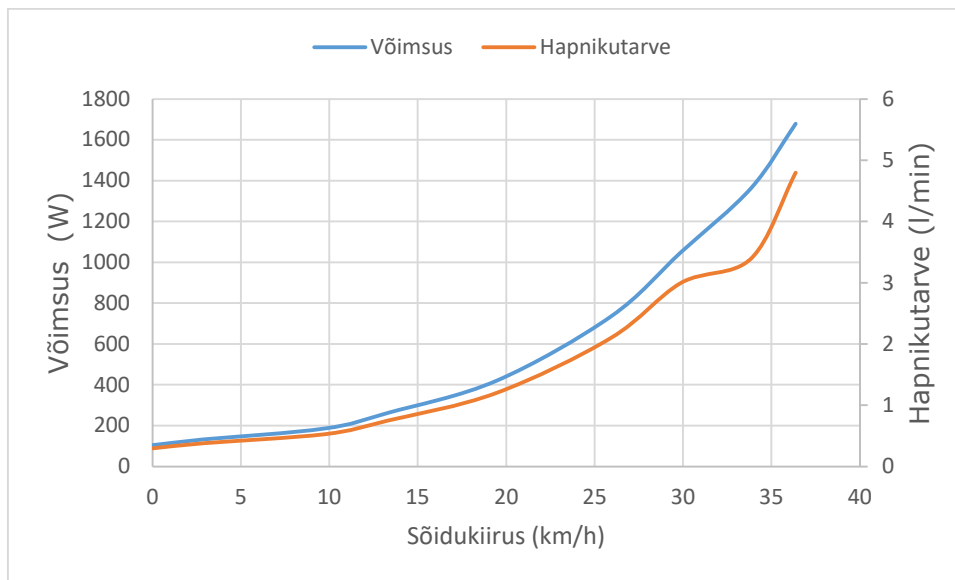
kus P_i on anorgaaniline fosfaatgrupp.

ATP energia vabaneb hüdroolüüsis, kusjuures on see protsess tagastatav (et taastada ATP varud.) Standardtingimustel vabaneb ühe mooli ATP hüdroolüüsis 7,3 kcal energiat.

Pikema (tund ja enam) lihaselise pingutuse jaoks kasutab keha glükoosi. Aeglasemalt glükoosi tarbides jõuab lihastesse enam energiat kui kiiresti kasutades [12]. Kui lihased on pikemaajaliselt suure koormuse all, saab lihastes salvestatud ATP varu otsa ning energiat hakatakse kasutama kiiret glükoosi reaktsiooni, mis on ebatõhus (lihastesse jõuab sel puhul vaid seitse protsenti energiast [12]). Elektrooniline ülekanne võiks selle järgi tõhustada inimese energiatarbimist pakkudes ratturile ühtlase vântamiskoormuse, mis ei vii lihaseid anaeroobsesse seisundisse, kus keemilise energia muundamine on ebatõhus.

Inimese energiatarvet saab vântamisel hinnata kas efektiivsuskordajaga ligikaudu 25% (ehk jalgrattal tehtud füüsiline töö on neljandik kulutatud energiast) või ka hapnikutarbega. Antud tõhusus tuleneb tõsiasjast, et ATP süntees on 50% tõhus ning ATP kasutamine lihase aktiveerimiseks on samuti 50% tõhus [12]. Kuna inimeses muudetakse keemiline energia mehaaniliseks energiaks ja soojuseks, siis see energia tuleb suures osas oksüdatsiooniprotsessidest (inimesel on ka tugeva lühiajalise lihaspingutuse jaoks olemas ATP varu, mille rakendamine hapniku ei vaja) [12]. Seega on sissehingatav hapniku hulk otseselt seotud tarbitud energiaga. Joonisel 2.2 on väljatoodud seos võimsuse, kiiruse ja hapnikutarbe vahel.

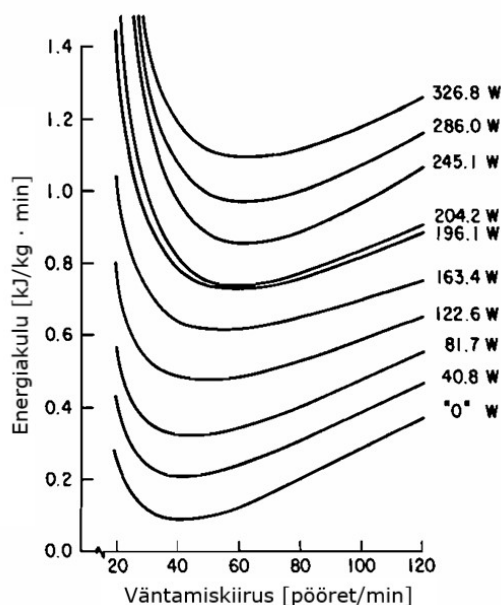
Jooniselt 2.2 selgub, et energiatarvet jalgrattasõidul saab hinnata hapnikutarbe järgi. "Võimsus" on mehaanilise võimsuse, mis on rakendatud jalgrattal ja ratturi kehasoojuse võimsuse summa. Hapniku ja õhu tarbimine on toodud ühikus liitrit minuti kohta.



Joonis 2.2 Õhutarbimine ning inimese väljundvõimsus erinevatel sõidukiirustel [12]

Samuti on seotud inimese energiatarve ka väntamiskiirusega. Jalgratta ergomeetri uurimuses selgitati välja, et iga mehaanilise väljundvõimsuse korral on olemas kõige optimaalsem väntamiskiirus [14].

Elektroniline ülekanne võimaldab jalgratturile pakkuda pidevalt optimaalset väntamiskiirust, vähendades energiatarvet. Energiakulu sõltuvust väntamiskiirusest kirjeldab joonis 2.3.



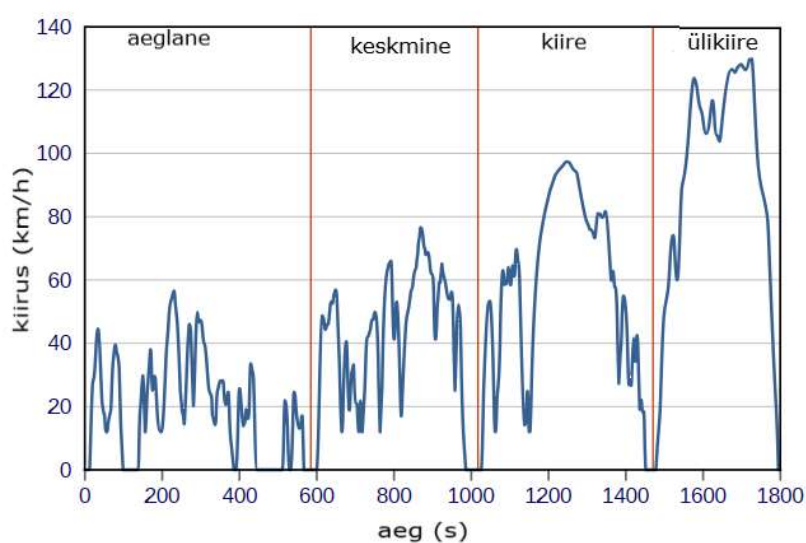
Joonis 2.3. Inimese energiakulu erinevatel vääntamisvõimsustel ja -kiirustel [14]

Joonise 2.3 vertikaalteljel on inimese energiakulu keha massi ühiku kohta minutis. Horisontaalteljel on vääntamiskiirus ühikuga pöret/minutis. On selge, et iga võimsuse kohta on kindel optimaalne vääntamiskiirus, mis asub U-kujulisel kõveral kõige madalamal, ning võimsuse kasvades kasvab ka optimaalkiiruse suurus. Optimaalsetel vääntamiskiirustel ning erinevatel võimsustel esinevad inimese tõhususmäärad on toodud tabelis 2.1.

