

TARTU ÜLIKOOL  
LOODUS- JA TEHNOLOOGIATEADUSKOND  
Füüsika instituut

Vegard Kruusla

**VÕIMSUSE MÕÕTMINE JALGRATTASPOORDIS**

Bakalaureusetöö (12 EAP)

Juhendaja: MSc Erik Randla

Kaitsmisele lubatud .....

Juhendaja .....

*allkiri, kuupäev*

Tartu 2014

## Sisukord

1. Sissejuhatus .....	3
1.1. Võimsuse mõõtmise vajalikkus rattaspordis .....	3
1.2. Töö struktuur ja probleemi püstitus .....	5
2. Olemasolevad lahendused võimsuse mõõtmiseks.....	6
2.1. Võimsuse mõõtjate võimalikud paiknemiskohad jalgrattal.....	6
2.2. Garmin Vector .....	10
2.3. Stages cycling .....	12
2.4. SRM.....	14
2.5. Ergomo Pro.....	16
2.6. Polari keti võnkumist monitooriv seade .....	19
2.7. PowerTap.....	21
2.8. iBike.....	24
3. Keti lüli põhine võimsuse mõõtja.....	27
3.1. Tööpõhimõtte ja ehituse kirjeldus .....	27
3.2. Mõõtmised .....	30
3.3. Järeldused .....	32
4. Kokkuvõte .....	34
5. Summary .....	35
6. Tänuavaldused.....	36
7. Kasutatud kirjandus.....	37
Lisad .....	40
Lisa 1 – Mõõtmistel kasutuses olnud ketid .....	40
Lisa 2 – Ketiplatide ristlõiked.....	40

# 1. Sissejuhatus

## 1.1. Võimsuse mõõtmise vajalikkus rattaspordis

Kehakultuuri valdkonnas on võimsus füüsikaline suurus, mis võimaldab pingutust või koormust kvantitatiivset analüüsida. Jalgrattaspordis saab seda omadust kasutada sportlase seisundile adekvaatse hinnangu andmiseks, treenerite ja ratturite vahelise koostöö soodustamiseks ning ühtlasi loob individuaalsel tasemel kehalise pingutuse intensiivsuse jälgimine soodsaid tingimusi treeningute fokuseerimiseks. [1]

Definitsiooni kohaselt on võimsus füüsikaline suurus, mis kirjeldab töö tegemise kiirust. Keskmise võimsus  $\bar{P}$  ajavahemiku  $\Delta t$  vältel avaldub valemiga

$$\bar{P} = \frac{A}{\Delta t}, \quad (1)$$

kus  $A$  on ajavahemiku  $\Delta t$  vältel tehtud töö.

Jalgratturi puhul saab võimsust mõõtes objektiivselt iseloomustada tema füüsilist sooritust. Praktiliseks mõõtmiseks on otstarbekas esitada võimsuse avaldis töö definitsiooni kaudu. Siis avaldub hetkvõimsus  $P$  süsteemile mõjuva jõu liikumise suunalise komponendi  $F$  ja selle tulemusena toimuva liikumise hetkkiiruse  $v$  kaudu

$$P = Fv. \quad (2)$$

Jalgratta jõuülekandes on oluline osa pöörliikumistel, mille korral avaldub hetkvõimsus  $P$  avaldisega

$$P = (\vec{r} \times \vec{F}) \cdot \vec{\omega} = \vec{M} \cdot \vec{\omega}, \quad (3)$$

kus  $\vec{r}$  tähistab jõu rakenduspunkti kohavektorit,  $\vec{F}$  on jõuvektor,  $\vec{\omega}$  on pöörlemise nurkkiiruse vektor ja  $\vec{M}$  tähistab jõumomendi vektorit.

Rattaspordis kasutatavad võimsuse mõõtjad salvestavad ratturi pingutust iseloomustava töö suurust lühikeste ajaintervallide tagant. See on kasulik omadus sportlase jõudluse muutuste täpseks jälgimiseks, ehk pidev andmete kogumine võimaldab välja selgitada, millistes konkreetsetes võistlus- ja treeningmarsruudi punktides tekkis ratturil probleeme. Seesugune katkematu pingutuse kaardistamine aitab välja selgitada konkreetsele ratturile iseloomulikke

tugevaid ning nõrku külgi ning neid teades, on võimalik keskenduda problemaatilistele elementidele, suurendades seeläbi treeningute efektiivsust. [2, lk 7]

Üks rakendus võimsuse mõõtjale on selle kasutamine ratturi optimaalse sõiduasendi selgitamisel. Jalgratturi sõiduasendit saab muuta mitmel moel, näiteks sadula kõrgust ja kaugust muutes, kinnitusklotside paiknemist sõidukingade all kohendades, reguleerides juhtraudade kallet ning selle kaugust raamist või lihtsalt muutes keha paiknemist sõiduvahendil. Analüüsides sarnase kehalise pingutuse korral paralleelselt erinevaid sõiduasendeid ning neile vastavaid võimsustoodanguid, on võimalik määrata konkreetse sportlase jaoks sobilikum kehahoiak vastava iseloomuga distantisile. [2, lk 15]

Võistluste ja pikemate treeningute kestel võimaldab võimsusandmete jälgimine paremini oma energiavarusid jaotada. Näiteks, kui eelnevate treeningutega on välja selgitatud, kus maal ja milliste tingimuste korral tekib sportlasel tugev väsimus, siis selle info abil on füüsilise pingutuse erinevates staadiumites võimalik koormuse taset reguleerida nii, et ka lõppfaasis jätkuks energiat varem määratud eesmärkide saavutamiseks. Eriti kasulik on see näiteks triatleetidele, kes täispika „Ironman“-distanti korral peavad jalgrattassõidu järel olema võimelised jooksuma ka maratoni. [2, lk 11-16]

Võimsuse mõõtmine füüsilise seisundi jälgimiseks ei asenda muidugi südametöö registreerimist, vaid pigem neid andmeid koos salvestades ja analüüsides on võimalik tõsta treeningute efektiivsust. Kui võimsusega registreeritakse jalgratta liikuma panemiseks vajalike lihaste tööd, siis südametegevuse jälgimine kirjeldab inimorganismi reaktsiooni sooritatud pingutusele. Olukord, mille puhul reaktsioon spetsiifilisele pingutusele on liiga tugev, võib viidata ebasobivale treeningmetoodikale ning sportlase tervise huvides oleks mõistlik teha muudatusi, vältimaks füüsilisi vigastusi. [2, lk 8-9]

Kuna võimsuse mõõtmine annab informatsiooni treeningplaani efektiivsuse kohta, siis suurendab see ka koostööd treeneri ja sportlase vahel. Kasutades võimsusandmeid, on ratturi juhendajal palju kergem jälgida sportlase arengut ja hetkeseisu ning vastavalt sellele infole korrigeerida kavasid. Lisaks eelnevale, on mitmeliikmelise rattameeskonna treeneril ka tunduvalt kergem ülesannete jaotamine võistlusteks või treeningperioodiks, sest nagu eelpool mainitud, on võimsuse mõõtjatega võimalik välja selgitada konkreetse ratturi tugevaid ja nõrku külgi. [2, lk 11-14]

Võimsuse mõõtmine võib kujuneda ka oluliseks motivaatoriks treeningutel. Maksimaalse pingutusega treenides on võimalik just võimsustoodangu numbreid jälgides leida väike lisaenergia, mille abil loodetud tulemusi saavutada ning tippspordis osutuvad tihtipeale just seesugused lisapingutused kõrgete kohtade jagamisel otsustavateks. [2, lk 14-15]

## **1.2. Töö struktuur ja probleemi püstitus**

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks on esmalt uurida, kuidas toimivad kaasaegsed jalgratta võimsust sõidu ajal registreerivad seadmed ning analüüsida hetkel eksisteerivate tehnoloogiliste lahenduste usaldusväärsust. Võttes arvesse vastava valdkonna kohta kogutud informatsiooni, on antud töö teine eesmärk pakkuda välja omapoolne idee võimsuse mõõtmiseks, kasutades selleks jalgratta keti lülidesse monteeritud andureid ning seejärel analüüsida mainitud idee teostatavust.

## 2. Olemasolevad lahendused võimsuse mõõtmiseks

Käesolevas peatükis võtame vaatluse alla hetkel eksisteerivad lahendused võimsuse mõõtmiseks. Kuna erinevaid mõõteseadmeid on rohkem, kui käesoleva töö raames oleks võimalik lahata, siis on tarvilik teha valik, millised seadmed uurimise alla võetakse. Selektiooni koostamiseks jagasime uuritavad objektid nende paiknemise järgi seitsmesse kategooriasse (pedaalid, vānt, vāndasüsteemi ketiratas, keskjooks, kett, tagumine rumm ning sõiduki juhtraud või muu raami osa, kus ei mõõdetata otseselt rakendatavaid jõude). Igast kategooriast võtame järgnevalt vaatluse alla oma tuntuse ja populaarsuse poolest silmapaistvaima mõõteseadme.

Valimikku võetud lahenduste kirjeldamiseks kasutame kolme kriteeriumi:

- mõõtmise tehnoloogiline lahendus,
- mõõtetäpsus,
- kalibreerimine ja seadistamine.

### 2.1. Võimsuse mõõtjate võimalikud paiknemiskohad jalgrattal

Jalgratturi poolt pedaalidele rakendatav jõud kantakse läbi jõuülekanne tagarattale. Jalgratturi poolt toodetavat võimsust saab mõõta jõuülekanne ahela erinevates osades. Järgneva kirjelduse parema jälgitavuse huvides on lisatud kasutatavaid mõisteid selgitav pilt (*joonis 1*) ja tabel (*tabel 1*).



Joonis 1 - Jalgratta komponendid

Number	Selgitus
1	Kett
2	Tagumiste ketirataste kassett
3	Tagumine käiguvahetaja
4	Tagumise käiguvahetaja hammasrattad
5	Tagajooksu rumm
6	Sidevarras
7	Parempoolne vânt
8	Keskjooks
9	Eesmised ketirattad
10	Vasakpoolne vânt
11	Esihark
12	Parempoolne klipp-pedaal
13	Vasakpoolne klipp-pedaal
14	Eesmine käiguvahetaja
15	Esijooksu rumm
16	Juhtraud

Tabel 1 - Joonisel 1 esitletud komponentide nimetused.

Võimsuse mõõtja paigaldamiseks jalgrattale sobivad seesugused asukohad, kuhu mingil määral rakendub ratturi lihaste poolt tekitatud jõud. Optimaalne on mitte kasutada lisaseadmeid võimsuse mõõtmiseks, mis tähendab seda, et otstarbekas on kasutada olemasolevaid, kuid veidi modifitseeritud detaile.

Võimsuse mõõtmisel peab arvesse võtma seda, et mida kaugemal jalgratturist asub võimsust registreeriv seade jõuülekanne ahelas, seda kaudsemalt on võimalik ratturi toodetavat võimsust mõõta. Näiteks jalgratta jõuülekanne efektiivsuse uurimisel on selgunud, et peamised tegurid, mis mõjutavad sportlase poolt tehtud töö efektiivsust eesmistest ketiratadest ja tagumiste ketiratadest vahel, on ketiratadest suurused ning hetkpinge ketis [3]. Selgub, et rakendatavat jõudu kasutatakse efektiivsemalt, kui jalgrattale on monteeritud suuremad ketirattad ning kui pinge ketis on võimalikult suur [3].

Mida kaugemal asub võimsust mõõtev seade jalgratast liikuma paneva jõuülekanne ahelas, seda suurema täpsusega on võimalik koguda informatsiooni jalgratta liikuma panemiseks kuluva kasuliku võimsuse kohta ehk teavet võimsusest jõuülekanne ahela lõpus. Kuna pingutuse registreerimisel jõuülekanne ahela erinevates punktides on omad positiivsed ja negatiivsed küljed, siis sõltub konkreetse lahenduse otstarbekus eelkõige mõõteseadme kasutaja vajadustest.

Järgnevalt toome välja hetkel eksisteerivate jalgratta võimsuse mõõtjate paigutuslahendusi ja ka mõningaid alternatiive nendele. Esmane kokkupuutepunkt ratturi rakendatava jõu ning jalgratast vedava mehhanismi vahel on pedaal. Selles piirkonnas on võimalik võimsust mõõta näiteks jalgratturi sõidukinga klotsis [4] või pedaalil endas [5]. Esimesel juhul on võimsusnäitajate leidmiseks võimalik uurida, kui suurt jõudu rakendab rattur oma jala ja klipp-pedaali (vt tabel 1 nr 12-13) vahel paiknevale elemendile, mille peamine eesmärk on sportlase jalga jäigalt pedaalile fikseerida. Selle variandi suureks eeliseks teiste alternatiivide ees on võimekus ilma suuremate probleemideta paigaldada mõõtesüsteem ühelt sõiduvahendilt teisele. Piisab, kui vaid jalutada ühe ratta juurest teiseni.

Pedaali külge kinnitatud võimsuse mõõtja registreerib pedaalil rakendatavat jõudu. Analoogselt eelnevale on ka taolise mõõtemetodi eelisteks teiste lahenduste ees asjaolu, et võimsust saab mõõta mõlema jala puhul eraldi ning kuna pedaalide maha ja külge monteerimine ei ole keeruline tegevus, siis mõõteseadme kasutamine erinevatel ratastel on



samuti kerge. Suurim eelis kingaklotsi paigaldatud mõõteüsteemi ees on asjaolu, et pedaali külge on kergem paigaldada sportlast mittehäirivat riistvara.

