

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A TELEKOMUNIKACÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Matematický model elektrické motokáry

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří ZWIEFELHOFER**
Osobní číslo: **E11N0089P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Dopravní elektroinženýrství a autoelektronika**
Název tématu: **Matematický model elektrické motokáry**
Zadávací katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Změřte jízdní odpory na současné elektrické motokáře.
2. Návrhněte a sestavte matematický model elektrické motokáry s využitím naměřených parametrů.
3. Proveďte sérii simulací a návrhněte parametry elektrického pohonu na základě zadaných kritérií.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

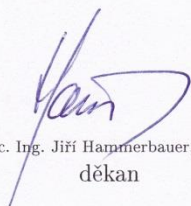
Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Luboš Streit

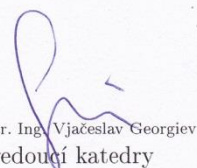
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce: 14. října 2013

Termín odevzdání diplomové práce: 12. května 2014


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Abstrakt

Tato práce se zabývá vytvořením matematického modelu elektrické motokáry při jízdě na závodním okruhu, pro použití při návrhu parametrů. Klíčový bod pro sestavení matematického modelu je identifikování jízdních odporů na současné elektrické motokáře Katedry elektromechaniky a výkonové elektroniky, Fakulty elektrotechnické, Západočeské Univerzity. Za tímto účelem jsou vypočítány momenty setrvačnosti, čelní plocha motokáry, součinitele aerodynamického odporu a valivého odporu. Tyto hodnoty jsou aplikovány při výpočtech jízdních odporů motokáry třídy Superkart divize 1 v sestaveném simulačním modelu. Na základě vytvořeného matematického modelu elektrické motokáry je simulována jízda na závodním okruhu za účelem návrhu parametrů při zachování konkurenceschopnosti se závodními stroji.

Klíčová slova

Superkart, simulace, matematický model, jízdní odpory, elektrický pohon.

Abstract

This Thesis deals with implementing a mathematical model of an Electric Go-kart driven on a racing track. The model should be used in order to design some important parameters. The key objective for the development of this mathematical model is to define all motion resistances of the Electric Go-kart available at the Department of Electromechanics and Power Electronics, Faculty of Electrical Engineering, University of West Bohemia in Pilsen. To develop this mathematical model, values for these parameters, moment of inertia, front part of go-kart, the coefficients of aerodynamic resistance and rolling resistance were computed. These values were further applied in the calculations of the road resistances of the go-kart class Superkart Division 1 in the developed simulation model. Conditions on a real racing circuit are simulated by the developed mathematical model, to design parameters of the Go-kart competitive to other racing machines.

Key words

Superkart, simulation, mathematical model, road resistance, electrical drive.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne 9.5.2014

Jiří Zwiefelhofer

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval Ing. Tomáši Komrskovi, Ph.D. a Ing. Luboši Streitovi, za pomoc na uskutečněných měřeních a přípravu motokáry. Zvláštní poděkování patří Ing. Tomáši Komrskovi, Ph.D. za cenné rady, pomoc při návrhu parametrů, připomínky a metodické vedení práce. Rovněž bych zde chtěl poděkovat firmě MSkart s.r.o. za poskytnutí cenných dat a informací o motokáře a závodech třídy Superkart divize 1.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ	9
ÚVOD	11
MĚNIČ NAPĚTÍ	12
1 IDENTIFIKACE JÍZDNÍCH ODPORŮ	13
1.1 JÍZDNÍ ODPORY	13
1.1.1 Aerodynamický odpor	13
1.1.2 Valivý odpor	14
1.1.3 Odpor stoupání	16
1.1.4 Odpor zrychlení	16
1.2 MĚŘENÍ JÍZDNÍCH ODPORŮ	17
2 ANALÝZA JÍZDY SPALOVACÍ MOTOKÁRY	22
3 SIMULACE JÍZDY ELEKTRICKÉ MOTOKÁRY	25
4 NÁVRH PARAMETRŮ	30
4.1 NÁVRH VÝKONU	32
4.2 NÁVRH BATERIE	35
ZÁVĚR	37
SEZNAM LITERATURY	39
PŘÍLOHA Č. 1	40