Tabel 2.1 Inimese tõhusus optimaalsel vääntamiskiirusel [14]

| Väljundvõimsus (W) | Optimaalne vääntamiskiirus (pöret/min) | Inimese tõhusus (%) |
|--------------------|--|---------------------|
| 40,8 | 42 | 15,4 |
| 81,7 | 46 | 19,2 |
| 122,6 | 50 | 20,9 |
| 163,4 | 54 | 21,9 |
| 196,1 | 58 | 21,4 |
| 204,2 | 59 | 22,6 |
| 245,1 | 61 | 23 |
| 286 | 62 | 23,4 |
| 326,8 | 64 | 23,6 |

Selleks, et hinnata kettülekanedega ja elektroonilise ülekanedega jalgrattaga sõitmist, on vaja simuleerida realistliku sõidu andmeid. See tähendab, et läbitav trajektor pole ühtlase kallakuga ning sõidukiirus on muutuv. Antud uurimuses võetakse eeskujuks sõiduauto kütusekulu või sõiduulatus hindamise süsteem (Joonis 2.4.)



Joonis 2.4 WLTC sõiduauto kütusekulu hindava süsteemi graafik [15]

Euroopas kasutatakse sõiduautode heitgaaside ja kütusekulu hindamiseks sõidutsükli WLTC, mida rakendatakse välitingimustes sõites. WLTC on osa Euroopa Liidu ja muude panustanud riikide poolt väljatöötatud sõiduki testimise protseduurist WLTP. Sõidutsükkel on koostatud reaalseste sõiduandmete järgi ning on loodud maailma universaalseks sõiduautode testimiseks [16]. Vastavalt WLTP protseduurile saab autotootja hinnata oma sõiduki vastavust näiteks Euroopa või Jaapani nõuetele. Sõiduautosid testitakse vastavalt WLTC sõidutsükli laboris dünamomeetri peal, kus mõõdetakse kütusekulu, heitgaase või ka näiteks elektriauto sõiduulatust.

Jalgrattasõidu analüüsimiseks kaasatakse mõjutavate faktorite alla ka tee kalle, sest see muudab liikumiseks vajalikku võimsust olulisel määral. Näiteks on kaheprotsendilise tõusuga teel sõitmiseks kiirusel 4 m/s tarvis 80 W, samas kui kaheksaprotsendilise tõusuga teel on samal kiirusel tarvis ligikaudu 260 W.

3. KOMPONENTIDE VALIK JA MODELLEERIMINE

3.1 Mootor, generaator, aku ja kontrollid

Mootori valikul võetakse arvesse järgmisi põhimõtteid:

- Maksimaalne nimivõimsus, millega sõiduk kuulub jalgratta nimetuse alla on 250 W. Vastavalt liikluseadusele on võimsama elektrimootoriga sõidukid mootorsõidukid ning siis on tegu kas mopeedi või mootorrattaga ning see ei kuulu uurimisteema alla [17].
- Tähtis on kõrge tõhusus. Kuna elektroonilises ülekandes on kadude allikaid rohkem, peab iga komponent olema võimalikult tõhus.

Veomootoriks valiti Saksa ettevõtte Neodrives tagaratta mootor Z20, mille tootjaandmed on sellised: nimivõimsus 250 W, maksimaalne hetkeline võimsus kuni 700 W (võimsuse varu võimaldab jalgrattal ületada lühikesed suure tõusuga teelõigud); optimaalsete sõiduparameetrite juures tõhusus 85%; võimaldab regeneratiivset pidurdamist; patenteeritud täpne sensorjuhtimine (võimaldab teha jalgratta sõidutunnetuse sujuvaks); nimipinge 36 V, mis on levinud pingetase elektrijalgrataste puhul [18].

Generaatori valikul oli samuti oluline tõhusus, kuid siinkohal peab arvestama ka mõõtmetega. Generaator peab olema õige kujuga ja kompaktne, et see mahuks keskjooksu kohale ning sõites ei kraabiks vastu maad. Üldiselt ei sobi tagarattasse paigaldatavad mootorid kasutusele keskjooksu kohale, sest on liiga suured.

Kuna keskjooksu generaatorid on elektroonilise ülekande vähese leviku tõttu raskesti kättesaadavad, valiti Bafangi keskjooksu mootor BBS01, mida rakendatakse arvutustes generaatorina. BBS01 mootori andmed on testide järgi sellised: maksimaalne tõhusus 89,7%; nimivõimsus 250 W (eeldatavalt jalgrattur seda üle ei koorma); nimipinge 36 V (sobib kokku valitud mootori ja akusüsteemiga) [19].

Meenutades komponentide ülevaates energiasalvestite ökoloogilist tausta, arvutatakse mudel läbi nii superkondensaatorite kui ka liitiumaku lahenduse puhul. Liitiumaku valikuks osutus kümme Samsungi 25R 18650 elementi, mis jadaühenduses annavad väljundpingeks 36 V. Samsungi 25R aku võimaldab ka järjepidevalt kuni 20 A voolu, mis on piisav valitud komponentide jaoks (näiteks generaatori maksimaalne vool on 18 A) [20].

Superkondensaatori lahendusena valiti Skeletontech Skelcap seeria. Kondensaatori komplekt on 13-st superkondensaatorist, mille salvestusvõime paralleelühenduses on 46,8 Wh energiat.

Vedavat mootorit juhtima valiti ilma tootjanimeta pooljuhtidel põhinev kontrolleri. Selle nimisuurused on järgmised [21]:

- Juhitav tööpinge 12-36 V
- Maksimaalne töövool 15 A

Tõhususe kohta andmed antud kontrolleri puuduvad, kuid edaspidi eeldatakse, et see töötab 95%-lise tõhususega, mis on pooljuht mootorite kontrolleri puhul tavaline [22].

3.2 Elektroonilise ülekandega jalgratta mudel

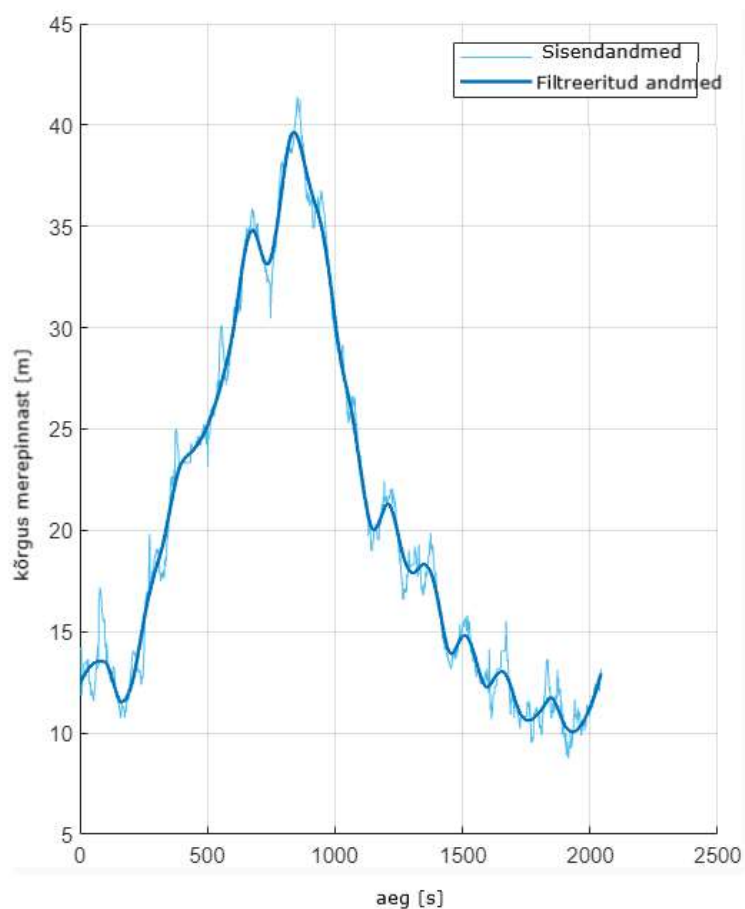
Selleks, et arvutustes simuleerida reaalse jalgrattasõidu parameetreid, kogus töö autor andmeid. Kasutades mobiiltelefoni GPS-i koguti rakendusega SpeedTracker [23] 7-kilomeetrise trajektooriga rattasõidu andmed. Rattasõidu tingimused olid järgmised: tuulevaikne ilm (maksimaalne tuulekiirus puhanguti 2 m/s), puudusid sademed ning sõiduvahendiks oli 7-käiguline meesteratas.