Järgmine potentsiaalne koht võimsuse mõõtja paigaldamiseks on jalgratta vänt [6]. Pedaalimise käigus painutatakse veidi vänta ning sellele rakendatud jõu leidmiseks mõõdetaksegi deformatsiooni vändas. Kuna kõne all olevat lahendust on võimalik paigutada vasakpoolsele vändale (millele ei ole kinnitatud kettirattaid), siis saab rakendatavat võimsust hinnata jättes arvestamata kaod jõuülekande süsteemis, mis on eeliseks mõningate teiste mõõtemetodite ees.

Parempoolse vända külge on traditsioonilistel jalgratastel paigaldatud ketiratas, mis on samuti potentsiaalselt sobilik koht võimsuse mõõtja paigaldamiseks [7]. Selle asukoha eelis teiste alternatiivide ees on asjaolu, et vajalike sensorite ja muu riistvara paigutamiseks on võrdlemisi palju keskkonna tingimuste ja mehaaniliste kahjustuste eest osaliselt kaitstud ruumi. Lisaks on vändasüsteemi ketirattal paiknevate anduritega süsteemi eeliseks asjaolu, et mõõdetud võimsuses kajastub mõlema jala panus.

Jalgratturi võimsust on võimalik jälgida ka keskjooksu paigutatud mõõtesüsteemi abil [8]. Sellisel juhul saab soovitud eesmärki saavutada keskjooksu võlli väändedeformatsiooni uurides. Kirjeldatud viisil mõõtesüsteemi monteerides on võimalik kaitsta seadet nii kasutajast kui ka muudest teguritest põhjustatud erinevate vigastuste eest. Viimane aspekt on kindlasti eeliseks nii mõnegi alternatiivse tehnoloogilise lahenduse paigutuse ees.

Kettirattale ja keskjooksule järgnev koht, kus oleks võimalik võimsust mõõta, on kett ise. Võimsuse registreerimiseks selle detaili juures on näiteks võimalik kasutada seadet, mis jälgib keti võnkumist pedaalimise ajal [9]. Taolise mõõtesüsteemi positiivne aspekt on see, et seda on võrdlemisi kerge jalgrataste vahel vahetada ning teoreetiliselt on võimalik nimetatud meetodikat kasutada ka teiste ketti kasutatavate seadmete võimsuse mõõtmiseks. Lisaks keti vibreerimise jälgimisele, saaks sportlase pingutust hinnata ka keti lülidesse paigutatud andurite abil, mis võimaldaksid jälgida keti pingutamiseks rakendatavat jõudu. Selle tööpõhimõttega mõõteseadmeid autorile teadaolevate andmete kohaselt veel hetkel ei eksisteeri.

Keti abil kandub rakendatav jõud edasi tagumise jooksu ketirataste kassetile ja rummule. Need asukohad on samuti sobilikud võimsuse mõõtmiseks [10-11]. Kuna viimasena mainitud lahendused asuvad jõuülekanne ahela lõpus, siis on neid rakendades võimalik efektiivselt mõõta võimsust, mis rakendub realselt sõiduvahendi liikuma panemiseks.

Eelpool toodud võimsuse mõõtjate võimalike paiknemiskohtade puhul mõõdetakse otse jalgratturi pingutuse tulemusena tekitatud võimsust, kuid seda ülesannet saab täita ka kaudsete mõõtmiste teel ehk matemaatilise modelleerimise abil [12-13]. Sellisel juhul on võimalik mõõta sõiduvahendile ja ratturile mõjuvaid takistavaid jõude. Vastavalt Newtoni kolmandale seadusele on viimati mainitud takistavate jõudude summa võrdne ja vastassuunaline selle jõuga, mida rattur peab rakendama, et liikumist pidurdavaid mõjusid ületada. Määrares lisaks eelnevale parameetritele ka sõidu kiiruse, on võimalik hinnata jalgratturi võimsust sõidu kestel. Seda tüüpi mõõteseadme saab paigutada näiteks jalgratta juhtrauale kinnitatud kompuutrisse.

Järgnevalt vaatame lähemalt olemasolevaid lahendusi võimsuse mõõtmiseks jalgratta jõuülekanne erinevates osades

## 2.2. Garmin Vector

### Tööpõhimõte

Garmin Vectori võimsuse mõõtja tööpõhimõtte selgitamisel lähtume seda tootva ettevõtte nimele kuuluvast patendist [5]. Garmin Vectori tehnoloogiline lahendus võimsuse mõõtmise probleemile, on paigutada vastavat ülesannet teostav mõõtesüsteem jalgratta pedaali sisemusse. Selle meetodika kohaselt toimub võimsuse määramine vastavalt avaldisega (3) kirjeldatud mudeli abil, mida rakendatakse vända pedaalipoolses otsas. Meid huvitava suuruse määramiseks on seega tarvilik leida kolme parameetri (rakendatava jõu  $F$ , vända pöörlemistelje ja jõu rakenduspunkti vahekauguse  $l$  ning pöörlemissageduse  $\omega$ ) väärtused. Kuna vända pikkus ehk parameeter  $l$ , sõidu ajal oluliselt ei muutu, siis selle väärtuse peab määrama vaid ühe korra – seadet jalgrattale paigaldades. Pedaalimise kestel on vaja mõõta seega vaid nurkkiirust ning rakendatava jõu suurust.

Eelpool mainitud dokumendi kohaselt kasutatakse ühe võimaliku lahenduse puhul rakendatava jõu suuruse määramiseks kaheksat tensoandurit, mis on paigaldatud pedaali

võllile kahes tasandis, nii nagu seda on näidatud *joonisel 2* numbritega 102<sub>1-8</sub>. Sportlase pingutusest põhjustatud jõu saab lahutada kaheks komponendiks: kasulikuks jõuks (*joonisel 3*  $V_{power}$ ), mille vektor on suunatud vända pöörlemistasandis pedaali kinnituspunkti puutuja sihis ning raisatud jõuks (*joonisel 3*  $V_{waste}$ ), mille vektor on risti kasuliku jõu vektoriga nii nagu *joonisel* näidatud. Viimati kirjeldatud jõudude vektorite määramiseks kasutatakse Wheatstone'i sildamist<sup>1</sup> ning nende jõudude eraldamine loob soodsad tingimused sportlase pedaalimisefektiivsuse hindamiseks ja parandamiseks.

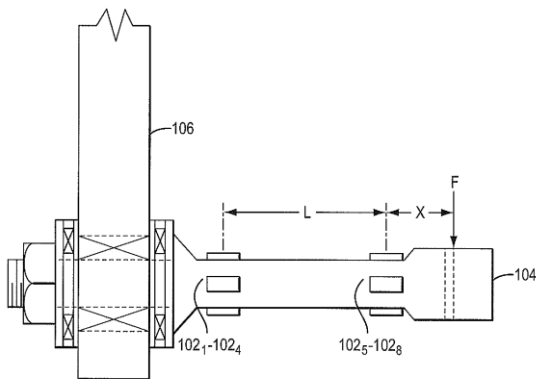


FIG. 1  
(PRIOR ART)

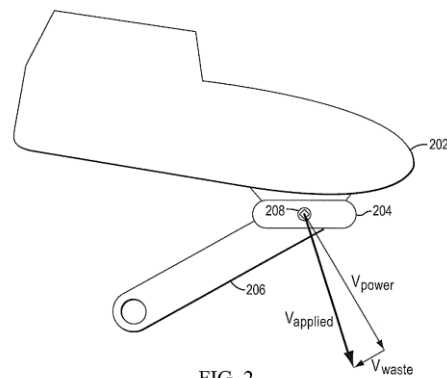


FIG. 2

**Joonis 2 - Andurite paiknemine pedali võllil [5].**

**Joonis 3 - Vântamisel pedaalidele mõjuvad jõud [5].**

Pedaalimise nurkkiiruse määramiseks kasutab Garmin Vector ühe võimaliku versiooni kohaselt kiirendusandureid, mis on paigaldatud vända külge eraldi moodulisse. Lisaks pedaalimissagedust mõõtvale sensorile on sellesse moodulisse monteeritud ka protsessor kogutud informatsiooni töötlemiseks, elektriline toide (patarei) ning muu riistvara signaalide edastamiseks. Elektroonika moodulist kantakse signaali edasi traadita ühendusi (ANT+, bluetooth, infrapuna jne) kasutades rattakompuutrisse, kus neid andmeid salvestatakse ja kasutajale kuvatakse.

## Täpsus

Kuna Garmin Vector võimsuse mõõtja on teadaolevatel andmetel turgudele jõudnud alles 2011. aasta augustis [14], siis ei ole veel käesoleva töö autorile teadaolevate andmetel selle seadme mõõtetäpsuse hindamiseks teostatud usaldusväärseid ja sõltumatuid uuringuid.

<sup>1</sup> Wheatstone'i sild – elektrooniline skeem tundmatu takistuse suuruse määramiseks.

Põgusalt on seda probleemi aga käsitletud näiteks ühe rattaspori maailmas tuntud tehnoloogiliste lahenduste testija R. Maker [15]. Tema eksperimentidest selgus, et Vectori täpsus võiks ligikaudu jääda tootja poolse väite ehk  $\pm 2\%$  lähedale. Ühtlasi kontrollis Maker, kui täpselt peab järgima tehase poolt väljastatud juhiseid mõõteseadmete paigaldamiseks ning selgus, et pedaalide kinnitamisel väntade külge on vaja rakendada täpselt soovitud jõumomenti (34Nm). Näiteks 6.8Nm suuruse jõumomendiga kinnitatud pedaali võimsusnäitaja tulemused erinesid usaldusväärsetest suurustest ligikaudu 20-30W võrra, soovitud tingimuste korral aga kõigest 4-5W sama pingutuse puhul.

### Kalibreerimine

Vastavalt Garmin Vectori veebilehel olevale seadme kasutusjuhendile [16], peab võimsusemõõtja kasutamiseks ning sellega parimate tulemuste mõõtmiseks esmakordsel paigaldamisel võimalikult täpselt sisestama vända pikkuse rattakompuutris oleva programmi abil ning enne igat seadme kasutuskorda on soovitatav seadistada mõõteseadme nullasend ehk rakendatava jõu puudumisele vastav referentsisignaali. Nullasendi kalibreerimiseks ei pea tegema muud, kui hoidma sõiduvahendit ratastel püsti ning kasutama kompuutri vastava funktsionaalsusega programmi.

## 2.3. Stages cycling

### Tööpõhimõte

Stages Cycling'i mõõteseadme tööpõhimõtte kirjeldamisel lähtume tehnoloogia leiutajate A. P. Lulli ja E. Goleshi vastava sisuga patendist [6]. Selle dokumendi kohaselt on monteeritud võimsust mõõtev süsteem jalgratta vasaku vända ehk ilma ketirattata vända külge nii nagu näidatud *joonisel 4*. Võimsusandmete kogumiseks on selle lahenduse puhul vajalik teada kolme parameetrit: rakendatava jõu suurust, jõu rakenduspunkti kaugust vända

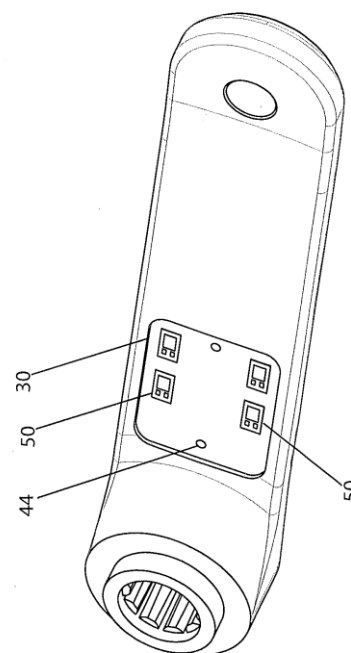


Fig. 6

Joonis 4 - Vasakpoolse vända sisse paigaldatava mõõtesüsteemi kujutis [6].

pöörlemisteljest ning süsteemi pöörlemise nurkkiirust (vt avaldist (3), mis kirjeldab võimsuse avaldumist pöördliikumisel).

Jõu suuruse määramiseks kasutatakse vähemalt kahte tensoandurit, mille elektriline takistus muutub vastavalt rakendatava surve suurusele. Sensori takistuse suuruse määramiseks kasutatakse Wheatstone'i sildamist ning sealt edastatakse signaal protsessorile. Nurkkiiruse määramiseks kasutatakse keelreleid ja/või kiirendusandurit. Keelrelee rakendamiseks kasutatakse ka raamile kinnitatud magnetit, mis võimaldab määrata hetke, millal vänt on sooritanud ühe täispöörde. Nurkkiirust mõõtvate sensorite signaal edastatakse protsessorile ning seal võrreldakse soovitud suuruse leidmiseks neid andmeid protsessori sisemise kellaga. Võttes arvesse asjaolu, et tensoandureid kasutavate võimsuse mõõtjate täpsus võib sõltuda ka temperatuuri kõikumistest [17], siis on selle mõõtemetoodika patendi autorid leidnud, et täpseimate tulemuste saamiseks võiks protsessoris kasutatav arvutusmudel arvestada lisaks eelnevalt kirjeldatud parameetritele ka termistoriga registreeritud temperatuuri muutusi. Käesoleva lahenduse elektriskeeme, sensoreid, arvutuskeskust ja sideühendust toidetakse patareidega, mis paiknevad analoogselt eelnevalt kirjeldatud komponentidega jalgratta vasakpoolse vända küljes. Kuna võimsuse arvutamiseks vajaliku jõuõla pikkus on fikseeritud väärtusega, siis seda eraldi mõõtma ei pea ning selle saab arvutusmudelisse võtta konstandina. Peale seda, kui mõõtesüsteemi protsessorisse on kogutud kõikide vajalike parameetrite suurused, saab arvutada võimsuse väärtuse vastavalt avaldisega (3) kirjeldatud mudeli abil.

