

Prehlásenie autora

Čestne prehlasujem, že táto diplomová práca je mojim pôvodným autorským dielom, na ktorom som pracoval samostatne na základe vlastných teoretických a praktických poznatkov získaných počas štúdia a informácií z dostupnej literatúry. Všetky zdroje, literatúru a pramene, ktoré som pri vypracovaní použil, riadne citujem s uvedením plného odkazu na príslušný zdroj. Uvedenú prácu som vypracoval pod vedením Ing. Stanislava Marčeka.

Bratislava, dňa 21. 05. 2015

.....

Bc. Matúš Mačák

Pod'akovanie

Ďakujem rodine, priateľke Anne a môjmu trénerovi, Mgr. Patrikovi Kurilovi, ktorý ma o tréningu naučil všetko, čo som mohol využiť pri návrhu algoritmu.

Abstrakt

Univerzita: Slovenská technická univerzita v Bratislave

Fakulta: Fakulta elektrotechniky a informatiky

Študijný program: Aplikovaná informatika

Školiace pracovisko: Ústav informatiky a matematiky

Autor: Bc. Matúš Mačák

Názov práce: Aproximácia wattového výkonu športovca

Vedúci práce: Ing. Stanislav Marček

Bratislava 2015

Diplomová práca sa zaoberá hľadaním algoritmu pre odhadnutie wattového výkonu športovca, cyklistu. V úvode práce je vysvetlená dôležitosť sledovania výkonu ako hlavného ukazovateľa v tréningu. Popisuje zariadenia, aplikácie a štandardy, ktoré sú vyvinuté za účelom sledovania tréningových údajov. Jadro práce pojednáva o problematike odhadovania výkonu z rôznych údajov a prezentuje riešenie, ktoré umožňuje určiť približné hodnoty výkonu bez jeho priameho merania. Záver práce je venovaný rozboru a analýze presnosti údajov odhadnutých algoritmom.

Kľúčové slová: šport, cyklistika, výkon, ANT+

Abstract

University: Slovak Technical University in Bratislava

Faculty: Faculty of Electrical Engineering and Information Technology

Study programme: Applied Informatics

Training workplace: Institute of Computer Science and Mathematics

Author: Matúš Mačák

Title: Approximation of athlete power output

Thesis supervisor: Ing. Stanislav Marček

Bratislava 2015

This master thesis describes the research of algorithm for estimating the power effort of an athlete, cyclist. First part explains the importance of monitoring the power as the main indicator in training. It describes devices, software and standards that are developed to track sport activity. The main part deals with common problems in power estimation from various data and presents the solution that allows approximating the value of athlete's power without a direct measurement. The conclusion is devoted to review and analyze the accuracy of the algorithm.

Keywords: sport, cycling, power, ANT+

Obsah

0	Úvod	7
1	Analýza problému	8
1.1	Význam veličiny výkon v tréningu cyklistu	8
1.2	Štandardy pre prenos tréningových dát	10
1.2.1	GPX	10
1.2.2	TCX	10
1.2.3	ANT	11
1.2.4	FIT	11
1.3	Meranie výkonu	13
1.4	Softvér pre vyhodnotenie tréningu	14
1.4.1	Strava	14
1.4.2	Bike Calculator	18
2	Pôsobenie síl	20
2.1	Gravitačná sila	20
2.2	Aerodynamický odpor	21
2.3	Valivý odpor	24
3	Opis riešenia	27
4	Záver	28

Zoznam obrázkov

1	Porovnanie výkonu a tepovej frekvencie pri záťaži	9
2	Zjednodušená štruktúra FIT súboru	12
3	CSV súbor po konverzii z FIT	12
4	Strava - detail tréningu	15
5	Strava - Analýza tréningu	16
6	Strava - Graf výkonu	16
7	Strava - Graf odhadnutého výkonu podľa GPS	17
8	Strava - Graf odhadnutého výkonu podľa Assisted GPS	17
9	Bike Calculator - Kalkulačka výkonu cyklistu	18
10	Teleso na naklonenej rovine	20
11	Závislosť potrebného výkonu od nadmorskej výšky	22
12	Závislosť potrebného výkonu od teploty vzduchu	23
13	Valivý odpor [10]	24
14	Závislosť potrebného výkonu od koeficientu odporu pneumatiky	25
15	Podiel silových zložiek v závislosti od stúpajúceho sklonu vozovky . . .	26

0 Úvod

Technologický pokrok je bezpochyby dôvodom, prečo sa rôzne inteligentné zariadenia stávajú naším najdôležitejším nástrojom pri každodennej rutine, ale aj v krízových situáciách. Inak tomu nie je ani v športe, najmä ak sa jedná o vytrvalostné disciplíny. Na pulte takmer každej športovej predajne sú k dispozícii merače srdcového tepu, športové hodinky, cyklopočítače s GPS a podobne. Nielen tréning podľa vlastného pocitu, ale podriadenie tréningovej záťaže údajom na meracom zariadení sa stáva kľúčom k postupnému zvyšovaniu výkonnosti. Vysoká dostupnosť technológií a *know-how* vyrovnáva schopnosti konkurencie. Víťazia športové družstvá, ktoré okrem mimoriadneho talentu dokážu tréning najlepšie zmerať, vyhodnotiť a opätovne naplánovať.

V práci sa zameriavame na analýzu vytrvalostného športu - cyklistiky, ktorú môžeme v globále urobiť z údajov ako je dĺžka tréningu v hodinách, tzv. tréningový objem, vzdialenosť, rýchlosť, tepová frekvencia. Tréning podľa tepovej frekvencie môže byť pre športovca obrovským prínosom za predpokladu, že má správne stanovené tréningové zóny, ktoré by mali odzrkadľovať zaťaženie organizmu [1]. Tepovú frekvenciu už môžeme v dnešnej dobe považovať za pomerne nenákladný spôsob usmernenia tréningu, no má však jednu nevýhodu. Tep srdca reaguje na stúpajúce zaťaženie s miernym oneskorením a môže byť skreslený pri výkyve vnútornej rovnováhy organizmu. V cyklistike, kde na reálny výkon, vyjadriteľný fyzikálnou veličinou, vplýva veľké množstvo faktorov, je aktuálna rýchlosť síce okamžitým, ale veľmi nepresným ukazovateľom. Preto je merač rýchlosti aj tepovej frekvencie postupne nahrádzaný meračom výkonu.

Meranie výkonu v cyklistike nám poskytuje okamžitú odpoveď na otázky: ako veľmi sa športovec namáha, akou silou pôsobí na pedále. Subjektívny pocit námahy nahrádza konkrétny číselný údaj, štandardne vyjadrený v jednotkách *Watt* [*W*]. Problémom je však cenová dostupnosť takéhoto merania. U profesionálnych športovcov možno cenová náročnosť nehrá rolu, avšak sú aj športoví nadšenci, amatérski pretekári, ktorí si chcú zmerať svoj progres, prípadne sa porovnať s najlepšími. Výkon je miera toho ako rýchlo vykonáva určitá sila prácu [3]. Je to fyzikálna veličina, a teda by malo byť možné ho vypočítať na základe údajov ako je stúpanie, rýchlosť, vzdialenosť. Práve týmto výpočtom sa snažíme odhadnúť výkon športovca.

1 Analýza problému

1.1 Význam veličiny výkon v tréningu cyklistu

Ako sme spomenuli v úvode, obrovská dostupnosť informácií a prostriedkov umožňuje vykonávať kontrolovaný tréning takmer každému záujemcovi. Pokiaľ máme záujem o perspektívne zlepšovanie, prvým krokom by malo byť absolvovanie výkonnostného testu u športového lekára, tzv. funkčného testu. Lekár by na základe anamnézy, predchádzajúcich skúseností so športom a aktuálnej výkonnosti mal odporučiť primerané tréningové zaťaženie. Čo je však najdôležitejšie, mal by stanoviť aj tréningové zóny, v ktorých by sa športovec pri tréningu mal pohybovať a v akom trvaní, teda odporučiť tréningový plán [1]. Tréning cyklistu nemôže byť postavený iba na odjazdení určitej vzdialenosti v čo najkratšom čase, a ani trénovaní vytrvalosti tým, že sa trénuje čo najdlhšie. Tréning cyklistu je zložený z rôznych intenzít, úsekov, opakovaní a cvičení, kedy sa trénujúci športovec vedome pohybuje v určite tréningovej zóne aby docielil ideálny tréningový impulz.