Koguti järgmised andmed: läbitud teepikkus; hetkkiirus sekundikaupa; GPS koordinaadid sekundikaupa ja kõrgus merepinnast sekundikaupa.

- Läbitud teepikkus
- Hetkkiirus sekundikaupa
- GPS koordinaadid sekundikaupa
- Kõrgus merepinnast sekundikaupa

Kuna GPS-i kõrgusandmed olid üpris mürarikkad (kõrgus merepinnast kõikus ühe sekundiga poole meetri suuruses), järgnes andmete filtreerimine tarkvaras Matlab. Kasutati lokaalsete kaaludega lineaarset regressiooni silumiskoeffitsendiga 0,05, mis filtreeris kõrgusandmetest ära hetkelised ebarealistlikud kõrguse hüpped.

Kasutatud filtreerimismeetod andis autorile soovitud tulemuse, kus kõrgus ei muutunud kahe mõõtepunkti vahel ebarealistlikus suuruses. Samas säilitati lühemad tõusud ja langused.



Joonis 3.1. Kõrgusandmete filtreerimine Matlab keskkonnas.

Kõrgusandmete ja läbitud teepikkuse järgi arvutati iga mõõtmishetke kohta tee tõus protsentides.

Koostatud Matlab Simulink mudel põhineb ühtlase kiirusega liikumise füüsikal, mida rakendatakse iga sekundi sõiduandmete kohta. Ratastel väljenduv hetkeline mehaaniline võimsus on funktsioon jalgratta liikumiskiirusest (valem 3.1).

$$P_{ratas} = f(v) \tag{3.1}$$

kus P_{ratas} – jalgratta rattal väljenduv hetkeline mehaaniline võimsus (W)

v – jalgratta liikumiskiirus (m/s)

Jalgratturile mõjub sõiduajal takistavalt kolm peamist jõudu:

1. Raskusjõud F_G , mis väljendab tee tõusu mõju sõidukoormusele (valem 3.2)
2. Veeretakistus F_v (valem 3.3)
3. Õhutakistuse jõud F_d (valem 3.4)

Takistavad jõud arvutatakse mudelis vastavalt etteseadud lähteandmetele järgmiselt [24]:

$$F_G = g \cdot \sin \left[\arctan \left(\frac{K}{100} \right) \right] \cdot W \quad (3.2)$$

kus g - Maa raskuskiirendus (m/s^2)

K - tee tõus protsentides (läbitud kõrguste vahe suhe läbitud teepikkusesse)

W - jalgratturi ja jalgratta masside summa (kg)

$$F_v = g \cdot \cos \left[\arctan \left(\frac{K}{100} \right) \right] \cdot W \cdot C_{rr} \quad (3.3)$$

kus C_{rr} - veeretakistuse koefitsent (sõltub jalgratta rehvidest)

$$F_d = 0,5 \cdot C_d \cdot A \cdot \rho \cdot v_{as}^2 \quad (3.4)$$

Kus C_d - õhutakistuse koefitsent

A - jalgratturi ning jalgratta eesmine pindala (m^2)

ρ - õhu tihedus (kg/m^3)

v_{as} - vastu puhuva tuulekiiruse ja jalgratta liikumiskiiruse summa (m/s)

Analüüsiks valitud konstandid ja muud lähteandmed on toodud tabelis 3.1.

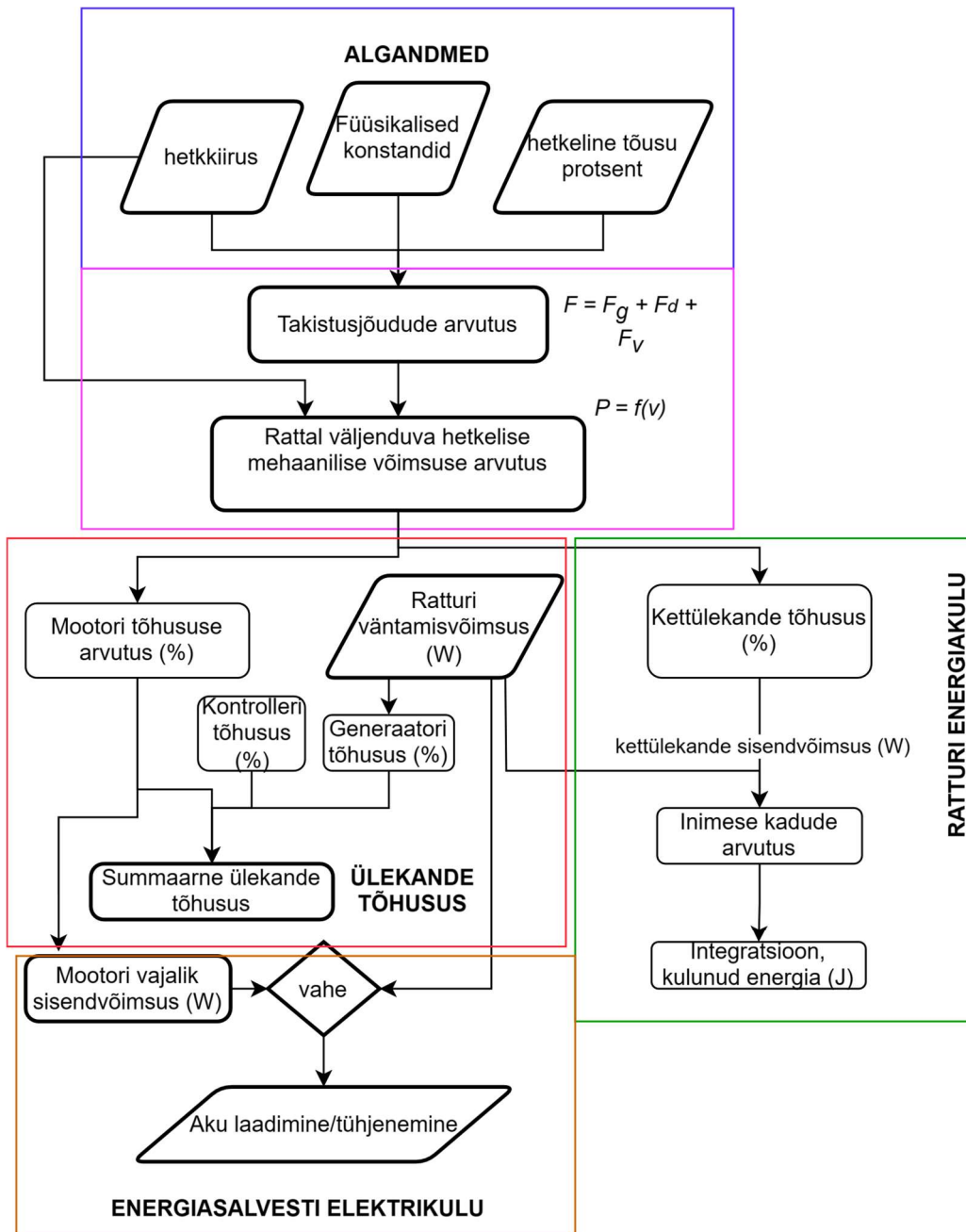
Tabel 3.1 Analüüsi lähteandmed.

| mass W [kg] | | raskuskiirendus g [m/s^2] | veeretakistuse koefitsent C_{rr} [-] | õhutakistuse koefitsent $C_d A$ [-] | õhu tihedus ρ [kg/m^3] | vastutuule kiirus [m/s] |
|---------------|--------|------------------------------------|--|---|------------------------------------|-----------------------------------|
| jalgratas | rattur | | | | | |
| 15 | 80 | 9,81 | 0,012[25] | 0,391[26] | 1,293 | 0 |

Veeretakistuse koefitsent on võetud maastikujalgrataste rehviuuringust ning on keskmine arvestades jalgratturi massiks 80 kg ning sõitu üle mitut tüüpi teekatet.