Seznam symbolů

O_c	Celkový jízdní odpor $[N]$
O_v	Aerodynamický jízdní odpor $[N]$
O_f	Valivý jízdní odpor $[N]$
O_{fk}	Valivý odpor při valení kola v přímém směru $[N]$
O_s	Jízdní odpor stoupání $[N]$
O_z	Jízdní odpor zrychlení $[N]$
O_{zp}	Jízdní odpor zrychlení posuvných částí $[N]$
O_{zr}	Jízdní odpor zrychlení rotujících částí $[N]$
S_x	Čelní plocha motokáry $[m^2]$
c_x	Součinitel aerodynamického odporu
ρ	Hustota vzduchu $[kg/m^3]$
ρ_o	Normálová hustota vzduchu $[kg/m^3]$
v	Rychlost $[m/s]$
v_o	Počáteční rychlost $[m/s]$
v_c	Cílová rychlost $[m/s]$
T	Teplota vzduchu $[^\circ]$
T_o	Normálová teplota vzduchu $[^\circ]$
p	Atmosférický tlak $[hPa]$
p_o	Normálový tlak ve střední hladině moře $[hPa]$
pp	Převodový poměr
M	Moment motoru $[Nm]$
M_k	Moment kola způsobený posunutím reakce podložky $[Nm]$
M_N	Jmenovitý moment motoru $[Nm]$
Z_k	Zatížení kola, reakce podložky $[N]$
e	Vzdálenost posunutí reakce podložky od osy kola $[m]$
r_d	Dynamický poloměr kola $[m]$
f_k, f_{kN}	Součinitel valivého odporu, souč.v.odp. získaný měřením
S_k	Boční reakce podložky $[N]$
α	Úhel směrové odchylky $[^\circ]$
m	Hmotnost $[kg]$
g	Součet gravitačního a odstředivého zrychlení Země $[m/s^2]$

t	Čas [s]
t_1, t_2	Začátek a konec časového intervalu [s]
a	Zrychlení [m/s^2]
a_b	Brzdné zrychlení [m/s^2]
J_r	Moment setrvačnosti rotujících částí [kgm^2]
J_m	Moment setrvačnosti rotoru motoru [kgm^2]
J_k	Moment setrvačnosti pneumatiky [kgm^2]
J_d	Moment setrvačnosti disku kola [kgm^2]
J_h	Moment setrvačnosti zadní hřídele motokáry [kgm^2]
J_{p1}	Moment setrvačnosti převodového kola na straně rotoru [kgm^2]
J_{p2}	Moment setrvačnosti převodového kola na straně zadní hřídele [kgm^2]
η_p	Účinnost převodu
ϑ	Součinitel rotujících hmot
k_1, k_2	Kořeny lineární regrese
γ	Úhel stoupání [$^\circ$]
$\beta, gyro$	Úhlová rychlost motokáry [$^\circ/s$]
E	Energie potřebná na ujetí jednoho kola závodního okruhu [J]
E_b	Energie baterie potřebná na ujetí jednoho kola z. okruhu [J]
ΔE_b	Snížená kapacita baterie vlivem nadproudu [%]
F_a	Tažná síla [N]
F_b	Brzdná síla [N]
F_{brzd}	Brzdná síla mechanických brzd [N]
s	Vzdálenost [m]
s_1, s_2	Vzdálenosti počátku a konce úseku [m]
s_o, s_c	Vzdálenosti počátku a konce cílového brždění [m]
k_z	Součin pro definování úseku zatáčky [$rad\ m/s^2$]
ω	Úhlová rychlost motokáry v zatáčce [rad/s]
L_b	Brzdná dráha [m]
I_b	Proud baterie [A]
I_{bf}	Fiktivní proud baterie [A]
P	Výkon motoru [W]
P_b	Výkon baterie [W]
P_N	Jmenovitý výkon motoru [W]

Úvod

Předmětem této diplomové práce je identifikace jízdních odporů, sestavení matematického modelu a simulace včetně návrhu parametrů elektrické motokáry srovnatelných výkonů s třídou Superkart divize 1 (Obr. 1). V této třídě závodí motokáry se spalovacími motory o objemu do 250 cm^3 , s výkony přesahujícími 70 kW . Základní parametry této motokáry od firmy *M Skart s.r.o.* jsou uvedeny v Tab. 1.