Sagedust registreeritakse ühe võimaliku versiooni kohaselt 32 korda sekundis ning need andmed edastatakse traadita ühendusi kasutades rattakompuutrisse. Stages Cyclingi kodulehelt omandatud info kohaselt kasutatakse signaalide edastamiseks *ANT+* või *bluetoothi* suhtlusprotokolle [18].

### **Täpsus**

Stages Cyclingi tootja väidab, et nende mõõteseade suudab vasaku jala poolt tekitatud võimsust mõõta kuni  $\pm 2\%$  täpsusega, pedaalimissageduse vahemikus 30-220 pöört minutis ning võimsuste vahemikus 0-1999W [19].

Kuna mitmete pedaalimistehnika sümmeetrilisuse uuringute tulemustest on selgunud, et osade rattassportlaste vasaku ja parema jala võimsusnäitajad ei ole sõidu kestel alati tasakaalus [20-21], siis seab see kahtluse alla tootja lubaduse väidetava täpsusklassi kohta, sest kõneall oleva seadme tööpõhimõtte üheks eelduseks on jalgade töö sümmeetrilisus [18]. Paraku ei ole vähemalt siinkirjutajale teadolevalt teostatud usaldusväärseid ja sõltumatuid uuringuid selles

alapeatükis kirjeldatud võimsuse mõõtja tootjapoolsete täpsushinnangute lubaduste paikapidavuse kohta ning seega on raske hinnata kui adekvaatset informatsiooni see lahendus rattasportlasele pakub.

### **Kalibreerimine**

Stages Cyclingi jalgratta võimsuse mõõtja tootja kodulehe andmetel [22] ei vaja see seade eriti keerulist ja järjepidevat kalibreerimist. Kasutajalt on nõutud mõõtesüsteemi seadistamine vaid vahetult peale paigaldamist, vältimaks monteerimisvigadest tekkida võivaid ebatäpsusi. Edaspidisel kasutamisel ei ole kalibreerimine vajalik, kuid parimate tulemuste saamiseks soovitatakse seda protseduuri siiski korrata ka vahetult enne igat seadme kasutuskorda. Kalibreerimiseks ei pea kasutaja tegema muud, kui sättima vända maapinnaga ristuvasse asendisse ning kasutama seejärel võimsusandmeid registreerivale rattakompuutrile, nutitelefonile või muule seadmele programmeeritud tarkvara vastavasisulist rakendust.

## **2.4. SRM**

SRMi võimsuse mõõtjad olid esimesed omalaadsete seas, mille abil oli võimalik ratturite võimsust mõõta mitte ainult laboratorsetes tingimustes, vaid ka maastikul liikudes [7]. Nende seadmete täpsust hinnatakse üsna kõrgelt ning sageli kasutatakse neid ka laboratorsete uuringute läbiviimiseks ning teiste võimsuse mõõtjate täpsuse hindamiseks [13, 23-24].

### **Tööpõhimõte**

SRM-i võimsuse mõõtja tööpõhimõtte selgitamiseks lähtume selle ettevõtte asutaja Ulrich Schöbereri nimele kuuluvast patendist [7], mis kirjeldab eesmisele ketirattale monteeritud mõõteseadme ehitust ning funktsioneerimist. Selle lahenduse puhul kasutatakse sportlase pingutuse registreerimiseks deformeeruvaid elemente nagu näiteks piesoelektrilisi kristalle ja tensotajureid, mis vastavalt rakendatava jõu suurusele, muudavad oma elektrilisi omadusi. Eelpool mainitud andurid on paigaldatud nii, et pedaalimise jõu ülekande ahelas paikneksid need vända ja ketiratta hammaste vahel. Lisaks rakendatava jõumomendi registreerimisele mõõdetakse ka ketiratta pöörlemise nurkkiirust, kasutades selleks keelkontakt magneteid, valguskardinaid, induktiivvastuvõtjaid või mehaanilisi tahhomeetreid. Teades jõumomendi ja nurkkiiruse väärtusi on võimalik leida sportlase pingutust iseloomustava võimsuse suurus, kasutades selleks valemiga (3) kirjeldatud mudelit.

Kuna kõik võimsust iseloomustava signaali töötlemiseks ja edastamiseks vajalikud elemendid on integreeritud eesmise ketiratta sisemusse, siis SRMi mõõteseadmed ei nõua lisa riistvara paigaldamist jalgrattale. Info edastamisel on olulised kaks signaali – rakendatava jõu suurus ning nurkiirust puudutav teave ning selle edastamiseks kasutatakse magnetinduktsiooni. Rakendatava jõumomendi suuruse määramiseks kasutatakse tensoandureid ning registreeritavate pingete väärtused keskmistatakse üle ühe ketiratta pöörde.

### **Täpsus**

Mõõtmistäpsuse (tensoandurite) alusel jaotatakse SRMi võimsusemõõtjaid kolme kategooriasse: amatööridele, professionaalidele ja teadlastele suunatud tehnika ning kõikide lahenduste puhul jäävad tootja väidete kohaselt täpsused 0.5-5% piiresse [25]. SRMi andmete paikapidavuse kontrollimiseks korraldatud uurimuse [17] põhjal selgus, et mõõtevahendite näitude usaldusväärsus on enamasti tootja väidetega kooskõlas, kuid siiski võib täpsus erinevate eksemplaride seas varieeruda. A. S. Gardneri jt korraldatud katses [17] kalibreeriti 19 mõõteseadet, misjärel nendega sõideti 11 kuud ning lõpuks kontrolliti taaskord täpsust dünaamilise kalibratsioonisüsteemiga, mis töötas konstantsel pöörlemissagedusel (100 pöört minutis) võimsusvahemikus 50-1000W. Esmase kalibreerimise tulemusena selgus, et kõikide mõõteseadmete keskmine määramatus on  $2.3 \pm 4.9\%$  ning peale 11-kuulist kasutust mõõdeti 15 eksemplari keskmiseks veaks  $0.8 \pm 1.7\%$ . Lisaks eelpool mainitud katsetele uuriti ka SRMi seadmete näitude sõltuvust temperatuurist, pedaalimissagedusest ja töösoleku ajast. Selleks kasutati seda mõõteseadet, mis eelnevate eksperimendi etappide tulemuste põhjal kõige täpsemaks osutus. Katse tulemustest selgus, et registreeritavad võimsusnäitajad ei sõltu oluliselt tööajast ega ka pedaalimissagedusest, kuid näitude erinevusi oli märgata temperatuuri muutumisel – temperatuuril vahemikus  $8-21^{\circ}\text{C}$  konstantset pingutust rakendades, muutusid võimsuse näidud 5.2% ulatuses.

Varasemate SRMi võimsusemõõtjate kohta on samuti teostatud usaldusväärsuse uuring [26] ning nende tulemuste kohaselt jääb ka siis seadmete keskmine määramatus tootja poolsete väidete piiresse, kuid ka sellest uurimisest selgub, et mõõtetäpsus varieerub paljude erinevate eksemplaride vahel. Selles, 1999. aastal E. W. Lawtoni jt poolt korraldatud uurimuses, võeti vaatluse alla 19 mõõteseadet ning uuriti nende registreeritud näitude erinevusi kalibratsioonisüsteemiga võrreldes, kui jalgrattal ka mõõtmise ajal käike vahetatakse. Kalibratsiooniseadme tööpiirkonnaks võeti nende mõõtmiste puhul 50-900W. Saadud

tulemustest selgus, et kõiki seadmeid arvesse võttes on nende keskmine määramatus  $2.5 \pm 5\%$ , kuid üle keskmise ehk 2.5%-st täpsemini suutsid tulemusi registreerida vaid 9 eksemplari ning kuni 5%-lise täpsusega funktsioneerisid 12 mõõteseadet. Koguni 4 mõõteseadme täpsus jäi selle uurimuse kohaselt vaid 9-10% vahele.

Kuna SRMi mõõteseadmeid kasutatakse sageli teiste tehnoloogiliste lahenduste hindamisel, siis on antud töös SRMi usaldusväärsust iseloomustatud ka teiste võimsust registreerivate instrumentide (Ergomo Pro, Powertap, Polar) analüüsil.

### Kalibreerimine

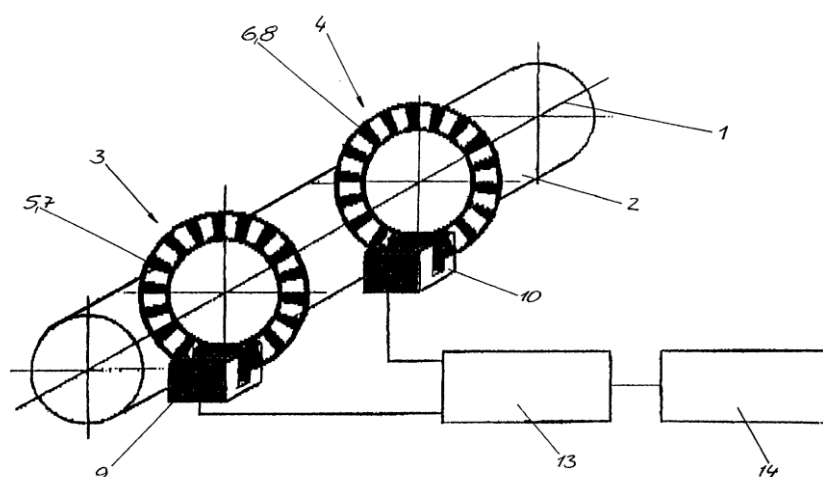
SRM-i seadmete puhul ei pea kasutaja ise kalibreerima rakendatava jõumomendi ja registreeritava võimsuse vahelist sõltuvust, kuna selle protseduuri viivad käsitsi läbi tootja tehase töölised. Täpseimate tulemuste saavutamiseks peab aga kasutaja enne iga sõitu ning muutlike keskkonna tingimuste korral ka pingutuse käigus kontrollima ja vajadusel muutma seadme nullseisundi väärtust ehk selle signaali suurust, mille korral pedaalidele jõudu ei rakendata. Kuna eelnevad protseduurid ei ole seadme kasutaja pädevuse suhtes eriti nõudlikud, siis on ka registreeritavate näitude usaldusväärsus suurem. [25]

## 2.5. Ergomo Pro

### Tööpõhimõte

Ergomo süsteemi tööpõhimõte seisneb keskjooksu väändumise uurimises ning selle täpsemaks selgitamiseks lähtume seadme leiutajale S. Gerlitzkile kuuluvast vastava sisuga

Figur 1



Joonis 5 - Keskjooksule monteeritava mõõtesüsteemi ehitus [8].



patendist [8] ja seadet tootva ettevõtte veebilehel esile toodud kirjeldustest [27]. Soovitud funktsionaalsuse saavutamiseks on keskjooksule kinnitatud kaks pöörlemisteljega risti paiknevat perforeeritud ketast, nii nagu seda on näidatud alloleval joonisel 5 ning on tähistatud seal numbritena 7 ja 8. Ketaste pöörlemisel katkestatakse nende ehituslike iseärasuste abil neile sensorite (joonisel 5 elemendid 9 ja 10) juures langevaid optilisi signaale, genereerides selle tulemusena kumbagi ketta juures nelinurksignaale. Andurid (9 ja 10) registreerivad tekitatud signaale ja edastavad neid mikrokontrollerile (13), kus teostatakse signaalide analüüsi. Andmetöötluse käigus selgitatakse välja, kui suur on jõu rakendamise põhjustatud ning perforeeritud ketaste abil registreeritud signaalide erinevus võrreldes kalibratsiooni näitajatega. Selle analüüsi tulemusena on võimalik määrata nii keskjooksu pöörlemise nurkkiirust kui ka ketaste vahelist väändnurka, mille väärtus sõltub rakendatud jõu suurusest. Kogutud andmete põhjal saab võimsust arvutada avaldisega (3) kirjeldatud mudeli abil, kuid seejuures peab arvesse võtma, et otseselt mõõdetakse vaid vasakpoolsele vändale rakendatud pingutust.

### **Täpsus**

Tootja poolse info kohaselt on perforeeritud ketaste abil minimaalsele registreeritavale nihkele vastav nurk ehk nurgamõõdu lahutusvõime 0.0025 kraadi, mis standardse vända puhul vastab 2.5N suurusele jõule [27]. Seadet tootva ettevõtja andmetel on Ergomo Pro võimsuse mõõtja mõõtemääramatus  $\pm 2\%$ , kuid selle informatsiooni usaldusväärsuse uuringute põhjal on mõõtetulemuste täpsus väiksem. Ergomo lahenduse usaldusväärsuse kontrolli tulemusi on esitatud näiteks S. Duc'i ja teiste autorite koostöös valminud uurimuses [24], kus võrdlust viidi läbi SRMi ja Powertapi võimsuse mõõtjatega. Katseid korraldati neljade erinevate tingimuste juures:

- alla maksimaalse pingutuse jäävate muutuvate võimsuste puhul,
- alla maksimaalse pingutuse jääva konstantse võimsuse puhul,
- maksimaalsel pingutusel saavutatud võimsuse puhul ning
- mitmekesise profiiliga välisõidu marsruudil.