Zámerne používame slovné spojenie tréningová zóna a nielen tepová zóna, hoci sa tieto slovné spojenia často zamieňajú. Tréningová zóna je však úroveň fyzického zaťaženia, ktoré prebieha v ľudskom organizme. Najjednoduchšie odporúčané delenie je:

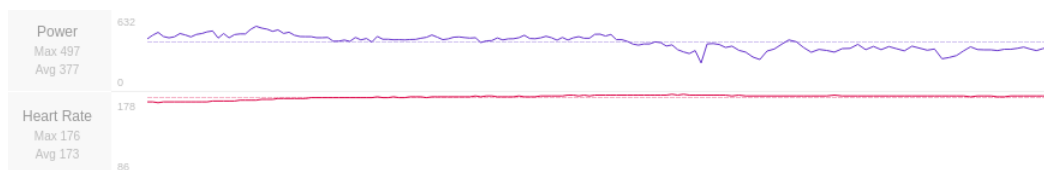
- Aeróbne pásmo ?? laktat
- Zmiešané pásmo ??
- Anaeróbny prah ??
- Anaeróbne pásmo ??

Ako sú tréningové zóny kontrolované počas tréningu je len na samotných možnostiach športovca. Najideálnejším ukazovateľom by bola hladina laktátu v krvi. Túto metódu však do každodenného tréningu aplikovať nemôžeme, nakoľko odber krvi z prsta alebo ucha a následné vyhodnotenie vzorky je zdĺhavé. Najdostupnejšia je metóda merania tepovej frekvencie, ktorá však nie je vždy spoľahlivá.

Každý ľudský organizmus je unikátny komplexný biologický systém. Tlak krvi, hormonálna rovnováha, krvný obraz a iné faktory neustále ovplyvňujú tep srdca. Mierny rozdiel v tepovej frekvencii pri rovnakej záťaži môžeme pozorovať už pri porovnaní tréningu ráno a večer. Pred prichádzajúcim ochorením môžeme zaznamenať zvýšenie tepovej frekvencie. Nižší tep športovci vykazujú po niekoľkých dňoch náročného tréningu.

Taktiež sme sa stretli s prípadmi, keď subjektívny pocit športovca bola únava a oproti normálu mal mierne zníženú tepovú frekvenciu, ale jeho wattový výkon v náročnom tréningu bol porovnateľný, niekedy aj lepší ako v iné dni. Vyšší tep sa dá jasne pozorovať už pri veľmi miernej dehydratácii, napr. na konci dlhého tréningu v teplom počasí. Sledovanie faktorov, ktoré ovplyvňujú tepovú frekvenciu nie je predmetom tejto práce. Je však dôležité poznamenať, že z pohľadu fináčnej náročnosti a výpovednej hodnoty je tepová frekvencia stále veľmi dobrým kontrolným mechanizmom pre riadenie tréningu.

Okamžité hodnoty, ktoré reprezentujú zaťaženie organizmu a veľmi dobrú presnosť, získame meraním výkonu. Môžeme určiť intenzitu pri krátkych zrýchlených úsekoch, kedy tepová frekvencia ešte nestihne vystúpiť na hodnotu zodpovedajúcu fyzickému zaťaženiu. Môžeme presnejšie analyzovať podaný výkon pri dlhších úsekoch v maximálnom úsilí, kedy zrýchlenie/spomalenie môže odzrkadľovať zmena tepová frekvencia o 1 tep, ale rozdiel vo výkone môže byť aj o 10%. Obr. 1 zobrazuje, ako sa môže meniť výkon športovca v porovnaní s tepovou frekvenciou.



Obr. 1: Porovnanie výkonu a tepovej frekvencie pri záťaži

Z priebehu kriviek môžeme pozorovať, ako odpočínutý športovec absolvuje úsek v tréningu. Počas desiatich minút mal udržiavať výkon vyšší ako 340 W. Vidíme, že na stúpajúce zaťaženie telo reaguje zvýšením tepovej frekvencie, zároveň sa v zaťažovaných svaloch tvorí kyselina mliečna (laktát). Prvých päť minút športovec absolvoval s priemerným výkonom 410W. Po zahltení svalov laktátom a ustálení tepovej frekvencie už daný výkon udržiavať nedokázal a postupne záťaž zvoľňuje na priemerných 320W. Kým tepová frekvencia kolíše v rozsahu ± 1 tep, priemerný výkon v druhej polovici je o 20W nižší než požadované zaťaženie. Zmena však stále nie je dostatočná na to, aby mohlo dôjsť k čiastočnému zotaveniu svalov, hladina laktátu v krvi je stále vysoká, na čo telo reaguje vysokou tepovou frekvenciou. Hoci po skončení tréningu má športovec pocit vyčerpanosti, neabsolvoval tréning podľa plánovaného konceptu. Zdokonalenie podobných chýb môže viesť k lepšiemu rozloženiu síl a lepšiemu vystupňovaniu výkonu, napr. v závere pretekov. Pri analýze výkonu sú tieto chyby jasne viditeľné.

1.2 Štandardy pre prenos tréningových dát

V predchádzajúcich častiach sme niekoľkokrát spomenuli športové hodinky alebo cyklopočítač. Ich spoločnou funkciou je prijímanie dát z rôznych snímačov, zobrazenie dát, a tiež aj uloženie pre neskoršie vyhodnotenie. Na trhu je veľké množstvo výrobcov, ktorý uprednostňujú vlastné formy prenosu a formu ukladania dát. Existujú však aj *open-source* protokoly, ktoré umožňujú interoperabilitu medzi zariadeniami rôznych značiek, prípadne aj inteligentnými telefónmi. Vo výskume sme sa na rozbor problematiky a následné vyhodnotenie presnosti rozhodli používať zariadenie na meranie výkonu PowerTap G3 (rok výroby 2013) a cyklopočítač Garmin Edge 500 (rok výroby 2014). Preto chceme v nasledujúcej časti popísať štandardy, ktoré tieto zariadenia využívajú, a teda sa bezprostredne dotýkajú našej práce.

1.2.1 GPX

GPX je rozšírenie formátu XML vytvorené za účelom štandardizácie prenosu GPS súradníc a trás pre navigačné systémy. Prvá verzia bola vydaná v roku 2002 a neskôr aktualizovaná v roku 2004. Neskoršie rozšírenie od firmy Garmin - schéma *GpxExtensions* umožňuje medzi GPS súradnice pridávať body záujmu¹, meniť zobrazenie trasy, a podobne. Neskôr Garmin pridal aj schému *TrackPointExtension*, ktorú už bolo možné využiť aj v zariadeniach, ktoré súvisia so športom. Okrem informácií o trase je možné do súboru uložiť aj údaje o tepovej frekvencii, teplote, rýchlosti a ďalšie.

1.2.2 TCX

TCX alebo plným názvom Training Center XML je dátový formát predstavený v roku 2007, opäť firmou Garmin ako súčasť ich Training Center produktov. Formát XML je veľmi podobný štandardu GPX, avšak postupnosť súradníc reprezentuje skôr ako fyzickú aktivitu než len trasu. Predstavuje štandard prenosu údajov zo športových meračov ako je tepová frekvencia, kalórie, frekvencia šliapania (bicykel) alebo kroku (beh) a mnohé ďalšie. Tiež môže obsahovať sumarizované údaje pre celú aktivitu aj jednotlivé okruhy.

¹z angl. Points of interest

1.2.3 ANT

ANT je nízko-energetický² bezdrôtový protokol prenosu dát medzi zariadeniami. Robustný ale veľmi flexibilný protokol nachádza využitie v PAN³ alebo LAN⁴ sieťach. Je ideálny pre športové aktivity, fitness a wellness.

ANT prenos dát prebieha na frekvencii medzi 2400 MHz až 2524 MHz s výnimkou frekvencie 2457 MHz, ktorá je rezervovaná pre ANT+ zariadenia.

ANT+ je množina definícií, ktoré upresňujú, čo reprezentujú informácie posielané v sieti ANT. Definícia sa nazýva *device profile* a obvykle je vytvorená na základe určitého prípadu použitia. Napríklad senzor rýchlosti na bicykli bude odosielať informácie o rýchlosti, preto implementuje profil *Speed monitor*.

