



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MECHANICAL ENGINEERING

REKUPERACE ENERGIE U HPV

RENEWAL ENERGY IN HPV

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. IVO BITTNER

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Doc. Ing. ZDENĚK KAPLAN, CSc.

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Ivo Bittner

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Automobilní a dopravní inženýrství (2301T038)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem c.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Rekuperace energie u HPV

v anglickém jazyce:

Renewal energy in HPV

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Obsahem práce je komplexní studium silničních vozidel poháněných lidskou silou s cílem rekuperovat energii mařenou při brzdění vozidla.

Cíle diplomové práce:

Cílem diplomové práce magisterského studia je ideový návrh rekuperace energie mařené při brzdění silničního vozidla poháněného lidskou silou.

Seznam odborné literatury:

Allan V. Abbott, David Gordon Wilson: Human Powered Vehicles

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Zdeněk Kaplan, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 22. 11. 2013

L.S.

prof. Ing. Václav Pištěk, DrSc.

Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.

Děkan fakulty



ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá komplexním studiem a návrhem rekuperační soustavy silničního vozidla poháněného lidskou silou s cílem vytvořit ideový návrh bicyklu sloužícího pro kondiční cvičení. Obsahuje přehled typů rekuperačních prostředků, jejich vlastnosti, výhody, nevýhody a použitelnost při konstrukci takového vozidla. Z těchto prostředků je pak vybrána soustava nejlépe odpovídající konstrukci vozidla určeného pro kondiční cvičení. Dále pak přehled jízdních odporů působících na vozidlo v průběhu jízdy. Ze zvolených parametrů s přihlédnutím k jízdním odporům a k odporům vedení elektrické energie je zkoumán celkový dojezd za různých podmínek.

KLÍČOVÁ SLOVA

HPV, rekuperace, bicykl, kondiční cvičení, elektrokolo, akumulátor, superkapacitor, elektromotor, generátor, jízdní odpory, dobíjení, přenos energie, převod

ABSTRACT

This thesis deals with the study and design of complex heat recovery system of a road vehicle driven by human power to create a conceptual design of the bicycle pertaining to fitness exercises. Provides an overview of the types of regenerative resources, their characteristics, advantages, disadvantages and applicability in the design of such a vehicle. Of these resources are then chosen system best suited to the vehicle structure designed for fitness training. Furthermore, an overview of driving resistance operating on the vehicle during driving. Of the selected parameters with regard to the driving resistances and resistances electrical power lines is examined overall range under various conditions.

KEYWORDS

HPV, recuperation, bicycle, fitness, electric bike, accumulator, supercapacitor, electric engine, generator, driving resistances, charging, power transmission, gear



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BITTNER, I. Rekuperace energie u HPV. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 57 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Zdeněk Kaplan CSc.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Zdeňka Kaplana, CSc. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 29. května 2014

.....

Ivo Bittner



PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu práce doc. Ing. Zdeňku Kaplanovi, CSc. za cenné rady a podporu při řešení dané problematiky.

Zároveň chci poděkovat své matce za podporu a bezmeznou trpělivost při mém studiu.



OBSAH

Úvod	10
1 Rekuperační soustava	11
1.1 Volba rekuperační soustavy	11
1.1.1 Paralelní elektrická soustava	12
1.1.2 Sériová elektrická soustava	12
1.2 Uspořádání sériové elektrické rekuperační soustavy	13
1.2.2 Rozvodná soustava	18
1.2.3 Řídící jednotka.....	19
1.2.4 Informační panel	19
1.2.5 Regulační člen	19
1.2.6 Pohonná rekuperační jednotka.....	20
1.2.7 Snímač otáček v náboji kola.....	21
1.2.8 Generátor elektrické energie.....	21
1.2.9 Bicykl	21
1.2.10 Cyklista.....	22
1.3 Přehled volených součástí systému.....	22
2 Jízdní odpory	23
2.1 Odpor valivý	23
2.2 Odpor vzdušný	25
2.2.1 Výpočet ztrátového výkonu odporem vzduchu.....	26
2.2.2 Odpor stoupání	27
2.2.3 Odpor zrychlení	28
2.2.4 Mechanické ztráty.....	29
2.2.5 Hnací síla potřebná k překonání jízdních odporů.....	30
3 Teoretický výpočet režimů jízdy	31
3.1 Režim pohonu bicyklu pouze elektromotorem	31
3.1.1 Počáteční podmínky	31
3.1.2 Výpočet dojezdu na baterii	32
3.2 Režim kondičního cvičení	33
3.2.1 Počáteční podmínky	33
3.2.2 Výpočet doby úplného nabití baterie.....	34
3.3 Režim Kondiční jízdy	34
3.3.1 Počáteční podmínky	34
3.3.2 Výpočet dojezdu na baterii	35
3.4 Zhodnocení	36



4	Pohon lidskou silou	37
4.1	Přímý pohon jako nouzový režim	37
4.1.1	Volba převodového ústrojí	38
4.2	Rychlost jízdy na zvolený převodový poměr	39
4.2.1	Počáteční podmínky	39
4.2.2	Výpočet rychlosti jízdy.....	39
4.3	Připojení mechanického pohonu.....	41
5	Energetická bilance.....	42
5.1	Počáteční podmínky.....	42
5.2	Vztahy pro výpočet	42
5.3	Jízda do kopce.....	44
5.4	Jízda do kopce s asistencí	44
5.5	Jízda z kopce	44
5.6	jízda z kopce s asistencí	45
5.7	Vypočtené hodnoty	45
5.8	Grafické znázornění	47
5.9	Zhodnocení	49
	Závěr.....	50
	Seznam použitých zkratk a symbolů	53



ÚVOD

Rekuperaci energie se v dnešní době zabývají snad všechna odvětví moderní dopravy. V některých je vývoj na již poměrně slušné úrovni, jinde ještě na začátku. A takovým případem je právě skupina vozidel poháněných lidskou silou. Vzhledem k slabému zdroji, který oproti jiným představuje lidský organismus, je výzvou pokusit se takový systém navrhnout tak, aby bezezbytku fungoval. HPV vozidla by se dala rozdělit do tří hlavních skupin, kterými jsou vozidla pohybující se po souši, vodě a ve vzduchu. Vzhledem k nejrozšířenější skupině vozidel pohybujících se pomocí lidské síly po souši, se ve své práci zaměřím právě na tato, především pak na bicykly.

Stejně jako u jiných dopravních prostředků, které nejsou vybaveny systémem rekuperace energie - automobily, vlakové soupravy, autobusy, trolejbusy atd. – i u bicyklů dochází při brzdění ke zbytečnému maření dříve nabyté kinetické energie, kterážto se přemění v brzděné soustavě v teplo. Toto pak již bez dalšího užítu unikne do okolí. Ale v případě vozidel poháněných cizím zdrojem je člověk pouze pasažér a svou energií více méně nijak aktivně nezapojuje. Oproti tomu právě pohyb na bicyklu je nejen ekologickou formou dopravy, ale taktéž poskytuje pro člověka jistý typ kondičního cvičení. Avšak právě u kondičního cvičení je dbáno na jistou konstantnost zatížení, která se v průběhu cvičení buď nemění vůbec, nebo dle požadovaných parametrů, čehož u bicyklu v běžných podmínkách nelze dosáhnout, pouze v jakýchsi laboratorních, například v tělocvičně. Zde se však na druhou stranu člověk okrádá o zážitek a požitek z jízdy volnou přírodou. Problémem při jízdě v přírodě je situace, kdy cyklista při své jízdě překonává převýšení, jehož důsledkem zvýší svou tělesnou teplotu, dochází k pocení a při následné jízdě z kopce naopak nevyvíjí žádnou námahu a ještě k tomu je chlazen proudícím vzduchem, což může vést ke zdravotním komplikacím, zvláště pak jedná-li se o staršího, nebo nemocného člověka. Proto se ve své práci pokusím zpracovat systém vozidla, kdy cyklista pojedje s konstantním zatížením, svou energii bude permanentně dobíjet akumulátor a systém rekuperace bude energii při jízdě z kopce taktéž ukládat, aby pak při překonávání jízdnic odporů, nebo případě jízdy do kopce touto energií cyklistovi vypomohl. V tomto řešení vidím vhodnou kombinaci již zmíněného kondičního cvičení s cykloturistikou.

Bicykl, vybavený zamýšlenou rekuperační soustavou, se od běžného liší především instalací elektromotoru, zásobníku elektrické energie, generátorem elektrické energie, elektronického řízení a ovládacími prvky této soustavy. Díky těmto komponentům může být elektrokolo o více než 50% hmotnější než běžné jízdnic kolo. Tato nadbytečná hmotnost má pak negativní vliv na velikost jízdnic odporů. V současné době je podíl elektrokol na českém trhu asi 2%, v zemích s rozvinutou cyklistickou kulturou dosahuje až 15%. Existují také elektrokola s možností rekuperace, u kterých uvádí výrobce maximální zvýšení dojezdu o 15% v závislosti na vnějších vlivech a profilu trati. Výsledky mnou uvažovaného kondičního bicyklu proto porovnam s hodnotami uváděnými výrobcí těchto kol.



1 REKUPERAČNÍ SOUSTAVA

Rekuperace je proces přeměny kinetické energie při zpomalování vozidla na energii chemickou nebo mechanickou, která je zpětně použita k pohonu tohoto vozidla. Obnova energie má tak za následek uspoření paliva, potažmo lidské síly. Cílem této práce však není návrh systému, který pouze energii rekuperuje, ale takový, který umožní cyklistovi jet jakýkoliv profil trati se zvoleným konstantním zatížením. Jedině tak lze dosáhnout toho, aby jízda byla kondičním cvičením, nikoli jen vožením se.

1.1 VOLBA REKUPERAČNÍ SOUSTAVY

Jednou z nejdůležitějších součástí celého systému rekuperace je úložiště energie. Slouží k uložení jinak mařené kinetické energie při brzdění jízdního kola v několika formách. Může se jednat o energii mechanickou, například zkrucování gumového svazku, nebo elektrickou uloženou v bateriích nebo kapacitorech, tlakovou jako stlačený vzduch v zásobníku a kinetickou uloženou v setrvačniku. Pro jeho realizaci u HPV se nabízí hned několik typů, ne všechny jsou však vyhovující. Pro použití u HPV by mělo splňovat parametry:

- nízká hmotnost
- dostatečná kapacita
- jednoduchá údržba
- pro sériovou výrobu nízké výrobní náklady

Tabulka 1 Přehled rekuperačních soustav

Rekuperační soustava	Využití energie	Zachycení energie	Výhody	Nevýhody	Účinnost
Zkrutem pružného členu	Potenciální energie	Zkrutem pružného členu	Nízká hmotnost, nízká pořizovací cena	Nelineární průběh dodávky energie, údržba, nízká životnost	-
Elektrická soustava	Elektrický náboj	Baterie, superkapacitory	Snadný přenos energie oběma směry, snadná údržba	Vyšší hmotnost baterií, drahá a složitá elektronika	60-90%
Tlaková soustava	Stlačený vzduch	Tlaková nádoba	Jednoduchá konstrukce, snadná údržba	Vyšší hmotnost, prostorově objemný zásobník	65-75%
Kinetická soustava	Kinetická energie setrvačniku	Setrvačnik	Dlouhá životnost, jednoduchá konstrukce	Vysoká hmotnost, gyroskopický moment	85%



Jako zcela nevyhovující je soustava se zkrutným členem, jelikož dokáže uložit pouze malé množství energie, jejíž dodávku nelze regulovat plynule pro potřeby kondičního cvičení.

Stejně tak není příliš efektivní využití kinetické soustavy, kde by se sice teoreticky dala energie dávkovat pomocí speciálně navržené spojky, nicméně aby byla tato soustava schopna zachytit větší množství energie, musel by být setrvačnick buď velice hmotný, nebo dosahovat vysokých otáček, což je v případě jízdního kola obtížně řešitelné.

Tlaková soustava by teoreticky připadala v úvahu, kdy za použití kompresoru lze energii uložit ve formě stlačeného vzduchu do zásobníku, ovšem v kompresoru dochází ke ztrátám tepelným a mechanickým, což by značně snižovalo efektivitu celé soustavy. Taktéž průběh tlaku je značně nelineární a jeho regulace na konstantní hodnotu by byla značně problematická.

U elektrické soustavy lze přesně regulovat výkon, který cyklista do systému odevzdá, pomocí řídicí elektroniky. Baterie pak slouží jako úložiště této energie a zároveň jako zdroj pro pohon vozidla. Systém je tak složen z elektromotoru pro pohon a rekuperaci, dynamu pro výrobu elektřiny cyklistou a bateriemi. Elektrická účinnost generátoru elektrické energie se pohybuje v rozmezí 60 až 90%. Vyšších účinností dosahují alternátory, až 90%.

Ze soustav uvedených v tabulce 1 proto volím pro ideový návrh rekuperace elektrickou soustavu, kdy lze vhodným způsobem regulovat cyklistovo zatížení a přebytky energie ukládat zpět do akumulátoru. Použití generátoru elektrické energie pak s volenou účinností 80% převyšuje možnosti tlakové soustavy.

1.1.1 PARALELNÍ ELEKTRICKÁ SOUSTAVA

Paralelní elektrická rekuperační soustava je myšlena jako soustava, kdy cyklista přes zařazený převod přímo přenáší svůj výkon na zadní kolo bicyklu a elektromotor umístěný například v náboji kola mu pomáhá překonávat jízdní odpory, případně při brzdění, nebo jízdě z kopce, elektrickou energii ukládat do akumulátoru. V tomto případě je ovšem velice komplikované synchronizovat přímý mechanický pohon s pohonem elektrickým tak, aby vždy při libovolném zařazeném rychlostním stupni cyklista stále šlapal stejným zatížením a elektromotor mu adekvátně pomáhal, případně udržoval rychlost, rekuperoval. V dnešních dnech existuje celá řada výrobců, kteří nabízí elektrokola s takovýmto uspořádáním, ovšem žádné z nich není uzpůsobeno jako cyklotrenažér. Problém se synchronizací řeší umístěním výkonových senzorů v náboji kola, snímačem otáček v ose šlapátek a informací o aktuální okamžité rychlosti. Signály z těchto snímačů pak zpracovává řídicí jednotka, která určuje dle zvoleného stupně asistence, jakým způsobem se bude elektromotor chovat. Zda bude asistovat, nebo rekuperovat. Jedná se však o složitou elektroniku, jejíž řízení a konečná efektivita je těžko počítatelná.

1.1.2 SÉRIOVÁ ELEKTRICKÁ SOUSTAVA

U ideového návrhu jízdního kola s rekuperací lze provést uspořádání pohonných systémů tak, aby cyklista poháněl po celou dobu jízdy generátor elektrické energie s předem zvoleným zatížením a pohon kola zajišťoval výhradně elektromotor. V tomto případě cyklista svými



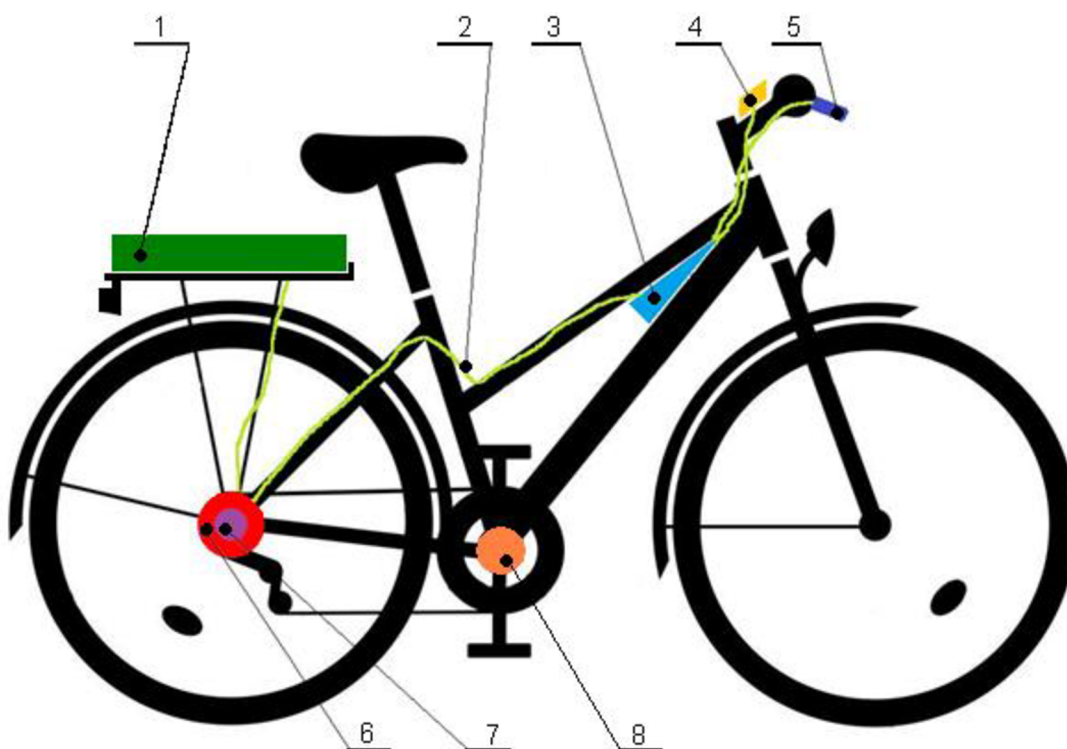
svaly pohání pouze generátor elektrické energie, kterým emituje proud dodávaný do akumulátoru a z toho je zásobován elektromotor, pohánějící bicykl. Výhodou tohoto systému je fakt, že si cyklista může předem nastavit, jakou rychlostí pojede a jaký při tom bude odevzdávat výkon. Zásobník energie ve formě akumulátoru pak zajistí dojezd, který bude prodloužen o energii dodanou cyklistou. V tomto případě se při jízdě na elektřinu neuvažuje s přímou mechanickou vazbou šlapátek a hnaného kola. Touto vazbou musí být samozřejmě kolo vybaveno, aby byl zajištěn dojezd v případě úplného vybití baterie v průběhu jízdy. Tato problematika bude popsána v Kapitole 4.