Obr. 1 Závodní motokára třídy Superkart divize 1 (vlevo) a elektrická motokára ZČU (vpravo) [1][2]

Nejvyšší výkon	71 kW při $13\,000/\text{min}^{-1}$
Maximální točivý moment	55 Nm při $12\,800/\text{min}^{-1}$
Maximální rychlost	250 km/h
Převodovka	šestistupňová, převod 6.st.: 3,39-3,46
Hmotnost motokáry bez paliva	143 kg
Minimální povolená hmotnost s jezdcem	218 kg

Tab. 1 Parametry závodní motokáry M Skart 2013 třídy Superkart, divize 1 [3]

Za účelem vytvoření matematického modelu byly naměřeny jízdní odpory na současné motokáře (Obr. 1) Fakulty elektrotechnické, Západočeské Univerzity. Tato motokára s elektrickým pohonem byla navržena Katedrou elektromechaniky a výkonové elektroniky. Motokáru pohání stejnosměrný motor *MARS Electric LLC ME 0708* buzený permanentními magnety, který napájí DC/DC měnič vlastní konstrukce. Motokára je osazena baterií LiFeYPO_4 , tvořenou čtyřmi moduly *LP12V80AH* firmy Thunder-Sky. Parametry současné elektrické motokáry jsou v Tab. 2 [2][3].

<i>Motor</i>	<i>DC buzený PM: 4.8 kW, 15 kW po 1 min, 3700 min⁻¹ bez zatížení</i>
<i>Točivý moment</i>	<i>13.1 Nm při 3200 min⁻¹</i>
<i>Maximální rychlost</i>	<i>56 km/h</i>
<i>Převodový poměr</i>	<i>3,5 – řetězem</i>
<i>Měnič napětí</i>	<i>snížovací a zvyšovací MOSFET měnič, trvalý proud 300 A</i>
<i>Baterie</i>	<i>LiFeYPO₄ - 48 V, 80 Ah, BMS, balanční obvod</i>
<i>Hmotnost motokáry</i>	<i>170 kg</i>

Tab. 2 Parametry současné motokáry Katedry elektromechaniky a výkonové elektroniky [2][4]

1 Identifikace jízdních odporů

Klíčovým bodem pro sestavení matematického modelu elektrické motokáry je stanovení jízdních odporů na současné elektrické motokáře. Jízdní odpory lze určit např. pomocí dojezdové zkoušky (kapitola 1.2).

1.1 Jízdní odpory

Jízdní odpory jsou síly působící na motokáru proti jejímu pohybu. Celkový jízdní odpor je tvořen součtem dílčích odporů

$$O_C = O_V + O_f + O_s + O_z, \quad (1)$$

kde O_c je celkový jízdní odpor, O_v aerodynamický odpor, O_f valivý odpor, O_s odpor stoupání a O_z je odpor zrychlení [5].

1.1.1 Aerodynamický odpor

Na těleso pohybující se ovzduším působí aerodynamické síly, které těleso musí překonávat silou, aby pokračovalo v rovnoměrném přímočarém pohybu. Složka síly ve směru jízdy působí proti pohybu tělesa a představuje tedy odpor tělesa

$$O_V = \frac{1}{2} S_x c_x \rho v^2. \quad (2)$$

Odpor je především závislý na následujících parametrech:

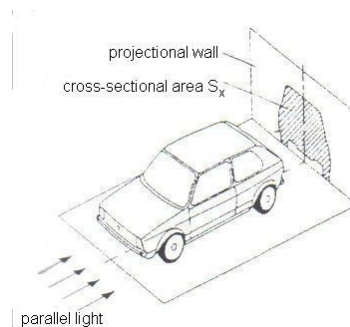
plocha tělesa S_x – průmět tělesa ve směru jízdy,

dynamický tlak – zahrnuje vliv rychlosti proudění v a hustotu vzduchu ρ ,

součinitel odporu c_x – vyjadřuje aerodynamickou vhodnost tvaru tělesa [5].