Každé ANT+ zariadenie musí pristupovať do ANT+ siete so sieťovým kľúčom a implementovať minimálne jeden *device profile*. Zariadenie s daným profilom je možné spojiť s ďalšími zariadeniami, ktoré implementujú rovnaký profil. Jedno zariadenie môže samozrejme implementovať aj viac profilov. Napr. športové hodinky môžu prijímať údaje o rýchlosti, tepovej frekvencii, výkone a pre každý údaj implementujú samostatný *device profile*.

V ANT+ sieti obvykle rozlišujeme dva typy zariadení. Meracie zariadenie, ktoré je podľa špecifikácie nazývané *sensor* a zobrazovacie zariadenie, *display*. ANT+ umožňuje pripojenie jedného, alebo aj viacerých zariadení typu *sensor* na jedno zariadenie typu *display*. Na jedných športových hodinkách teda môžeme zobrazovať viacero meraných veličín, alebo pripojiť jedno zariadenie typu *sensor* na viac zariadení typu *display*.

1.2.4 FIT

The Flexible and Interoperable Data Transfer (FIT) protokol bol navrhnutý špeciálne pre ukladanie a prenos dát pochádzajúcich zo športových aktivít. Definuje niekoľko šablón pre ukladanie dát, tzv. *Fit message*. Môžu v nich byť uložené informácie o používateľskom profile, dáta zo športovej aktivity a podobne. Bol navrhnutý tak aby bol kompaktný, interoperabilný a rozšíriteľný.

FIT protokol pozostáva z:

- Definície štruktúry .fit súboru
- Definície dátových polí a dátových typov pre jednotlivé *Fit messages*

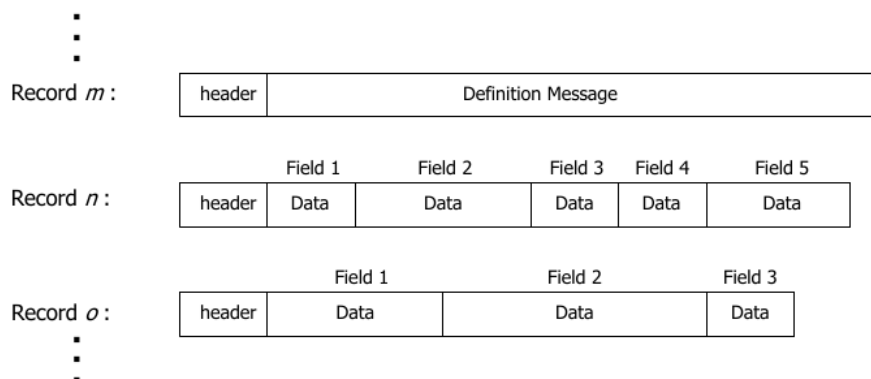
²z angl. Ultra-low power

³PAN - personal area network

⁴LAN - local area network

- Vývojového nástroja, tzv. SDK⁵, ktorý umožňuje vygenerovať potrebný zdrojový kód pre nakonfigurovanie produktov využívajúcich FIT protokol. Obsahuje aj nástroj pre konverziu binárneho .fit súboru do .csv dátového súboru a opačne.

FIT súbor obsahuje dátové reťazce, pričom každý reťazec je zostavený z hlavičky a obsahu. Obsah dátového reťazca môže byť buď špecifikácia dát v nasledujúcom reťazci alebo správa, ktorá obsahuje niekoľko polí s údajmi, viď obr. 2.



Obr. 2: Zjednodušená štruktúra FIT súboru

Na konverziu bitového FIT súboru využijeme konverzný nástroj v jazyku JAVA. Výstupom konverzie sú dva CSV súbory. Prvý súbor je textovou reprezentáciou dát z FIT súboru, čo znamená, že niektoré riadky sú definíciou nasledujúcich údajov a niektoré riadky nesú údaje. Zároveň je potrebné si všimnúť, že údaje nie sú rozdelené fixne podľa stĺpcov. Stĺpec *Field N* oznamuje, čo reprezentuje hodnota v stĺpci *Value N*, stĺpec *Units N* definuje jednotky pre túto hodnotu, pričom $N > 0$. Jeden stĺpec *Field N* nemusí niesť vždy rovnaký údaj. Príklad uvádzame na obr. 3.

Type	Local Number	Message	Field 1	Value 1	Units 1	Field 2	Value 2	Units 2	...	Field N
Definition	0	file_id	serial_number	1		time_created	1			
Data	0	file_id	serial_number	3882026635		time_created	793193395			
Definition	1	file_creator	software_version	1		hardware_version	1			
Data	1	file_creator	software_version	330						
Definition	2	event	timestamp	1		data	1			
Data	2	event	timestamp	793193385	s	timer_trigger	0			

Obr. 3: CSV súbor po konverzii z FIT

Druhý súbor, ktorý je výstupom z konverzie má príponou *_data.csv* a obsahuje všetky dáta usporiadané vo forme stĺpcov. Jeden stĺpec reprezentuje vždy konkrétny

⁵SDK - Software development kit

údaj podľa hlavičky, napr. *event.timestamp[s]*, *record.altitude[m]*, *record.speed[m/s]*... Jednotky sú uvádzané v hranatej zátvorke v záhlaví stĺpca. Oba súbory teda obsahujú všetky dáta, rozdielna je iba ich postupnosť. Rozhodli sme sa používať prvú spomenutú štruktúru. Najdôležitejšie sú riadky, kde stĺpec *Type* nadobúda hodnotu *Data*, v stĺpci *Message* sú hodnoty *record* pre jednotlivé body v tréningu, *session* pre sumarizáciu alebo *lap* pre informáciu o stlačení medzičasu.

1.3 Meranie výkonu

Pre správne pochopenie problematiky sa musíme oboznámiť so zaužívaným spôsobom merania výkonu cyklistu. Výkon je meraný špeciálnym snímačom, ktorý je vo väčšine prípadoch zabudovaný priamo v komponente bicykla. Jedná sa o komponent, ktorý sa priamo stará o prenos sily pôsobiacej na pedál do pohonu zadného kolesa. Môže to byť náboj zadného kolesa, jedna alebo obe kľuky stredového zloženia, prípadne pedále. To, kde je snímač umiestnený, záleží od konkrétneho výrobcu a jeho techniky merania. Snímač nazývame merač výkonu⁶.

Najdôležitejším prvkom merača je tenzometer. Ide o súčiastku s uzavretým elektrickým okruhom a konštatným elektrickým odporom. Ak je tenzometer vystavený pôsobeniu mechanickej sily, dochádza k jeho deformácii, zmene odporu a vďaka piezoelektrickému javu aj k zmene napätia. Správnou konfiguráciou je teda možné zistiť presnú silu pôsobiacu na túto súčiastku.

Ako sme uviedli v predchádzajúcej časti, výkon je mierou toho ako rýchlo vykonáva určitá silu prácu. Vezmime do úvahy jednoduchý vzťah:

$$P = F \frac{\partial d}{\partial t} \quad (1)$$

Výkon P je rovný sile, ktorú je potrebné vyvinúť, aby sme teleso s danou hmotnosťou premiestnili po dráhe d za čas t . Dráha prekonaná za čas predstavuje rýchlosť, preto môžeme vzťah 1 upraviť na nasledovný tvar:

$$P = F v \quad (2)$$

To je podstata fungovania merača výkonu vo veľmi zjednodušenej forme. Sila zmeraná tenzometrom je odoslaná do cyklopočítača/športových hodínok, tam je násobená aktuálnou rýchlosťou a zobrazí sa výkon v jednotkách *Watt*. Nakoľko je veľmi náročné pri jazde na bicykli udržiavať približne konštatný výkon, často sa nezobrazuje momentová

⁶z angl.: Power Meter

hodnota ale priemer za 3s, 5s alebo 10 až 30 sekúnd. Sily, ktoré pôsobia proti pohybu športovca pri jazde na bicykli bližšie rozoberáme v kapitole 2.