Z výše uvedených poznatků pro ideový návrh rekuperační soustavy volím sériovou elektrickou soustavu.

1.2 USPOŘADÁNÍ SÉRIOVÉ ELEKTRICKÉ REKUPERAČNÍ SOUSTAVY

Návrh sériové rekuperační soustavy se skládá ze samotného bicyklu, pohonné/rekuperační jednotky, generátoru elektrické energie, úložiště energie, rozvodné soustavy, ovládacích a regulačních prvků a informačního panelu. V následujících bodech bude objasněna funkce jednotlivých částí soustavy tak, aby byla chápána jako celek.

Okruh paralelní elektrické rekuperační soustavy se skládá z prvků: úložiště energie (1), rozvodná soustava (2), řídicí jednotka (3), informační panel s informací o okamžité rychlosti (4), provozní brzda se spínačem generátoru (5), pohonná a zároveň rekuperační jednotka (6), snímač otáček (7), generátor elektrické energie (8).



Obr. 1 Schéma rekuperační soustavy



1.2.1.1 ÚLOŽIŠTĚ ENERGIE

K uložení elektrické energie dnes slouží celá řada akumulátorů, jejichž vlastnosti se liší dle účelu použití. Ta je vázaná chemicky v elektrolytu. Je dána chemickou reakcí mezi dvěma elektrodami, které jsou vyrobeny z různých materiálů a tím mají specifické vlastnosti. Prostor mezi nimi je vyplněn elektrolytem, ve kterém probíhá příslušná chemická reakce. Pro použití u hybridních vozidel se jeví jako nejvýhodnější Li-Ion baterie, která není svou chemickou stavbou tolik nebezpečná, jako například Ni-Cd baterie. Aby však baterie správně fungovala, je potřeba udržovat stále napětí nad 50% kapacity. Taktéž pro začátek dobíjení je potřeba jistá časová prodleva k zahájení chemické reakce a tento jev je velice nepříznivý při využití u bicyklu, kde se předpokládají kratší časové intervaly dobíjení a nízký, nepravidelný proud.

Tabulka 2 Přehled úložišť energie

Parametr	Ni-MH	Li-Ion	Superkapacitor
Hustota energie	30-80 Wh/kg	100-135 Wh/kg	10 Wh/kg
Měrný výkon	1 kW/kg	14,5 kW/kg	10 kW/kg
Doba nabíjení	5 h	4 h	10 s
Životnost	1 000 cyklů	Až 1000 cyklů	1 000 000 cyklů
Výhody	Konstantní napětí do úplného vybití, levné	Vysoký měrný výkon a hustota energie	Okamžité přijímání náboje, bezúdržbové
Nevýhody	Nízká účinnost dobíjení (66%), paměťový efekt	Rychlé stárnutí, při úplném vybití může dojít ke zničení	Rozměrná konstrukce, vyšší hmotnost, vysoká cena, 10x nižší hustota energie

Pro účely rekuperace HPV se jeví jako vyhovující superkapacitor, protože dokáže okamžitě přijímat elektrický náboj. Nevýhodou je však nízká hustota energie, kdy při plném zatížení dokáže dodávat energii pouze v řádech minut. Pro kontrolu vhodnosti volby jsem provedl výpočet reálného superkapacitoru.

1.2.1.1.1 Simulace nabíjení reálného superkapacitoru

V případě uvažovaného superkapacitoru se jedná o konkrétní hodnoty. Pro zjednodušení obvodu mějme schéma zapojení dle obrázku 2 a parametry reálného superkapacitoru Maxwell BMOD 048V dle Tabulky 3.



Tabulka 3 Parametry superkapacitoru Maxwell [8]

C [F]	86	I_p [A]	1080	L [mm]	416
U_n [V]	48,6	E_{max} [Wh/kg]	2,48	W [mm]	108
R_{esr} [m Ω]	12,3	P_{ξ} [kW/kg]	5,4	S [mm]	53,7
I_{cc} [A]	150	P_d [kW/kg]	2,0	Hmotnost [kg]	11

Kde: C – kapacita [F]

U_n – jmenovité napětí [V]

R_{esr} – počáteční stejnosměrný vnitřní odpor [m Ω]

R_d – vnitřní odpor [m Ω]

I_n – jmenovitý proud [A], vybíjení po dobu 5s na $U/2$

I_{sc} – zkratový proud [A]

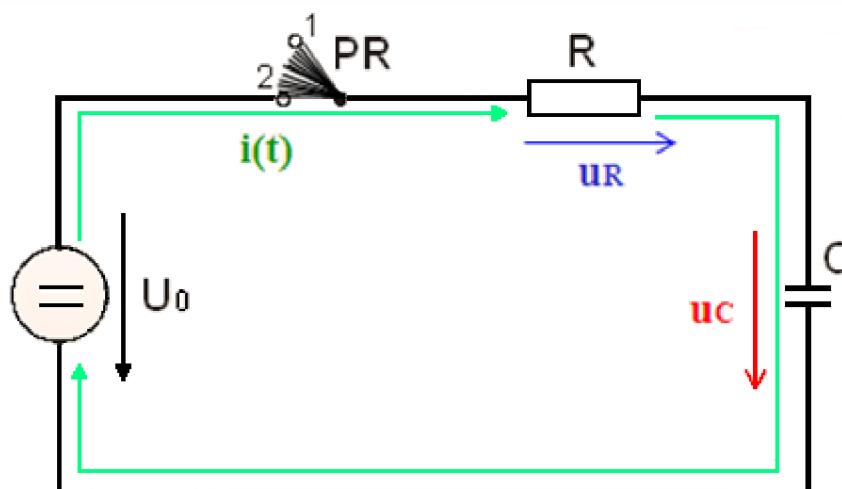
I_{cc} – maximální kontinuální proud [A]

I_p – špičkový proud [A] po dobu 1s

E_{max} – hustota uložené energie [Wh/kg]

P_{ξ} – špičkový výkon dodaný do zátěže [kW/kg]

$P_d - P_d = (0,2 * U^2 / R_d) / m$ (m - hmotnost)



Obrázek 2 Schéma zapojení nabíjení superkapacitoru [30]



Pro simulaci jsou určeny počáteční podmínky, kdy:

Tabulka 4 Počáteční podmínky

$u_c(t)$	0	Kondenzátor je vybitý
$i(t)$	0	Obvod je rozpojený
U_r	0	vzhledem k tomu, že $i(t) = 0$, nevznikne na R úbytek napětí

Vzhledem k tomu, že kapacitor C je vybitý a R_v zdroje je roven nule, bude počáteční proud obvodem omezen pouze velikostí rezistoru R. V okamžiku připojení zdroje U_0 začne obvodem téct proud $i(t) = U_0/R$.

Kondenzátor se začne nabíjet přes odpor R a napětí u_c se bude měnit podle vztahu [10]:

$$u_{cn} \ t = U_0(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (1.1)$$

Pro průběh proudu i obvodem platí [10]:

$$i \ t = \frac{U_0 - u_c(t)}{R} = \frac{U_0 - U_0(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})}{R} = \frac{U_0 - U_0 + U_0 e^{-\frac{t}{\tau}}}{R} = \frac{U_0}{R} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1.2)$$

Průběh napětí U na rezistoru R je dán vztahem [10]:

$$u_r \ t = R i \ t = R \frac{U_0}{R} e^{-\frac{t}{\tau}} = U_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1.3)$$

Průběh vybíjení superkondenzátoru je dán vztahem [10]

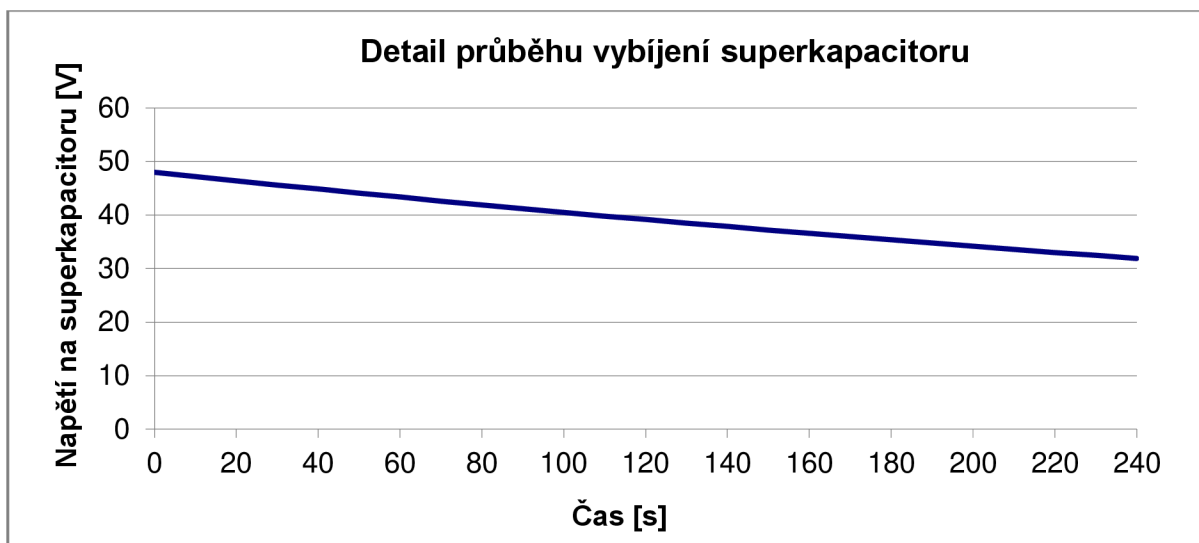
$$u_{cv}(t) = \frac{Q}{C} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1.4)$$

Časová konstanta τ ovlivňující všechny obvodové veličiny [10]:

$$\tau = RC \ [s, \Omega, F] \quad (1.5)$$

Vnitřní odpor motoru [10]:

$$R_m = \frac{U^2}{P_m} = \frac{36,6^2}{187,5} = 7,1 \Omega \quad (1.6)$$



Graf 1 Detail vybíjení superkapacitoru

Z výpočtu a Grafu 1 je patrné, že superkapacitor, který by odpovídal požadavku na motor o napětí 36,6V je schopen dodávat energii pouze po dobu 160s v plném zatížení. To je pro požadavky kondičního cvičení nedostatečné.

1.2.1.1.2 Bateriový akumulátor

Jako úložiště s výrazně vyšší energetickou kapacitou se nabízí bateriový akumulátor. V dnešní době existuje množství výrobců nabízejících akumulátory na bázi elektrochemické reakce mezi elektrodami, které jsou vyrobených z různých materiálů. Tyto reálné akumulátory mají odlišnou nabíjecí a vybíjecí charakteristiku, stejně tak jako vnitřní odpor závislý na nabíjecím a vybíjecím proudu. Žádná z těchto veličin není lineární a na teoretický výpočet by se dala těžko aplikovat, proto pro volený akumulátor volím střední hodnotu vnitřního odporu dle rovnice 1.7 [9] a ve výpočtech ji budu považovat za ideální zdroj pouze s vnitřním odporem.

$$R_i = \frac{U_{sv}}{I} \quad (1.7)$$

Dle tabulky 2 s přehledem nejběžnějších bateriových systémů volím baterii Li-Ion, která se vyznačuje dostatečnou hustotou uložené energie, vysokým počtem nabíjecích cyklů a požadovaným napětím na svorkách pro pohon zvoleného elektromotoru.

Tabulka 5 Parametry zvoleného akumulátoru [13]

U_n [V]	C [Ah]	E_b [Wh]	R_d [mΩ]	Hmotnost [kg]
48	8,8	423	5,45	7,3

Kde: U_n – jmenovité napětí [V]

R_d – vnitřní odpor [mΩ]



C – kapacita akumulátoru [Ah]

E_b – hustota uložené energie [Wh]

1.2.2 ROZVODNÁ SOUSTAVA

K přenosu elektrické energie slouží rozvod, který musí splňovat požadavky na co nejnižší hmotnost a také elektrický odpor.

Tabulka 6 Materiál rozvodné soustavy

Materiál	Hliník	Měď	Stříbro
Hustota	2700 kg/m ³	8960 kg/m ³	10490 kg/m ³
Měrný odpor	2,828 μΩcm	1,75 μΩcm	1,629 μΩcm
Výhody	Nízká hmotnost, relativně levný	Nízký měrný odpor	Nízký měrný odpor
Nevýhody	Vysoký měrný odpor, lámavost	Vyšší hustota	Vysoká hustota, relativně drahé

Pro účely HPV k rozvodu elektrické energie a energie řídicích prvků volím rozvod měděným vodičem jako kompromis levného materiálu s nízkým odporem. Měřením na reálném bicyklu jsem došel k závěru, že pro rozvod energie a připojení periférií je potřeba 2 metry vodiče o průměru 1,5mm pro propojení baterie s elektromotorem a generátorem a 1,5 metru pro připojení řídicích elementů o průměru 0,75mm. Z dvou metrů vodiče o průměru 1,5mm použiji 1 metr pro propojení elektromotoru s baterií a 1 metr pro propojení generátoru s baterií. Proto ve výpočtu pro průměr 1,5mm budu počítat s délkou 1 metr. Ztrátový odpor vedením je vyjádřen vztahem [6]:

$$R = \rho_m \cdot \frac{L}{S} \quad (1.8)$$

Kde R je odpor vodiče, ρ_m měrný odpor, L délka vodiče a S průřez vodiče. Z rovnice 1.8 lze počítat pro vodič o délce $L_1 = 1\text{m}$ a průměru $d_1 = 1,5\text{mm}$:

$$R_1 = \rho_m \cdot \frac{L_1}{S_1} = 1,75 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{1}{\frac{\pi \cdot 0,0015^2}{4}} = 0,01 [\Omega] \quad (1.9)$$

Z rovnice 1.8 lze počítat pro vodič o délce $L_2 = 1,5\text{m}$ a průměru $d_2 = 0,75\text{mm}$:

$$R_2 = \rho_m \cdot \frac{L_2}{S_2} = 1,75 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{1,5}{\frac{\pi \cdot 0,00075^2}{4}} = 0,059 [\Omega] \quad (1.10)$$

Celková hmotnost vodičů m_v , kde ρ_v je hustota materiálu vodiče: (1.11)



$$m_v = S_1 \cdot L_1 + S_2 \cdot L_2 \cdot \rho_v = \pi \cdot \frac{0,0015^2}{4} \cdot 1 + \pi \cdot \frac{0,00075^2}{4} \cdot 1,5 \cdot 2700 = 6,56 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$$

Tyto odpory budou zohledněny ve výpočtu energetické bilance jako jedna ze ztrát působící při přenosu elektrické energie. Celková hmotnost vodičů je v porovnání s hmotností ostatních prvků soustavy nepoměrně malá, že ji ve výpočtech zanedbám.

1.2.3 ŘÍDÍCÍ JEDNOTKA

Zpracovává signály ze snímačů, elektromotoru a zdroje energie. Jejím úkolem je rozdělovat energetické vstupy (cyklista, dynamo) a výstupy (elektromotor) tak, aby bylo zajištěno zvolené konstantní zatížení cyklisty, asistence při překonávání jízdních odporů a rekuperování energie při jejím přebytku. Jedině tak může plnit celý systém funkci kola pro kondiční cvičení. Slouží k řízení celého systému, vyhodnocování dat z jednotlivých členů soustavy a optimalizování vedení proudu v jednotlivých fázích jízdy. Na trhu existuje několik výrobců, zabývající se výrobou těchto jednotek, nejsložitější je výrobek společnosti BionX, který je schopen dávkovat energii v krocích po 25%, stejně jako ji v těchto krocích ukládat. Hmotnost takového zařízení je v době miniaturizace nízká, v řádech desítek gramů, proto ji ve výpočtech nebudu uvažovat. Stejně tak nebudu uvažovat vnitřní odpor tohoto zařízení.