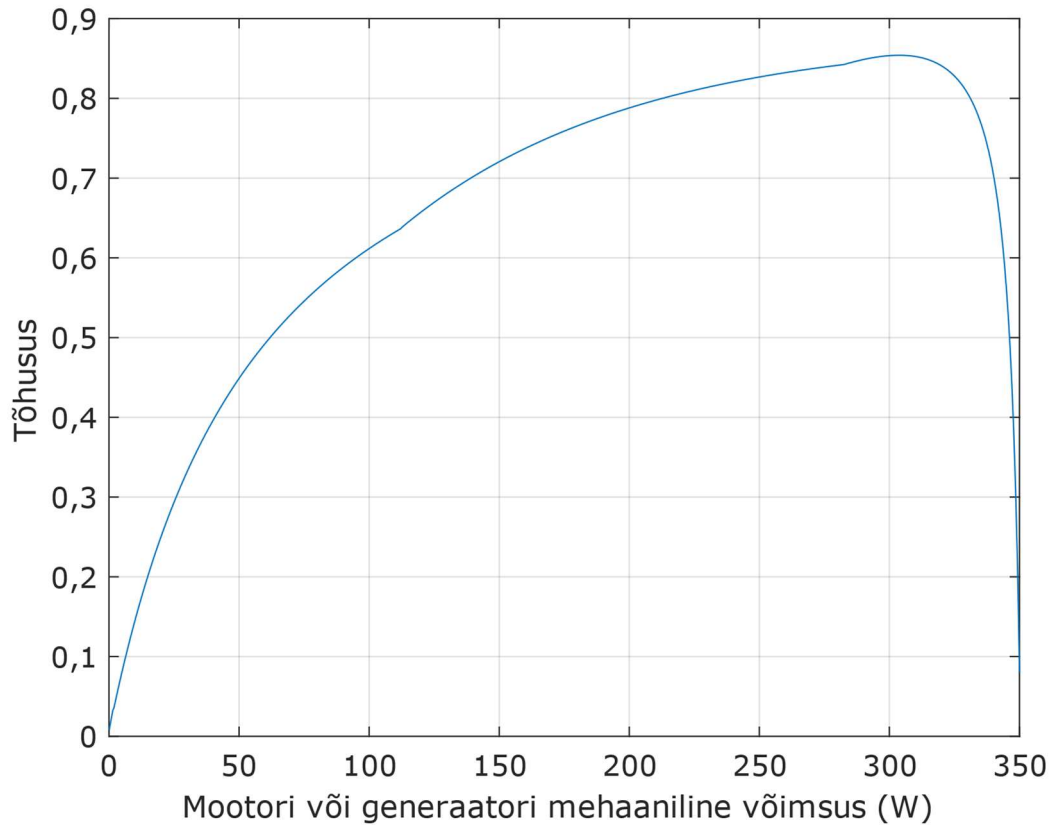
Märkus: tabelis olev õhutakistuse koefitsent C_dA tähistab koefitsenti, mis on algandmetes eelnevalt läbikorrutatud jalgratturi eesmise pindalaga A . Õhutakistuse koefitsent leitakse üldiselt katseliselt õhutunnelis.

Mudeli arvutamislõogikat kirjeldab plokk skeem joonisel 3.2.



Joonis 3.2. Matlab Simulink jalgratta mudeli arvutamislõogika plokk skeem

Mootori ja generaatori tõhusus muutub vastavalt rakendatavale võimsusele. Selleks, et hinnata tõhusust erinevates olukordades, koostati tõhususkarakteristik vastavalt tüüpilistele andmetele (joonis 3.3) [27].



Joonis 2.3. Vastavalt tüüpilistele mootori omadustele koostatud mootori ja generaatori tõhususgraafik [19].

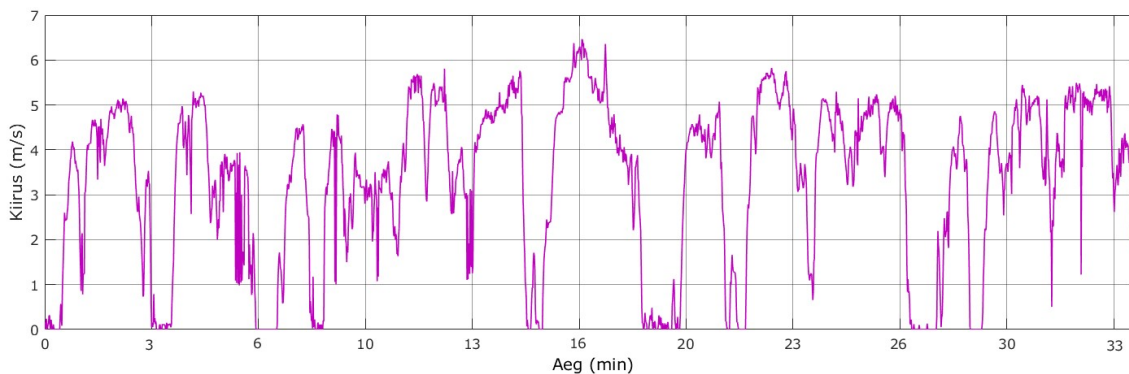
Interpoleerides tõhususandmete tabelit leitakse igal ajahetkel vastavale väljundvõimsuse väärtusele mootori või generaatori tõhusus, mille järgi arvutatakse kas mootorisse sisenev või generaatorist väljuv elektrienergia.

Inimese tõhusust arvestati samuti interpoleerides algallikast hangitud andmepunkte (tabel 2.1). Võrdlemiseks eeldati, et elektroonilise ülekandega sõitev rattur väntab igal juhul optimaalse väntamiskiirusega ning kettülekanedega on inimese tõhusus on igal võimsustasemel 3 protsendipunkti madalam optimaalse väntamisega tõhususest, et arvestada piiratud ülekannete valikut.

Matlab Simulink mudeli arvutamise plokk skeem on nähtav lisan 1.

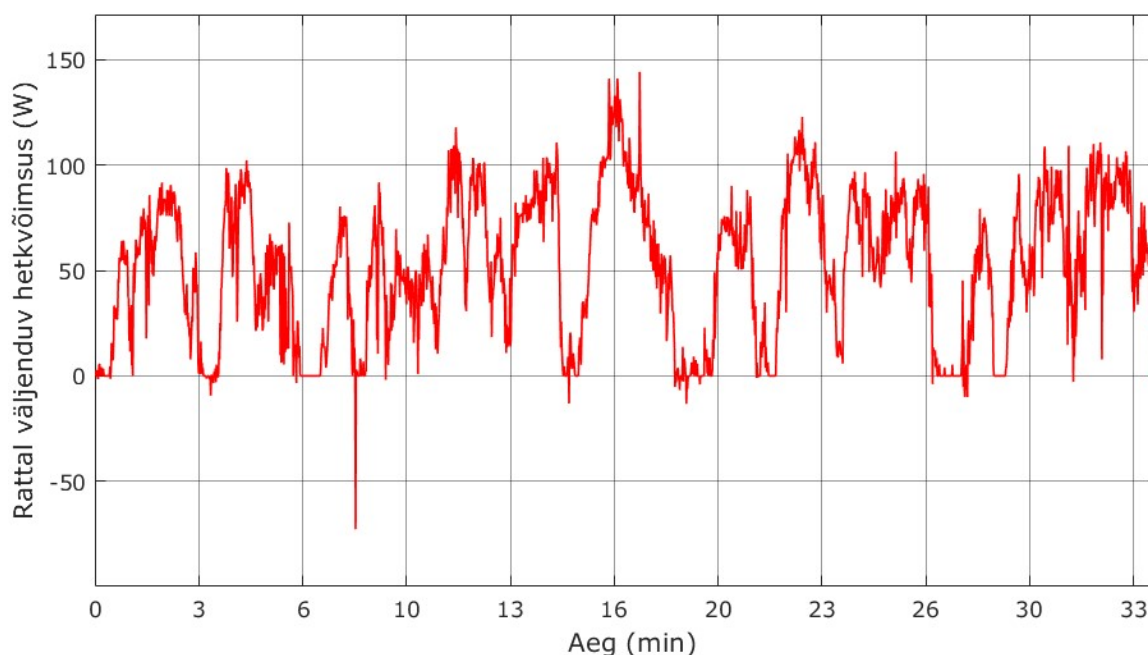
4. TULEMUSED

Arvutused viidi läbi joonisel 4.2 toodud kiirusgraafiku alusel, mis põhineb GPS rakendusega töö autori kogutud rattasõidu andmetel. Kiirused on linnas jalgrattaga sõites tavapärased, kus maksimaalne kiirus jäi alla 26 km/h ning keskmine kujunes 14 km/h.