Prvý merač výkonu bol dostupný verejnosti v roku 1989. Jednalo sa o značku SRM (Schoberer Rad Messtechnik), ktorá svoj produkt testovala s profesionálnymi športovcami od začiatku osemdesiatych rokov.[9]

Väčšina výrobcov v súčasnosti uvádza pre svoje merače odchýlku do 2%. Možné odchýlky môžu byť spôsobené stratou pri prenose sily z pedálu na pohon zadného kola, t.j. napnutím reťaze, pružnosťou rámu, pružnosťou kola, kalibráciou merača atď. Je dôležité si uvedomiť, že žiaden merač, ktorý je súčasťou bicykla, z týchto dôvodov nebude ukazovať presný výkon podávaný športovcom. Ak však športovec dlhodobo používa rovnakú metódu merania, porovnávanie jeho výkonov má veľký význam.

1.4 Softvér pre vyhodnotenie tréningu

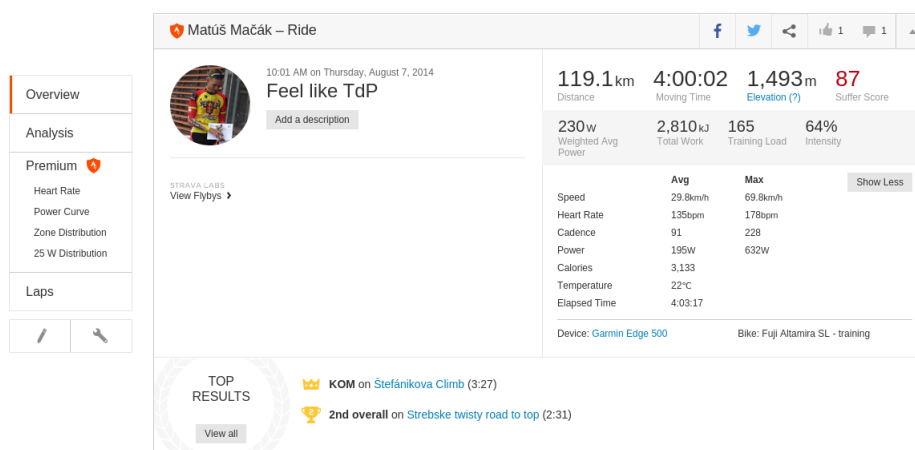
1.4.1 Strava

Strava je portál, ktorý sa snaží združovať komunity športovcov po celom svete. Nosným pilierom Strava je webová aplikácia na adrese <http://www.strava.com>, ktorá ponúka komplexnú analýzu tréningových dát a množstvo sociálnych funkcií. Ako uvádza priamo Strava, používateľovi umožňuje zažiť tzv. *social fitness*, čo by malo predstavovať spojenie, porovnanie a súťaženie s ďalšími športovcami [12]. Okrem webovej aplikácie je možné využiť aj mobilnú aplikáciu pre platformu Android a iOS. Primárne je Strava určená pre bežcov a cyklistov, grafy a analýza pre ich aktivity sú najpodrobnejšie. Tréningový denník si však môžu viesť aj ďalší športovci.

Princíp fungovania Strava môžeme popísať tromi krokmi. Prvým je absolvovanie tréningu a jeho zaznamenanie na zariadenie s GPS, resp. na ich mobilnú aplikáciu. Druhým krokom je uloženie tréningového záznamu na server Strava. Vďaka využitiu API výrobcov ako je Garmin, Suunto, TomTom, Timex a niektorých ďalších umožňuje Strava priame uloženie tréningových dát na server ihneď po pripojení zariadenia/športových hodín do počítača. Priame ukladanie funguje na platformách Windows a OSX. Ak používateľ používa iný operačný systém alebo má záujem uložiť tréning z iného zariadenia, môže tak urobiť nahraním súboru, ktorý je vo formáte GPX, TCX alebo FIT. Tretím krokom je zobrazenie detailu tréningu a analýza.

Portál Strava sme sa rozhodli popísať z dôvodu, že ako jeden z prvých prináša aproximáciu wattového výkonu cyklistu z GPS dát. Skôr ako popíšeme kladné a záporné stránky samotnej aproximácie výkonu, pozrime sa na používateľské rohranie

webovej aplikácie, konkrétne na časť s detailom tréningu.

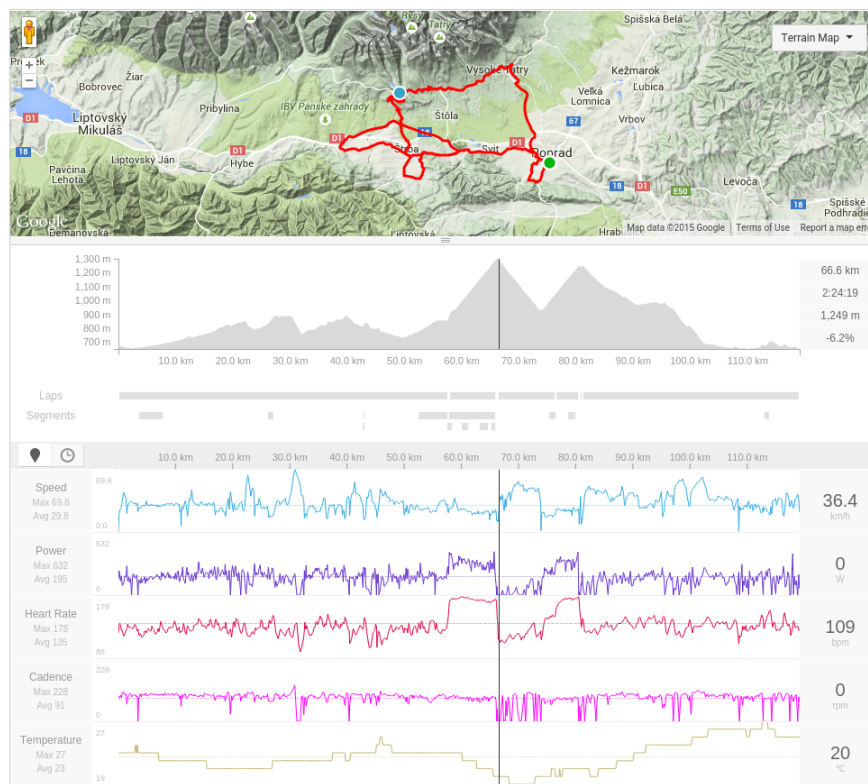


Obr. 4: Strava - detail tréningu

V pravej časti obrazovky môžeme vidieť celkové a priemerné údaje z tréningu. Jedná sa o dáta, ktoré boli uložené cyklopočítačom Garmin Edge 500 - vzdialenosť, čas, nastúpané metre, rýchlosť, tepová frekvencia, frekvencia šliapania, teplota. Červenú hodnotu *Suffer Score* počíta Strava na základe času, ktorý športovec strávil v jednotlivých tréningových zónach podľa tepovej frekvencie. Nakoľko sme pri tréningu mali k dispozícii aj merač výkonu Power Tap G3, Strava nám na základe váženého priemerného výkonu vypočíta tréningové zaťaženie (*Training Load*) a intenzitu tréningu (*Intensity*). Intenzita tréningu je percentuálny pomer váženého priemerného výkonu a FTP hodnoty výkonu⁷. Presný výpočet hodnoty tréningového zaťaženia Strava verejne neuvádza, ale zo skúsenosti môžeme konštatovať, že sa jedná o násobok váženého priemerného výkonu, dĺžky tréningu a ďalšieho koeficientu.