Esimeses osas sõideti rattaga linttrenažööril kolmel erineval tõusunurgal (2%, 4% ja 6%), iga kalde puhul rakendati kahte kiirust (15 ja 25 km/h) ning kolme erinevat eesmise ja tagumiste käikude vahet (39/15, 39/19 ja 39/23)<sup>2</sup>. Neid katsetingimusi järgides saavutati 6 erinevat pedaalimissagedust (47, 60, 75, 80, 100 ja 123 pöör/minutis) ning võimsustaset (100, 165,

---

<sup>2</sup> Käikude vahet on esitatud kujul: hammaste arv eesmisel ketirattal/hammaste arv tagumisel ketirattal.

175, 230, 280 ja 395W). Võrreldes mõõteseadmeid omavahel, selgus, et Ergomoga registreeritud võimsuse näidud on teiste omadest märgatavalt suuremad. SRMi tulemustest erinesid mõõteandmed  $6.3(\pm 2.5)\%$ <sup>3</sup> ning Powertap-ist koguni  $11.1(\pm 2.1)\%$ .

Eelpool mainitud S. Duc'i jt uuringu teises osas sooviti välja selgitada, kas konstantset pingutust rakendades muutuvad jalgratta võimsuse mõõtja andmed ajas. Selleks sooritati lintrenažööril 30-minutilisi katseid, mille käigus hoiti konstantsetena sõidu tõusnurka (2%), kiirust (25 km/h) ning käikude vahekorda (39/16). Sellist konfiguratsiooni jälgides saadi mõõduka intensiivsusega katsetingimused, mille võimsusnäit oli 170W ning pedaalimissagedus oli 85 pöoret/minutis. Tulemusi analüüsides, selgus, et oluline erinevus esines Ergomo ja Powertapi seadmete vahel. Nende keskmised registreeritud võimsused olid vastavalt  $180(\pm 10)W$  ja  $161(\pm 7)W$ . SRMi tehnoloogia mõõtetulemuste keskväärtuseks saadi  $171(\pm 4)W$ .

Uuringu kolmandas faasis selgitati välja, kas katsealuste seadmete võimsusnäitajad erinevad teineteisest lühikeste kiirenduste puhul. Selleks teostati 8-sekundilisi kiirendusi kolme erineva käikude vahekorral (53/15, 53/17 ja 53/21). Maksimaalseteks pedaalimissagedusteks saadi  $104(\pm 5)$ ,  $114(\pm 5)$  ja  $134(\pm 10)$  pöoret/minutis. Katsete sooritamise intensiivsus hoiti madalana, jäädes alla 150W. Märgatavaid erinevusi eksperimendi tulemustes ei täheldatud. Ergomo võimsusnäitajad olid SRMi tehnoloogiast keskmiselt  $1.6(\pm 2.5)\%$  ning Powertapi süsteemist keskmiselt  $3.2(\pm 2.7)\%$  suuremad.

Uurimuse neljandas etapis sooritati vabas õhus ning mitmekesise profiiliga marsruudil 8 mõõtmist. Keskmine sõidu kestvus ja kilometraaž olid vastavalt  $181(\pm 73)$ min ning  $77(\pm 31)$ km. Eksperimendi tulemustest kajastus taas asjaolu, et Ergomo võimsusemõõtja registreerib suuremaid näite, kui SRM ja Powertap ning käesoleval juhul mõõdeti nende erinevuseks vastavalt  $12.0(\pm 5.7)\%$  ja  $16.5(\pm 5.9)\%$ .

Uurimuse esimese osa tulemuste põhjal hinnati ka mõõteseadmete näitude reprodutseeritavust. Selleks arvutati kõigi mõõtetingimuste korral ka variatsiooni koefitsendid<sup>4</sup> (VK). Kõikide katse konfiguratsioonide põhjal arvatud keskmised VK-d olid Ergomo, SRMi ja Powertapi jaoks vastavalt  $4.1(\pm 1.8)\%$ ,  $1.9(\pm 0.4)\%$  ja  $2.1(\pm 0.8)\%$ . Nende tulemuste põhjal on selgelt märgata, et Ergomo tehnoloogia on teistest võrdluses osalenud lahendustest ebatäpsem ja -usaldusväärsem. Siiski peaks mainima, et kuna võrdlevate

<sup>3</sup> Andmed olid mainitud töös esitatud järgneval kujul: mõõtetulemuste keskmine väärtus ( $\pm$  standardhälve).

<sup>4</sup> Variatsiooni koefitsent näitab standardhälbe ja mõõtmiste keskväärtuse suhet.

mõõtmiste teostamiseks kasutati iga tehnoloogilise lahenduse puhul vaid ühte eksemplari, siis võivad S. Duc'i jt autorite koostöös valminud uurimuse tulemused olla eksitavad, juhul kui mõni kasutuses olnud mõõteseadmetest erineb teistest omalaadsetest seadmetest olulisel määral.

### **Kalibreerimine**

Ergomo Pro kalibreerimise meetodika kirjeldamisel lähtume samuti S. Duc'i jt autorite koostöös valminud uurimuses kirjeldatule [24]. Nendele juhistele tuginedes peab süsteemi seadistamiseks tõstma ülesse jalgratta tagumise ratta ning käega ajama ringi parempoolset, ehk ketirattaga vänta. Käigud tuleks viia stabiilse ja sujuva ülekande saavutamiseks kõige n-ö raskemasse asendisse, ehk eest suurima ketta peale ning tagant väikseimale. Seejärel tuleks saavutada pedaalimissagedus, mis jääks vahemikku 50-70 pöört/minutis ning kui kõik eelnevad tingimused on täidetud, siis saab mõõtesüsteemi kompuutris käivitada kalibratsiooni teostava programmi. Seadistamise korrektsust saab kontrollida kui eelpool kirjeldatud aspekte arvesse võttes jäävad parempoolset vänta käega ringi ajades võimsusnäitajad vahemikku 0-5W ning vasakpoolset vänta käsitsi keerutades peavad need suurused jääma 5-15W piiresse.

## **2.6. Polari keti võnkumist monitooriv seade**

Segaduste tekkimise vältimises peame mainima, et Polar toodab ka pedaalipõhist võimsuse mõõtjat, kuid siinkohal vaatame ainult keti võnkumist monitoorivat seadet.

### **Tööpõhimõte**

Polari loodud võimsuse mõõtja põhineb keti võnkumise ja kiiruse mõõtmisel. Keti võnkesagedusest leitakse pinge ketis, mis lubab valemi (2) põhjal arvutada võimsuse. Eeldusel, et kett käitub nagu pingul pillikeel, on tema omavõnkesagedus  $f$  seotud keti pingega  $T$ , kinnituspunktide vahekaugusega  $L$  ja joontihedusega  $\rho$  järgmiselt

$$f = \frac{\sqrt{T}}{2L} \cdot \sqrt{\rho}. \quad (4)$$

Avaldades siit keti pinge  $T$  ja asendades avaldises (2) jõu asemele, on tulemuseks võimsuse avaldis

$$P = (2Lf)^2 \rho v. \quad (5)$$

Keti kinnituspunktide vahekauguseks  $L$  võib võtta kesk- ja tagajooksu telgede vahekauguse, keti joontihedus  $\rho$  tuleb määrata keti massi ja pikkuse suhtena. Mõõtes keti võnkesageduse  $f$  ja kiiruse  $v$ , on võimsus arvutatav.

Polari loodud võimsusemõõtja tehnoloogilise lahenduse selgitamisel lähtume A. Cote, J. Croy ja J. J. Cote poolt leiutatud seadme patendist [9]. Selle dokumendi kohaselt on ühe võimaliku lahendusena jalgratta sidevardale paigaldatud vähemalt kaks sensorit, mille ülesandeks on keti vibreerimise sageduse mõõtmine. Sisuliselt on need andurid väikesed poolid, milledest voolu läbi juhtides saavad elektromagnetid ning seejärel on need võimelised tajuma keti liikumist sensorite suhtes. Keti juures mõõdetud võnkumiste sageduse jälgimist võib häirida ka keti ringliikumise põhjustatud signaali registreerimine, mistõttu on tarvis leida lahendus nende eristamiseks. Patendi kohaselt on tagumise käiguvahetaja hammasrataste lähedale, eelnevate anduritega analoogse sensori paigutamine, üks võimalik meetod mainitud probleemi lahendamiseks. Sellisel juhul suudaks lisasensor registreerida mürasignaali, mis on võimalik protsessoris teostatava andmetöötluse käigus kasulikust signaalist eristada. Lisaks müra mõõtmisele saab selle anduriga mõõta ka keti liikumise kiirust, mis Polari tehnoloogilise lahenduse puhul on vajalik võimsuse arvutamiseks. Avaldisest (5) on näha, et käesoleva tehnoloogilise lahenduse puhul ei pea võimsuse mõõtmiseks sõidu ajal teisi parameetreid peale keti liikumiskiiruse ja võnkesageduse jooksvalt mõõtma, kuid kasutaja peab arvutusmudelil muutumatute suuruste väärtused ehk antud juhul suurused  $L$  ja  $\rho$  ise, enne seadme kasutamist, ära määrama.

## Täpsus

Polari võimsuse mõõtja täpsuse hindamisel saame lähtuda G. P. Milleti jt autorite koostöös valminud uurimusest [28], mille eesmärk oli teostada mõõtmisi mudeli S710 võimsusnäitajate usaldusväärsuse ja paikapidavuse kontrollimiseks. Seadme täpsuse hindamiseks sooritati võrdlusi SRMi võimsuse mõõtjaga.

Eksperimente viidi läbi kahes erinevas etapis. Esimeses etapis testisid 8 professionaalset jalgratturit uuringu all olevaid seadmeid välitingimustes. Katse ülesehituse kohaselt selgitati esmalt välja jalgratturite maksimaalne võimsustoodang, mille määramisel kasutati statsionaarset võimsusemõõtjat Monark 818E. Kaheksa ratturi keskmiseks vastavaks näitajaks mõõdeti  $375 \pm 45W$ <sup>5</sup>. Nende näitude põhjal määrati igale sportlasele kolm intensiivuse astet

---

<sup>5</sup> Selles eksperimendis esitati tulemusi samuti järgneval kujul: mõõtmiste keskmine väärtus±standardhälve.

(60%, 75% ja 90% maksimaalsest jõudlusest), mille juures mõõtmisi sooritama hakati. Katsete kestel pidid ratturid intensiivsuse taset stabiilsena hoidma vastavalt SRMi mõõteseadme näitudele. 60% ja 90%-lise raskusastmega viidi läbi kummalgi juhul istuvas asendis 2 mõõtmist ning 75% puhul teostati 4 mõõtmist, millest üks oli püstises asendis ning ülejäänud istuvas asendis. Tulemustest selgus, et Polari seade registreeris oluliselt suuremaid võimsuse näitajaid, kui SRM, erinedes selle mõõteandmetest keskmiselt  $7.4 \pm (5.1)\%$ . Märgata oli ka seda, et pingutuse intensiivsuse kasvades suurenesid ka erinevused kahe mõõteseadme vahel. Korrelatsioon eelnevalt mainitud parameetrite vahel oli 0.79.

Teises uuringu etapis testisid mõõteseadmeid 44 erineva sõiduvõimega ratturit ning need mõõtmised viidi läbi laboratoorsetes tingimustes. Seekord pidid ratturid rakendama pukil sõites konstantset võimsust (150W) ning selle intensiivsuse juures uuriti lugemite näitused kolmel pedaalimissagedusel (60, 90 ja 110 pöört/minutis). Mõõtetulemustest selgus taaskord, et Polari seade S710 registreerib suuremaid võimsuseid, kui SRM. Keskmise näitude erinevus oli  $4.2 \pm (4.9)\%$ . Märgata oli ka asjaolu, et pedaalimissageduse kasvades suurenesid kahe mõõteseadme vahelised võimsuste erinevused. 60, 90 ja 110 pöört/minutis sagedustel olid Polari tehnoloogilise lahenduse näitajad suuremad vastavalt  $0.6 \pm (3.8)\%$ ,  $4.4 \pm (3.7)\%$  ja  $7.8 \pm (4.4)\%$ .

Uurimuse käigus kontrolliti ka SRMi ja Polari seadmete usaldusväärsust. Selleks arvatati variatsiooni koefitsiendid professionaalsete ratturite abil läbi viidud nelja katse puhul, mille intensiivsuse astmeks oli 75% maksimaalsest võimsustoodangust. Tulemustest kajastus ka seekord SRMi paremad mõõteomadused, kuna Polari ja SRMi seadmete näitude variatsiooni koefitsiendid olid vastaavalt  $2.2\%<sup>6</sup>$  ja  $1.9\%$ .

### **Kalibreerimine**

Polari keti võnkumist monitooriva võimsuse mõõtja kalibreerimist selle tootja poolsete soovitude järgi ei teostata [2, lk 32-33].