Čelní plocha

K zjištění čelní plochy vozidla se běžně používá metoda paralelní projekce světla, nebo metoda s použitím laserového paprsku. Princip je u obou metod obdobný. Vozidlo vrhá stín na projekční stěnu, ze které je obraz následně počítačově zpracován a vypočtena plocha [5].



Obr. 2 Měření čelní plochy vozidla [5]

Součinitel aerodynamického odporu

Součinitel c_x je závislý na tvaru vozidla a svou hodnotu popisuje aerodynamickou čistotu karoserie. Z toho lze vyvodit, že motokára bude mít podstatně větší součinitel odporu v porovnání s osobními auty, které se obvykle pohybují v rozmezí hodnot 0,3-0,4.

Ve vývojových střediscích automobilek se součinitel odporu měří v aerodynamickém tunelu na samotném autě, nebo většinou na modelu, který se dá dále upravovat, popř. může být zmenšený.

Hustota vzduchu

Při teplotě $T_o = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ a tlaku $p_o = 1013 \text{ hPa}$ odpovídá hodnotě $\rho_o = 1,25 \text{ kg/m}^3$. Ve výpočtech je však zapotřebí uvažovat hustotu ρ odpovídající aktuálním meteorologickým podmínkám při provádění dojezdové zkoušky. Tuto hodnotu zjistíme přepočtem dle vzorce

$$\rho = \rho_o \frac{p(T_o + 273)}{p_o(T + 273)} = \frac{354p}{(T + 273)}, \quad (3)$$

kde p a t jsou naměřené hodnoty tlaku a teploty.

1.1.2 Valivý odpor

Vlivem zatížení kola silou Z_k dochází k deformaci kola a podložky. Při provozu motokáry můžeme uvažovat, že povrch je asfalt, nebo jiný dostatečně tvrdý materiál a deformaci podložky nemusíme uvažovat. Před osou otáčení se pneumatika stlačuje, zvětšuje se měrný tlak, a spotřebovává energii, která se mění v teplo. Vlivem těchto ztrát (hystereze) je energie potřebná k stlačení větší, než vrácená energie z narovnání. Součtem těchto elementárních sil s reakcí podložky se posune výslednice o vzdálenost e a tím vznikne moment

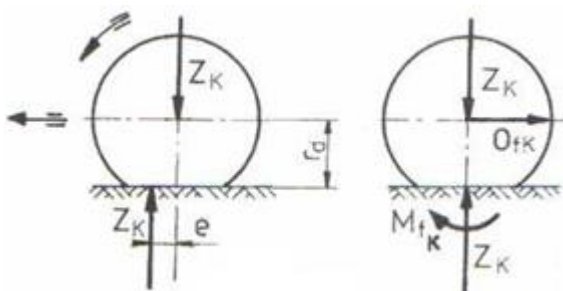
$$M_k = Z_k \cdot e, \quad (4)$$

působící proti směru otáčení. Situace je znázorněna na Obr. 3. Valivý odpor O_{fk} se rovná síle,

kterou musíme působit na kolo, aby setrvalo v rovnoměrném pohybu. Pro přímočarý pohyb tedy platí