1.2.4 INFORMAČNÍ PANEL

Slouží k vizuálnímu sdělení informací jezdcovi o aktuální rychlosti, množství energie uložené v baterii a zvoleném jízdním režimu. Lze volit z celé řady cyklocomputerů, jejich vlastnosti jsou ve většině případů shodné a hmotnost v porovnání s hmotnostmi ostatních částí myšleného systému nepoměrně malá, že hmotnost tohoto zařízení nebudu ve výpočtech uvažovat.

1.2.5 REGULAČNÍ ČLEN

Jako regulační člen je myšlena brzdová páka, jež je propojena mechanickou vazbou s brzdovými čelistmi. Touto klasickou mechanickou brzdou musí být ze zákona vybaveno každé jízdní kolo. V případě brzdové páky na kole vybaveném rekuperační soustavou je však myšleno její vybavení kontaktním spínačem a potenciometrem. Kontaktní spínač slouží k tomu, aby v případě stisknutí páky došlo okamžitě k rozpojení hnacího obvodu tak, aby při brzdění nedošlo současnému chodu motoru v režimu pohonu. V další fázi pak dojde k přepnutí hnacího motoru do režimu generátoru a pomocí potenciometru dochází k postupnému zvyšování brzdícího účinku motoru, který se v tuto chvíli chová jako generátor a takto generovaná energie se ukládá do akumulátoru. Poslední fází při pozvolném stisknutí brzdové páky je zapojení mechanické brzdy tak, aby cyklista mohl bezpečně zastavit.



1.2.6 POHONNÁ REKUPERAČNÍ JEDNOTKA

V principu lze každý elektromotor využít jako generátor. Rozdělit bychom je mohli na stejnosměrné - dynamo a střídavé - alternátory, pak s vlastním buzením a cizím buzením. Dále s permanentními magnety, nebo elektromagnety. Těch dělení by bylo ještě víc. Vezme-li se tedy jakýkoliv komutátorový stejnosměrný motor, tak při jeho mechanickém roztočení se začne chovat jako dynamo. Z počátku se využívá jeho zbytkového magnetického pole k nabuzení budícího vinutí. Tento budící proud se neustále zvětšuje a při dosažení jistých otáček se již téměř nemění. Odebíraný výkon je pak závislý na konstrukci elektromotoru, jako je průměr vinutí, rychlost otáčení, velikost cívky pohybující se v magnetickém poli atd. Konstrukčně lze na bicykl umístit libovolný elektromotor.

Tabulka 7 Přehled elektromotorů

Typ	Vnější	V náboji kola	V náboji šlapátek
výkon	400 W	250 W	250 W
Točivý moment	80 Nm	9 - 40 Nm	30 - 50 Nm
hmotnost	4 kg	3,36 kg	4 kg
Podpora šlapání	0 - 100%	25% - 100%	30% - 100%
Přenos síly	Pomocným řetězem	Přímo na kolo	Přes převody kola řetězem
Výhody	Levný a jednoduchý motor	Bezúdržbový, bez převodu, přímo pohání kolo	Bez převodu
Nevýhody	Vyšší ztráty v přídatném řetězovém převodu	Omezená šířka, musí se vejít do vidlice	Větší rozměr, je potřebné mechanické spojení s hnaným kolem

Dle tabulky 8 volím elektromotor v náboji kola se snímačem otáček. Z nabídky elektromotorů na trhu pak motor s parametry dle tabulky 9



Tabulka 8 Parametry zvoleného elektromotoru [27]

	Napětí [V]	Proud [A]	Příkon [W]	Točivý moment [Nm]	Rychlost [km/h]	Výstupní výkon motoru [W]	Účinnost [%]
Volnoběh	36,66	0,83	30,3	0,29	28,09	6,69	22
Max. točivý moment	36,32	12,3	446,7	19,41	20,45	319,5	71,5
Max. Výstupní výkon	36,32	12,3	446,7	19,41	20,45	319,5	71,5
Max. účinnost motoru	36,49	6,55	239,1	9,7	24,02	187,5	78,4

Z uvedených parametrů v Tabulce 8 je patrné, že elektromotor jako reálný stroj se nechová lineárně a jeho charakteristika je proměnná. Pro ideový návrh rekuperační soustavy a následné výpočty proto budu uvažovat příkon, výstupní výkon a oblast maximální účinnosti jako konstantní.

1.2.7 SNÍMAČ OTÁČEK V NÁBOJI KOLA

Je uložen v náboji zadního kola a snímá otáčky kola. Tuto informaci předává řídicí jednotce, která zajistí, aby se kolo otáčelo se stále stejnou, předem zvolenou frekvencí.

1.2.8 GENERÁTOR ELEKTRICKÉ ENERGIE

Jako generátor elektrické energie čistě pro potřeby volby konstantního zatížení cyklisty lze použít generátor umístěný v ose šlapátek. Musí mít dostatečný výkon na to, aby si cyklista mohl zvolit maximální zatížení, které je schopen vlastními silami vyvinout. Z grafu v Kapitole 3 je patrné, že trénovaný sportovec je schopen po omezenou dobu vyvinout špičkový výkon 400W. Proto pro soustavu volím generátor o výkonu 450W s účinností 80%, což bývá u těchto zařízení běžné, stejně jako hmotnost 4kg. Z těchto parametrů budu vycházet při sestavování výpočtu.

1.2.9 BICYKL

Na trhu existuje velké množství bicyklů pro různé oblasti využití. Nejrozšířenější skupinu tvoří bicykly horské a trekkingové, které se také nejlépe hodí pro instalaci rekuperační soustavy. Proto volím bicykl o hmotnosti 15kg s běžnými pneumatikami.



1.2.10 CYKLISTA

Rozmanitost lidstva spočívá mimo jiné v rozdílné tělesné konstrukci jednotlivců, proto je třeba zvolit obecný průměr, který budu uvažovat ve výpočtu. Jako hodnoty pro výpočet budu uvažovat cyklistu o výšce 1,8m a hmotnosti 80kg.

1.3 PŘEHLED VOLENÝCH SOUČÁSTÍ SYSTÉMU

- Úložiště energie: Li-Ion baterie o napětí $U = 48V$, uložené energii $E_b = 423Wh$ a hmotnosti $m_b = 7,3kg$
- Rozvodná soustava: Měděné vodiče s odporem $R_1 = 0,01\Omega$ a $R_2 = 0,059\Omega$
- Pohonná rekuperační jednotka: elektromotor v náboji kola o příkonu $P_p = 250W$, hmotnosti $m_m = 3,36kg$ s účinností $\eta_m = 78,4\%$
- Generátor elektrické energie: generátor v náboji šlapátek o výkonu $P_g = 450W$ s účinností $\eta_m = 80\%$ o hmotnosti $m_g = 4kg$
- Bicykl: trekingové kolo o hmotnosti $m_k = 15kg$
- Cyklista: hmotnost $m_c = 80kg$

Celková hmotnost bicyklu, instalovaných systémů a cyklisty:

$$m_{celk} = m_b + m_m + m_g + m_k + m_c = 7,3 + 3,36 + 4 + 15 + 80 = 109,66 [kg] \quad (1.12)$$



2 JÍZDNÍ ODPORY

Dle prvního Newtonova pohybového zákona platí, že těleso setrvává v klidu, nebo rovnoměrném přímočarém pohybu, pokud není působením vnějších sil přinuceno tento stav změnit. Těmito vnějšími silami se rozumí pohon daného prostředku, povětrnostní vlivy a jízdní odpory. Tyto odpory jsou souborem sil, působících proti pohybu vozidla a následkem těchto sil dochází od zpomalování vozidla až k jeho úplnému zastavení. Jízdní odpory je potřeba překonávat, aby mohlo vozidlo pokračovat minimálně v rovnoměrném přímočarém pohybu. K překonávání slouží pohonné jednotky umístěné na vozidle, kterými může být spalovací motor, elektromotor nebo lidské svaly. V případě motorů mají odpory za následek mimo jiné zvýšení spotřeby, v případě svalů pak cyklistovu únavu, svalové vyčerpání a negativně ovlivňují jeho celkový sportovní výkon. V porovnání s konvenčními motory mají lidské svaly nízký výkon, proto je pro ně překonávání jízdních odporů mnohem obtížnější. Z tohoto důvodu je potřeba tyto odpory co možná nejvíce minimalizovat. U jízdního kola lze toto provést snížením jeho hmotnosti, vhodnou geometrií rámu, snížením valivého odporu pneumatik a vzdušného odporu. Valivý a vzdušný odpor působí proti pohybu vozidla vždy, odpor zrychlení se projevuje pouze při zrychlování, odpor stoupání pak při jízdě do kopce.

Během jízdy působí na HPV následující odpory:

- O_f – odpor valivý
- O_v – odpor vzdušný
- O_s – odpor stoupání
- O_z – odpor zrychlení
- Mechanické ztráty

2.1 ODPOR VALIVÝ

Valivý odpor vzniká deformací pneumatiky a vozovky. V případě HPV vybaveného rekuperační soustavou budu uvažovat jeho provoz po zpevněné komunikaci, v městské aglomeraci nejčastěji asfaltové. Tím nemusím uvažovat deformační odpor vozovky a můžu se zaměřit pouze na deformaci pneumatiky. Valivý odpor závisí na součiniteli valivého odporu kola f_k . Ten závisí na konstrukci pneumatiky, jejím nahuštění, povrchu vozovky a rychlosti kola. Valivý odpor lze počítat jako součin tíhové složky HPV s jezdcem G kolmé na rovinu vozovky a součinitele valivého odporu. Je dán vztahem [4]:

$$O_f = G \cdot \cos \alpha \cdot f_k \quad (2.1)$$

Vliv na velikost valivého odporu má především tlak v pneumatikách, menší roli pak hraje průměr kola, profil pneumatiky a její šířka. Pro srovnání lze z *tabulky 9* určit příklady valivých odporů pláštěů.



Tabulka 9 Součinitele valivého odporu pneumatik

Pneumatika	Součinitel valivého odporu f [-]
Běžná pneumatika pro horská nebo treková kola	>0,0075
Sportovní pneumatika	0,006
Závodní silniční pneumatika	0,005
Schwalbe Stelvio (ISO 406 mm)	0,0045
Rinkowsky	0,003
Michelin Ecorun	0,0028

Pro srovnání valivých odporů dvou různých plášťů lze použít jednoduchý příklad, kdy budu uvažovat cyklistu o hmotnosti 80kg jedoucího na bicyklu o celkové hmotnosti 29,66kg po rovině:

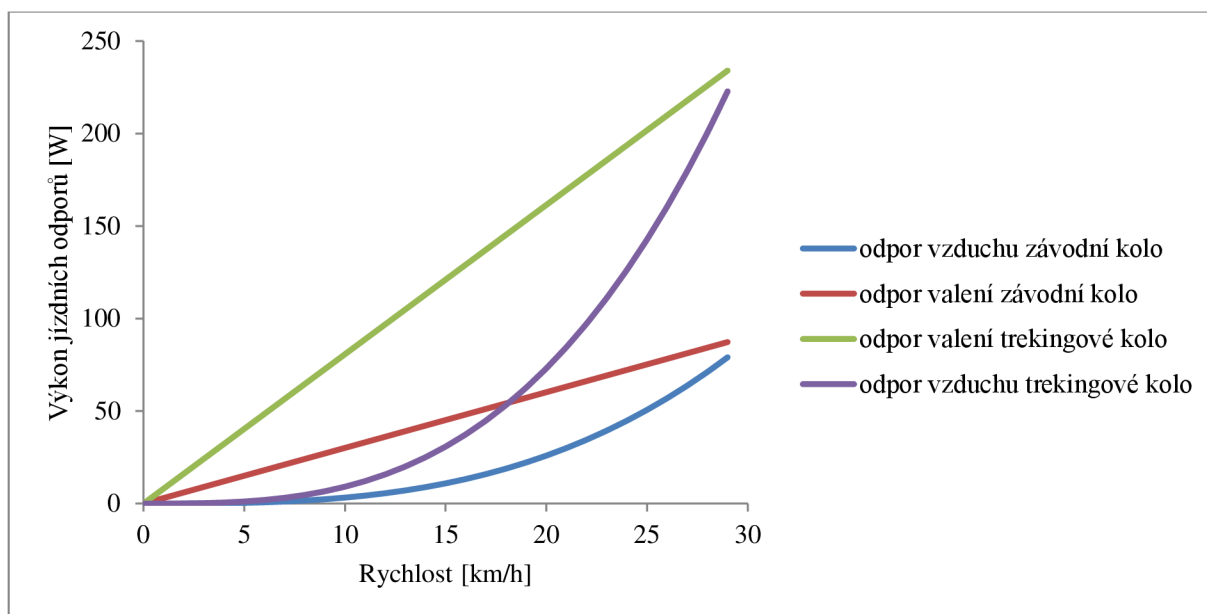
a) Běžná pneumatika $f_1 = 0,0075$ [-]

$$\text{Dle (2.1): } O_{f_1} = G \cdot f_1 = 80 + 29,66 \cdot 9,81 \cdot 0,0075 = 8,07[N]$$

b) Michelin Ecorun $f_2 = 0,0028$ [-]

$$\text{Dle (2.1): } O_{f_2} = G \cdot f_2 = 80 + 29,66 \cdot 9,81 \cdot 0,0028 = 3,01[N]$$

Z výpočtu je patrné, že vhodnou volbou pneumatik lze snížit valivý odpor o více než polovinu.



Graf 1 Srovnání ztrátového výkonu



2.2 ODPOR VZDUŠNÝ

Lze jej charakterizovat jako odpor prostředí proti pohybu tělesa v něm. Odpor způsobuje tření, které vzniká mezi prostředím a tělesem. Síly, které v důsledku tření působí proti pohybu tělesa, se označují jako odporové síly. Působí vždy proti směru relativního pohybu. V praxi hodnotu vzdušného odporu ovlivňuje zejména vítr, který může působit na cyklistu z kterékoliv strany a tím ovlivnit hodnotu vzdušného odporu. Pro teoretický výpočet vliv větru nebudu uvažovat. Vzdušný odpor je závislý na koeficientu odporu c_x , který zohledňuje tvar a kvalitu povrchu tělesa. Vzdušný odpor lze určit ze vztahu [4]:

$$O_v = \frac{1}{2} \cdot \rho_v \cdot S_x \cdot c_x \cdot v^2 \quad (2.2)$$

Kde ρ je hustota prostředí, S_x je čelní plocha, c_x koeficient odporu, v rychlost, ρ měrná hmotnost vzduchu závisící na teplotě a tlaku. Pro praktické výpočty uvažujeme $\rho_v = 1,25 \text{ kg/m}^3$, což platí pro tlak vzduchu 1,013 bar a teplotu 15°C .

Pro výpočet výkonu P_v nutného k překonání vzdušného odporu O_v počítáme dle vztahu [4]:

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho_v \cdot S_x \cdot c_x \cdot v^3 \quad (2.3)$$

Vzhledem k tomu, že vzdušný odpor je závislý v druhé mocnině na rychlosti a výkon potřebný k jeho překonání dokonce v mocnině třetí, je jasné, že tento odpor tvoří významnou ztrátovou složku. Snižování vzdušného odporu je možné především vhodnou volbou cyklistova vybavení (geometrie rámu, aerodynamický oděv a přilba, plná kola, poloha za říditky...)

Pro zjištění skutečné hodnoty odporu je potřeba znát tzv. efektivní hodnotu čelní plochy $C_d A$, která je součinem koeficientu odporu c_x a čelní plochy S_x . Pak lze psát [4]:

$$C_d A = c_x S_x \quad (2.4)$$

Pro zjištění parametrů k výpočtu efektivní čelní plochy se používají dvě metody:

- **Projekční metoda na rovnou plochu** - jedná se o levný způsob, kdy je snímána plocha čelního profilu cyklisty sedícím na kole na rovinu kolmou na směr jízdy. Je to levná metoda k jistění čelní plochy S_x
- **Měření v aerodynamickém tunelu** – slouží ke zjištění přesného koeficientu odporu vzduchu c_x pro konkrétní vozidlo, model, nebo libovolný předmět. Jedná se však o poměrně drahou metodu. Náklady na jednu hodinu měření se pohybují v rozmezí 400 – 1000 USD



Tabulka 10 Přehled vybraných HPV a jejich hodnoty S_x a c_x

Typ jízdního kola	$S_x [m^2]$	$c_x [-]$	$(S_x \cdot c_x)$
Trekingové/cestovní kolo	0,62	1,1	0,680
Horské kolo	0,58	0,95	0,550
Silniční kolo - horní úchop	0,57	0,9	0,510
Silniční kolo - dolní úchop	0,45	0,85	0,380
Závodní kolo s plnými disky	0,44	0,55	0,240
Lehokolo LWB	0,35	0,77	0,270
Barracuda - kapotovaný speciál	0,39	0,14	0,055
Varna Diablo - kapotovaný speciál	0,29	0,07	0,020

Z tabulky vyplývá, že čím je posed cyklisty a tím daná jeho čelní plocha S_x , tím se snižuje koeficient odporu c_x a společně s nimi i efektivní hodnota čelní plochy.