Joonis 4.2 Arvutuste aluseks olev sõidukiiruse graafik.

Ülekande arvutuste põhjaks olev rattal väljenduv mehaaniline hetkvõimsus ajas on esitatud joonisel 4.1. Võimsus arvutati vastavalt valemitele 3.1, 3.2, 3.3 ning 3.4.

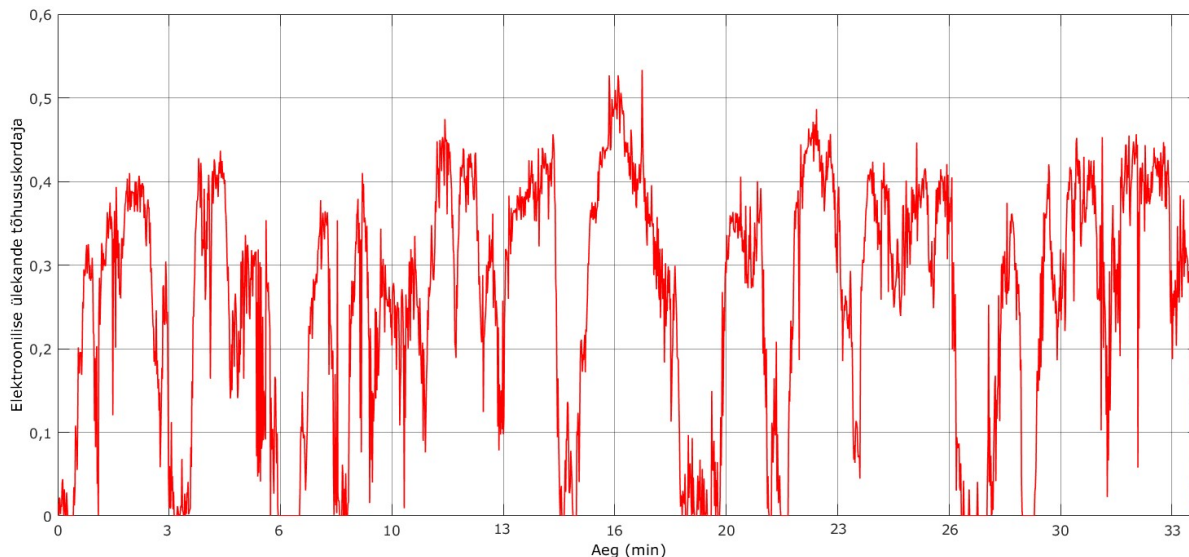


Joonis 4.1 Jalgrattal väljenduv mehaaniline hetkvõimsus ajas.

Näidissõidu andmete põhjal arvutatud võimsusgraafik näitab, et maksimaalne võimsus jäi alla 150 W. Keskmine võimsus oli 51 W. Esineb ka negatiivseid võimsusi, mis väljendab seda, et vastava teelõigu juures on languse tõttu vaja pidurdada.

4.1 Elektroonilise ülekande tõhusus

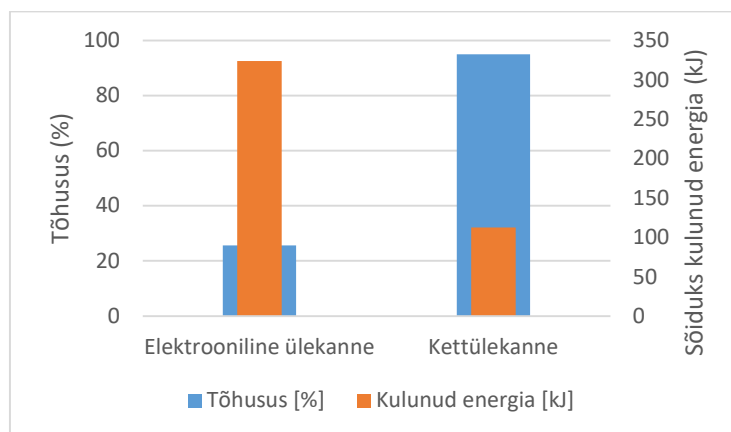
Järgnevalt arutati uuritava ülekandesüsteemi summaarne tõhusus, mis koosnes generaatori, veomootori ja kontrolleri energiakadudest. Elektroonilise ülekande kogutõhusus ajas on kujutatud joonisel 4.3.



Joonis 4.3 Elektroonilise ülekande tõhusus ajas.

Jooniselt 4.3 on näha, et võrreldes kettülekande konstantse tõhususega 95% on elektroonilise ülekande tõhusus märgatavalt madalam. Maksimaalne tõhusus 50% saavutati kõige võimsamal rattasõidu hetkel, mil rattal väljenduv võimsus oli ligikaudu 150 W. Kui rattal väljenduvale mehaanilisele võimsusele lisati igal ajahetkel 50 W, oli maksimaalne tõhusus 60%. Sellise tavapärase koormusega jalgrattasõit ei ole elektroonilise ülekande puhul optimaalne. Keskmiseks tõhususeks kujunes vaid 25,6%, mida vähendab tugevalt madala koormusega sõidu osad. Tõhususe mediaan oli 29%.

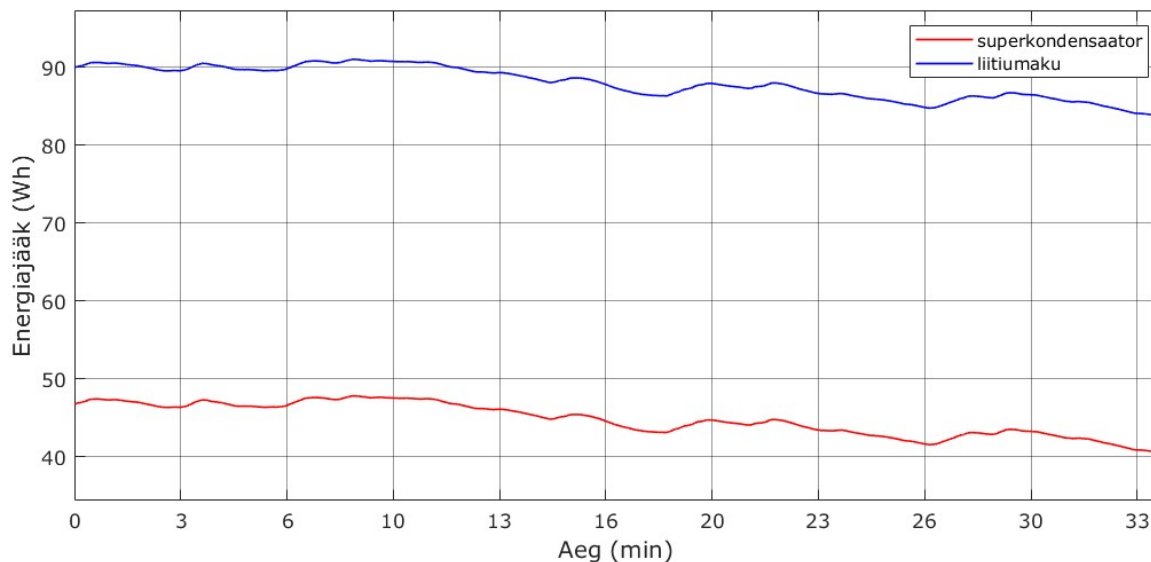
Kettülekande ja elektroonilise ülekande võrdlus on toodud joonisel 4.4.