## **2.7. PowerTap**

### **Tööpõhimõte**

PowerTapi jalgratta võimsuse mõõtja tööpõhimõtte selgitamisel tugineb seda seadet tootva ja arendava ettevõtte *Saris Cycling Group*-i nimele kuuluvast patendile [11], kus tehnoloogia leiutajaks on märgitud T. W. Lassanke.

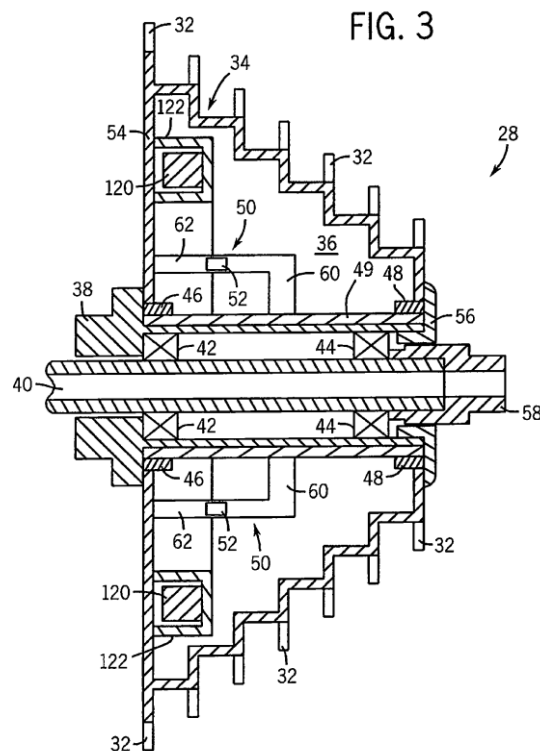
---

<sup>6</sup> Uurimises ei märgitud ära variatsiooni koefitsientide mõõtetäpsust.

Powertapi tehnoloogia kohaselt monteeritakse võimsuse mõõtmiseks tarvilik riistvara tagumise jooksu ketirataste kasseti sisemusse, ehk kasseti ja vabajooksu vahele tekkivasse õõnsasse ruumi (joonisel 6 näidatud numbriga 36). Ühe võimaliku versiooni (patendi autori eelistatud lahenduse) kohaselt on rattasportlase pedaalimisest põhjustatud jõudu mõõtvad andurid paigutatud kasseti sisemuses paiknevatele jõu ülekande ahela üheks lüliks olevatele painduvatele taladele (nr 50 *joonisel 6*) ning on tähistatud *joonisel 6* numbriga 52. Paigaldatavate andurite arv võib ulatuda ühest kuni eelpool mainitud kasseti sisemuses paiknevate talade arvuni. Pedaalimise käigus

tensoanduritega registreeritavad signaalid muutuvad vastavalt rakendatava jõu suurusele ning omandatud andmete töötlus teostatakse peale võimendamist ja digitaliseerimist süsteemi juurde kuuluvas protsessoris. Lisaks tensoandurile on võimsuse arvutamiseks vajalik mõõtesüsteemi paigaldada ka sensor, mis on võimeline mõõtma nurkkiiruse suurust. Selle anduri valiku ehituslikku spetsiifikat ei ole kõneall olevas patendis kirjeldatud. Powertapi tehnoloogia kasutab analoogselt SRMi, Ergomo Pro jt sarnaste lahendustele võimsuse arvutamiseks avaldisega (3)

kirjeldatud mudelit, mille jaoks tarvilikud rehkendused teostatakse peale anduritelt signaalide kogumist mõõtesüsteemi protsessoris. Arvutuskeskusest edastatakse signaal transmitterile, mis kannab traadita ühenduste abil informatsiooni edasi rattakompuutri vastuvõtjale. Kõik rattakompuutrile signaali edastamiseks vajalikud riistvara elemendid on võimalik paigutada ketirataste kasseti ja vabajooksu vahelisse õõnsusesse (nr 36 *joonisel 6*).



Joonis 6 - Tagumise ratta veermik [11].

### Mõõtetäpsus

Lisaks SRMi võimsuse mõõtjale on ka Powertap üks täpsemaid jalgratta võimsuse mõõtjaid ning ka selle tehnoloogia abil on teostatud teiste mõõteseadmete usaldusväärsuse uuringuid [24]. Powertap'i tootjate veebilehe andmetel jääb nende seadme täpsus  $\pm 1.5\%$  piiresse [29]

ning selle väite paikapidavuse uurimiseks võtame aluseks W. Bertucci jt koostöös valminud artikli [23], mille raames võrreldi Powertapi tehnoloogiat SRMi seadmega. Uurimus viidi läbi analoogselt käesoleva töö alapeatükis 2.5 kirjeldatud metoodikale, mida rakendati ka Ergomo Pro mõõteseadme usaldusväärsuse hindamiseks [24].

Katsete esimese osa tulemustest selgus, et Powertapi ja SRMi mõõteandmete vahel eksisteeris tugev korrelatsioon ( $r=0.99$ ) võimsuste vahemikus 100-420W. Kõikide mõõtmiste (linttrenažööril kaldenurkade 0%, 2%, 4% ja 6% juures teostatud mõõtmiste) keskmine erinevus nende seadmete näitude vahel oli  $2.9(\pm 3.3)$ W ning linttrenažööril vaid 2%, 4%, ja 6% kallakuga tõusul leitud tulemusi keskmistades selgus et Powertapi näidud on  $1.2(\pm 1.3)$ % väiksemad SRMi omadest. Keskmised mõõdetud väärtused olid seejuures vastavalt  $241.3(\pm 101.2)$ W ja  $238.4(\pm 100.6)$ W. Ühtlasi selgus eksperimendi tulemustest asjaolu, et kumbagi tehnoloogia puhul ei sõltunud võimsuse näidud oluliselt ei pedaalimissagedusest ega ka sõiduasendist.

Uurimuse teises osas sooritatud katsetega taheti teada saada, kas konstantset intensiivsust 30-minutilise pedaalimise käigus hoides, sõltuvad registreeritud näidud ajast või seadme tehnoloogiast. Tulemustest kajastus, et SRMi ja Powertapi võimsusandmed ei erinevad teineteisest olulisel määral. Nende keskmised väärtused olid vastavalt  $187.3(\pm 4.4)$ W ja  $184.0(\pm 4.6)$ W. Ühtlasi selgus, et kumbagi seadme puhul ei esine olulist näitude sõltuvust ajast.

Kõige enam lahkkelisid kahe tehnoloogilise lahenduse vahel mõõdeti uurimuse kolmandas osas, kus registreeriti võimsusandmeid kiirendustestidel. Selgub, et madalatel käikude vahekordadel (antud juhul 39/23) näitab Powertap ligikaudu 8% väiksemaid suursusi, kui SRM. Suuremate (39/14) ja keskmiste (39/17) käikude vahekordadega olulisi muudatusi ei täheldatud.

Neljandas eksperimentaalses osas kasutati võimsusemõõtjaid vabas õhus mitmekesistel marsruutidel ning nendel tingimustel ei esinenud olulisi erinevusi kahe lahenduse vahel. SRMi ja Powertapi keskmised võimsuse näitajad sõitude kestel olid vastavalt  $144.6(\pm 83.8)$ W ning  $140.2(\pm 85.3)$ W. Seega keskmiselt hindas Powertap võimsustoodangut ligikaudu 2.7% väiksemaks, kuid SRM.

Uuringu all olevate mõõteseadmete usaldusväärsuse hindamiseks arvutati mõlema seadme jaoks esimese ja teise eksperimendi osa raames ka VK. Esimese osa 2%-6% tõusunurkade juures sooritatud mõõtmiste keskmised VK-d olid SRMil ja Powertapil vastavalt  $1.5(\pm 0.4)$ %

ja  $1.8(\pm 0.6)\%$ . Konstantsel intensiivsusel sooritatud mõõtmiste tulemustest arvatud VK-d olid SRMil ja Powertapil vastavalt 1.7% ja 1.5%.

Powertapi mõõteseadme puhul on uuritud ka selle näitude sõltuvust temperatuurist ning nendest tulemustest selgus, et temperatuuridel  $8^{\circ}\text{C}$  ja  $21^{\circ}\text{C}$  erinevad andmed ligikaudu 8.4% [17]. Viimati nimetatud uuringus võrreldi Powertapi mõõtetäpsust ka dünaamilise kalibratsiooniseadmega, mis funktsioneeris võimsusvahemikus 50-1000W ja pedaalimissagedusel 100 pööret/minutis ning nende tulemuste põhjal erinevad Powertapi võimsusnäitajad  $-2.5(\pm 0.5)\%$ .

### **Kalibreerimine**

Powertapi kalibreerimiseks ei pea vastavalt tootja väljastatud kasutusjuhendile [30] tegema muud, kui seisva jalgratta, millele jõudu ei rakendata, kompuutris valima vastava funktsionaalsusega programmi ning selle käivitama. Seda protseduuri on soovitatav korraldada enne igat sõitu ning ka siis, kui eksisteerib kahtlus, et võimsuse näidud on temperatuuri muutuse või mõne muu põhjuse tõttu eksitavad.

## **2.8. iBike**

### **Tööpõhimõte**

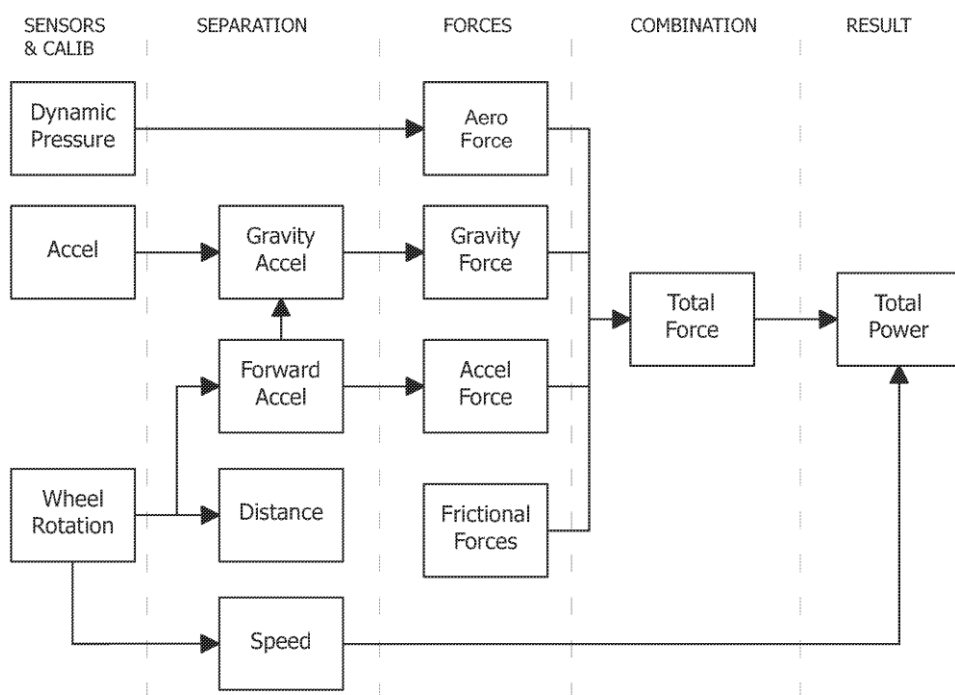
Eelnevalt kirjeldatud võimsuse mõõtmise meetodid põhinesid otsesel jalgratturi pingutuse tulemusena tekitatud jõu registreerimisel, kuid toodetava võimsuse suurust saab hinnata ka kaudsel teel ehk matemaatilise modelleerimise abil [13]. iBike jalgratta võimsuse mõõtja tööpõhimõtte selgitamisel lähtume seda seadet tootva ettevõtte (Velocomp) nimele kuuluvast vastava sisuga patendist [12]. iBike mõõdab soovitud parameetrite arvutamiseks nende takistusjõudude suurust, mida jalgrattur peab ületama. Peamiste ratturi sõitu takistavate tegurite seas on tuuletakistus, hõõrdejõud rattalaagrites ja jõu ülekande mehhanismis ning kineetilise ja potentsiaalse energia muutused [13]. Vastavalt Newtoni kolmandale seadusele on viimati nimetatud jõudude summa võrdne ja vastupidise suunaga nende jõudude summaga, mida sportlane peab rakendama.

Jalgratturile mõjuvate takistusjõudude määramiseks kasutab iBike'i lahendus mitmeid sensoreid. Ühe võimaliku versiooni kohaselt kasutab see tehnoloogiline lahendus võimsuse rehendamiseks järgnevaid andureid:



- rataste pöörlemist jälgivat andurit;
- kiirendusandurit, mis mõõdab muutusi kiiruses ja gravitatsioonilistes jõududes ning mille abil on võimalik määrata kiirendusi ja sõidumarsruudi profiili;
- diferentsiaalset rõhuandurit või baromeetrit, mille abil saab määrata aerodünaamilist takistust;
- temperatuuriandurit, mille abil on võimalik korrigeerida teiste andurite mõõtetulemuste täpsust.

Joonisel 7 on kirjeldatud iBike'i tehnoloogilise lahenduse rakendamise alusalgoritm. Joonisel 7 esimeses tulbas on toodud kasutatavad andurid (ülalt alla): dünaamiline rõhuandur, kiirendusandur, ratta liikumist jälgiv andur. Teises tulbas on mõõdetavad suurused: gravitatsiooniline kiirendus, liikumissuunaline kiirendus, läbitud sõidudistants ja liikumise kiirus. Kolmandas tulbas on registreeritavad jõud: õhutakistus, raskusjõud, Newtoni teise seadusega kirjeldatud kiirendamise jõud ja hõõrejõud. Neljandas tulbas on toodud summaarne liikumist takistav jõud ning viimases tulbas on rakendatav võimsus.