2.2.1 VÝPOČET ZTRÁTOVÉHO VÝKONU ODPOREM VZDUCHU

Pro srovnání ztrátového výkonu aerodynamickým odporem u běžného a závodního kola při rychlosti 20 km/h lze počítat:

- Trekingové kolo:

Dle (2.2) určíme odpor vzduchu:

$$O_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S_x \cdot c_x \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 0,62 \cdot 1,1 \cdot \frac{20}{3,6}^2 = 13,16 [N]$$

Dle (2.3) určíme ztrátový výkon:

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S_x \cdot c_x \cdot v^3 = \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 0,62 \cdot 1,1 \cdot \frac{20}{3,6}^3 = 73,09 [W]$$

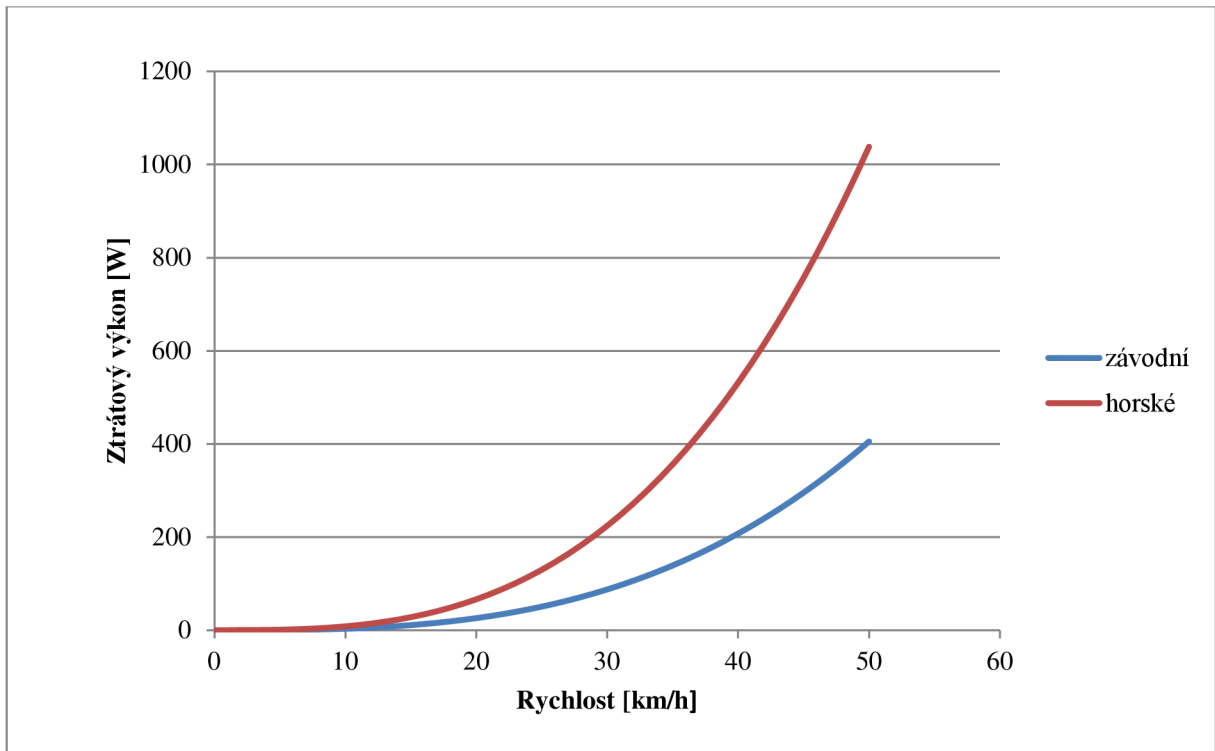
- Závodní kolo:

Dle (2.2) určíme odpor vzduchu:

$$O_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S_x \cdot c_x \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 0,44 \cdot 0,55 \cdot \frac{20}{3,6}^2 = 4,67 [N]$$

Dle (2.3) určíme ztrátový výkon:

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S_x \cdot c_x \cdot v^3 = \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 0,44 \cdot 0,55 \cdot \frac{20}{3,6}^3 = 25,93 [W]$$



Graf 2 Srovnání ztrátového výkonu odporu vzduch při jízdě po rovině

Jak je patrné z uvedených příkladů a praktického měření, aerodynamika hraje nejvýznamnější roli ve ztrátách působících na bicykl. Pro snížení vlivu těchto ztrát lze na bicykl připevnit různé aerodynamické prvky, případně jej celý kapotovat. Takto upravené bicykly jsou ovšem z praktického hlediska těžko využitelné vzhledem k jejich prostorové objemnosti, obtížnému nastupování a zhoršené manipulaci, navíc při jízdě do kopce tato kapota nepřináší téměř žádnou výhodu, zatímco svou přebytečnou hmotností zatěžuje jezdce.

2.2.2 ODPOR STOUPÁNÍ

Odpor stoupání vzniká při jízdě vozidla po podélném svahu a je určen sinovou složkou tíhy vozidla s jezdcem rovnoběžnou s povrchem vozovky. Velikost odporu stoupání je dána vztahem [4]:

$$O_s = \pm G \cdot \sin \alpha \quad (2.5)$$

Kde G je celková tíha vozidla s jezdcem a α je úhel svírající vodorovnou rovinu s rovinou vozovky. Znaménko plus pak platí pro jízdu do kopce (je odporem proti pohybu vozidla) a znaménko mínus platí pro jízdu z kopce (pomáhá pohybu vozidla).

Odpor stoupání působí v těžišti, při výpočtech pro malé úhly pak platí $\sin \alpha \approx \tan \alpha$ lze použít vztah:

$$O_s = \pm G \cdot s \quad (2.6)$$

V praktických výpočtech se místo úhlu používá stoupání s , pro které platí:



$$s = \frac{h}{l} = \tan \alpha \quad (2.7)$$

Kde l je průmět dráhy do vodorovného směru a h je průmět dráhy do svislého směru, tzv. převýšení.

Vztah (2.7) lze použít pro stoupání do $\alpha = 17^\circ$, což odpovídá stoupání $s = 0,3 \Rightarrow 30\%$. Na silnicích jsou obvykle maximální hodnoty stoupání 10 – 12%, na dálnicích nepřesahují 6% (výjimku mohou tvořit vysokohorské silnice). Odpor stoupání bývá (v určitých případech) největší z jízdních odporů. V případě extrémních sklonů silnice $\alpha \geq 17^\circ$ je potřeba vycházet ze vztahu (2.5).

2.2.2.1 PŘÍKLAD ODPORU STOUPÁNÍ

Jezdec o hmotnosti $m = 80\text{kg}$ jede na bicyklu o hmotnosti $b = 29,66\text{ kg}$ do kopce se stoupáním 3%. Dle (2.6) pak lze počítat:

$$O_s = G \cdot s = m + b \cdot g \cdot s = 80 + 29,66 \cdot 9,81 \cdot 0,03 = 32,27 \text{ [N]}$$

2.2.3 ODPOR ZRYCHLENÍ

Odpor zrychlení působí na vozidlo při změně jeho rychlosti jízdy. Při zrychlování vozidla působí proti směru jízdy, naopak při zpomalování po směru jízdy vozidla. Velikost setrvačného odporu je dána vztahem [4]:

$$O_z = O_{zp} + O_{zr} \quad (2.8)$$

Skládá se ze dvou složek:

- Odpor posuvné části o hmotnost, kde m je hmotnost vozidla s jezdcem a a je jeho zrychlení (zpomalení).

$$O_{zp} = m \cdot a \quad (2.9)$$

- Odpor zrychlení rotačních částí, kde M_r je setrvačný moment rotačních částí vozidla a r_d je dynamický poloměr kola.

$$O_{zr} = \frac{M_r}{r_d} \quad (2.10)$$

Setrvačný moment rotačních částí se skládá z M_{rm} - momentu na hnacích kolech vozidla (potřebný na zrychlení rotujících částí pohonného ústrojí), M_{rp} - momentu, který je nutný pro zrychlení rotujících částí převodového ústrojí a M_{rK} - momentu, který je potřebný ke zrychlení kol vozidla. Pak lze psát:

$$M_r = M_{rm} + M_{rp} + M_{rK} \quad (2.11)$$

Výsledný odpor pak lze psát:



$$O_z = 1 + \frac{J_m \cdot i_c^2 + J_p \cdot i_r^2 \cdot \eta + J_{Kl}}{m r_d^2} m a = \vartheta \cdot m \cdot a \quad (2.12)$$

- Kde:
- J_m hmotnostní moment setrvačnosti rotujících částí pohonného ústrojí
 - i_c celkový převod mezi motorem a hnacími koly
 - J_p hmotnostní moment setrvačnosti rotujících částí převodového ústrojí
 - i_r převod rozvodovky
 - η mechanická účinnost
 - J_{Kl} hmotnostní moment setrvačnosti rotujících kol vozidla
 - ϑ součinitel vlivu rotačních částí

Vzhledem k malým hmotnostem a rychlostem otáčení u bicyklu volím hodnotu součinitele $\vartheta = 1,005$.

2.2.3.1 PŘÍKLAD ODPORU ZRYCHLENÍ

Dle (2.12) lze při zrychlení $a = 0,3 \text{ m/s}^2$, hmotnosti jezdce $m = 80 \text{ kg}$ jedoucím na kole o hmotnosti $k = 29,66 \text{ kg}$ a součiniteli vlivu rotačních částí $\vartheta = 1,005$ počítat:

$$O_z = \vartheta \cdot m \cdot a = 1,005 \cdot 80 + 29,66 \cdot 0,3 = 32,89 \text{ [N]}$$

Vzhledem k tomu, že ve výpočtech počítám vždy s předem zvolenou konstantní rychlostí, tyto ztráty se ve výpočtu neprojeví.

2.2.4 MECHANICKÉ ZTRÁTY

Mechanické ztráty působí v ložiscích kol vlivem jejich zatížení hmotností cyklisty a styku řetězu s ozubeným kolem.

Odporový moment ložiska lze psát:

$$M = \frac{i \cdot G \cdot d_1}{2} \quad (2.13)$$

Odpor na obvodu kola:

$$W_{ol} = \frac{2 \cdot M}{d} \quad (2.14)$$

Kde:

- G zatížení ložiska [N]
- d_1 průměr ložiska [mm]
- d průměr kola [mm]
- i součinitel odporu valení ložiska ($0,02 \div 0,002$)



2.2.4.1 PŘÍKLAD MECHANICKÝCH ZTRÁT

Pro jednoduchý výpočet si zvolím 60% zatížení zadního kola cyklistou o hmotnosti 80kg, což je $G = 48 \cdot 9,81 = 471\text{N}$, průměr ložiska $d_1=0,03\text{m}$, průměr kola $D=0,6\text{m}$ a střední hodnotu $i_1=0,01$:

Dle (2.13):

$$M = \frac{0,01 \cdot 471 \cdot 0,03}{2} = 0,07[\text{Nm}] \quad (2.15)$$

Po dosazení do (2.14):

$$W_{ol} = \frac{2 \cdot 0,07}{0,6} = 0,23[\text{N}] \quad (2.16)$$

Z rovnice (2.16) vyplývá, že mechanický odpor pro uvažované podmínky je řádově nižší, než odpor vzduchu, nebo valivý odpor, proto jej ve výpočtu nebudu uvažovat.

2.2.5 HNACÍ SÍLA POTŘEBNÁ K PŘEKONÁNÍ JÍZDNÍCH ODPORŮ

K překonání všech jízdních odporů je potřeba síla F_h , která je součtem všech jízdních odporů, proto [4]:

$$F_h = O_f + O_v + O_s + O_z = 8,07 + 13,16 + 0 + 0 = 21,23 [\text{N}] \quad (2.15)$$

Ztrátový výkon P_c pro jízdu po rovině konstantní rychlostí 20km/h lze počítat jako součet jízdních odporů F_h z výše uvedených příkladů vynásobených rychlostí v [6]:

$$P_c = F_h \cdot v = 21,23 \cdot \frac{20}{3,6} = 117,94 [\text{W}] \quad (2.16)$$

Z rovnice (2.16) plyne, že pro překonání jízdních odporů při jízdě po rovině konstantní rychlostí 20km/h je potřeba vynaložit 117,94W.



3 TEORETICKÝ VÝPOČET REŽIMŮ JÍZDY

K určení celkového dojezdu a doby, po kterou je schopen akumulátor dodávat energii k pohonu bicyklu systému jej rozdělím na tři samostatné okruhy. Těmito okruhy je myšlen okruh, kdy je bicykl poháněn pouze elektromotorem čerpajícím energii z akumulátoru bez asistence cyklisty, okruh, kdy v rámci kondičního cvičení cyklista nabíjí zvoleným zatížením vybitý akumulátor na jeho plnou kapacitu a režim jízdy, kdy cyklista na bicyklu jede a zároveň zvoleným zatížením dobíjí akumulátor. Srovnáním doby dojezdu asistovaného a neasistovaného režimu zjistím, o kolik se prodlouží dojezd. Zvláštní režim, myšlený jako nouzový, přichází v úvahu po tom, co cyklista spotřebuje všechnu energii uloženou v akumulátoru v průběhu cesty a potřebuje se dostat zpět do výchozího bodu. V tomto režimu budu porovnávat výkon dodaný cyklistou a rychlost, jakou pojede, v závislosti na zvoleném převodovém poměru. Tento režim je zpracován v samostatné kapitole 4. Pro tyto výpočty uvažuji jízdu po rovině konstantní rychlostí. Jízdní odpory vstupující do výpočtu uvažuji dle kapitoly 2 jako idealizované, kdy vnější vlivy, které mohou nastat v praxi, jako je velikost a směr větru působícího na cyklistu, nerovnosti a kvalita povrchu, po kterém se pohybuje, neuvažuji.

3.1 REŽIM Pohonu BICYKLU POUZE ELEKTROMOTOREM

Výpočet tohoto režimu slouží k určení maximálního dojezdu bicyklu bez asistence cyklisty poháněného pouze energií z akumulátoru až do jeho úplného vybití. Výsledek pak bude sloužit jako porovnávací hodnota pro případ, kdy cyklista bude aktivně vstupovat do okruhu a svým výkonem akumulátor dobíjet.

3.1.1 POČÁTEČNÍ PODMÍNKY

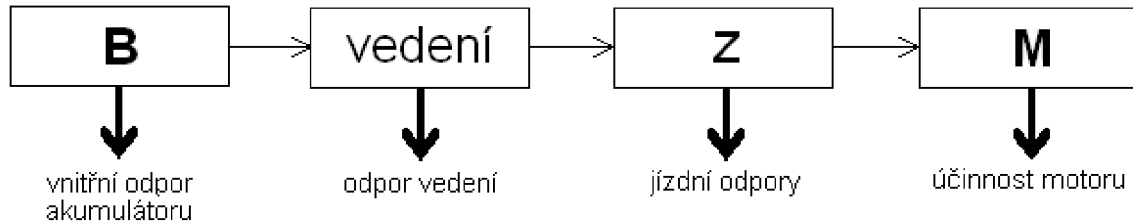
Pro výpočet stanovuji počáteční podmínky dle volených parametrů v kapitole 1 a jízdní odpory dle kapitoly 2. Jedná se o jízdu po rovině konstantní rychlostí, proto ve výpočtu neuvažuju odpor zrychlení a odpor stoupání. Mechanické ztráty jsou v poměru k ostatním taktéž zanedbatelné:

- Energie akumulátoru: $E_b = 429 \text{ Wh}$
- Vnitřní odpor akumulátoru: $R_b = 5,45 \text{ m}\Omega$
- Proud protékající obvodem při rychlosti 20km/h: $I=12,3 \text{ A}$
- Odpor vedení řídicí jednotky: $R_f = 0,059 \Omega$
- Odpor vedení proudu od akumulátoru k motoru: $R_{vb} = 0,01 \Omega$
- Účinnost elektromotoru: $\eta_m=78,4 \%$
- Odpor valení: $O_{f1} = 8,07 \text{ N}$
- Odpor vzdušný při rychlosti 20km/h: $O_v = 13,16 \text{ N}$
- Konstantní rychlost: $v = 20 \text{ km/h}$



3.1.2 VÝPOČET DOJEZDU NA BATERII

Pro výpočet dojezdu na akumulátor je potřeba uvažovat všechny jízdní odpory, které na cyklistu působí, odpory v elektrické části kola a účinnost elektromotoru.