Joonis 4.4 Elektroonilise ülekande ja kettülekande võrdlus.

Võrreldes kettülekanedega kuluks väntadel kokku 2,9 korda rohkem energiat. Kettülekanedega sõidul kulub 112 kJ mehaanilist energiat ning elektroonilise ülekanedega sõites 324 kJ energiat. Elektroonilise ülekanede väiksem tõhusus ei ole üllatav, sest kadude allikaid (mootor, generaator, kontrolleri) on rohkem.

Energiasalvesti energiakulu on kujutatud joonisel 4.5.



Joonis 4.5 Energiasalvesti kasutamise graafik.

Antud jalgrattasõiduga tühjeneks energiasalvesti 6 Wh, mis on ligikaudu 5 kcal. Seega valitud energiasalvestistest sobivad mõlemad (liitiumaku ja superkondensaator). Järelikult arvestades eelnevalt mainitud superkondensaatori eeliseid üle liitiumakude saab sellise jalgratta puhul neid rakendada. Ühe laadimisega võib jätkuda energiat vähemalt viieks identseks rattasõiduks.

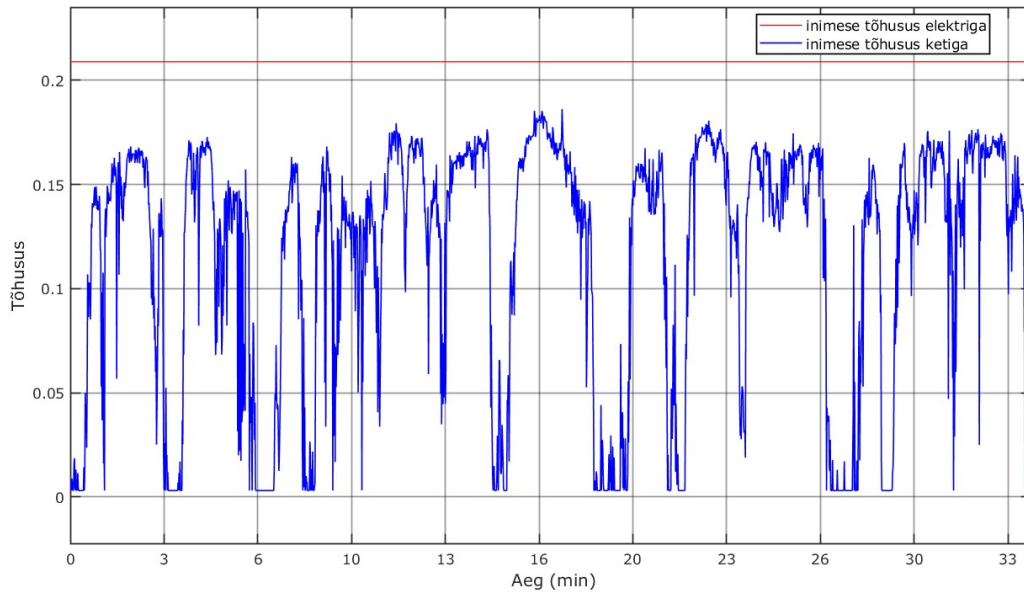
4.2 Tõhusus inimese füsioloogia vaatepunktist

Mudeli arvutamisel võrreldi kettulekannet ja elektroonilist ülekanet ratturi energiakulu kaudu järgmiselt:

- Kettülekanedega sõites väntab inimene võimsusega, mis on tarvis peale keti võimsuskao arvestamist. Et võtta arvesse mitte-optimaalset väntamiskiirust, on inimese tõhusus määratud kõigil võimsustel 3 protsendipunkti madalamaks, kui elektroonilise ülekanedega sõites.

- Elektroonilise ülekandega sõites väntab inimene konstantse võimsusega 122,6 W ning alati optimaalse väntamiskiirusega. Valitud võimsus on hinnanguliselt jõukohane tavalise jalgratturi jaoks. Puudujääv võimsus tuleb energiasalvestist mootoris. Ülejääv võimsus suunatakse akusse tagasi.

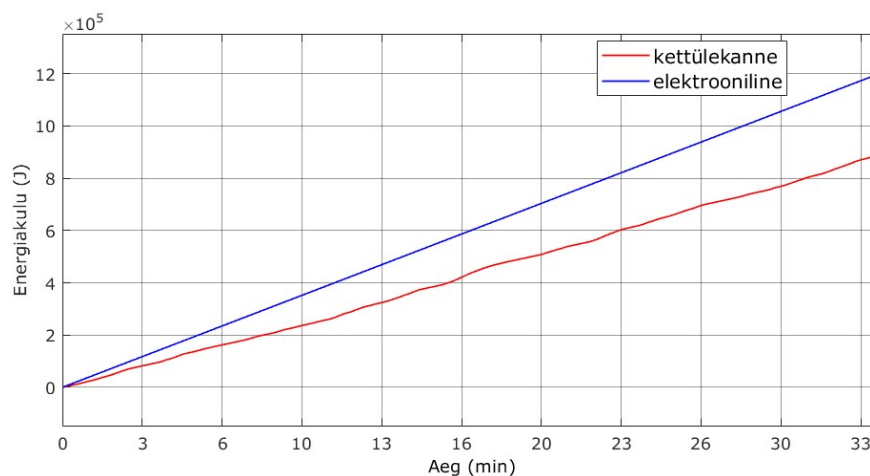
Arvutuslik inimese tõhusus kettülekandega ja elektroonilise ülekandega sõites on kujutatud joonisel 4.6.



Joonis 4.6 Inimese tõhusus kettülekannet ning elektroonilist ülekannet kasutades.

Kuna simulatsioonis määrati, et elektroonilise ülekandega sõites väntab rattur konstantse võimsuse ja kõige optimaalsema väntamiskiirusega, on tõhusus ühtlaselt 20,9%. Kettülekandega sõites kujunes keskmiseks inimese tõhususeks 11,8%. Elektroonilise ülekandega sõites on inimese tõhususprotsent kõrgem.

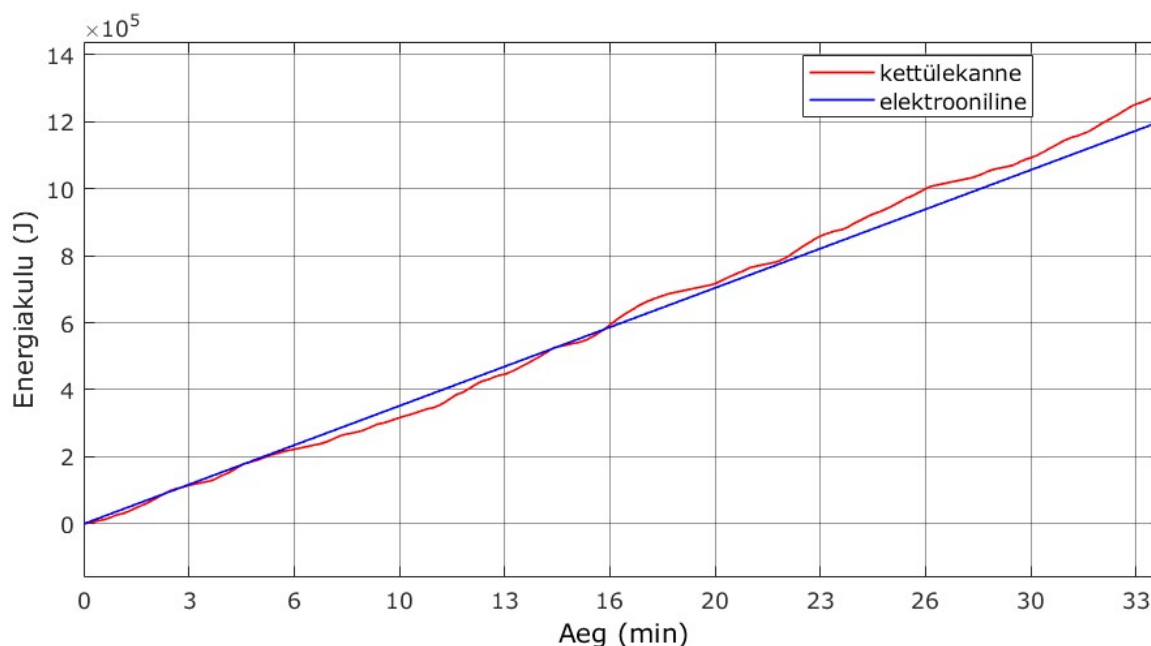
Tervet sõitu arvesse võttes kujutab inimese energiakulu joonis 4.7.