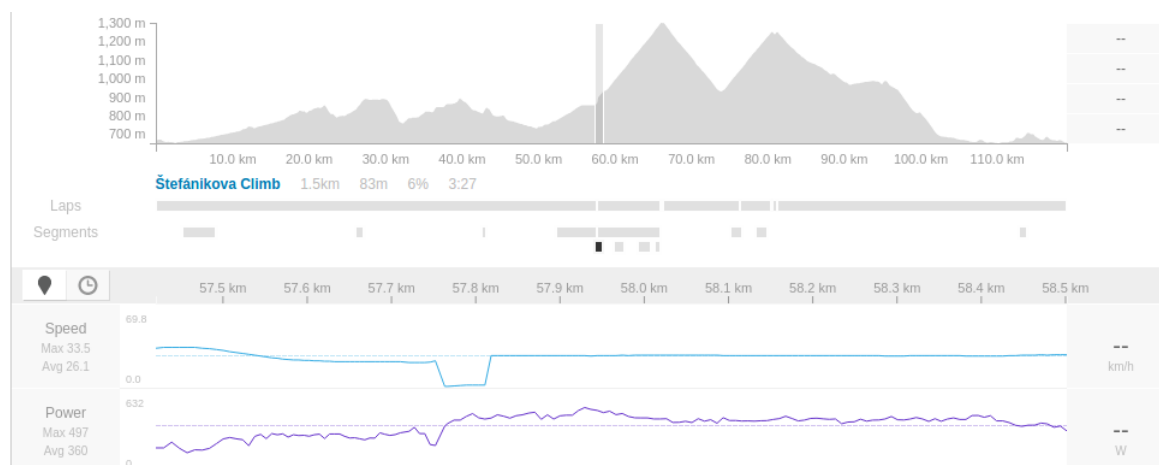
V prostrednej časti obr. 4 môžeme vidieť názov tréningu, pod ktorým ho športovec uložil a dátum absolvovania. Po kliknutí na *Analysis* v menu v ľavej časti obrazovky, sa nám načíta sekcia s mapou a grafmi, ktoré zobrazujú priebeh celého tréningu, hodnoty aktuálnej nadmorskej výšky, rýchlosti, tepovej frekvencie, frekvencie šliapania a teploty v jednotlivých pozíciách, viď obr. 5.

⁷FTP - Functional threshold power - Hodnota, na ktorej športovec dokáže pracovať 30 minút [2]



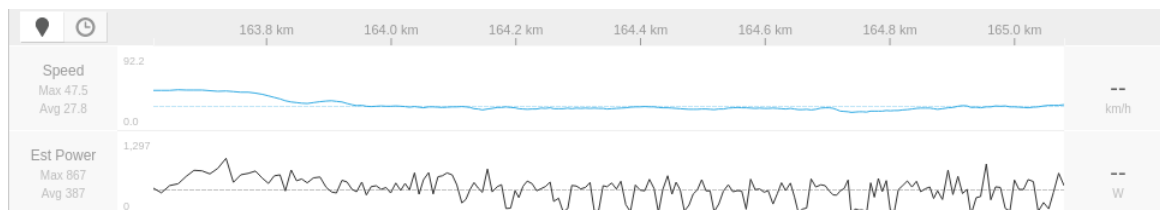
Obr. 5: Strava - Analýza tréningu

Prejdime k analýze výkonu na portále Strava, aby sme ju mohli porovnať vzhľadom na naše ciele. Ako vzorku dát budeme zobrazovať úsek na trase Tatranská Štrba - Štrbské pleso v dĺžke 1500m. Absolvovali sme tri rôzne tréningy, pri prvom sme zmerali aj výkon zariadením Power Tap G3 a dáta zaznamenávali do cyklopočítača Garmin Edge 500. Na obr. 6 môžeme vidieť reálnu hodnotu výkonu, športovec sa snažil o plynulý rovnomerný výkon bez výkyvov.



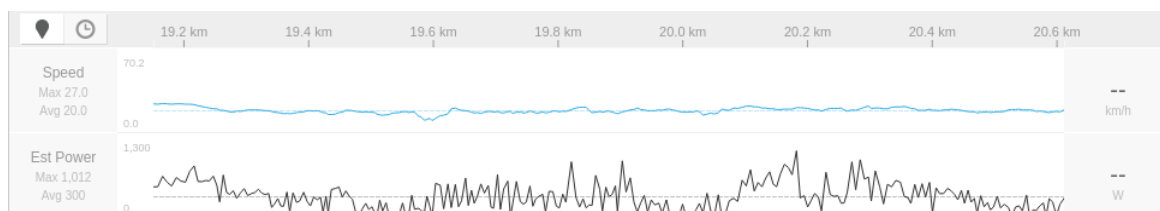
Obr. 6: Strava - Graf výkonu

Druhý tréning bol zaznamenaný tiež cyklopočítačom Garmin Edge 500 ale bez merania výkonu. Na obr. 7 môžeme vidieť výkon odhadnutý algoritmom Strava z rýchlosti a nadmorskej výšky. Môžeme pozorovať veľké výkyvy odhadnutého výkonu v rozmedzí od 0W do 867W, pričom dosahovaná rýchlosť je plynulá a bez výkyvov.



Obr. 7: Strava - Graf odhadnutého výkonu podľa GPS

Posledný záznam je meraný mobilnou aplikáciou Strava, viď obr. 8. V tréningu sme výkon opäť nemerali a grafe môžeme vidieť odhadnuté hodnoty. Obrovské výkyvy prisudzujeme odchýlkam v pozícii a aj nadmorskej výške. Použitý mobilný telefón Samsung Galaxy S4 mini nedisponuje barometrickým výškomerom, hodnota nadmorskej výšky je získaná z pozície. Ako je známe, GPS čip v mobilných telefónoch nedosahuje takú vysokú presnosť ako špeciálne športové zariadenia a pozícia je často korigovaná aj mobilnými sieťami.



Obr. 8: Strava - Graf odhadnutého výkonu podľa Assisted GPS

Z prezentovaných testov môžeme vyvodiť záver, že odhad výkonu portálom Strava nie je presný. Chybné sú najmä hodnoty, ktoré skáču z nuly do maximálnych hodnôt, a to aj napriek tomu, že športovec sa pohyboval takmer konštantnou rýchlosťou a snažil sa dodržať rovnakú frekvenciu šliapania. Hoci nepoznáme presný algoritmus výpočtu v Strava, myslíme si, že príčinou nepresnosti je zvolenie priveľmi malých úsekov, na ktorých sú vypočítavané čiastkové výkony, resp. sú vypočítavané medzi jednotlivými bodmi uloženými do zariadenia. Na malom úseku môže byť odchýlka v nadmorskej výške, nakoľko barometrický výškomer ju určuje podľa tlaku. Môže to byť samozrejme aj nepresnosťou GPS alebo malou frekvenciou ukladania jednotlivých bodov tréningu, pričom nie sú zachytené všetky zmeny terénu.

1.4.2 Bike Calculator

Druhý systém relevantný nášmu výskumu nájdeme na webovej stránke <http://www.bikecalculator.com>. Bike Calculator je údajne najpopulárnejšia kalkulačka výkonu cyklistu fungujúca od roku 1997 [13]. Už na prvý pohľad je jasné, že sa jedná iba o kalkulačku a žiaden vstup zo športových hodín alebo merača nie je možný. Stránka disponuje krátkym vysvetlením fyzikálneho problému výpočtu výkonu a formulárom, do ktorého je možné zadať hodnoty pre výpočet a výsledok je vyhodnotený okamžite.

Obr. 9: Bike Calculator - Kalkulačka výkonu cyklistu

Otestovali sme ho pre viacero úsekov, ktoré sme zmerali na tréningu meračom výkonu. V tabuľke 1 uvádzame porovnanie nameraných a vypočítaných hodnôt.

Úsek	dĺžka [m]	priemer. stúpanie [%]	priemer. rýchlosť [km/h]	reálny výkon [W]	Bike Calculator [W]	Rozdiel	Rozdiel [%]
1.	1000	7.4	13.5	269	247	-22	-8.18%
2.	1000	8.5	13.0	285	269	-16	-5.61%
3.	1000	10.2	11.9	285	289	4	1.40%
4.	1500	4.9	26.1	267	261	-6	-2.25%
5.	1500	6.6	15.6	272	263	-9	-3.31%
6.	1500	9.2	11.7	273	258	-15	-5.49%
7.	2700	3.0	20.4	201	197	-4	-1.99%

Úsek	dĺžka [m]	priemer. stúpanie [%]	priemer. rýchlosť [km/h]	reálny výkon [W]	Bike Calculator [W]	Rozdiel	Rozdiel [%]
8.	2700	4.8	24.1	357	346	-11	-3.08%
9.	2700	5.2	17.5	257	245	-12	-4.67%
10.	1500	0.7	30.5	180	214	34	18.89%
11.	1500	1.2	26.5	211	177	-34	-16.11%
12.	1500	2.3	23.8	187	210	23	12.30%

Tabuľka 1: Bike Calculator - porovnanie výpočtu

Z tabuľky si môžeme všimnúť, že celková dĺžka segmentu neovplyvňuje rozdiel medzi reálnou a vypočítavanou hodnotou. Zámerne však neuvádzame úseky dlhé iba niekoľko desiatok metrov, aby sme mohli poukázať na fakt, že práve stúpajúci sklon (priem. stúpanie) robí výpočet presnejším. Minimalizuje sa totiž aerodynamický odpor spôsobený vetrom, ktorého smer aj intenzitu je veľmi ťažké odhadnúť a stúpa podiel sily potrebnej na prekonanie zemskej tiaže.