Obrázek 3 Schéma toku energie

Dle rovnice (2.1) lze počítat ztrátový výkon P_f odporu valení:

$$P_f = O_{f1} \cdot v = 8,07 \cdot \frac{20}{3,6} = 44,83 \text{ [W]} \quad (3.1)$$

Dle rovnice (2.3) lze počítat ztrátový výkon P_v vzdušného odporu:

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S_x \cdot c_x \cdot v^3 = \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 0,62 \cdot 1,1 \cdot \left(\frac{20}{3,6}\right)^3 = 73,09 \text{ W} \quad (3.2)$$

Celkový ztrátový výkon P_c potřebný pro překonání jízdních odporů:

$$P_c = P_f + P_v = 44,83 + 73,09 = 117,92 \text{ [W]} \quad (3.3)$$

Příkon motoru P_m pro překonání jízdních odporů:

$$P_m = P_c \cdot \eta_m = 117,92 \cdot 1,216 = 143,39 \text{ [W]} \quad (3.4)$$

Ztrátový výkon vnitřního odporu akumulátoru P_b :

$$P_b = I^2 \cdot R_b = 12,3^2 \cdot 5,45 \cdot 10^{-3} = 0,82 \text{ [W]} \quad (3.5)$$

Ztrátový výkon P_{vb} vedení k akumulátoru:

$$P_{vb} = I^2 \cdot R_{vb} = 12,3^2 \cdot 0,01 = 1,51 \text{ [W]} \quad (3.6)$$

Ztrátový výkon $P_{\check{r}}$ vedení řídicí jednotky:

$$P_{\check{r}} = I^2 \cdot R_{\check{r}} = 12,3^2 \cdot 0,059 = 8,93 \text{ [W]} \quad (3.7)$$

Celkový výkon P_{cb} odebíraný z akumulátoru potřebný pro jízdu po rovině konstantní rychlostí:

$$P_{cb} = P_m + P_b + P_{vb} + P_{\check{r}} = -143,39 - 0,82 - 1,51 - 8,93 = -154,65 \text{ [W]} \quad (3.8)$$

Při odebíraném výkonu dle rovnice (3.8) dojde k úplnému vybití akumulátoru za čas t_v :



$$t_v = \frac{E_b}{P_{cb}} = \frac{423}{154,65} = 2,735 \text{ h} = 164,11 \text{ [min]} \quad (3.9)$$

Dráha s_b ujetá na akumulátor konstantní rychlostí po rovině:

$$s_b = v \cdot t_v = \frac{20}{3,6} \cdot 2,735 \cdot 3600 = 54700 \text{ m} = 54,7 \text{ [km]} \quad (3.10)$$

Ve výpočtu není zohledněna doba rozjezdu t_r , kterou cyklista potřebuje z klidového stavu pro dosažení požadované rychlosti. Pokud by se rozjížděl z klidu konstantním zrychlením $a = 0,3 \text{ m/s}^2$, pak by tato doba byla dle vzorce:

$$t_r = \frac{v}{a} = \frac{\frac{20}{3,6}}{0,3} = 18,51 \text{ [s]} \quad (3.11)$$

V kontrastu s celkovou dobou jízdy t_v proto dobu nutnou pro akceleraci zanedbávám a s ní spojený odpor zrychlení.

Celkově tedy z výpočtu vychází, že pokud cyklista vyjede z výchozího bodu s plně nabitým akumulátorem, pak mu tato energie při zvolených podmínkách vystačí na ujetí 54,7km za dobu 164,11min.

3.2 REŽIM KONDIČNÍHO CVIČENÍ

V tomto režimu uvažuji, že je akumulátor zcela vybit a cyklista jej bude nabíjet vlastními silami předem zvoleným zatížením. Zajímavé bude sledovat, za jak dlouho jej bude cyklista schopen nabít, protože tento režim lze využít i jako kondiční treňažér, kdy cyklista v teple doma umístí bicykl do speciálního stojanu a aby nemusel čerpat energii pro nabití akumulátoru ze sítě, tak jej nabije vlastními silami s předem zvoleným zatížením.

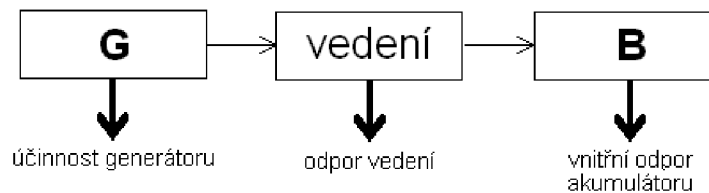
3.2.1 POČÁTEČNÍ PODMÍNKY

V tomto režimu jde o stacionární šlapání, na které nemá vliv okolní prostředí ani jízdní odpory. Proto energie, kterou cyklista generuje, je pouze zatížena ztrátami ve vedení, vnitřním odporem akumulátoru a účinností generátoru:

- Maximální energie akumulátoru $E_b = 429 \text{ Wh}$
- Výkon dodávaný cyklistou: $P_{cy} = 100 \text{ W}$
- Účinnost generátoru: $\eta_g = 80 \%$
- Odpor vedení řídicí jednotky: $R_f = 0,059 \Omega$
- Odpor vedení proudu od akumulátoru k motoru: $R_{vb} = 0,01 \Omega$
- Vnitřní odpor akumulátoru: $R_b = 5,45 \text{ m}\Omega$



3.2.2 VÝPOČET DOBY ÚPLNÉHO NABÍTÍ BATERIE



Obr. 4 Schéma toku energie s uvažovanými ztrátami

Při zvoleném kondičním zatížení cyklisty dodává generátor výkon P_g :

$$P_g = P_{cy} \cdot \eta_g = 100 \cdot 0,8 = 80 \text{ [W]} \quad (3.12)$$

Z kapitoly 3 budu uvažovat hodnoty ztrátového výkonu pro vedení a vnitřní odpor baterie, protože jsou pro tento případ totožné. Z rovnice (3.5) ztrátový výkon vnitřního odporu baterie $P_b = 0,82\text{W}$, z rovnice (3.6) ztrátový výkon vedení k akumulátoru $P_{vb} = 1,51\text{W}$ a z rovnice (3.7) ztrátový výkon vedení řídicí jednotky $P_f = 8,93\text{W}$.

Rovnici pro celkový dodaný výkon akumulátoru P_k lze psát jako výkon dodávaný generátorem snížený o výkon, který odebírá vedení a vnitřní odpor akumulátoru:

$$P_k = P_g - P_b - P_{vb} - P_f = 80 - 0,82 - 1,51 - 8,93 = 68,74 \text{ [W]} \quad (3.13)$$

Čas potřebný k dobití akumulátoru t_k :

$$t_k = \frac{E_b}{P_k} = \frac{423}{68,74} = 6,153 \text{ h} = 369,21 \text{ [min]} \quad (3.14)$$

Z rovnice (3.14) plyne, že cyklista je schopen vlastními silami při dodávaném výkonu 100W akumulátor dobít za 6,153 hodiny. Tuto dobu nemusí trávit nutně při jízdě, ale v pohodlí doma může takto kondičně trénovat. Při zvoleném zatížení 100W například ve třech dvouhodinových fázích akumulátor zcela dobije.

3.3 REŽIM KONDIČNÍ JÍZDY

V režimu kondiční jízdy uvažuji situaci, kdy cyklista reálně jede na bicyklu předem zvolenou rychlostí 20km/h, bicykl je poháněn elektromotorem z akumulátoru a cyklista předem zvoleným zatížením 100W přes generátor elektrické energie akumulátor dobíjí. Zajímavé bude sledovat srovnání dojezdu v tomto režimu s dojezdem v bodě 3.1.

3.3.1 POČÁTEČNÍ PODMÍNKY

Ve výpočtu uvažuji všechny jízdní odpory působící na cyklistu během jízdy vyjma vnějších vlivů, jako je vítr, kvalita a nerovnosti vozovky. Ztráty při přenosu elektrické energie jsou taktéž uvažovány.

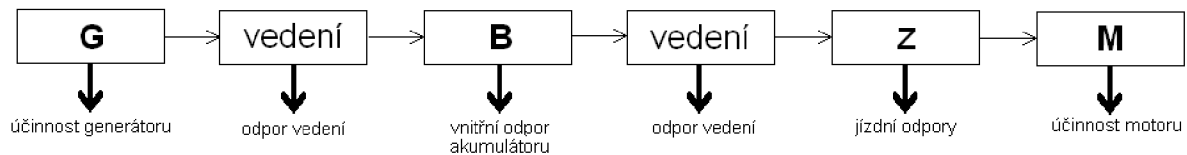


- Maximální energie akumulátoru $E_b = 429 \text{ Wh}$
- Výkon dodávaný cyklistou: $P_{cy} = 100 \text{ W}$
- Účinnost generátoru: $\eta_g = 80 \%$
- Odpor vedení řídicí jednotky: $R_{\check{r}} = 0,059 \Omega$
- Odpor vedení proudu od akumulátoru k motoru: $R_{vb} = 0,01 \Omega$
- Odpor vedení proudu od motoru k akumulátoru: $R_{vb} = 0,01 \Omega$
- Vnitřní odpor akumulátoru: $R_b = 5,45 \text{ m}\Omega$
- Proud protékající obvodem při rychlosti 20km/h: $I=12,3 \text{ A}$
- Účinnost elektromotoru: $\eta_m=78,4 \%$
- Odpor valení: $O_{fl} = 8,07 \text{ N}$
- Odpor vzdušný při rychlosti 20km/h: $O_v = 13,16 \text{ N}$
- Konstantní rychlost: $v = 20 \text{ km/h}$

Pro výpočet dále použiji výsledky z rovnice (3.8) celkový výkon odebíraný z akumulátoru $P_{cb} = -154,65\text{W}$ a z rovnice (3.13) celkový výkon dodaný akumulátoru cyklistou $P_k = 68,74\text{W}$.

3.3.2 VÝPOČET DOJEZDU NA BATERII

Rovnice výpočtu dojezdu na baterii v podstatě slučuje dva předchozí případy do jednoho, kdy je potřeba uvažovat dvojnásobný odpor vedení elektrické energie a stejně tak uvažovat dvojnásobný vnitřní odpor baterie, protože energie jde jak směrem od akumulátoru k elektromotoru, tak směrem od generátoru k baterii.



Obrázek 5 Schéma toku energie

Ze zadaného pak můžu sestavit rovnici pro celkový výkon P_a , který bude odebírán z baterie:

$$P_a = P_g - P_{vb} - P_{\check{r}} - P_b - P_b - P_{vb} - P_{\check{r}} - P_m \quad (3.15)$$

Po dosazení:

$$P_a = 80 - 1,51 - 8,93 - 0,82 - 0,82 - 1,51 - 8,93 - 143,39 = -85,91[\text{W}] \quad (3.16)$$

Čas dojezdu t_a na akumulátor při kondiční jízdě:

$$t_a = \frac{E_b}{P_a} = \frac{423}{85,91} = 4,923 \text{ h} = 295,42[\text{min}] \quad (3.17)$$

Dráha s_a ujetá konstantní rychlostí na akumulátor při asistenci cyklisty:

$$s_a = v \cdot t_a = 20 \cdot 4,923 = 98,46 [\text{km}] \quad (3.18)$$



3.4 ZHODNOCENÍ

Porovnáním výpočtů dojezdu pouze na akumulátor a dojezdu s asistencí zjistím efektivitu η_{ef} cyklistova přínosu pro dojezd:

$$\eta_{ef} = \frac{s_a}{s_b} = \frac{98,46}{54,7} = \frac{54,7}{98,46} = 0,55 = 55\% \quad (3.19)$$

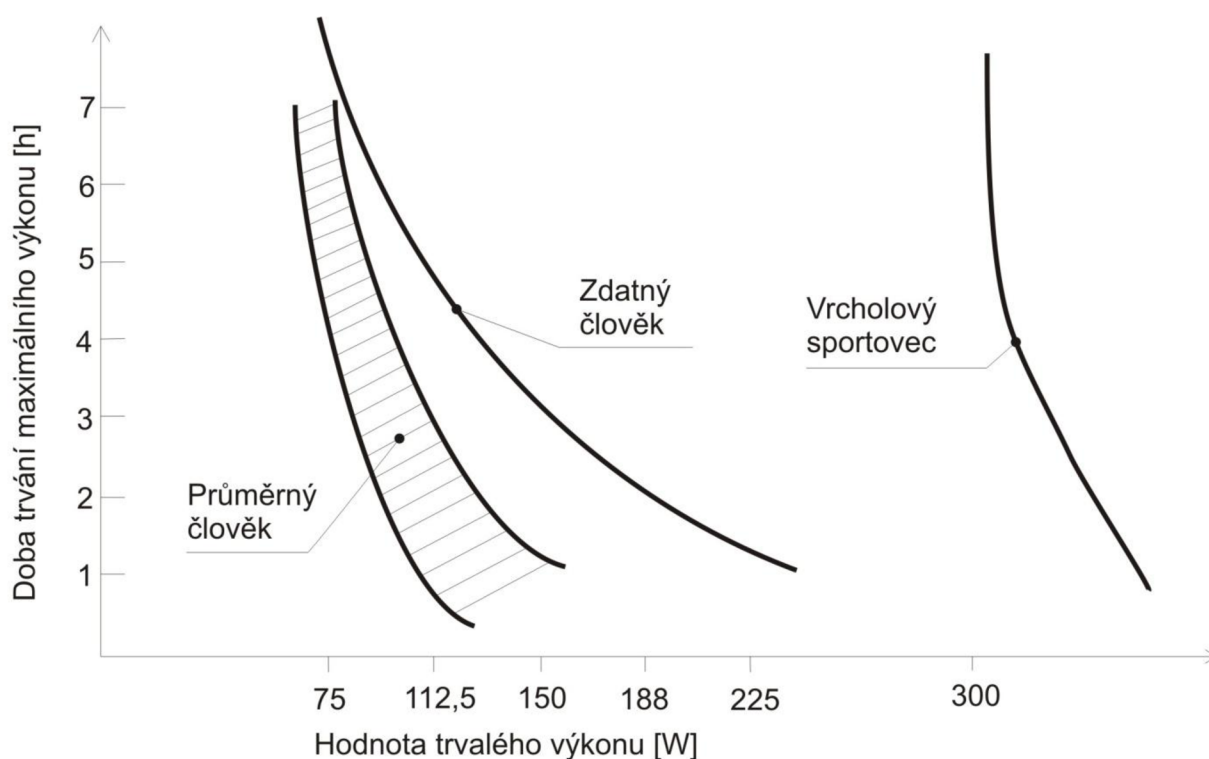
Z rovnice (3.19) vychází, že cyklista je schopen svým přínosem prodloužit dojezd bicyklu o 55%. Je třeba si však uvědomit, že výpočet byl proveden pro určité konstantní podmínky, jako je jízda po rovině bez uvažování jízdních odporů stoupání, odporu mechanických částí a především pak okolních vlivů, jako je proměnný vítr a kvalita a profil terénu, po kterém se cyklista pohybuje. V reálném prostředí by byl výsledek jistě méně optimistický, ovšem vnější vlivy jsou obtížně měřitelné, proto je neuvažují ve výpočtu a pro srovnání slouží pouze hodnoty teoretické.



4 POHON LIDSKOU SILOU

Lidský organismus je od přírody postaven tak, aby odolával fyzické námaze. V dřívějších dobách, kdy se lidé živili ve větší míře fyzickou prací, postačoval tento životní styl k dobré duševní a tělesné kondici. Dnes však většinu těžké práce obstarávají stroje a člověk pouze plní roli obsluhy či uživatele. Moderní pohodlný život využívající k dopravě motorizovaných vozidel, nezdravé stravování a celkový omezený pohyb však vede k civilizačním chorobám, jako je obezita, nemoci kardiovaskulárního systému a podobně. Pro zdravý životní styl je proto potřeba dřívější přirozenou námahu nahrazovat kondičním cvičením.

Výkon lidského organismu lze získat zátěžovým měřením v laboratoři pomocí speciálního rotopedu a měřících snímačů na lidském těle. Lze tak získat graf pro různě zdatné sportovce.