Joonis 4.7 Inimese energiakulu ajas.

Selgus, et elektroonilise ülekandega kuluks inimesel energiat rohkem. Kui kettülekandega sõidu teinud rattur peaks tarbima 215 kcal energiat, siis elektroonilise ülekandega peaks sama sõidu jaoks tarbima 71 kcal rohkem ehk 286 kcal. Toidu vaatest on energiakulu vahe umbes 1 viil leiba. Inimese energiakulule lisandub kasutatud akuenergia.

Järgnevalt viidi arvutused läbi olukorras, kui sõidu ajal puhub vastutuul 4 m/s. Inimese energiakulu sel juhul on toodud joonisel 3.7.

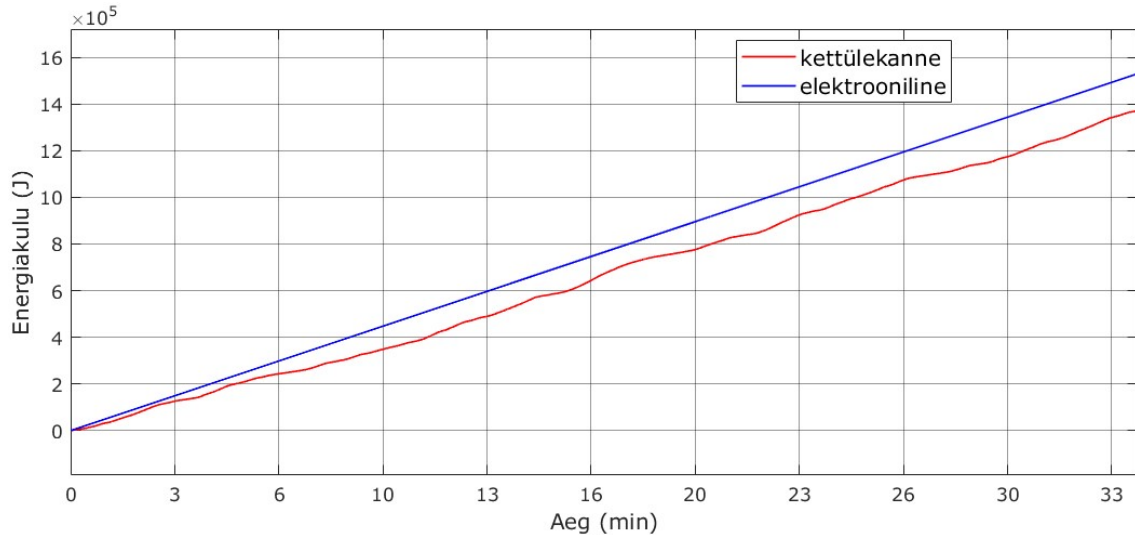


Joonis 4.8 Inimese energiakulu ajas sõites vastutuulega 4 m/s.

Jooniselt 4.8 selgub, et vastutuult sõites on elektrooniline ülekanne ratturi jaoks tõhusam. Elektroonilise ülekandega sõites kuluks sellistel tingimustel ratturil 23,9 kcal vähem energiat. Mõju tuleneb sellest, et vastavalt valemile 3.4 on õhutakistuse jõud sõltuvuses ratturi liikumiskiiruse ja vastutuule kiiruse ruudust, seega takistav jõud kasvab tuule tugevnedes kiiresti. Antud juhul tuleb energiakulude vahe energiasalvestist, mille energiakulu oli 30 Wh, mida saab lugeda sarnaseks kettülekandega ratturi enam kulutatud energiaga (25 kcal).

Järgnevalt viidi arvutused läbi suuremate kiiruste puhul. Joonisel 4.9 on kujutatud inimese energiakulu juhul, kui igal ajahetkel on sõidukiirus 2 m/s suurem.

Alloleval joonise arvutustes määrati elektroonilise ülekande puhul väntamisvõimsuseks 163,4 W ning väntamiskiiruseks kõige optimaalsem 54 pööret minutis (vastavalt tabelile 2.1). Selgub, et kettülekanne on ka sel juhul siiski elektrooniliselt ülekandest ratturi suhtes tõhusam, ja seda 23 kcal võrra.



Joonis 4.9 Inimese energiaakulu ajas suuremate kiirustega sõites.

Töö autor järeldab, et üldiselt ei ole siiski inimese füsioloogia mõttes energeetiliselt kasulik kasutada jalgrattal elektroonilist ülekannet. Elektrooniline ülekanne saab olla kettülekandest tõhusam vaid kindlates tingimustes (näiteks eeltoodud olukord vastutuult sõites). Keskmise sõidu puhul kulub ratturil sellise lahendusega sõites siiski rohkem energiat.

Samas ei tasu elektroonilise ülekande lahenduse uurimist lõpetada – potentsiaali rakendamiseks oleks näiteks kaubajalgratastel või kokkupakitavatel jalgratastel, kus sõidu tõhusus ei ole nii oluline. Tavalise jalgratta puhul jääb see traditsioonilisele kettülekandele alla nii maksumuse, jalgratta massi kui ka tõhususe küljest.

KOKKUVÕTE

Käesolevas töös uuriti jalgratta elektroonilist ülekannet. Uurimuse eesmärgid olid: valida elektroonilise ülekande sobilikud komponendid, hinnata jalgratta elektroonilise ülekande tõhusust ning leida mõju ratturi energiakulule. Arvutustes võeti arvesse inimese füsioloogiat ja tõhusust rattasõidul, mille andmed pärinesid füsioloogiauurimustest ning jalgrattasõidu teaduslikust väljaandest „Bicycling Science”. Töös tehti ülevaade elektrifitseeritud jalgrataste olulisusest, nende nüüdisaja tasemest, põhilistest komponentidest ning eelistest. Samuti avati seosed inimese füsioloogiast jalgrattasõidul.

Uurimuses püstitatud peamised eesmärgid saavutati. Elektroonilisele ülekandele leiti sobilikud komponendid: generaator, mootor, kontroller ning superkondensaatorid energiasalvestiks. Koguti keskpärase jalgrattasõidu kiirus- ja kõrgus andmed ning arvutati elektroonilise ülekande tõhusus, ratturi energiakulu ja superkondensaatorite tühjenemine.

Selgus, et elektrooniline ülekanne ei ole siiski inimese energiakulu vaates mõistlik. Kogutud rattasõidu andmetega kuluks elektroonilise ülekandega jalgratturil 71 kcal rohkem energiat. Samuti kujunes uuritava ülekande tõhusus madalamaks, kui loodeti. Mehaaniline väljundvõimsusena jõuaks tagarattale vaid neljandik sisendvõimsusest.