Ako môžeme vidieť vo formulári na obr. 9, typ pneumatík a pozíciu športovca na bicykli vyberáme z predvolených hodnôt. Pre typ pneumatík sú to tri hodnoty, a to plášte, galusky alebo MTB. Pozíciu môžeme zvoliť podľa bicykla - vzpriamená, mierne vzpriamená, zohnutá, aerodynamická. Podľa vybraného vstupu Bike Calculator použije predvolený koeficient valivého odporu, resp. aerodynamického odporu.

Koeficient aerodynamického odporu je však závislý aj od oblečenia cyklistu, od bicykla, od kolies. Koeficient valivého odporu je rozdielny pre jednotlivé modely plášťov, hodnotu ich nahustenia. Môžeme povedať, že je rozdielny pre každú jednu dvojicu športovec-bicykel. Dôkladnejšie vysvetlenie tejto problematiky uvádzame v kapitole 2.

2 Pôsobenie síl

Jednotlivé zložky, ktoré pôsobia na cyklistu počas jazdy sa menia v závislosti od zmeny terénu a poveternostných podmienok.

- Gravitačná sila
- Aerodynamický odpor
- Valivý odpor

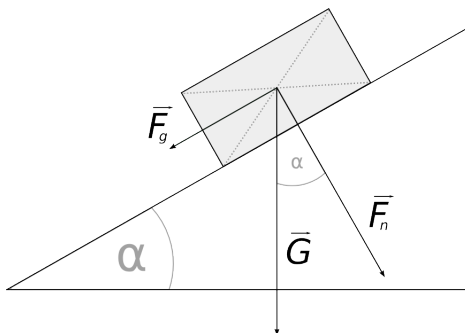
Kým aerodynamický odpor je najviac počítovaný pri jazde po rovine, jeho podiel klesá spolu s narastajúcim sklonom vozovky a začína prevládať zložka gravitačnej sily. Valivý odpor je spôsobený kontaktom pneumatiky s povrchom vozovky, konkrétne ich deformáciou a mikrotrením.

Princíp superkompenzácie hovorí, že výsledná sila pôsobiaca na teleso je rovná vektorovému súčtu všetkých síl pôsobiacich na dané teleso [10].

$$\vec{F} = \sum_i \vec{F}_i \quad (3)$$

2.1 Gravitačná sila

Pri pohybe cyklistu a bicykla v horizontálnej rovine je reakciou na gravitačnú silu normálová sila, ktorá zohráva úlohu pri valivom odpore (viď kapitola 2.3). Akonáhle však športovec prekonáva nadmorskú výšku, teda vo fyzikálnom pomenovaní sa pohybuje po naklonenej rovine, musí prekonať aj zložku gravitačnej sily F_g , ktorá pôsobí proti smeru jeho pohybu. Zložky gravitačnej sily sú zobrazené na obr. 10.



Obr. 10: Teleso na naklonenej rovine

Silu pôsobiacu proti pohybu cyklistu v smere z kopca vyjadríme vzťahom $F_g = m g \sin \alpha$. Kde m je hmotnosť sústavy, v našom prípade hmotnosť športovca a bicykla a g je gravitačné zrýchlenie. Sínus pre uhol sklonu môžeme vypočítať zo zmeny

nadmorskej výšky $\Delta altitude$ a prejdenej vzdialenosti d :

$$F_g = m g \frac{\Delta altitude}{d} \quad (4)$$

Veľkosť normálovej sily, je vyjadrená vzťahom 5

$$F_n = m g \cos \left(\arcsin \left(\frac{\Delta altitude}{d} \right) \right) \quad (5)$$

2.2 Aerodynamický odpor

Aerodynamický odpor je v poslednom období v cyklistike často preberanou tématikou. Upravujú sa tvary trubiek bicyklov, menia sa profily kolies, vylepšujú sa materiály a strih oblečenia, všetko s cieľom dosahovania vyšších rýchlostí bez nutnosti zvyšovať výkon. Zo vzťahu 6

$$F_d = \frac{1}{2} \rho v^2 C_d A \quad (6)$$

môžeme vidieť, že sila potrebná na prekonanie aerodynamického odporu rastie s druhou mocninou rýchlosti. ρ je hustota prostredia. Referenčná plocha A je v tomto prípade premietnutá čelná plocha športovca a bicykla. Jedinou možnosťou ako znížiť odporovú silu je teda znížiť koeficient odporu C_d .

Koeficient odporu pre pohybujúce sa teleso C_d je závislý od povrchu a aerodynamického tvaru telesa, ďalej od hustoty a viskozity látky prostredia, v ktorom sa teleso pohybuje. Tiež závisí od rýchlosti a smeru pohybu telesa vzhľadom na smer pohybu látky prostredia (napr. smer vetra). Pre vysoké rýchlosti môžeme C_d vyjadriť ako funkciu Reynoldsového čísla Re a čísla $Mach$. Pre rýchlosti, ktoré dosahujú automobily alebo bicykle môžeme považovať C_d za konštantný.

Vo vzťahu 6 vystupuje hustota ρ , ktorá v našom prípade predstavuje hustotu vzduchu. Tá je pri 15°C na hladine mora rovná hodnote $1,2754 \text{ kg m}^{-3}$ [6]. Hustota vzduchu sa však mení so stúpajúcou teplotou a tiež stúpajúcou nadmorskou výškou, keďže sa mení tlak vzduchu.

Atmosferický tlak p v nadmorskej výške h určíme podľa vzťahu 7,

$$p = p_0 \left(1 - \frac{L h}{T_0} \right)^{\frac{gM}{RL}} \quad (7)$$

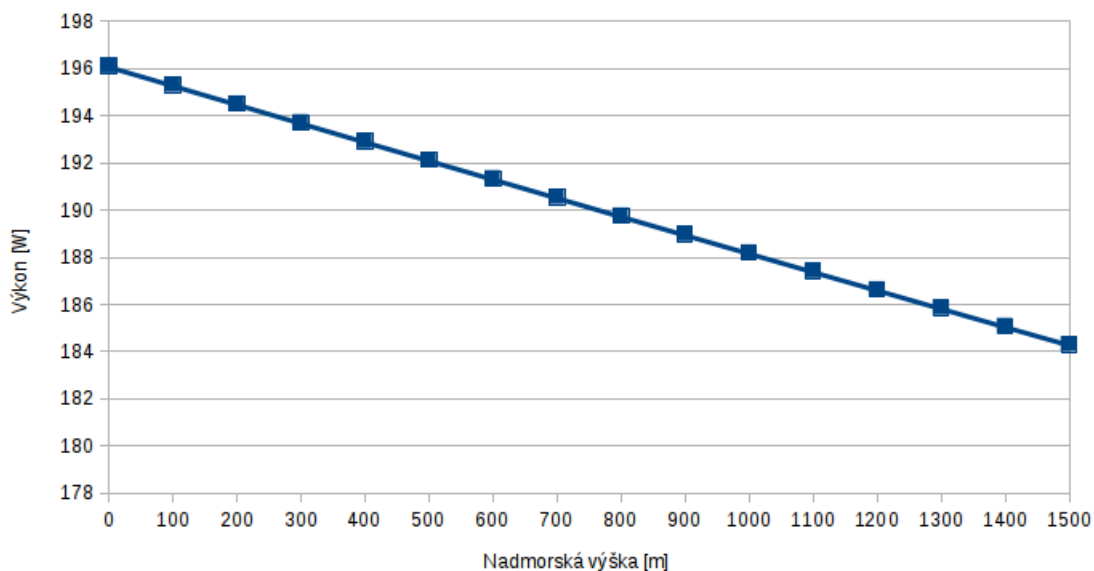
v ktorom figurujú nasledovné konštanty [6]:

- p_0 - atmosferický tlak na hladine mora - $101,325 \text{ kPa}$
- T_0 - štandardná teplota vzduchu - $288,15 \text{ K} = 15^\circ\text{C}$
- g - gravitačné zrýchlenie - $9,80665 \text{ m s}^{-2}$
- L - teplotný gradient - $0,0065 \text{ K m}^{-1}$
- R - univerzálna plynová konštanta - $8,31447 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$
- M - molová hmotnosť vzduchu - $0.028964 \text{ kg mol}^{-1}$

Pri známom tlaku vzduchu pre danú nadmorskú výšku, môžeme určiť hustotu vzduchu pri rôznej teplote T vzťahom 8

$$\rho = \frac{p M}{R T} \quad (8)$$

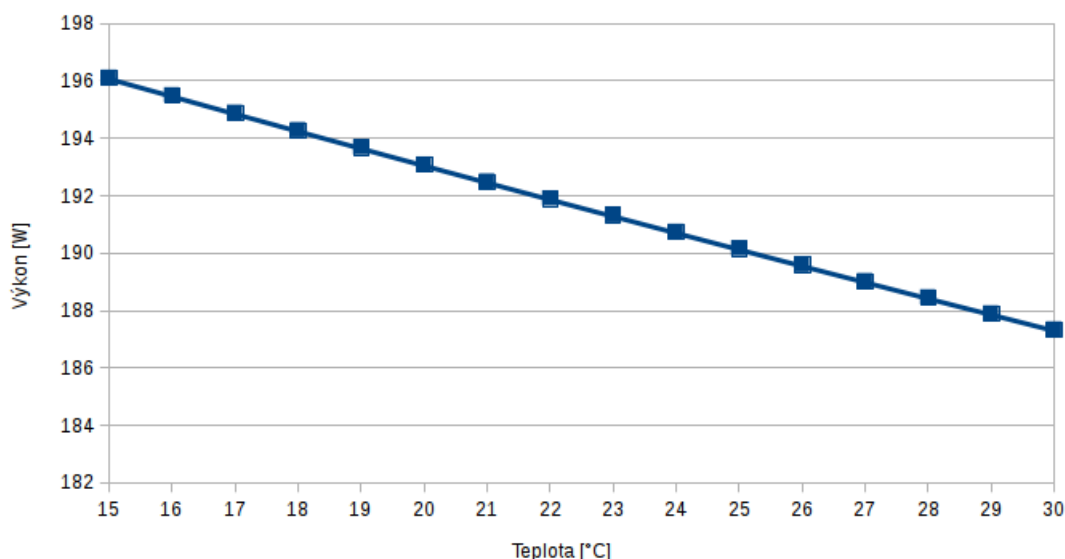
Zmena teploty a tlaku vzduchu ovplyvní aj výkon potrebný pre udržanie rovnakej rýchlosti, a to nezanedbateľným rozdielom. Ako príklad vezmime do úvahy cyklistu pohybujúceho sa rýchlosťou 30 km h^{-1} v horizontálnej rovine v nadmorskej výške od 0 m n.m. až do 1500 m n.m. Pri konštantnej teplote, referenčnej ploche A , konštantnom valivom odpore C_{rr} a koeficiente aerodynamického odporu C_d , sa môže rozdiel v nadmorskej výške prejavíť rozdielom 12 W vo výkone, vid' obr. 11



Obr. 11: Závislosť potrebného výkonu od nadmorskej výšky

Stúpajúca teplota vzduchu sa prejaví znížením hustoty vzduchu, a teda aj výkon potrebný na udržanie rovnakej rýchlosti klesá. Pri rovnakých podmienkach ako

v predchádzajúcom príklade a pri zmene teploty z 15°C na 30°C , stačí cyklistovi na udržanie 30 km h^{-1} približne o 9 W nižší výkon, viď obr. 12.



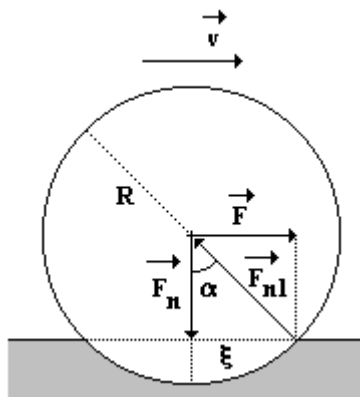
Obr. 12: Závislosť potrebného výkonu od teploty vzduchu

Ďalší faktor, ktorý súvisí s aerodynamickým odporom je vietor. Smer a intenzita vetra počas tréningu by bolo veľmi náročné určiť. Hoci by sme mohli využiť API predpovede počasia, získané údaje nevieme garantovať pre rôzne segmenty trasy, keďže vietor sa môže lámať medzi budovami alebo stromami. Ďalším faktorom je aj veľkosť skupiny, v ktorej cyklista tréning absolvuje. Je samozrejmé, že v závetrí väčšej skupiny športovec šetrí silu. To, ako presne sa tieto dva faktory odzrkadľujú na výkone, už povedať nevieme a jediná cesta dosiahnutia presných výsledkov by bola testovanie vo veternom tuneli. Takéto testovanie by však bolo nielen časovo ale aj finančne náročné, a preto sme v rámci rozsahu našej práce uprednostnili čo možno najpresnejšiu aproximáciu v známych podmienkach.

V našej aproximácii budeme predpokladať, že smer a intenzita vetra, má zanedbateľný vplyv na výkon, resp. pri dlhších a kľukatých úsekoch je v niektorých častiach jeho intenzita pričítaná a v iných zase odčítaná z celkového aerodynamického odporu. Výkon sa budeme snažiť aproximovať v úsekoch kedy podiel aerodynamického odporu na celkovej pôsobiacej sile je čo najnižší. Dobré výsledky by mohli byť dosahované pri aproximácii v stúpaniach nad 3% priemerného sklonu.

2.3 Valivý odpor

Valivým odporom môžeme nazvať silu, ktorá vzniká, keď sa teleso kruhového prierezu (v našom prípade koleso bicykla) valí po pevnej podložke. Fyzikálnou podstatou tohoto javu je hysterézia, ktorá nastáva pri deformácii podložky resp. kolesa pôsobením normálovej tlakovej sily. V reálnych podmienkach samozrejme podložka ani galuska kolesa nie sú dokonale pružné. Preto reakcia na normálovú tlakovú silu je posunutá o vzdialenosť ξ [10].



Obr. 13: Valivý odpor [10]

Silu F , ktorou predmet udržíme v rovnomernom pohybe vyjadríme vzťahom:

$$F = F_n \tan \alpha \quad (9)$$

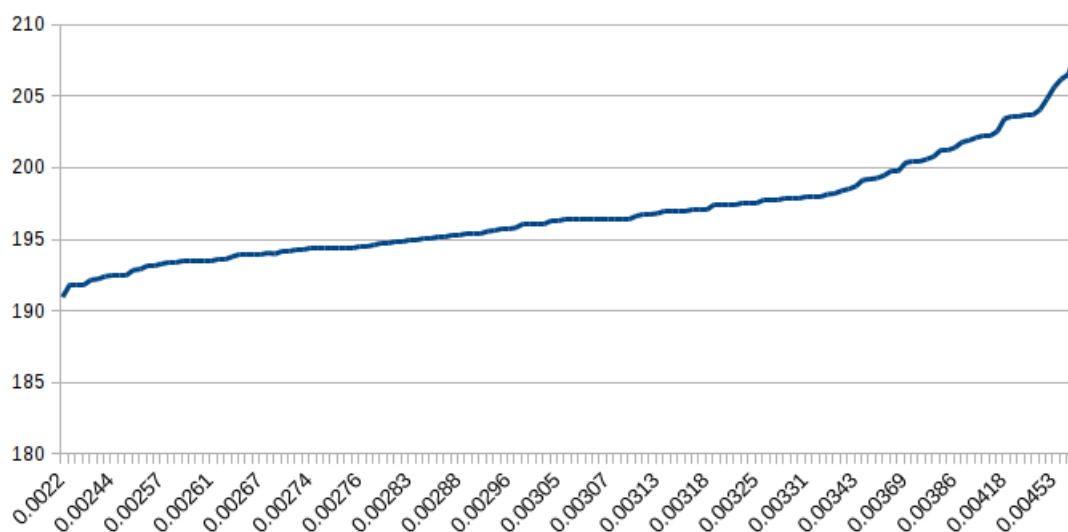
Pre malé uhly je $\tan \alpha = \sin \alpha$ a pre koleso s polomerom R je $\sin \alpha = \frac{\xi}{R}$. Dosadením do vzťahu 9 dostávame:

$$F = \frac{\xi}{R} F_n \quad (10)$$

Normálovú silu na naklonenej rovine vypočítame podľa vzťahu 5.