$$O_{fk} = \frac{Z_k \cdot e}{r_d} = Z_k \cdot f_k, \quad (5)$$

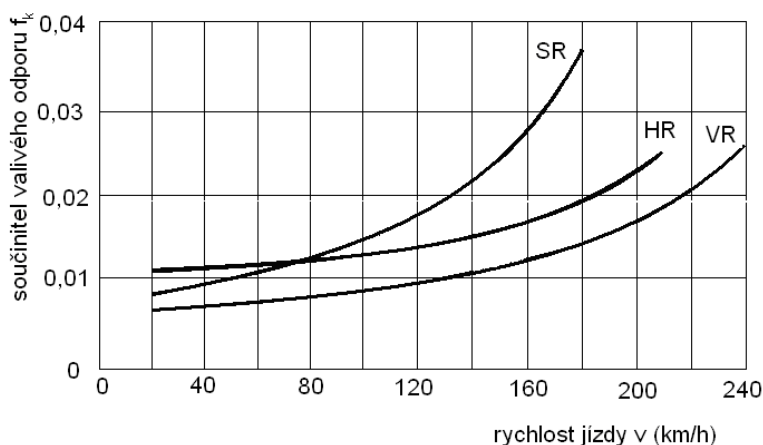
kde r_d je dynamický poloměr kola, který odpovídá hodnotě poloměru zatížené pneumatiky zvětšeného vlivem odstředivých sil, a f_k je součinitel valivého odporu [5].



Obr. 3 Vznik valivého odporu pneumatiky (upraveno z [5])

Koeficient valivého odporu je proměnný v závislosti na následujících faktorech.

- Rychlost jízdy – po překročení určité rychlosti (u os. automobilu cca 80km/h) se nedá považovat koeficient valivého odporu za konstantní. Pneumatika se nestíhá deformovat ve stejné míře a v přední části narůstá měrný tlak => Z_k se posouvá více vpřed. Nárůst koeficientu se liší dle typu pneumatiky, především dle rychlostního indexu. Na Obr. 4 je vidět součinitel valivého odporu u radiálních pneumatik s rychlostními indexy S (do 180km/h), H (210 km/h), V (240 km/h) [5].



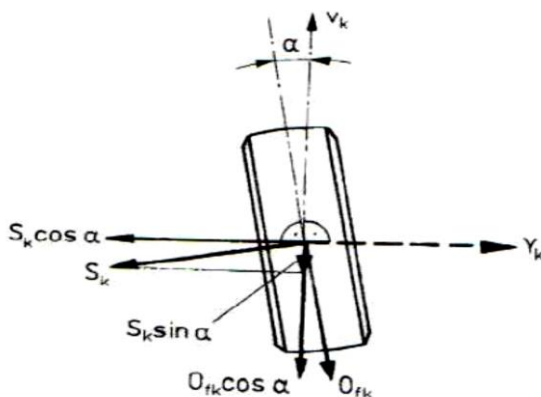
Obr. 4 Součinitel valivého odporu závislý na rychlosti (pro osobní automobily) [5]

- Směrová úchylnost valení – působí-li v ose otáčení kola boční síla, vznikne ve stopě boční reakce S_k nebo-li boční vodící síla. Deformace je pak závislá na velikosti této síly a na boční tuhosti pneumatiky. Kolo se neodvaluje ve směru jízdy, ale se

směrovou úchylkou α (znázorněno na Obr. 5). Ve směru pohybu pak působí valivý odpor

$$O_f = O_{fk} \cdot \cos \alpha + S_k \cdot \sin \alpha, \quad (6)$$

kde α je úhel směrové úchylky.



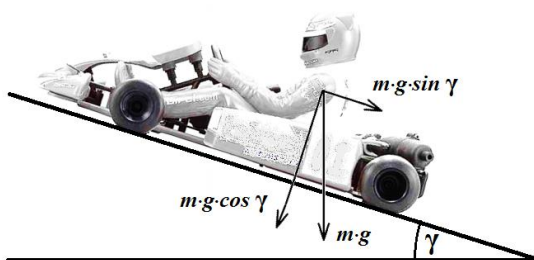
Obr. 5 Rozložení sil při zatáčení [5]

1.1.3 Odpor stoupání

Vlivem gravitačního zrychlení působí na vozidlo síla

$$O_s = m \cdot g \cdot \sin \gamma, \quad (7)$$

kde O_s je odpor stoupání, m je hmotnost vozidla, α je úhel stoupání a g je součet gravitačního a odstředivého zrychlení Země (pro naši zeměpisnou šířku $g = 9,81 \text{ m/s}^2$) [5].