**FIG. 20**

Joonis 7 - iBike-i lahenduse üldine algoritm [12].

Nagu ka eelnevalt jooniselt on näha, ei mõõdeta kõiki võimsustoodangu määramiseks vajalikke parameetreid iBike-ile monteeritud andurite abil. Mõnede suuruste, näiteks hõõrejõu, väärtuse saab arvesse võtta ligikaudsete hinnangute, eelduste või kalibreerimiste

abil. Osad parameetrid on aga seesugused, mida peab iga seadme kasutaja individuaalselt seadistama. Nendeks on näiteks ratturi kaal, pikkus ja sõiduasend.

### **Täpsus**

Käesoleva töö autorile teadaolevatel andmetel ei ole iBike'i tehnoloogia täpsust hinnatud hetkel veel üheski usaldusväärses allikas, seega lähtume täpsuse uurimisel J. C. Martini jt autorite koostöös valminud artiklist [13], kus uuriti matemaatilist modelleerimist kasutava jalgratta võimsuse mõõtmise täpsust võrreldes SRMi tehnoloogilise lahendusega. Selle allika eksperimendid teostati tasasel, ligikaudu 471.8m pikkusel teelõigul, esmalt ühes suunas ning hiljem sellele vastupidisel marsruudil. Katseid viisid läbi kuus kogenud rattasportlast, kes mainitud teelõigu läbimiseks kasutasid kolme erinevat kiirust (7, 9 ja 11 m/s).

Tulemustest selgus, et SRMi ja arvutusmudeliga määratud võimsuse andmed ei erinenud olulisel määral, korrelatsioon nende näitude vahel oli kõrge ( $R^2=0.97$ ). Kõikide mõõtmiste keskmised võimsustoodangud olid SRMil ja arvutusmudelil vastavalt 172.8( $\pm 14.7$ )W ja 172.0( $\pm 15.2$ )W. Nendest tulemustest võib järeldada, et matemaatilist modelleerimist kasutavad võimsuse mõõtjad võivad teatud tingimustel tõepoolest pakkuda adekvaatset informatsiooni võimsusnäitajate kohta, kuid kuna katseid teostati üsna kitsalt piiritletud tingimustel, siis reaalses olukorras ei pruugi modelleerimisele tuginev tehnoloogia usaldusväärset infot pakkuda.

### **Kalibreerimine**

iBike'i uusima mudeli, Newtoni, kalibreerimiseks ei pea selle kasutaja palju vaeva nägema. Vastavalt seadet tootva ettevõtte kodulehel paiknevale kasutusjuhendile [31] sooritatakse mõõtesüsteemi seadistamine ühe 10-minutilise rattasõidu käigus. See protseduuri ei nõua sportlaselt olulist pingutust, vaja on vaid valida kompuutrist vastav programm, pedaalida ühel vähese lii klusega marsruudil ning peale vastava sisulise märguande saamist rattakompuutrit otsa ringi pöörata ning sama teed pidi tagasi liikuma.

### 3. Keti lüli põhine võimsuse mõõtja

Käesolevas peatükis kirjeldatakse võimsuse mõõtmise võimalust keti lülides paiknevate andurite abil ja tutvustame esialgsete mõõtmiste tulemusi ning neil põhinevaid järeldusi.

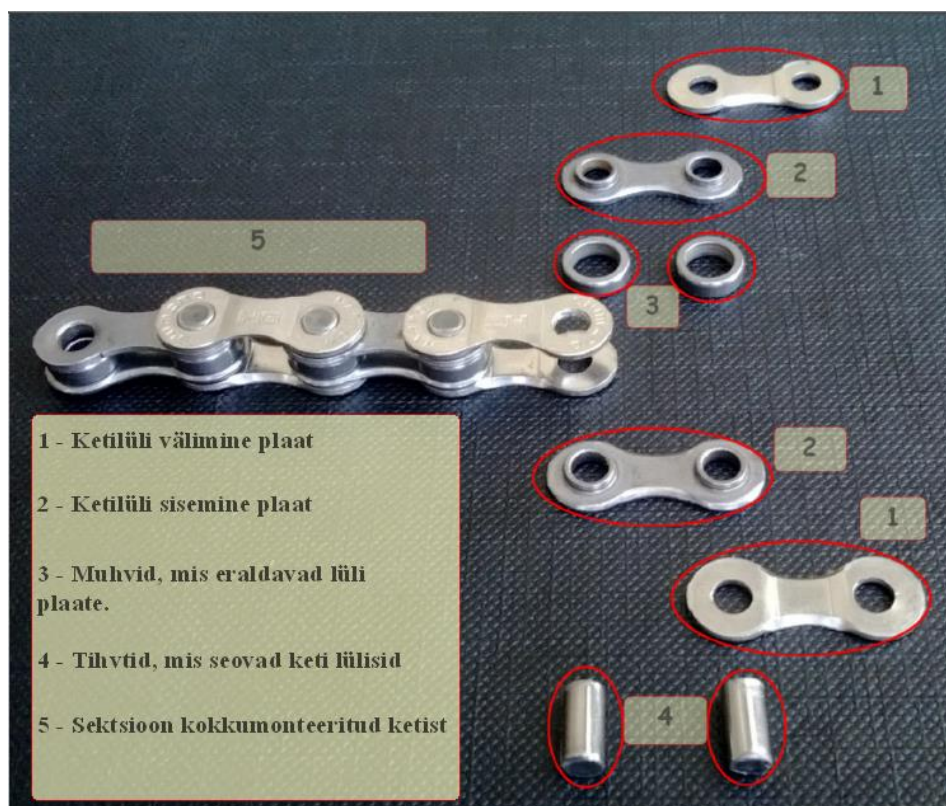
#### 3.1. Tööpõhimõtte ja ehituse kirjeldus

Autorile teadaolevalt ei ole seni uuritud võimalust mõõta jalgratturi võimsust jalgratta keti lüli sees paiknevate andurite abil, ehkki patendikirjeldustes on esitletud põhimõttelist võimalust mõõta sel viisil pinget ketis [32-33]. Töö käesolevas osas tutvustatav lahendus põhineb võimsuse  $P$  avaldises

$$P = Tv, \quad (6)$$

kus  $T$  on keti pinge ja  $v$  on keti lüli joonkiirus, olevate suuruste vahetel mõõtmisel keti lülidesse paigutatud andurite abil.

Järgneva piltlikustamiseks on *joonisel 8* kujutatud ketilülide ehitust ja komponente.



Joonis 8 - Keti komponendid.

Võimsuse katkematuks mõõtmiseks on vaja keti ülemise, vedava lõigu pinget ja kiirust mõõta keti liikumistsükli terves ulatuses. Selle saavutamiseks piisab, kui paigaldame terve keti ulatuses võrdsete vahemaade kaugusele kokku kolm pinget mõõtvat süsteemi. Nii jääb alati vähemalt üks anduriga ketilüli mõõtmiseks olulisse ketilõiku. Neid tingimusi järgides peaks üks andur olema alati tagumise jooksu ketirataste kassetti ja keskjooksu juures paiknevate hammasrataste vahelisel ketilõigul.

Ratturi lihaste töö tulemusena tekkinud ketipinget registreerivateks anduriteks sobiksid levinud mehaanilise pinge andurid – tensoandurid ja piesoelektrilised andurid ning piesoelektrilisel efektil põhinevad trafod. Mehaaniline pinge võib jaguneda keti ristlõikes ebaühtlaselt. Selleks, et kogu mehaanilist pinget keti ristlõikes võimalikult täpselt määrata, peaks seda mõõtma sama ketilüli kummalgi küljel eraldi anduriga. Sensoreid oleks võimalik paigutada tihti õõnsusse või lüliplaadi pinnale. Sensoritelt signaalide lugemiseks on võimalik kasutada, nii nagu ka mõningate teiste eksisteerivate lahenduste puhul, Wheatstone'i sildamist.

Keti plaatide külgedel asuvad andurid on võimalik ühendada jadamisi või rööpselt. Rööpne ühendus on keti konstruktsiooni silmas pidades lihtsamini teostatav. Lihtne analüüs näitab, et juhul, kui mehaaniline pinge jaguneb ketiplaatide vahel ligikaudu võrdselt, on niisuguse pingete erinevuse mõju ühesuguste tensoandurite kogutakistusele tühine.

Kõneall oleva lahenduse iseärasuste tõttu on tarvis pingestada kasutusse võetavaid elektroonikaskeeme ning selle probleemi lahendamiseks on võimalik rakendada alalisvoolu allika pinget vändasüsteemi juurde kuuluva ketiratta ja tagumise jooksu hammasrataste kassetti vahele. Toitevoolu reguleerimiseks saab iga anduri juures kasutada dioode. Dioode mõõtesüsteemile monteerides, on võimalik voolu suunata nii, et keti liikumise kestel on mõõtmisi sooritavate elementide juures paiknevad diodid päripingestatud ning ülejäänud oleksid samal ajal vastupingestatud. Sellisel juhul suudame registreerida vaid keti pinget kajastavate sensorite signaale ning ühtlasi on võimalik säästa süsteemi komponentidele kuluvat energiat. Eelnev elektriskeemi pingestamise kirjeldus on võimalik vaid sellisel juhul, kui jalgratta raam on valmistatud elektrit mittejuhtivast materjalist nagu näiteks süsinikkiust. Vastasel juhul lühistaks rattaraam toiteallika ära ning mõõteandmeid ei oleks võimalik koguda.

Sportlase pingutust iseloomustavat anduri signaali on võimalik edastada näiteks traadita ühenduste teel või tuginedes voolu karakteristikute kõikumiste uurimisele mehaaniliselt

pingestatud (ülemise) ketilõigu otstel. Viimasel juhul on võimalik jälgida, kui suur pingelang esineb ratta ketis paiknevates andurites, kui nende elektrilisi omadusi muudetakse jõu rakendamisest põhjustatud deformatsioonil. Signaali edastamiseks raadioühenduse kaudu on võimalik kasutada peenikesest traadist antenni, mis on kantud ketilüli plaadile. Veel üks alternatiivne võimalus selle probleemi lahendamiseks on kasutada magnetilisele induksioonile põhinevat infoedastusviisi, nii nagu seda on teinud näiteks SRM [7]. Signaali vastuvõtja võiks paikneda näiteks keti lähedal asuva sidevarda osal nii, nagu seda on tehtud ka Polari ketivibratsiooni jälgiva võimsusemõõtja puhul [9].

Võimsuse mõõtmiseks peame me käesoleva lahenduse puhul olema suutelised ka keti liikumise kiirust hindama. Selle probleemi lahendamiseks võib välja pakkuda kolm võimalikku ideed. Esimene meetod oleks keti kiiruse hindamiseks juhul, kui kasutada ketipinget iseloomustava signaali edastamisel traadita ühendusi. Nendel tingimustel saab kiiruse hinnangu tegemiseks kasutada Doppleri efekti, mille kohaselt ketilüli paikneva antenni edastatava signaali sagedus vastuvõtjas muutub vastavalt keti liikumise tempole. Juhul, kui ketile rakendatavat tõmmet mõõta pingutatud ketiosa otstel esinevate voolukarakteristikate muutusi jälgides, on võimalik selle liikumise kiirust hinnata registreeritavate signaalimuutuste andmeid analüüvides. Eeldades, et mõõtmisi sooritavad andurid on monteeritud ketile nii, et mingite ajavahemike tagant esineb alati olukord, millal vooluallika klemmide vahel on päripingestatud vähemalt kaks sensorite süsteemi, siis suureneb nende poolt põhjustatud signaal lühiajaliselt ning seejärel on võimalik hinnata keti lülide liikumise kiirust. Kolmas variant keti kiiruse hindamiseks on paigaldada näiteks käiguvaheaja külge eraldi vastavat otstarvet täitev seade, nii nagu seda on tehtud Polari lahenduse puhul [9].

Eelnevalt kirjeldatud võimsuse mõõtmise meetoodika seab mõningad piirangud ka anduriga ketilüli materjali valiku tegemisel. Vastavalt ISO 9633:2001 standardile [35], mis kirjeldab keti karakteristikuid ning testimise meetodeid, peab minimaalne keti tõmbetugevus katkemisel olema 8kN. Võttes arvesse ka seda, et eelpool kirjeldatud mõõtesüsteemi ehituse nõudmiste järgi peaks andureid sisaldav lüli olema elektrit mittejuhtivast materjalist, siis on võimalik teha ligikaudseid soovitusi, millisest materjalist võiksid ketilülid valmistatud olla. Sobiliku materjali leidmiseks mõõtsime ühe konkreetse keti (Shimano CN-HG91) lüliplaadi ristlõikepindala suuruse (ligikaudu 5 mm<sup>2</sup> kitsaima koha pealt) ning leidsime, et halvimal juhul, kui kogu ketipinget kanduks läbi ühe ketiplaadi, peaks otsitava materjali tõmbetugevus katkemiseni olema  $8\text{kN}/5\text{mm}^2 = 1600\text{MPa}$ . Mainitud ristlõiked on esitletud lisas 2. Samasse

suurusjärku jäävate karakteristikutega dielektrilised materjalid on praeguseks ajaks juba välja töötatud [36] ning seega ei tohiks mõõtsüsteemi väljatöötamisel ületamatuks takistuseks saada materjalide valik. Tuleb silmas pidada, et sisemiste ketiplaatide sisepinnad ja välimiste ketiplaatide mõlemad pinnad puutuvad kokku hammasratastega või käiguvahetaja raamiga ja seega näib optimaalne paigutada andurid sisemiste ketiplaatide väliskülgedele, kus keti tavapärane liikumine rattal jätab selleks umbes  $20\text{mm}^2$  vaba pinda. Keti maksimaalsel voltimisel jääks vaba pinda ligikaudu  $10\text{mm}^2$ . Olenevalt kasutatavast materjalist tuleks vajadusel plaatide sisekülgi sobiva kattega kulumise eest kaitsta.