Graf 3 Výkon lidského těla

4.1 PŘÍMÝ POHON JAKO NOUZOVÝ REŽIM

K přenosu výkonu lidského těla na vozovku slouží pedály na klíce talířového kola, které je spojeny řetězem s převodovkou. Změnou převodového poměru lze efektivněji využít síly lidského organismu v rozmezí přijatelných otáček. U pohonu rekuperačního bicyklu uvažují pohon výhradně elektromotorem a přímý pohon přes pedály, řetěz a převodovku jen jako nouzové řešení pro dojezd do výchozího bodu v případě, že cyklista během jízdy vyčerpá energii z akumulátoru a v daném terénu nebude schopen jej vlastními silami pomocí generátoru dobít.



4.1.1 VOLBA PŘEVODOVÉHO ÚSTROJÍ

Existuje celá řada převodových ústrojí pro bicykly, lišící se počtem převodových stupňů a počtem zubů na jednotlivých kolech. Pro volbu tohoto ústrojí vybírám z nejběžnějších provedení:

Tabulka 11 Přehled běžných převodových ústrojí

Typ	Planetové	Talířové	Stálý převod
Převodový poměr	0,75-3,7	0,85 – 3,5	1,5
Počet převodů	29	Až 30	1
Umístění	V náboji kola	Na osách šlapání a zadního kola	Na osách šlapání a zadního kola
Výhody	Kompaktní rozměr, rozsah převodů	Dostupnost, snadná údržba	Snadná údržba
Nevýhody	Údržba, složitá konstrukce, nelze použít v kombinaci s elektromotorem v náboji	Opotřebením řetězu, obtížná změna převodového poměru při plném zatížení	Pouze jeden převodový poměr

Vzhledem ke složitosti planetové převodovky a její vyšší pořizovací ceně volím dle tabulky 11 pohon talířovým převodovým ústrojím s 21 převody, který pro nouzový režim dojezdu bicyklu svým rozsahem převodů plně dostačuje. Stálý převod hodnotím jako nevyhovující.

Tabulka 12 Přehled převodových poměrů [17]

Počet zubů pastorku	Počet zubů kola		
	45	32	22
13	3,23	2,46	1,69
15	2,80	2,13	1,47
17	2,47	1,88	1,29
19	2,21	1,68	1,16
21	2,00	1,52	1,05
23	1,83	1,39	0,96
26	1,62	1,23	0,85



Pro běžnou jízdu se nevyužívá všech kombinací ozubených kol, protože se převodové poměry často překrývají. Proto pro orientační výpočet volím pouze ty nejběžněji používané, které plně pokryjí jízdu jak z kopce, tak do kopce. Tyto převody jsou vyznačeny v tabulce 12 žlutou barvou.

4.2 RYCHLOST JÍZDY NA ZVOLENÝ PŘEVODOVÝ POMĚR

K určení rychlosti jízdy na zvolený převodový poměr budu uvažovat odstupňovaný výkon dodaný cyklistou a sledovat, jak se bude měnit dosažená rychlost. Tyto hodnoty pak vynesu do grafu závislosti zvoleného převodového poměru na rychlosti.

4.2.1 POČÁTEČNÍ PODMÍNKY

Převodový poměr volím vyznačené hodnoty z tabulky 12. V tomto výpočtu nejsou zohledněny ztráty, proto je výsledkem rychlost za ideálních podmínek bez ztrát. Sílu na pedál, kterou cyklista působí, beru jako polovinu jeho hmotnosti 80kg.

- Dodaný výkon cyklistou: $P_{cy} = \{100W, 150W, 200W, 250W\}$
- Převodový poměr: $i = \{3,23; 2,80; 2,47; 2,21; 1,88; 1,68; 1,52; 1,05\}$
- Rameno šlapací kliky: $r_s = 0,017m$
- Síla na pedál: $F_{pe} = 400N$
- Poloměr kola: $r_k = 0,3m$

4.2.2 VÝPOČET RYCHLOSTI JÍZDY

Pro výpočet je třeba znát úhlové rychlosti, kde ω_1 je úhlová rychlost hnacího kola a ω_2 je úhlová rychlost kola hnaného. Převodový poměr i [6]:

$$\omega_1 = \omega_2 \cdot i \quad (4.1)$$

Rychlost v_o na obvodu kola [6]:

$$v_o = \omega \cdot r_k \quad (4.2)$$

Výkon dodávaný cyklistou P_{cy} [6]:

$$P_{cy} = F_{pe} \cdot r_s \cdot v_o \quad (4.3)$$

Dosazením pak vyjde rovnice pro výpočet rychlosti:

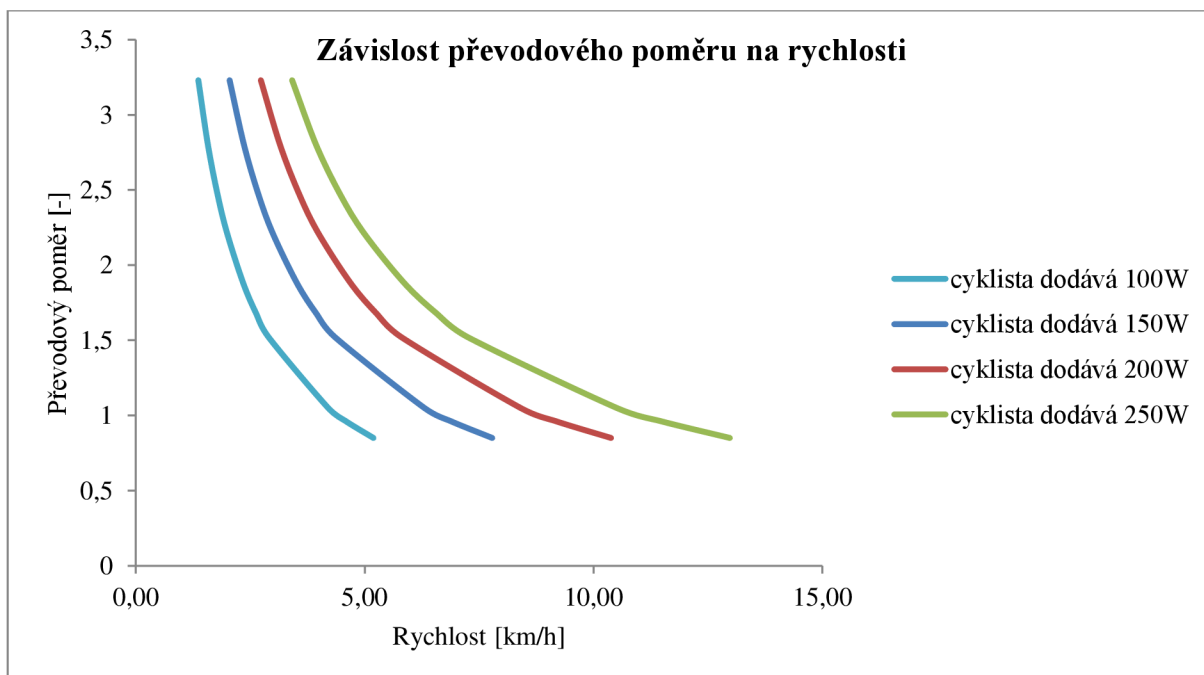
$$v_o = \frac{P_{cy} \cdot r_k}{i \cdot F_{pe} \cdot r_s} \quad (4.4)$$

Dosazením skutečných hodnot do rovnice (4.4) pak vznikne tabulka hodnot rychlosti pro jednotlivé zvolené převodové poměry a z toho plynoucí graf závislosti převodového poměru na rychlosti.



Tabulka 13 Závislost rychlosti na zatížení při zvoleném převodovém poměru [17]

Převodový poměr	Závislost rychlosti na zatížení			
	v_1 [m/s] při 100 W	v_2 [m/s] při 150 W	v_3 [m/s] při 200 W	v_4 [m/s] při 250W
i [-]				
3,23	1,37	2,05	2,73	3,41
2,8	1,58	2,36	3,15	3,94
2,47	1,79	2,68	3,57	4,47
2,21	2,00	2,99	3,99	4,99
1,88	2,35	3,52	4,69	5,87
1,68	2,63	3,94	5,25	6,57
1,52	2,90	4,35	5,80	7,26
1,05	4,20	6,30	8,40	10,50
0,96	4,60	6,89	9,19	11,49
0,85	5,19	7,79	10,38	12,98



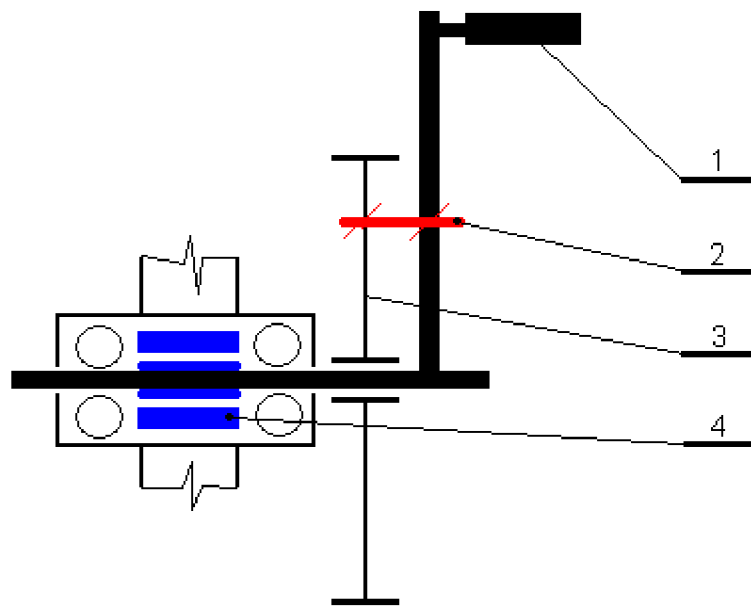
Graf 4 Závislost převodového poměru na rychlosti



4.3 PŘIPOJENÍ MECHANICKÉHO POHONU

Jak již bylo zmíněno, pro pohon navrhovaného kondičního bicyklu mechanický pohon neuvažují, ale bicykl jím musí být vybaven, aby se cyklista v případě úplného vybití akumulátoru, nebo při poruše, byl schopen dostat zpět do výchozího bodu. Aby však tento mechanický systém cyklistovi nekladl odpor při šlapání, je potřeba vyřešit jeho aktivní připojení pouze v okamžiku potřeby. V provozu kondičního kola by cyklista šlapal do šlapátek, v jejichž náboji je uvažovaný generátor a talířové ozubené kolo je na této hřídeli volně a protáčí se. V případě potřeby cyklista propojí talířové ozubené kolo s klikou šlapátek pomocí aretačního kolíku a tím vytvoří mechanickou vazbu mezi šlapátkou a hnaným kolem.

Schéma propojení: klika šlapátka (1), propojovací kolík (2), talířové ozubené kolo (3), generátor elektrické energie (4)



Obrázek 6 Mechanická vazba mezi šlapátkou a talířovým kolem



5 ENERGETICKÁ BILANCE

Doposud jsem zkoumal situace, kdy cyklista jede po rovině a akumulátoru dodává energii pouze vlastními silami. V této kapitole proto budu uvažovat situace, kdy cyklista jede po trati s různým sklonem, ať už do kopce, nebo z něj. Budu sledovat, jaký vliv bude mít profil trati a cyklistův přínos na celkový dojezd. V následujících případech budu uvažovat jízdu po dráze s odstupňovaným sklonem od 3% do 15% a situace, kdy jede bicykl pouze na akumulátor a kdy cyklista svým výkonem dobíjí akumulátor. Výpočet se zakládá na jízdě konstantní rychlostí 20km/h, proto uvažuji, že snímače otáček v kole spolu s řídicí jednotkou, budou sledovat konstantní otáčení kola a elektromotor, určený k pohonu při jízdě do kopce, bude přebytečnou energii, která by jinak způsobovala zrychlování bicyklu, ukládat do akumulátoru.

5.1 POČÁTEČNÍ PODMÍNKY

Jako počáteční podmínky uvažuji konstantní rychlost 20km/h, při jízdě do kopce na počátku plně nabitý akumulátor a při jízdě z kopce naopak akumulátor zcela vybitý. V prvním případě budu sledovat čas a ujetou dráhu, za kterou se akumulátor zcela vybije, v druhém případě čas, za který se akumulátor zcela nabije. Ve výpočtu neuvažuji vnější vlivy, jako je vítr, kvalita a nerovnosti vozovky.

- Maximální energie akumulátoru $E_b = 429 \text{ Wh}$
- Výkon dodávaný cyklistou: $P_{cy} = 100 \text{ W}$
- Účinnost generátoru: $\eta_g = 80 \%$
- Odpor vedení řídicí jednotky: $R_f = 0,059 \Omega$
- Odpor vedení proudu od akumulátoru k motoru: $R_{vb} = 0,01 \Omega$
- Odpor vedení proudu od motoru k akumulátoru: $R_{vb} = 0,01 \Omega$
- Vnitřní odpor akumulátoru: $R_b = 5,45 \text{ m}\Omega$
- Proud protékající obvodem při rychlosti 20km/h: $I = 12,3 \text{ A}$
- Účinnost elektromotoru: $\eta_m = 78,4 \%$
- Odpor valení: $O_{fl} = 8,07 \text{ N}$
- Odpor vzdušný při rychlosti 20km/h: $O_v = 13,16 \text{ N}$
- Konstantní rychlost: $v = 20 \text{ km/h}$
- Stoupání: $s = \{0,3; 0,5; 0,10; 0,15\}$
- Hmotnost bicyklu s cyklistou: $m_{celk} = 109,66 \text{ kg}$
- Tíhové zrychlení: $g = 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$

5.2 VZTAHY PRO VÝPOČET

Pro výpočet použiji rovnice, se kterými jsem počítal v kapitole 3. Ztrátový výkon odporu P_s stoupání je zohledněn v celkovém ztrátovém výkonu P_c pro překonání jízdních odporů. Znaménko celkového ztrátového výkonu P_s ovlivní, zda elektromotor bude bicykl pohánět a tím energii spotřebovávat, nebo se bude chovat jako generátor a tím energii akumulátoru dodávat:



Ztrátový výkon P_f odporu valení:

$$P_f = O_{f1} \cdot \cos \alpha \cdot v$$

Ztrátový výkon P_v vzdušného odporu

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S_x \cdot c_x \cdot v^3$$

Ztrátový výkon P_c potřebný pro překonání jízdnic odporů:

$$P_c = P_f + P_v + P_s$$

Příkon motoru P_m pro překonání jízdnic odporů:

$$P_m = P_c \cdot \eta_m$$

Ztrátový výkon vnitřního odporu akumulátoru P_b :

$$P_b = I^2 \cdot R_b$$

Ztrátový výkon P_{vb} vedení k akumulátoru:

$$P_{vb} = I^2 \cdot R_{vb}$$

Ztrátový výkon $P_{\check{r}}$ vedení řídicí jednotky:

$$P_{\check{r}} = I^2 \cdot R_{\check{r}}$$

Ztrátový výkon odporu stoupání:

$$P_s = \pm G \cdot s \cdot v$$

Celkový výkon P_{cb} odebíraný z akumulátoru potřebný pro jízdu do kopce konstantní rychlostí:

$$P_{cb} = P_m + P_b + P_{vb} + P_{\check{r}}$$

Výkon generátoru:

$$P_g = P_{cy} \cdot \eta_g$$

Celkový výkon dodaný akumulátoru P_k :

$$P_k = P_g - P_b - P_{vb} - P_{\check{r}}$$

Dráha s_b ujetá na akumulátor konstantní rychlostí:

$$s_b = v \cdot t_v$$

Čas úplného vybití akumulátoru:

$$t_v = \frac{E_b}{P_{cb}}$$



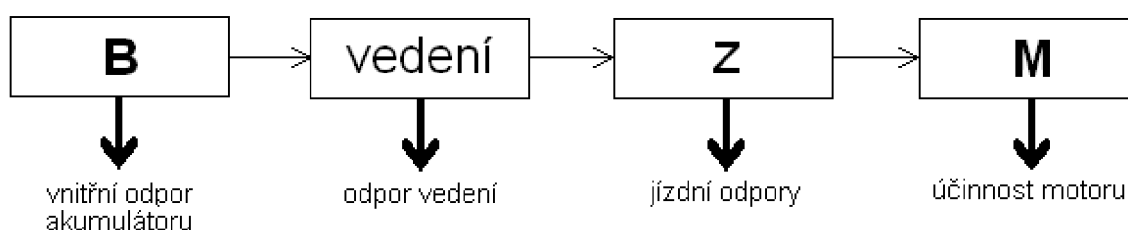
Čas potřebný k dobití akumulátoru t_k :

$$t_k = \frac{E_b}{P_k}$$

5.3 JÍZDA DO KOPCE

Při jízdě do kopce pouze na akumulátor dochází ke zvýšení jízdních odporů o složku odporu stoupání, což má negativní vliv na konečný dojezd. Dle uvažovaného schématu na obrázku 7 pak můžu sestavit rovnici celkového odebíraného výkonu P_{kop} z akumulátoru:

$$P_{kop} = -P_m - P_b - P_{vb} - P_{\dot{\gamma}} \quad (5.1)$$

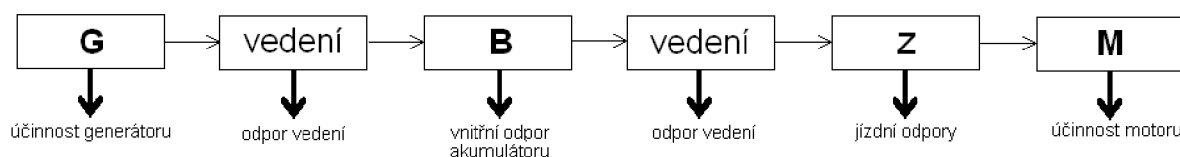


Obrázek 7 Schéma toku energie při jízdě do kopce

5.4 JÍZDA DO KOPCE S ASISTENCÍ

Při jízdě do kopce s asistencí uvažuji situaci, kdy cyklista jede do kopce zvolenou konstantní rychlostí a šlape zvoleným zatížením, čímž generuje elektrický proud a dobíjí akumulátor. Pro jízdu do kopce s asistencí lze psát rovnici P_{kopa} :

$$P_{kopa} = P_g - P_m - 2 \cdot P_b - 2 \cdot P_{vb} - 2 \cdot P_{\dot{\gamma}} \quad (5.2)$$