Obr. 6 Znázornění odporu stoupání

1.1.4 Odpor zrychlení

Odpor zrychlení neboli setrvačný odpor, působí vždy směrem proti zrychlení. Skládá se ze dvou částí:

- odporu zrychlení posuvných částí

$$O_{zp} = m \cdot a, \quad (8)$$

- odporu zrychlení rotujících částí

$$O_{zr} = \frac{J_r}{r_d^2} \cdot a, \quad (9)$$

kde J_r je moment setrvačnosti rotujících částí, vztažený k ose zadního kola, a je zrychlení a r_d je dynamický poloměr kola [5].

Za tímto účelem byl vypočten moment setrvačnosti disků, pneumatik, zadní hřídele, ozubených kol převodu a rotoru motoru. Výsledný odpor zrychlení se vypočítá jako

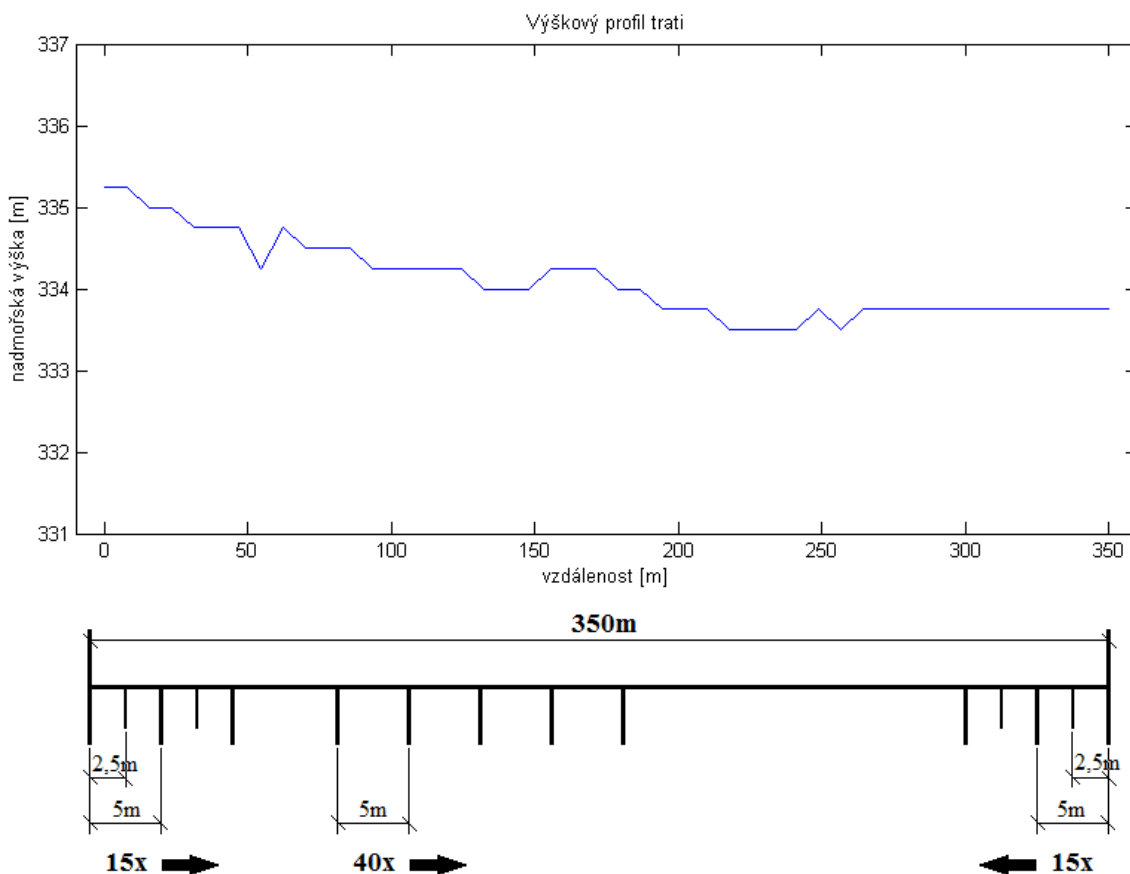
$$O_z = \left(1 + \frac{(J_m + J_{p1}) \cdot pp^2 \cdot \eta_p + 4 \cdot (J_k + J_d) + J_h + J_{p2}}{m \cdot r_d^2} \right) \cdot m \cdot a = \mathcal{G} \cdot m \cdot a, \quad (10)$$