V praxi by ale bolo veľmi náročné zmerať vzdialenosť ξ , preto sa podiel vo vzťahu 10 často nahrádza koeficientom valivého odporu C_{rr} . Koeficient môžeme nájsť pre rôzne typy pneumatík v tabuľkách. Definovaním štandardov pri testovaní pneumatík ako je napríklad štandard SAE J2452 [7] sa vymedzujú podmienky testu. Pre potreby tejto práce je dôležité považovať podložku, povrch vozovky, ako dokonale pevnú a koeficienty valivého odporu galusiek alebo plášťov cestného bicykla v rozsahu od 0.002 do 0.006 [11]. Na týchto dátach môžeme prezentovať, aký vplyv má koeficient odporu C_{rr} na výkon potrebný pre udržanie konštantnej rýchlosti 30 km h^{-1} , vid' obr. 14.

V príklade sa športovec pohybuje v horizontálnej rovine a všetky ďalšie premenné sú konštantné.



Obr. 14: Závislosť potrebného výkonu od koeficientu odporu pneumatiky

Kým koeficient je podľa tabuľky nezávislý od tlaku, pretože test predpokladá konštatné, ideálne nahustenie pneumatiky, v praxi tomu tak byť nemusí. Venujme teda niekoľko ďalších riadkov faktorom, ktoré ovplyvňujú valivý odpor.

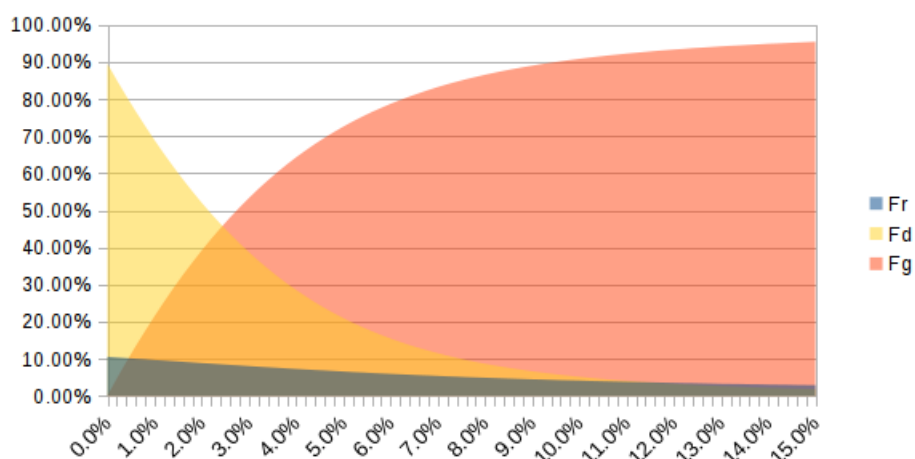
Tlak v pneumatike. Čím vyššie je nahustenie pneumatiky, tým je nižšia jej deformácia a teda aj valivý odpor.

Šírka pneumatiky. Pôsobením normálovej tlakovej sily je každá pneumatika mierne deformovaná, avšak širšia sa deformuje viac do svojej šírky (menšie ξ), kým užšia je deformovaná pozdĺžne, pneumatika stráca viac zo svojho kruhového tvaru a rastie ξ . Širšia pneumatika má pri rovnakom tlaku oproti užšej pneumatike nižší valivý odpor ale užšiu je možné hustiť na vyšší tlak pri dosiahnutí rovnakého komfortu jazdy. Užšie pneumatiky majú navyše nižší aerodynamický odpor, ktorému sa budeme venovať neskôr. Ďalšími faktormi, ktoré ovplyvňujú valivý odpor sú aj štruktúra a materiál pneumatiky, priemer kolesa, hmotnosť záťaže, mikrotrenie medzi povrchom a pneumatikou.

Nakoľko je na trhu nespočetné množstvo modelov galusiek a plášťov pre bicykle, nie je možné k nim uchovávať a neustále aktualizovať koeficient valivého odporu C_{rr} . Určitú úlohu hrá aj tlak v pneumatike, ktorý každý cyklista volí podľa svojich osobných preferencií, požadovaných jazdných vlastností a komfortu. Žiadať tlak v pneumatike

ako vstup do systému od používateľa považujeme za veľmi nekomfortné a preto vyvodzujeme záver, že práve hodnota C_{rr} bude predmetom odhadu v našom algoritme.

Na záver tejto kapitoly chceme prezentovať podiel jednotlivých silových zložiek na celkovej sile pôsobiacej na cyklistu v závislosti od stúpajúceho sklonu vozovky. Na obr. 15 sú dáta pri konštantných podmienkach, koeficientoch a konštantnom výkone 350 W. S postupnou zmenou stúpania z 0 až do 15% môžeme vidieť, že podiel gravitačnej sily a aerodynamického odporu sa vyrovnáva približne pri 2.5% stúpania. Valivý odpor má po celú dobu minimálny podiel na celkovej sile, avšak nemôžeme ho zanedbať.



Obr. 15: Podiel silových zložiek v závislosti od stúpajúceho sklonu vozovky

3 Opis riešenia

4 Záver

Výsledkom našej práce je ...

Literatúra

- [1] DÍVALD, L.: *Kontrolovaný tréning*. Bratislava: Laurenc Dívald, 2009. 116s. ISBN 978-80-970358-1-5
- [2] KENNEY, W. L. - WILMORE, J. H. - COSTILL, D. L.: *Physiology of Sport and Exercise*, 5. vydanie. Champaign: Human Kinetics, 2011. 640s. ISBN: 860-1401254188
- [3] HALLIDAY, D. - RESNICK, R. - WALKER, J.: *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Brno: Vysoké učení technické, 2000. 1278s. ISBN 80-214-1868-0
- [4] WILSON, D. G.: *Bicycling Science*, 3. vydanie. Cambridge: The MIT Press, 2004. 485s. ISBN: 978-0262731546
- [5] CLARK, S. K. - DODGE, R. N.: *A Handbook for the Rolling Resistance of Pneumatic Tires*. Michigan: University of Michigan, 1979. 156s. ASIN: B0006XMSXI
- [6] ISO 2533:1975 : *Standard Atmosphere* - International Organization for Standardization
- [7] SAE J2452:1999 : *Stepwise Coastdown Methodology for Measuring Tire Rolling Resistance* - Society of Automotive Engineers
- [8] SCHWALBE: *Rolling Resistance*. [cit. 14. 4. 2015]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.schwalbetires.com/tech_info/rolling_resistance>
- [9] CYCLING-WEEKLY: *Power meters: Everything you need to know*. [cit. 15. 4. 2015]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.cyclingweekly.co.uk/news/power-meters-everything-you-need-to-know-35563>>
- [10] REICHL, J. - VŠETIČKA, M.: *Encyklopedie fyziky - Valivý odpor*. [cit. 25. 4. 2015]. Dostupné na World Wide Web: <<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/37-valivy-odpor>>
- [11] BIKETECH-REVIEW: *Roller Data*. [cit. 25. 4. 2015]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.biketechnreview.com/tires/rolling-resistance/475-roller-data>>

- [12] STRAVA: *About*. [cit. 10. 3. 2015]. Dostupné na World Wide Web: <<https://www.strava.com/about>>
- [13] BIKECALCULATOR: *How to use*. [cit. 10. 3. 2015]. Dostupné na World Wide Web: <<http://bikecalculator.com/how.html>>

Obsah CD nosiča

Obsah priloženého CD nosiča je nasledovný:

- v priečinku *dokument* sa nachádza text diplomovej práce vo formáte PDF
- v priečinku *aplikácia* sú zdrojové súbory výslednej funkčnej aplikácie, a tiež skript pre vytvorenie tabuliek v databáze
- v priečinku *dokumentácia* je dokumentácia zdrojového kódu vo formáte HTML obsahujúca popis jednotlivých tried a ich metód, a tiež príslušné diagramy tried