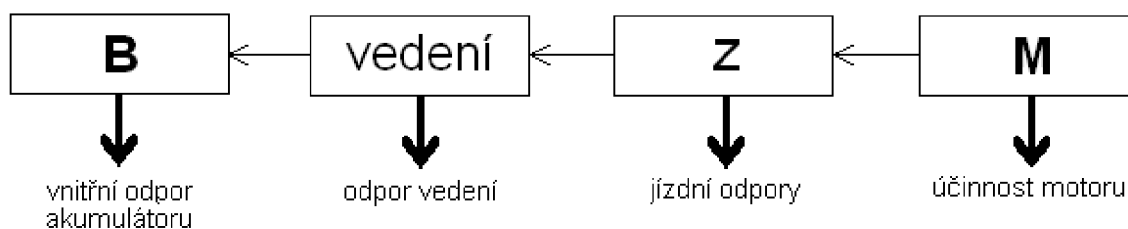
Obrázek 8 Schéma toku energie při jízdě do kopce s asistencí

5.5 JÍZDA Z KOPCE

Při jízdě z kopce uvažuji situaci, kdy bicykl jede konstantní rychlostí, překonává jízdní odpory a pokud je složka zrychlení vlivem gravitace větší, než součet jízdních odporů, pak elektromotor bicykl brzdí na požadovanou hodnotu rychlosti a energii tímto brzděním vytvářenou ukládá do akumulátoru. Pro jízdu z kopce píší rovnici P_{zkop} :



$$P_{zkop} = - P_m - P_b - P_{vb} - P_{\check{r}} \quad (5.3)$$

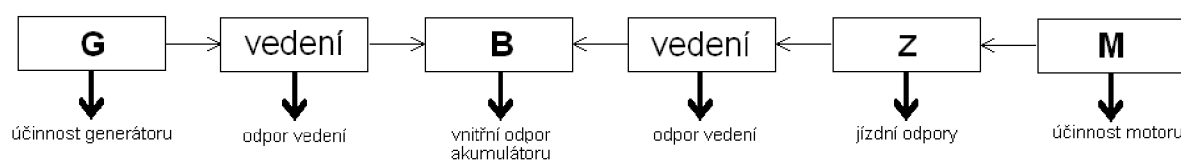


Obrázek 9 Schéma toku energie při jízdě z kopce

5.6 JÍZDA Z KOPCE S ASISTENCÍ

Tento režim uvažuje situaci, kdy cyklista aktivně šlape, dobíjí akumulátor a pokud je složka zrychlení vlivem gravitace větší, než jízdni odpory, pak motor generuje proud pro dobíjení akumulátoru. V tomto režimu by mělo dojít k úplnému dobití akumulátoru za nejkratší čas. Rovnice výkonu pro jízdu z kopce s asistencí P_{zkopa} :

$$P_{zkopa} = P_g - (P_m) - 2 \cdot P_b - 2 \cdot P_{vb} - 2 \cdot P_{\check{r}} \quad (5.4)$$



Obrázek 10 Schéma toku energie při jízdě z kopce s asistencí

5.7 VYPOČTENÉ HODNOTY

Do následujících tabulek jsem zpracoval vypočtené hodnoty pro jednotlivé režimy a sklony drah. Z nich lze usuzovat, jaký vliv má na celkový dojezd sklon dráhy a nakolik mu pomáhá příspěvek cyklisty.

Tabulka 14 Vypočtené hodnoty pro jízdu do kopce

jízda do kopce							
stoupání	P_f [W]	P_s [W]	P_v [W]	P_c [W]	P_{kop} [W]	t [h]	s [km]
3	44,82	313,22	73,26	524	535,3	0,79	15,8
5	44,65	523,3	73,26	779,7	790,96	0,53	10,6
10	44,14	1054,7	73,26	1425,3	1436,6	0,294	5,88
15	43,29	1602,67	73,26	2090,6	2101,86	0,2	4



Tabulka 15 Vypočtené hodnoty pro jízdu z kopce

jízda z kopce							
stoupání	P_f [W]	P_s [W]	P_v [W]	P_c [W]	P_{zkop} [W]	t [h]	s [km]
3	44,82	313,22	73,26	-237,3	-294,78	1,43	28,6
5	44,65	523,3	73,26	-492,9	-550,4	0,768	15,36
10	44,14	1054,7	73,26	-1139,8	-1197,3	0,35	7
15	43,29	1602,67	73,26	-1807,1	-1864,4	0,23	4,6

Tabulka 16 Vypočtené hodnoty pro jízdu do kopce s asistencí cyklisty

jízda do kopce s asistencí cyklisty							
stoupání	P_f [W]	P_s [W]	P_v [W]	P_c [W]	P_{kopa} [W]	t [h]	s [km]
3	44,82	313,22	73,26	524	455,3	0,93	16,8
5	44,65	523,3	73,26	779,7	722,2	0,58	11,6
10	44,14	1054,7	73,26	1425,3	1367,8	0,309	6,18
15	43,29	1602,67	73,26	2090,6	2033,1	0,21	4,2

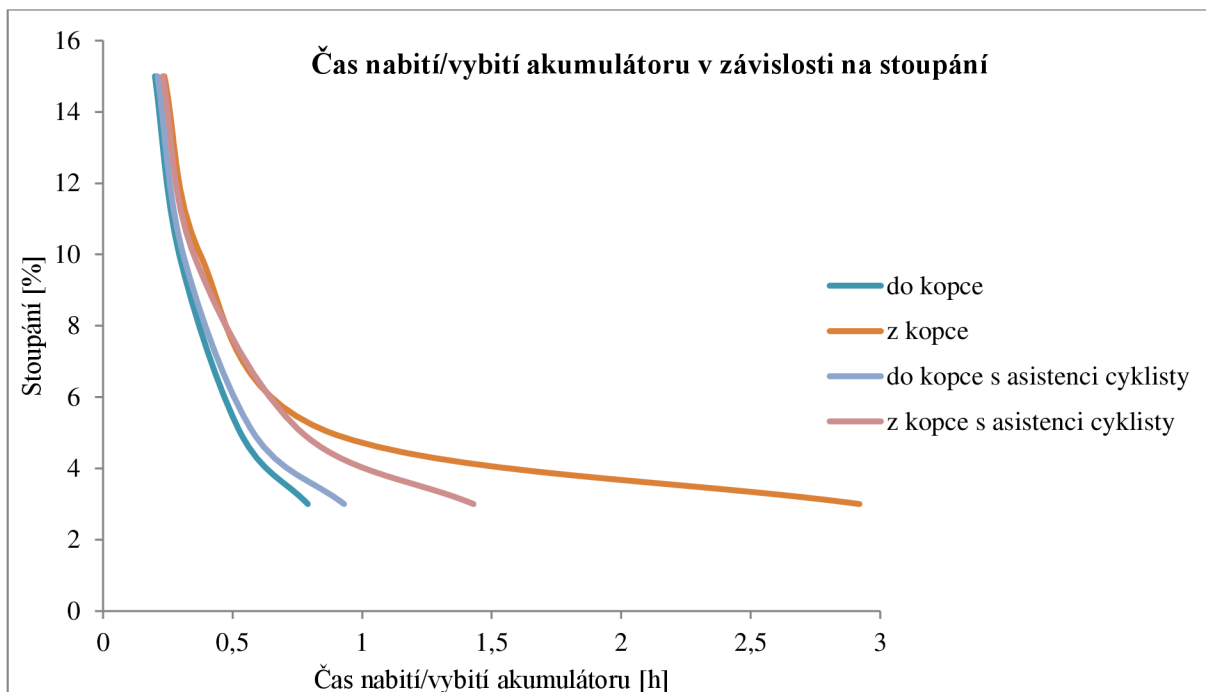
Tabulka 17 Vypočtené hodnoty pro jízdu z kopce s asistencí cyklisty

jízda z kopce s asistencí cyklisty							
stoupání	P_f [W]	P_s [W]	P_v [W]	P_c [W]	P_{zkopa} [W]	t [h]	s [km]
3	44,82	313,22	73,26	-237,3	-144,86	2,92	58,4
5	44,65	523,3	73,26	-492,9	-481,64	0,878	17,56
10	44,14	1054,7	73,26	-1139,8	-1128,54	0,375	7,5
15	43,29	1602,67	73,26	-1807,1	-1795,8	0,236	4,72

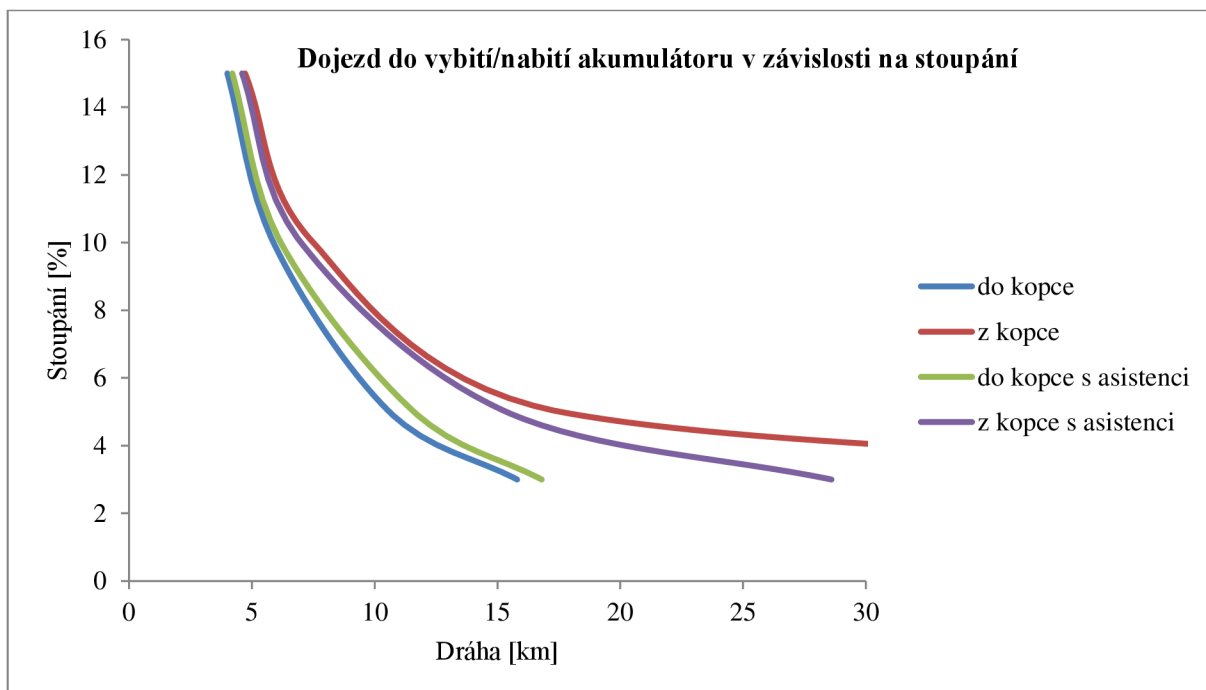


5.8 GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ

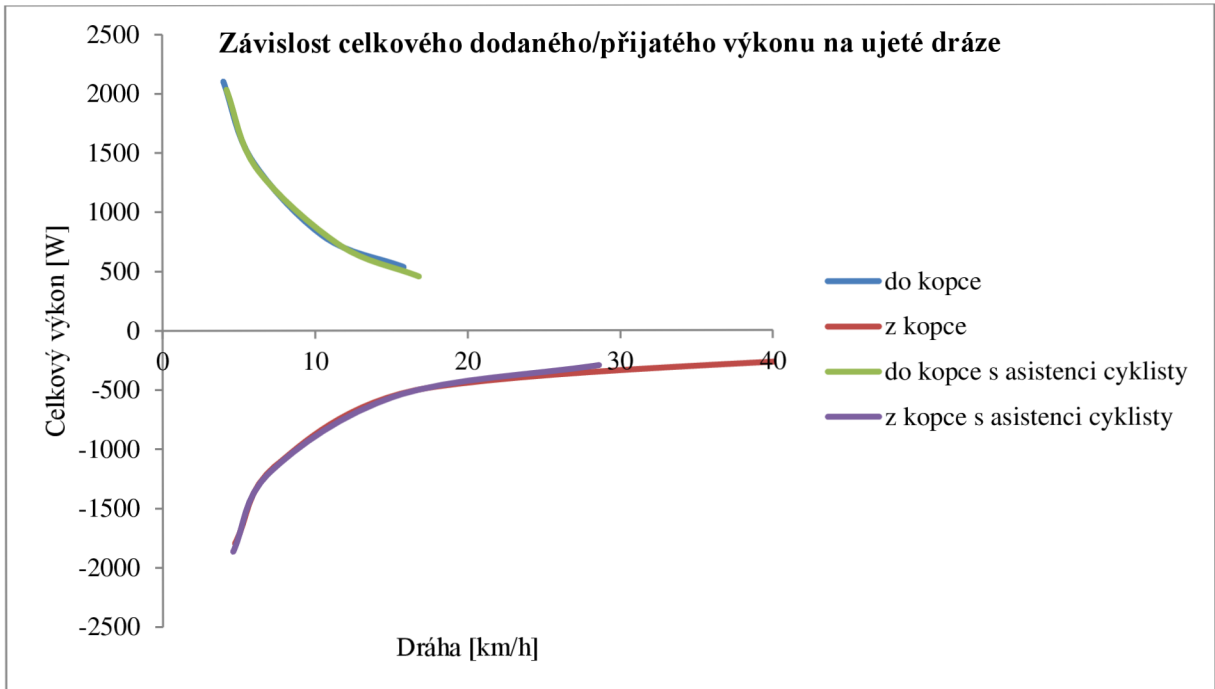
Pro lepší přehlednost jsem ze získaných hodnot vynesl grafy, ze kterých je patrné, jaký vliv má sklon vozovky na energetickou náročnost, dobu vybití, nebo nabití akumulátoru a celkovou ujetou vzdálenost.