kde J_m ...moment setrvačnosti rotoru motoru,
 J_k ...moment setrvačnosti pneumatiky,
 J_d ...moment setrvačnosti disku,
 J_h ...moment setrvačnosti zadní hřídele,
 J_{p1} ...moment setrvačnosti převodového kola na straně rotoru,
 J_{p2} ...moment setrvačnosti převodového kola na straně z. hřídele,
 pp ...převodový poměr,
 η_p ...mechanická účinnost převodu,
 \mathcal{G} ...součinitel vlivu rotačních hmot.

1.2 Měření jízdních odporů

Jízdní odpory byly měřeny tzv. dojezdovou zkouškou, kdy se vozidlo rozjelo na požadovanou rychlost a následně při nulovém tahu motoru zpomalovalo vlivem odporů působících na vozidlo.

Záznam zpomalení byl proveden výpočtem změny rychlosti ze známé délky úseků a času. Metoda spočívá ve vyznačení dílčích úseků trati s následným měřením času jízdy úseku. Pro měření času ujetí úseků byl použit videozáznam z digitálního fotoaparátu Nikon 1 J1, z kterého byly odečteny časy projetí vyznačenými body. Pro přesný odečet času bylo použito softwarové stříhací studio s krokem 1 snímku. Při snímkovací frekvenci videa 29,97 sn/s tak přesnost odečtu činí 33 μ s, přičemž byl brán ohled na poměrnou vzdálenost od značky mezi jednotlivými snímky, čímž se přesnost zvětšila. Po zastavení motokáry byla změřena vzdálenost od značky. Měřící úsek o délce 350m byl označen kužely, mezi kterými bylo vyznačeno sedmdesát pětimetrových úseků, kde vždy 15 krajních úseků bylo rozděleno na 2,5 metrové, viz Obr. 7.



Obr. 7 Nákres úseků a výškový profil trati

Jak lze vidět na výškovém profilu, dráha je do vzdálenosti 200 m skloněna. Maximální stoupání na úseku prováděného měření je dané normou [7] a v ideálním případě je nulové. Pokud je mezi počátečním a koncovým bodem trati výškový rozdíl, lze na konstantním stoupání odpor vypočítat a odečíst, popř. vliv omezit měřením v obou směrech s následným zprůměrováním výsledků. Odpor stoupání je vzhledem k malému zrychlení poměrně nízký a můžeme ho pro naše účely zanedbat.

Na úseku bylo uskutečněno 6 měřících jízd, vždy v obou směrech. Všechny záznamy jízd rychlosti v v závislosti na čase t jsou znázorněny v příloze č.1. Data z jednotlivých jízd byla proložena polynomem metodou nejmenších čtverců a zprůměrována. Výsledný polynom z dojezdové zkoušky je

$$v = -3,39e^{-5} \cdot t^3 + 48,78e^{-4} \cdot t^2 - 473,4e^{-3} \cdot t + 13,75. \quad (11)$$

Pro výpočet zrychlení a byl polynom (11) derivován dle vzorce

$$a = \frac{dv}{dt} = -10,17e^{-5} \cdot t^2 + 97,56e^{-4} \cdot t - 473,4e^{-3}, \quad (12)$$

a po převedení závislosti na rychlost byl získán polynom

$$a = 0,494e^{-3} \cdot v^2 + 10,728e^{-3} \cdot v + 0,2376. \quad (13)$$

Po zjištění čelní plochy motokáry bylo možné z tohoto polynomu vypočítat součinitele aerodynamického a valivého odporu.

Čelní plocha motokáry

Při zjišťování čelní plochy motokáry byl pořízen snímek motokáry s jezdcem ve vzdálenosti 20 m, který se následně softwarově upravil v programu GIMP Portable v.2.6.1 do výsledné podoby (Obr. 8). V programu byl poté pomocí histogramu zjištěn počet pixelů vybrané oblasti v porovnání s celkovým počtem pixelů obrázku. Při známém, dobře čitelném rozměru na motokáře byla zjištěna skutečná plocha na obrázku a zároveň v daném poměru i čelní plocha motokáry.