Keti lüli sisse paigutatava mehaanilist pinget mõõtva anduri signaali peab saama edastada eraldiseisvale andmetöötlusseadmele. Järgnevas osas keskendume sellele välja pakutud lahendusele, kus andmeedastuseks kasutatakse rattaketti ja signaal saadakse läbi mehaaniliste ülekannete jalgratta keskjooksu ja tagajooksu metallist kinnitusdetailide vahelt.

### **3.2. Mõõtmised**

Käesolevas punktis kirjeldatakse esialgsete mõõtmiste metoodikat ja tulemusi, mis lubavad hinnata keti kasutamisel andmekandjana tekkivaid takistusi.

Kõik mõõtmised on tehtud statsionaarselt, st olukorras, kus kett on mingis asendis paigal. Mõõtmised on tehtud puhta ketiga (Shimano CN-HG91), mille läbisõit on u. 1000 kilomeetrit ja mida on puhastatud/õlitatud 100-200 kilomeetrise intervalliga, viimati vahetult enne mõõtmist. Eelpool kirjeldatud kett on kujutatud lisas 1. Võrdluseks oli kasutada u. 3500 kilomeetrit läbi sõitnud kett (Shimano CN-HG91), mida oli määratud vajadusest lähtuvalt, kasutades oliiviõli. Niisugune kett võiks iseloomustada äärmuslikult puuduliku hoolduse mõju. Hooldamata kett on samuti kujutatud lisas 1. Mõõtmistel on kasutatud süsinikraamiga jalgratast Trek 5500. Ehkki väljapakutud lahenduses kulgeb vool valdavalt keti vedavas osas (üleval), on siinsed mõõtmised tehtud modifitseerimata ketiga jalgrattal nii, et vool jaguneb vastavalt takistustele keti ülemise ja veidi pikema alumise osa vahel. Alalispinge mõõtmiseks on kasutatud digitaalset multimeetrit Düwi EM392, vahelduvpinge genereerimiseks ja tuvastamiseks kasutati ostsilloskoopi Welleman PCSU200. Etteruttavalt võime öelda, et sooritatud mõõtmiste täpsuse hindamisel jätsime arvestamata B-tüüpi, ehk mõõteseadmest

põhjustatud määramatused, kuna statistiliste mõõtmiste tulemuste varieerumine (A-tüüpi määramatus) oli tunduvalt suurema osakaaluga.

Pidades silmas lahendust, mille puhul tensoanduri muutuvat takistust mõõdetakse läbi keti, on oluline teada keti elektrilisi omadusi, sest tensoandurite normaalses töörežiimis muutub nende takistus vaid suurusjärgus 0.1% [37] ja selle registreerimine eeldab ülejäänud mõõteahelalt stabiilset elektritakistust. Mõõtmiste alguses ilmnas, et antud jalgrattal on paralleelselt ketiga elektriline ühendus tagumise jooksu kinnituse ja keskjooksu vahel läbi tagumise käiguvahetaja trossi, juhtraua ja eesmise käiguvahetaja trossi ning eesmise käiguvahetaja. Seda on lihtne kõrvaldada nt käiguvahetuslinkide sobiva kinnitamisega. Tänapäeval levinud mittejuhtivast materjalist juhtraudadega ei tohiks nimetatud probleemi tekkida. Edasiste mõõtmiste ajaks ühendasime tagumise käiguvahetaja trossi käiguvahetaja küljest lahti. Kõik mõõtmised on tehtud ülekande 53/13 korral. Iga kahe mõõtmise vahel pöörasime vänta 180 kraadi. Puhta ja õlitatud ketiga kümnel korral takistust mõõtes oli keskmine takistus keskjooksu võlli ja tagarummu võlli vahel  $31.2 \Omega$  ( $\sigma^7 = 21.0\Omega$ ). Keti mõõdukal mehaanilisel pingestamisel vähenes takistus märkimisväärselt. Käe jõuga pedaalile surudes ja samal ajal tagaratast kinni hoides, oli võimalik saavutada takistuseks  $0.8 \Omega$ , kusjuures see näit püsis suhteliselt stabiilsena võrreldes lõdva keti takistusega. Võrdluseks tahtsime teostada sarnase mõõtmise kulunud ja halvasti hooldatud ketiga. Selleks oli kasutada u. 3500 kilomeetrit läbi sõitnud kett, mida oli määratud vajadusest lähtuvalt, kasutades oliiviõli. Niisugune kett võiks iseloomustada äärmuslikult puuduliku hoolduse mõju. Eelpool kirjeldatud hooldamata kett on illustreeritud kujul esitletud lisas 1. Mõõtmisi ei õnnestunud siiski samal viisil teha, sest hooldamata keti takistus jalgrattal oli suurem kui 2 megaoomi ja seega meie poolt kasutatud mõõteriista mõõtevahemikust väljas. Keti pingutamisel eelkirjeldatud viisil õnnestus mõõta tema takistuseks 1.1 megaoomi.

Et teha kindlaks, kus tekib suur ja muutlik takistus ketis, mõõtsime nii puhta kui musta keti puhul erinevate lüli detailide vahelist takistust. Nii puhta kui musta keti puhul oli takistus tihvti ja välimise lüliplaadi vahel alla 1 oomi ja seega liiga väike, et seda saaks meie kasutatud oom-meetriga tuvastada. Puhta keti puhul oli kümne lüli mõõtmise tulemusena takistus seesmise lüliplaadi ja tihvti vahel 4.3 oomi ( $\sigma=3.0$  oomi). Musta keti puhul oli takistus seesmise lüliplaadi ja tihvti vahel kõigil mõõtmistel üle 2 megaoomi. Mõlema keti puhul osutus vajalikuks kontaktpinnad enne mõõtmist teemantviiliga haljaks puhastada, et tagada

---

<sup>7</sup>  $\sigma$  – standardhälve.

hea elektriühendus mõõteseadmega. Uuema keti puhul tuli stabiilse kontakti saamiseks eemaldada tihvtide pinnakate tihvti otstelt, vanema keti puhul tuli eemaldada roostet.

Esialgne mõõtmine rattalt eemaldatud kettidega näitas, et 1 MHz sagedusega sinusoidset signaali kandsid tuvastatavalt edasi nii puhas kui must kett. Mõlemal juhul oli sisendpinge efektiivväärtuseks 1.41 V. Puhta keti puhul oli väljundpinge efektiivväärtuseks u. 30 mV ja musta keti puhul u. 10 mV.

### 3.3. Järeldused

Me loeme tehtud mõõtmised piisavaks, et pidada jalgrattaketi elektrijuhtivust suuresti sõltuvaks keti pingsusest ja veelgi enam puhtusest. See teeb küsitavaks võimaluse kasutada ketti tensoanduri signaali kandjana, kui signaaliks on väikesed muutused alalisvoolu takistusele. Sellegipoolest võib osutada võimalikuks kasutada ketti toitepinge juhtimiseks andurit ja raadiosaatjat sisaldava ketilülini. Kuivõrd elektritakistus ketis tekib valdavalt üksteise suhtes liikuvate osade vahel, mis on ka mustuse kogunemiskohtadeks, saaks elektritakistuse muutumist kasutada keti puhtuse indikaatorina, mis võimaldaks hinnata puhtust keti töö seisukohalt olulistes ja visuaalselt varjatud osades. Uurimist vääriks ka võimalus kasutada ketti vahelduvpinge juhtimiseks anduriga lülini, kus anduriks võiks olla piesotrafo.

Esmaste mõõtmiste põhjal saame järeldada, et käesoleva projekti järgnevates arenguetappides tasuks eelkõige keskenduda seesuguste mõõtesüsteemide arendamisele, mille korral toimub signaali edastamine traadita ühendusi kasutades. Ühtlasi selgus esialgsete uuringute põhjal, et keti lülile paigaldatavate komponentide iseärasustest tingitud piirangud keti materjalile ei välista selle idee teostust, kuna vastavaid nõudmisi rahuldavad dielektrilised materjalid on käesolevaks ajaks juba välja töötatud. Tõenäoliselt üheks suuremaks komistuskiviks antud töö raames väljapakutud võimsuse mõõtja edasiarendusetel, võib kujuneda võrdlemisi ranged piirid mõõtesüsteemi ruumilisel paigutamisel. Eeldades, et mõõtesüsteem ei talu hästi hõõrdumisest tingitud kahjustusi, on vajaliku riistavara monteerimiseks võimalik kasutada ligikaudu 10-20mm<sup>2</sup> suurust pinda.



Kuna eesmiste ketirataste ja tagajooksu kasseti vaheline takistus sõltus mõõtmistel oluliselt keti pingest, viib see mõttele kasutada keti enda loomuliku elektritakistuse muutumist keti pinge määramiseks. Ilmselt ei oleks tegemist kuigi täpse mõõtmisega, kuid koos sobiva sõidueelse või ka -aegse kalibreerimisprotsessiga võiks niisugune lahendus olla potentsiaalselt huvipakkuv võimalus ratturi võimsuse hindamiseks väga lihtsa seadmega.

## 4. Kokkuvõte

Antud töö üheks eesmärgiks oli uurida hetkel eksisteerivate jalgratta võimsuse mõõtjate tehnoloogiliste lahenduste tööpõhimõtteid ja usaldusväärsust ning peab tõdema, et jalgrattaspordis on võimsuse mõõtmise meetodeid üsna palju ning konkreetsele kasutajale sobilik lahendus sõltub eelkõige sellest, millisel otstarbel on plaanis mõõteseadet kasutada. Usaldusväärsuse uuringutest selgus, et valikusse võetud seadmetest on selle kriteeriumi põhjal parimad lahendused välja töötanud SRM ja Powertap ning vastava pingerea teise otsa jäävad vändale kinnitatud Stages Cycling, keskjooksule monteeritud Ergomo Pro ja Polari ketivibratsiooni jälgivad võimsuse mõõtjad. Garmin Vectori, Stages Cyclingi ja iBike mõõtevahendite usaldusväärsust on raske hinnata, kuna nende seadmete kohta ei ole veel autorile teadaolevatel andmetel vastava sisulisi uuringuid tehtud.

Teine käesoleva töö eesmärk oli välja pakkuda omapoolne idee võimsuse mõõtmiseks rattaspordis. Üks võimalik lahendus selle eesmärgi saavutamiseks oleks mehaanilist pinget tajuvate sensorite paigaldamine jalgratta keti lülidesse. Esialgsete mõõtmiste ja uuringute põhjal võib arvata, et see idee on hetkel eksisteerivate tehnoloogiliste vahendite abil teostatav, kuid vajaks kindlasti edasist analüüsi. Väljapakutud idee kohaselt saaks võimsust mõõta, kui keti lülidesse oleks monteeritud minimaalselt kolm mehaanilist pinget mõõtvat andurite süsteemi. Nende sensorite elektriliseks toiteks võiks kasutada alalisvooluallikaid ning sobiliku vooluringi tekitamiseks saab dioode kasutades pingestada vaid vändasüsteemi hammasratta ja tagumise ketirataste kasseti vahelisele ketilõigule jäävaid mõõtesüsteeme. Anduritelts signaali edastamiseks saaks arvatavasti kasutada traadita ühendusi (raadioühendus, magnetilise induktsioonile tuginev side ja võibolla veel mõni alternatiiv eelnevatele). Käesolevas töös uurisime ka seda, kas mehaanilise pingest signaali on võimalik edastada jalgratta keti kaudu, kuid esmaste mõõtmiste põhjal võib järeldada, et see lahendus on pigem ebarealistlik. Võimsushinnangu saamiseks vajaliku keti liikumise kiiruse määramiseks on võimalikud mitmed lahendused. Seda on võimalik teostada näiteks doppleri efekti abil, andurite liikumisel tekkivate signaalimuutuste analüüsil ning samuti on võimalik monteerida käiguvahetajale vastavat otstarvet täitev lisaseade.

Antud töö edasi arendamisel tuleks uurida, kas ja kuidas väljapakutud lahenduse teostamiseks vajalik riistvara on võimalik monteerida keti lülidele ning kui see on teostatav, siis on vajalik välja selgitada, mil viisil oleks võimalik anduritega registreeritud signaalide edastamine.

## 5. Summary

### POWER METERS FOR BICYCLES

Vegard Kruusla

One aim of this research was to investigate the principles of operation and accuracy of the currently existing technological solutions for measuring road cycling power. According to our findings, we must admit that the variety of measuring methods is relatively wide and an appropriate solution for a specific user depends primarily on the purpose of use. Information gathered on the reliability of power meters revealed that the best technical solutions concerning this matter were provided by SRM and Powertap, while Ergomo Pro and Polar power measuring devices showed less reliability. It proved difficult to assess the accuracy of Garmin Vector, Stages Cycling and iBike because no independent and trustworthy research had been conducted on this subject.