Töö autor hindab, et tulemused on ülekannet turul saadavate komponentidega rakendades realistlikud. Elektroonilises ülekandes on energia kadude allikaid rohkem. Kahjuks ei ole inimese energeetiline võit optimaalse väntamiskoormuse puhul piisavalt suur, et elektrikadusid kompenseerida. Siiski tuleb tõdeda, et elektrooniline ülekanne ei ole laialtlevinud toode – on võimalik, et sellise lahenduse jaoks spetsialiseeritud komponentidega saab saavutada parema tõhususe. Töös valitud elektrimootor ja -generaator ei ole projekteeritud töötama etteantud koormustel ning seetõttu ei ole nende tõhusus ökonoomne.

Tuleviku mõttes võib öelda, et jalgratta elektroonilist ülekannet tasub edasi uurida muudel rakendusvaldkondadel, kus tõhusus ei ole eriti oluline. Jalgrattaketi puudumine võimaldab näiteks koostada kompaktsena kokkupakitava jalgratta. Samuti oleks potentsiaalselt kasulik paigaldada uuritud ülekanne kaubajalgratatele, mis arvatavasti lihtsustaks suuremate tõhusude ületamise vedades rasket kaupa. Elektroonilise ülekandega on võimalik projekteerida ka mitmerattavedu, mis võib olla kaubarattale rasketes teoludes kasulik.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] „Health and environmental impacts prompt a call for strict ruling on ubiquitous ‘forever chemicals’”. Vaadatud: 6. aprill 2024. [Online]. Available at: https://environment.ec.europa.eu/news/health-and-environmental-impacts-prompt-call-strict-ruling-ubiquitous-forever-chemicals-2023-10-19_en
- [2] „Europe E-bike Market Size & Share Analysis - Industry Research Report - Growth Trends”. Vaadatud: 19. veebruar 2024. [Online]. Available at: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/europe-e-bike-market>
- [3] E. Zachos, „Are electric bikes the future of green transportation?”, National Geographic. Vaadatud: 6. aprill 2024. [Online]. Available at: <https://www.nationalgeographic.com/environment/article/electric-bike-sustainable-transportation>
- [4] M. Toll, „Believe it or not, study shows e-bike riders get more exercise than cyclists”, Electrek. Vaadatud: 6. aprill 2024. [Online]. Available at: <https://electrek.co/2019/08/11/electric-bike-riders-more-exercise-than-cyclists/>
- [5] R. Dan, „If You’re Considering an E-Bike, Let This Motor Guide Explain All They Have to Offer”, Bicycling. Vaadatud: 19. veebruar 2024. [Online]. Available at: <https://www.bicycling.com/bikes-gear/a25836248/electric-bike-motor/>
- [6] E. Punsalang, „Anod Hybrid E-Bike Combines Supercapacitors And Lithium-Ion Batteries”, InsideEVs. Vaadatud: 25. veebruar 2024. [Online]. Available at: <https://insideevs.com/news/692650/anod-hybrid-ebike-supercapacitor-lithium-batteries/>
- [7] O. Duboust, „This French company has designed an e-bike that doesn’t need a battery”, euronews. Vaadatud: 25. veebruar 2024. [Online]. Available at: <https://www.euronews.com/next/2023/12/05/this-french-company-has-designed-the-first-e-bike-that-doesnt-need-a-battery>
- [8] Eaton, „The major differences between supercapacitors and batteries”.
- [9] „Comparing All Types of Motors Used in Electric Bikes Comprehensively”, Engwe-bikes-EU. Vaadatud: 3. märts 2024. [Online]. Available at: <https://engwe-bikes-eu.com/blogs/news/comparing-all-types-of-motors-used-in-electric-bikes-comprehensively>
- [10] „A Shape of Bicycles”, Drawing Simple Lines. Vaadatud: 23. aprill 2024. [Online]. Available at: <https://linespage.blogspot.com/2014/08/a-shape-of-bicycles.html>
- [11] H. Brunn, G. Arnold, W. Körner, G. Rippen, K. G. Steinhäuser, ja I. Valentin, „PFAS: forever chemicals—persistent, bioaccumulative and mobile. Reviewing the status and the need for their phase out and remediation of contaminated sites”, *Environ. Sci. Eur.*, kd 35, nr 1, lk 20, märts 2023, doi: 10.1186/s12302-023-00721-8.
- [12] D. G. Wilson, *Bicycling Science*, 3. tr. 2004.
- [13] „ATP cycle and reaction coupling | Energy (article)”, Khan Academy. Vaadatud: 23. aprill 2024. [Online]. Available at: <https://www.khanacademy.org/science/ap-biology/cellular-energetics/cellular-energy/a/atp-and-reaction-coupling>
- [14] J. J. SEABURY, W. C. ADAMS, ja M. R. RAMEY, „Influence of Pedalling Rate and Power Output on Energy Expenditure During Bicycle Ergometry”, *Ergonomics*, kd 20, nr 5, lk 491–498, sept 1977, doi: 10.1080/00140137708931658.
- [15] „Detailed Test Information”. Vaadatud: 6. aprill 2024. [Online]. Available at: https://www.fueleconomy.gov/feg/fe_test_schedules.shtml
- [16] M. Tutuianu *et al.*, „Development of the World-wide harmonized Light duty Test Cycle (WLTC) and a possible pathway for its introduction in the European legislation”, *Transp. Res. Part Transp. Environ.*, kd 40, lk 61–75, okt 2015, doi: 10.1016/j.trd.2015.07.011.
- [17] „Liiklusseadus–Riigi Teataja”. Vaadatud: 20. aprill 2024. [Online]. Available at: <https://www.riigiteataja.ee/akt/LS#para2lg1p14>
- [18] Neodrives, „Z20 rear motor”, neodrive. Vaadatud: 20. aprill 2024. [Online]. Available at: <https://www.neodrives.com/en/drive-system/z20/z20-rear-motor/>

- [19] „Kurvencharakteristik-Bafang-BBS01-36V-250W-V1-0.pdf“. Vaadatud: 20. aprill 2024. [Online]. Available at: <https://www.ebike-solutions.com/media/pdf/b5/5b/2d/Kurvencharakteristik-Bafang-BBS01-36V-250W-V1-0.pdf>
- [20] „Samsung 25S 18650 2500mAh 25A Battery“, 18650BatteryStore.com. Vaadatud: 20. aprill 2024. [Online]. Available at: <https://www.18650battery.com/products/samsung-25s>
- [21] „Brushless Driver Controller BLDC Motor Driver 12-36V 15A 500W with Hall speed co, 19,90 €“, Brushless Driver Controller BLDC Motor Driver 12-36V 15A 500W with Hall speed co, 19,90 €. Vaadatud: 20. aprill 2024. [Online]. Available at: <https://www.marotronics.de/Brushless-Driver-Controller-BLDC-Motor-Driver-12-36V-15A-500W-with-Hall-speed-control>
- [22] D. Laskay, „BLDC Motor Controllers...for Maximum Performance & Efficiency“.
- [23] „Speed Tracker: GPS Speedometer“, App Store. Vaadatud: 10. mai 2024. [Online]. Available at: <https://apps.apple.com/ee/app/speed-tracker-gps-speedometer/id604836034>
- [24] „An interactive model-based calculator of cycling power vs. speed“. Vaadatud: 21. aprill 2024. [Online]. Available at: https://www.gribble.org/cycling/power_v_speed.html
- [25] W. Steyn ja J. Warnich, „Comparison of tyre rolling resistance for different mountain bike tyre diameters and surface conditions“, *South Afr. J. Res. Sport Phys. Educ. Recreat.*, kd 36, lk 179–193, jaan 2014.
- [26] B. Blocken, T. Druenen, Y. Toparlar, ja T. Andrienne, „CFD analysis of an exceptional cyclist sprint position“, *Sports Eng.*, kd 22, märts 2019, doi: 10.1007/s12283-019-0304-7.
- [27] „<https://ebikes.ca/tools/simulator.html>“. Vaadatud: 21. aprill 2024. [Online]. Available at: <https://ebikes.ca/tools/simulator.html>

Lisa 1. Matlab Simulink plokskeem