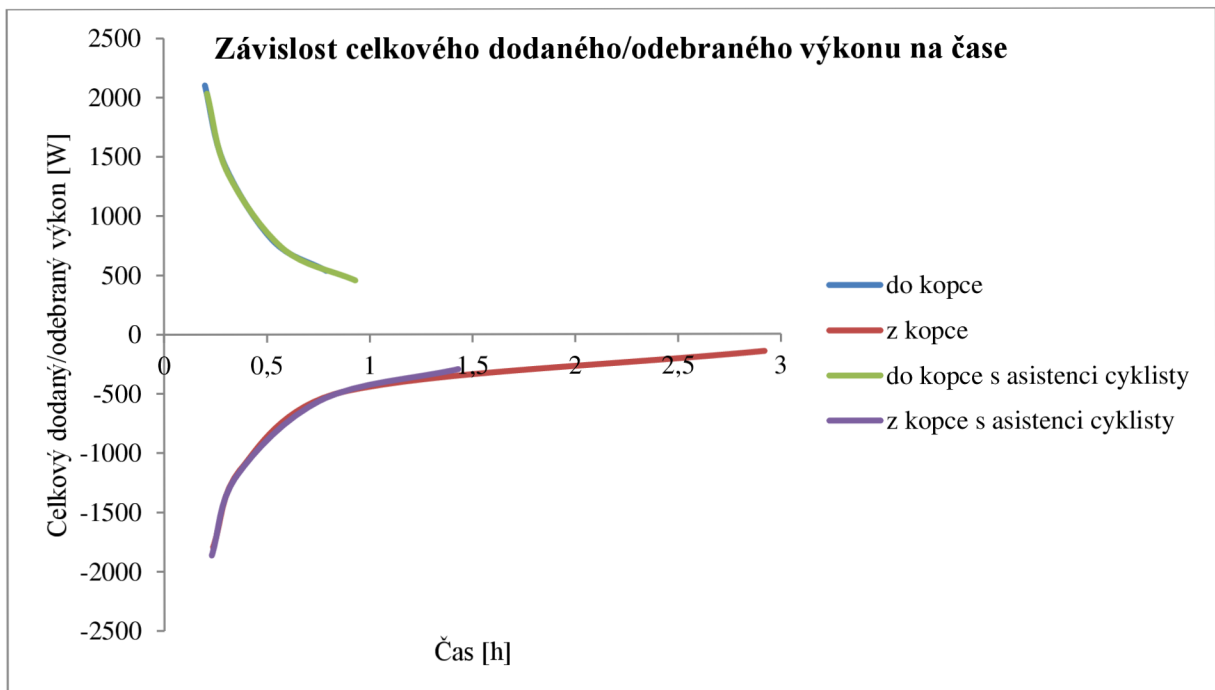
Graf 5 závislost času nabití/vybití akumulátoru v závislosti na stoupání



Graf 6 Dojezd do vybití/nabití akumulátoru v závislosti na stoupání



Graf 7 Závislost celkového dodaného/přijátého výkonu na ujeté dráze



Graf 8 Závislost celkového dodaného výkonu na čase



5.9 ZHODNOCENÍ

Z výpočtů a grafů je patrné, nakolik má vliv sklon vozovky na hospodaření s energií akumulátoru. Výrazný vliv na celkový dojezd má ovšem také zvolená konstantní rychlost 20km/h. Snižováním rychlosti například na 10km/h by sice došlo k prodloužení doby dojezdu, ale rovněž k prodloužení doby nabíjení. Pro přehled, jaký má cyklistou odevzdaný výkon vliv na dojezd, případně dobu nabíjení, srovnám ujetou vzdálenost při nabíjení a vybití pro jednotlivé sklony vozovky v tabulce 18 a 19:

Tabulka 18 Srovnání ujeté vzdálenosti do vybití akumulátoru s asistencí a bez asistence cyklisty při jízdě do kopce

jízda do kopce	ujetá vzdálenost		
	bez asistence [km]	s asistencí [km]	přínos cyklisty [%]
stoupání			
3	15,8	16,8	6%
5	10,6	11,6	9%
10	5,88	6,18	5%
15	4	4,2	5%

Z tabulky 18 plyne, že při jízdě do kopce cyklista prodlouží ujetou vzdálenost, během které dojde k úplnému vybití baterie, protože je potřeba více energie pro pohon bicyklu, než je cyklista schopen dodat. Cyklista svým působením tuto vzdálenost prodlouží v průměru o 6,25%.

Tabulka 19 Srovnání ujeté vzdálenosti do úplného nabití akumulátoru s asistencí a bez asistence cyklisty při jízdě z kopce

jízda z kopce	ujetá vzdálenost		
	bez asistence [km]	s asistencí [km]	přínos cyklisty [km]
klesání			
3	58,4	28,6	51%
5	17,56	15,36	13%
10	7,5	7	7%
15	4,72	4,6	3%

Z tabulky 19 vyplývá, že cyklista je v případě jízdy z kopce s klesáním 3% schopen zkrátit dobu nabíjení o 51%. Při vyšších sklonech jeho přínos již není tolik znát, protože složka gravitace působící na bicykl generuje větší energii, než přináší samotný cyklista.



ZÁVĚR

Cílem práce byl ideový návrh rekuperace energie mařené při brzdění silničního vozidla poháněného lidskou silou. Ze systémů zpracovaných v kapitole 1 jsem vybral takový, který umožní nejen jízdu jako na běžném bicyklu, ale především slouží jako prostředek pro kondiční cvičení, kdy si sportovec předem zvolí, s jakým zatížením bude trénovat. Zprvu se jako vhodný zásobník energie nabízel superkapacitor, protože je schopen okamžitě přijímat 99% elektrického náboje, ale při kontrolním výpočtu jsem zjistil, že by byl schopen dodávat potřebnou energii pouze po dobu 140s, což je pro můj navrhovaný systém nedostačující. Proto jsem pro návrh zvolil Li-Ion akumulátor, který sice přijímá proud pomaleji a s menší účinností, ale se svou kapacitou 423Wh plně pokryje potřeby elektrokola pro kondiční cvičení. Oproti jiným elektrokolům, které jsou vybaveny elektromotorem, spočívá výhoda mnou navrhovaného, že aby sportovec trénoval, nemusí například při nepřízní počasí opouštět domov, ale umístí bicykl do stojanu a tréninkově si může akumulátor dobít, jak je popsáno v kapitole 3. Při vlastním výkonu 100W je schopen akumulátor dobít za šest hodin, což je schopen při rozfázování za jeden den zvládnout.

Srovnáním doby dojezdu s asistencí a bez ní jsem zjistil, že cyklistův přínos je patrný a v některých situacích může dosáhnout zvýšení dojezdu až o 51%. Jsem si samozřejmě vědom, že jsem ve svém výpočtu zanedbal skutečnosti, jako jsou vnější vlivy působení větru, kvality a profilu trati, po které se může cyklista pohybovat a některé odpory působící během jízdy. Uvažování těchto vlivů by určitě nepříznivě ovlivnilo konečný dojezd, nebo dobu potřebnou k nabíjení. Neuvažování těchto vlivů jsem však vždy patřičně zdůvodnil.

Výsledkem je tedy ideový návrh, jak by mohl vypadat bicykl určený především pro kondiční cvičení a pokračováním mé diplomové práce by pak mohla být jeho konstrukce.



POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] ABBOTT, A., WILSON, D. Human-Powered Vehicles. První vydání, 1995. ISBN 0-87322-827-8
- [2] VLK, F. Teorie a konstrukce motocyklů 1. První vydání, Brno, 2004. ISBN 80-239-1601-7
- [3] VLK, F. Automobily 1. Druhé vydání, Brno, 2001. ISBN 80-239-8757-2
- [4] VLK, F. Dynamika motorových vozidel. Druhé vydání, Brno, 2003. ISBN 80-239-0024-2
- [5] VLK, F. Podvozky motorových vozidel. Druhé vydání, Brno, 2001. ISBN 80-239-0026-9
- [6] HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J., Fyzika. První vydání, Brno, 2000. ISBN 80-214-1869-9
- [7] RAUSCHER, J. Vozidlové motory [online]. Poslední revize 20.5.2011. Dostupné z <<http://www.iae.fme.vutbr.cz>>
- [8] ECOM s. r. o. [online]. Poslední revize 29.5.2014 [cit. 2011-20-5]. Dostupné z <<http://www.ecom.cz/files/documents-catalogue/47.pdf>>
- [9] VNITŘNÍ ODPOR BATERIE. [online]. Poslední revize 29.5.2014. Dostupné z <<http://physics.fme.vutbr.cz/~mcerny/BF/labiny/nu.pdf>>
- [10] CHARGING A CAPACITOR. [online]. Poslední revize 29.5.2014. Dostupné z <<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electric/capchg.html>>
- [11] COLLECTION OF SOLID PROBLEMS IN PHYSICS [online]. Poslední revize 20.5.2014. Dostupné z <<http://www.physicstasks.eu/>>
- [12] RECUMBENTS.COM. [online]. Poslední revize 22.5.2014. Dostupné z <<http://www.recumbents.com/home/>>
- [13] AZUB BIKE paměť. [online]. Poslední revize 28.5.2014. Dostupné z <<http://www.azub.cz/inteligentni-elektrokolo-elektrosada-bionx/>>
- [14] HYPERPHYSIC. [online]. Poslední revize 20.5.2014. Dostupné z <<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electric/capchg.html>>
- [15] TZB-Technické Zabezpečení Budov. [online]. Poslední revize 25.5.2014. Dostupné z <<http://energie.tzb-info.cz/7435-akumulace-elektriny>>
- [16] NEDŘISE. [online]. Poslední revize 27.5.2014. Dostupné z <<http://nedrise.cz/14-prestavba-elektrokol>>
- [17] CYKLISTIKAKRNOV.CZ. [online]. Poslední revize 20.5.2011. Dostupné z <<http://www.cyklistikakrnov.com/Cykloinformace/Retezovy-prevod.htm>>



- [18] ČEZ. a.s. [online]. Poslední revize 20.5.2011. Dostupné z <http://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/06/cesty_1.html>
- [19] GRUBER, J. [online]. Poslední revize 20.5.2011. Dostupné z <http://www.spstr.pilsedu.cz/osobnistranky/josef_gruber/clanky/vyn_kola.pdf>
- [20] AUTOMATIZACE.HW.CZ. [online]. Poslední revize 20.5.2011. Dostupné z <<http://automatizace.hw.cz/el-pohony/ART299-superkondenzator--princip-vlastnosti-pouziti.html>>
- [21] ECOTECH. Elektropohony do kola. [online]. Poslední revize 20.5.2011. Dostupné z <<http://www.ecotech.cz/elektrokola-motory/>>
- [22] ZAPLETAL, M. Nabíjení kondenzátoru. [online]. Poslední revize 25.5.2014. Dostupné z <www.souch.cz/dok/nabijeni_kapacitoru.ppt>
- [23] K&F TECHNICKÁ GUMA. [online]. Poslední revize 25.5.2014. Dostupné z <http://www.guma.cz/shd-letecka_guma.htm>
- [24] ENDELES SPHERE TECHNOLOGY. [online]. Poslední revize 21.5.2014. Dostupné z <<http://www.endless-sphere.com/>>
- [25] KOLA ŠTĚRBA. [online]. Poslední revize 20.5.2011. Dostupné z <<http://www.sterba-kola.cz/>>
- [26] OHIO.EDU. [online]. Poslední revize 20.5.2011. Dostupné z <<http://www.ohio.edu/mechanical/programming/hpv/hpv.html>>
- [27] ROWEROWYTORUN. [online]. Poslední revize 20.5.2011. Dostupné z <http://rowerowytorun.com.pl/index.php?akcja=art_drukuj&art_id=133>
- [28] GNOSIS9. [online]. Poslední revize 20.5.2011. Dostupné z <<http://hledani.gnosis9.net/view.php?cislocclanku=2008120007>>
- [29] RUBICON PROJECT. [online]. Poslední revize 20.5.2011. Dostupné z <<http://www.rubiconproject.com/blog/culture/?p=877>>
- [30] LAURINI. Runbike. [online]. Poslední revize 20.5.2011. Dostupné z <<http://www.runbiking.eu/Runbiking/Co-je-to-runbiking>>
- [31] KPO KILOMETRY 2013. [online]. Poslední revize 24.5.2013. Dostupné z <<http://www.kpo.cz/dokument/aero.pdf>>



SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

μ	[%]	účinnost
a	[m.s ⁻²]	zrychlení
C	[F]	kapacita
$C_d A$	[-]	efektivní hodnota čelní plochy
c_x	[-]	součinitel odporu vzduchu
d	[m]	průměr
E_b	[Wh]	hustota uložené energie v akumulátoru
E_k	[J]	kinetická energie
E_{max}	[Wh.kg ⁻¹]	hustota uložené energie v superkapacitoru
f	[s ⁻¹]	frekvence
F	[N]	síla
F_h	[N]	hnací síla
f_k	[-]	součinitel valivého odporu pneumatik
F_{pe}	[N]	síla na pedál
g	[m.s ⁻²]	tíhové zrychlení
G	[N]	tíha
h	[m]	průmět dráhy do svislého směru
I	[A]	proud
i	[-]	převodový poměr
I_c	[mA]	ztrátový vnitřní proud změřený 72 hodin po nabití superkapacitoru na Un
i_c	[-]	celkový převod
I_{cc}	[A]	maximální kontinuální proud superkapacitoru
i_l	[-]	součinitel valení ložiska
I_n	[A]	jmenovitý proud, vybíjení po dobu 5s na U/2 superkapacitoru
I_p	[A]	špičkový proud superkapacitoru po dobu 1s
i_r	[-]	převod rozvodovky
I_{sc}	[A]	zkratový proud superkapacitoru
J	[kg.m ²]	moment setrvačnosti
J_{ki}	[kg.m ²]	hmotnostní moment setrvačnosti rotujících kol vozidla
J_m	[kg.m ²]	hmotnostní moment setrvačnosti rotujících částí
J_p	[kg.m ²]	hmotnostní moment rotujících částí převodového ústrojí



L	[m]	délka vodiče
l	[m]	průmět dráhy do vodorovného směru
L,W,S	[mm]	rozměry superkapacitoru
m	[kg]	hmotnost
m_c	[kg]	hmotnost cyklisty
m_{celk}	[kg]	celková hmotnost bicyklu s jezdcem
m_g	[kg]	hmotnost motoru
M_k	[N.m]	kroucí moment motoru
m_k	[kg]	hmotnost bicyklu
M_r	[Nm]	setrvačný moment rotačních částí
M_{rk}	[Nm]	moment zrychlení kol vozidla
M_{rm}	[Nm]	moment na hnacích kolech vozidla
M_{rp}	[Nm]	moment zrychlení rotujících částí
m_v	[kg]	hmotnost vodiče
O_f	[N]	odpor valivý
O_s	[N]	odpor stoupání
O_v	[N]	odpor vzduchu
O_z	[N]	odpor zrychlení
O_{zp}	[N]	odpor posuvných částí
O_{zr}	[N]	odpor zrychlení rotačních částí
P	[W]	příkon
P_a	[W]	střední hodnota výkonu
P_a	[W]	celkový výkon odebíraný z baterie
P_b	[W]	ztrátový výkon vnitřního odporu akumulátoru
P_c	[W]	celkový ztrátový výkon
P_c	[W]	ztrátový výkon pro překonání jízdních odporů
P_{cb}	[W]	výkon odebíraný z akumulátoru
P_f	[W]	ztrátový výkon odporu valení
P_g	[W]	příkon generátoru
P_g	[W]	výkon dodávaný generátorem
P_k	[W]	výkon dodávaný akumulátorem
P_{kop}	[W]	výkon dodaný při jízdě do kopce
P_{kopa}	[W]	výkon dodaný při jízdě do kopce s asistencí



P_m	[kW.kg ⁻¹]	měrný výkon
P_m	[W]	výstupní výkon motoru
P_m	[W]	příkon motoru
P_p	[W]	příkon elektromotoru
$P_{\dot{r}}$	[W]	ztrátový výkon vnitřního odporu vedení k baterii
P_{ξ}	[W]	špičkový výkon dodaný do zátěže superkapacitorem
P_{vb}	[W]	ztrátový výkon vnitřního odporu vedení k akumulátoru
P_{zkop}	[W]	výkon při jízdě z kopce
P_{zkopa}	[W]	výkon při jízdě z kopce s asistencí
Q	[c]	elektrický náboj
R	[Ω]	elektrický odpor
R_b	[Ω]	vnitřní odpor akumulátoru
R_d	[mΩ]	vnitřní odpor superkapacitoru při 100Hz
r_d	[m]	dynamický poloměr kola
R_{esr}	[mΩ]	počáteční stejnosměrný vnitřní odpor superkapacitoru
R_m	[Ω]	vnitřní odpor motoru
$R_{\dot{r}}$	[Ω]	odpor vedení k řídicí jednotce
r_{ξ}	[m]	rameno šlapací kliky
R_v	[Ω]	vnitřní odpor zdroje
R_{vb}	[Ω]	odpor vedení akumulátoru
s	[m]	dráha
S	[m ²]	průřez vodiče
s	[°]	stoupání
s_a	[m]	dráha ujetá na akumulátor
s_b	[m]	dráha ujetá po rovině
S_x	[m ²]	čelní plocha
t	[s]	čas
T	[°C]	teplota
t_a	[s]	čas dojezdu na akumulátor
t_k	[s]	čas nabití akumulátoru
t_r	[s]	čas rozjezdu
t_v	[s]	čas vybití akumulátoru
U	[V]	napětí



U_n	[V]	jmenovité napětí
U_r	[V]	vnitřní odpor rezistoru
v	[m.s ⁻¹]	rychlost
W	[J]	energie
W_{ol}	[N]	mechanické ztráty
α	[°]	úhel
Δt	[s]	časová změna
η_{ef}	[-]	cyklistův přínos pro dojezd
η_g	[-]	účinnost generátoru
η_m	[%]	účinnost motoru
ξ	[-]	součinitel vlivu rotačních částí
ρ_m	[Ωm]	měrný odpor vodiče
ρ_v	[kg.m ³]	hustota vodiče
τ	[-]	časová konstanta
ω	[s ⁻¹]	úhlová rychlost



Seznam příloh