Another aim of this research was to provide a new method for measuring road cycling power. One possible solution to achieve this goal would be mounting sensors that are capable of measuring mechanical stress on a chain link. Preliminary measurements and research shows that the proposed idea is technologically feasible, however further analysis must certainly be done to confirm it. According to the proposed methodology, at least three tension responsive sensors must be installed to ensure constant stream of measured data during an entire movement cycle of the chain. The sensors can probably be powered by a DC power supply unit. The desired electrical circuit is created using diodes for leading the current through only that segment of chain that lies between rear cassette and crankset. Power Data can most likely be transmitted via wireless connections since preliminary measurements of chain provided signal communication showed unsatisfactory results. Measuring the speed of a moving chain is also necessary for determining the amount of power produced and there are several methods for acquiring that data. For example if the tension responsive sensors transmit data wirelessly, then detected signals can be used for measuring speed using the Doppler effect or if at some point in time the signal is transmitted by two or more sensors then simple signal processing tools can be used.

To proceed with the development of this measuring method, one must investigate if and how the necessary hardware required can be fitted on a chain link and if prior is possible then the specific means for data communication should be determined.

## **6. Tänuavaldused**

Täna oma juhendajat Erik Randlat uurimuse teema soovitamise ja suurepäraselt sujuva koostöö eest. Samuti soovin tänada kõiki sõpru ja pereliikmeid, kes oma nõu ja jõuga töö valmimisel abiks olid.

## 7. Kasutatud kirjandus

- [1] *Power meters: Everything you need to know. Cycling Weekly.* 26. aprill. IPC Media, 2012. a.
- [2] **Allen, H. ja Coggan, A.** *Training and racing with a power meter.* Boulder: VeloPress, 2006. ISBN-10:1-931382-79-4; ISBN-13:978-1-931382-79-3.
- [3] *On the efficiency of bicycle chain drives.* **Spicer, J. B., Richardson, C. J. K ja Ehrlich, M. J.** Baltimore: Human Power, 2000. a.
- [4] **Redmond, B. ja Mellor, I. P.** *Device and Method for Measurement of Cycling Power Output.* US20110087446 A1 Ameerika ühendriigid, 14. aprill 2011. a.
- [5] **O'Neill, G. D., et al., et al.** *System and device for measuring and analyzing forces applied by a cyclist on a pedal of a bicycle.* US8011242 B2 USA, 6. september 2011. a.
- [6] **Lull, A. P. ja Golesh, E.** *Apparatus, system and method for power measurement.* US20120214646 A1 Ameerika Ühendriigid, 23. august 2012. a.
- [7] **Shoberer, U.** *Powermeter for a crank drive.* EP0386005 B1 Euroopa, 3. aprill 1996. a.
- [8] **Gerlitzki, S.** *Method and device for determining the torque exerted on a rotating body which can be rotationally driven around a rotational axis.* US6356847 B1 Ameerika ühendriigid, 12. märts 2002. a.
- [9] **Cote, A., Croy, J. ja Cote, J. J.** *Apparatus and Method for Extracting Vibration Data From a Moving Drive Chain.* US20120261895 A1 Ameerika Ühendriigid, 18. oktoober 2012. a.
- [10] **Roessingh, J. R. ja Wendt, D. L.** *Cassette-based power meter.* US8141438 B2 Ameerika Ühendriigid, 27. märts 2012. a.
- [11] **Lassanske, T. W.** *Rear hub power meter for a bicycle.* US8336400 B2 Ameerika Ühendriigid, 25. detsember 2012. a.
- [12] **Cunningham, G. B.** *Method for measuring total force in opposition to a moving vehicle.* US7377180 B2 Ameerika Ühendriigid, 27. mai 2008. a.
- [13] *Validation of a Mathematical Model for Road Cycling Power.* **Martin, J. C., et al., et al.** 3, s.l.: Journal of Applied Biomechanics, lk 276-291, 1998. a., Kd. 14.
- [14] **Garmin Ltd.** *Garmin Brings Power to the People with Vector.* *Garmin.* [Võrgumaterjal] Garmin Ltd, 18. august 2011. a. [Tsiteeritud: 23. mai 2014. a.] [http://garmin.blogs.com/my\\_weblog/2011/08/garmin-brings-power-to-the-people-with-vector-1.html#.U3\\_eJCgZvEI](http://garmin.blogs.com/my_weblog/2011/08/garmin-brings-power-to-the-people-with-vector-1.html#.U3_eJCgZvEI).

- [15] **Maker, R.** Garmin Vector In-Depth Review. *DC Rainmaker*. [Võrgumaterjal] 13. september 2013. a. [Tsiteeritud: 23. mai 2014. a.] <http://www.dcrainmaker.com/2013/09/garmin-vector-review.html>.
- [16] **Garmin.** Vector Owner's Manual. s.l. : Garmin, aprill 2014. a.
- [17] *Accuracy of SRM and Power Tap Power Monitoring Systems for Bicycling.* **Gardner, A. S., et al., et al.** 7, s.l.: Medicine and Science in Sports and Exercise, 2004. a., Kd. 36.
- [18] **Stages Cycling LLC.** Stages Power Tech Specs. *Stages Cycling*. [Võrgumaterjal] Stages Cycling LLC. [Tsiteeritud: 19. Märts 2014. a.] <http://www.stagescycling.com/stagespower-tech-specs>.
- [19] **Stages Cycling LLC.** Stages Power User Guide. *Stages Cycling*. [Võrgumaterjal] 2013. a. [Tsiteeritud: 23. mai 2014. a.] <http://www.stagescycling.com/StagesCycling/Stages%20Power%20User%20Guide%20-%20EN.pdf>.
- [20] *The influence of pedaling rate on bilateral asymmetry in cycling.* **Smak, W. ja Neptune, R. R.** s.l. : Journal of Biomechanics, lk 899-906, 1999. a., Kd. 32.
- [21] *Analysis of the pedaling biomechanics of master's cyclists: A preliminary study.* **Bertucci, W. M., Arfaoui, A. ja Polidori, G.** 2, s.l. : Journal of Science and Cycling, lk 42-46, 2012. a., Kd. 1.
- [22] **Stages Cycling LLC.** Support Zero Reset. *Stages Cycling*. [Võrgumaterjal] Stages Cycling LLC, 2012. a. [Tsiteeritud: 19. mai 2014. a.] <http://www.stagescycling.com/support-zero-reset>.
- [23] *Validity and reliability of the PowerTap mobile cycling powermeter when compared with the SRM Device.* **Bertucci, W., et al., et al.** s.l. : International journal of sports medicine, lk 868-873, 2005. a., Kd. 26. ISSN 0172-4622.
- [24] *Validity and reproducibility of the Ergomo Pro power meter compared with the SRM and Powertap power meters.* **Duc, S., et al., et al.** 3, s.l. : International Journal of Sports Physiology and Performance, lk 270-281, 2007. a., Kd. 2. ISSN: 1555-0265.
- [25] **Schoberer Rad Meßtechnik.** SRM User Manual. *SRM*. [Võrgumaterjal] 2007. a. [Tsiteeritud: 20. mai 2014. a.] [http://www.srm.de/fileadmin/user\\_upload/images/support/manuals/SRM\\_System\\_PowerMeter/manuals\\_SRMsystem\\_powermeter\\_srm\\_SRMManual\\_English.pdf](http://www.srm.de/fileadmin/user_upload/images/support/manuals/SRM_System_PowerMeter/manuals_SRMsystem_powermeter_srm_SRMManual_English.pdf).
- [26] *Validation of SRM power cranks using dynamic calibration.* **Lawton, E W, Martin, D T ja Lee, H.** Canberra : 5th IOC World Congress on Sport Sciences, 1999.
- [27] **Ergomo.** Sensoraufbau. *Ergomo Pro*. [Võrgumaterjal] Ergomo. [Tsiteeritud: 25. märts 2014. a.] <http://www.ergomo-systems.de/app/download/6349726556/measurement+principle.pdf?t=1358355374>.

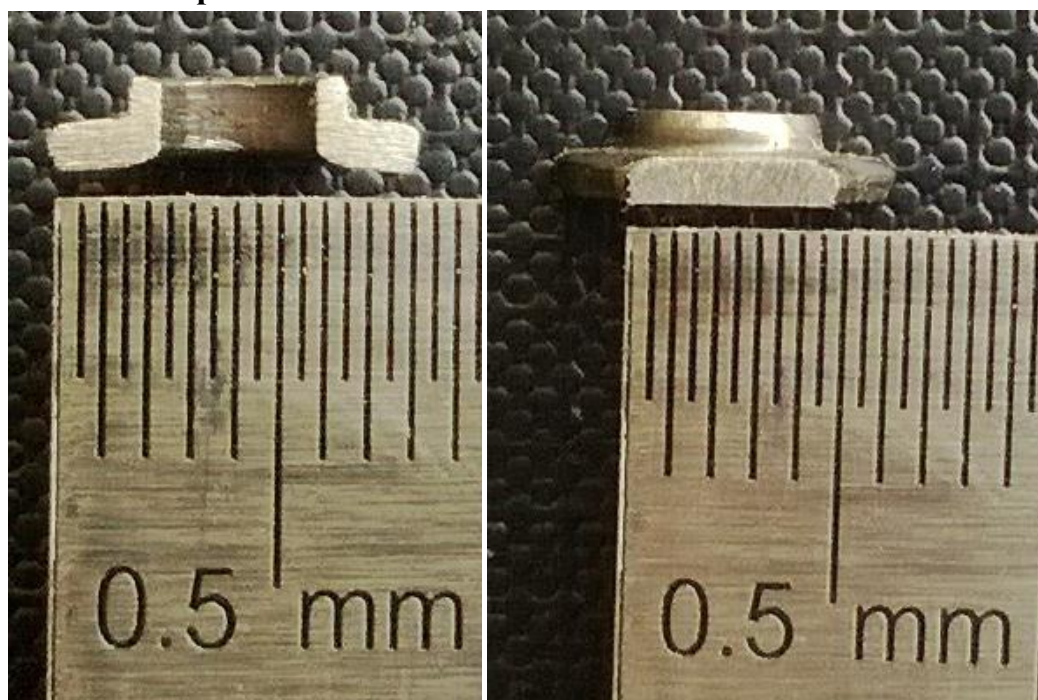
- [28] *Validity and Reliability of the Polar S710 Mobile Cycling Powermeter*. **Millet, G. P., et al., et al.** New York : International Journal of Sports Medicine, lk 156-161, 2003. a., Kd. 23. ISSN 0172-4622.
- [29] **Saris Cycling Group, LLC**. Our System: PowerTap Hubs - Accuracy is everything. *Powertap*. [Võrgumaterjal] Saris Cycling Group, LLC, 2014. a. [Tsitereitud: 23. mai 2014. a.] <http://www.powertap.com/pages/our-system>.
- [30] **Saris Cycling Group**. CycleOps PowerTap Owner's Manual. Madison: Cycleops, 2004. a.
- [31] **iBike**. iBike Newton Instructions. *ibike Power Meter Computers*. [Võrgumaterjal] detsember 2013. a. [Tsitereitud: 23. mai 2014. a.] [http://www.ibikesports.com/wp-content/uploads/2014/03/NewtonInst122213\\_RED.pdf](http://www.ibikesports.com/wp-content/uploads/2014/03/NewtonInst122213_RED.pdf).
- [32] **Xinsheng, L., Zengmei, W. ja Qinghe, A.** *Chain tension measuring instrument*. CN2203448 Hiina, 12.. juuli 1995. a.
- [33] **Osako, N. ja Sakata, K.** *Bicycle for momentum gauge*. JPH05201374 Jaapan, 10. august 1993. a.
- [34] **International Organization for Standardization**. Online browsing platform. *International Organization for Standardization*. [Võrgumaterjal] 20. juuni 2012. a. [Tsitereitud: 17. mai 2014. a.] [http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue\\_ics/catalogue\\_detail\\_ics.htm?csnumber=23532](http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_ics/catalogue_detail_ics.htm?csnumber=23532). ICS:43.150.
- [35] *Comparison of tensile strength of different carbon fabric reinforced epoxy composites*. **de Paiva, J. M. F., Mayer, S. ja Rezende, M. C.** 1, São Carlos : Ibero-american Journal of Materials, lk 83-89, 2006. a., Kd. 9. ISSN 1516-1439.
- [36] **National Instruments**. Measuring Strain with Strain Gages. *National Instruments*. [Võrgumaterjal] National Instruments, 19. aprill 2014. a. [Tsitereitud: 24. mai 2014. a.] <http://www.ni.com/white-paper/3642/en/>.

## Lisad

### Lisa 1 – Mõõtmistel kasutuses olnud ketid



### Lisa 2 – Ketiplaatide ristlõiked





## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks**

Mina, **Vegard Kruusla** (17. jaanuar 1991), annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „VÖIMSUSE MÕÕTMINE RATTASPOORDIS”, mille juhendaja on MSc **Erik Randla**,

- 1.1 reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
- 1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi Dspace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõpuni.
2. Olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, 27.05.2014. a.