Obr. 8 Úprava fotografie pro určení čelní plochy motokáry s jezdcem

Zjištěná čelní plocha současné motokáry s jezdcem činí $0,628 \text{ m}^2$.

Součinitel aerodynamického odporu

Součinitel aerodynamického odporu c_x byl určen z výsledků dojezdové zkoušky, kde se uplatní setrvačnost vozidla, valivý a aerodynamický odpor, pro které platí

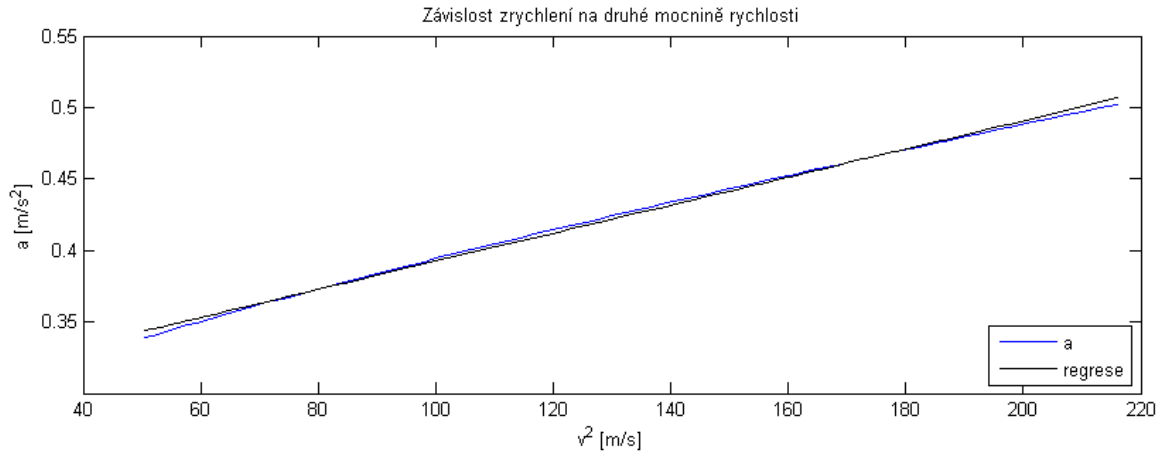
$$ma\mathcal{G} = \frac{1}{2}v^2 S_x c_x \rho + f_k mg. \quad (14)$$

Získané hodnoty zrychlení a byly znázorněny v závislosti na druhé mocnině rychlosti (Obr. 9)

a pomocí metody nejmenších čtverců vypočítány koeficienty regresní přímky:

$$a = k_1 v^2 + k_2 = 0,00098v^2 + 0,29417, \quad (15)$$

kde k_1 a k_2 jsou koeficienty lineární regrese.



Obr. 9 Závislost zrychlení na druhé mocnině rychlosti

Dosažením (14) do (15) dostáváme

$$a = \frac{S_x c_x \rho}{2m\mathcal{G}} v^2 + \frac{f_k \mathcal{G}}{\mathcal{G}}. \quad (16)$$

Poté můžeme rovnici rozdělit na složku valivého odporu (18) a aerodynamického odporu:

$$k_1 = \frac{S_x c_x \rho}{2m\mathcal{G}} \Rightarrow c_x = \frac{2m\mathcal{G} \cdot k_1}{S_x \rho} = \frac{2 \cdot 245 \cdot 1,06 \cdot 0,0009}{0,628 \cdot 1,29} = 0,58. \quad (17)$$

Součinitel rotujících hmot \mathcal{G} byl určen podle vztahu (10) z vypočtených setrvačných momentů rotujících částí, které jsou uvedeny v Tab. 3.

	rozměr	J [kgm^2]
přední disk	6x6"	1.96E-03
zadní disk	6x9"	2.69E-03
př. pneumatika	10x4.5-5"	1.57E-02
z. pneumatika	10x7.1-5"	2.30E-02
zadní hřídel	40x4/950mm	1.17E-03
převod	-	3.50E-03
rotor	-	1.20E-02

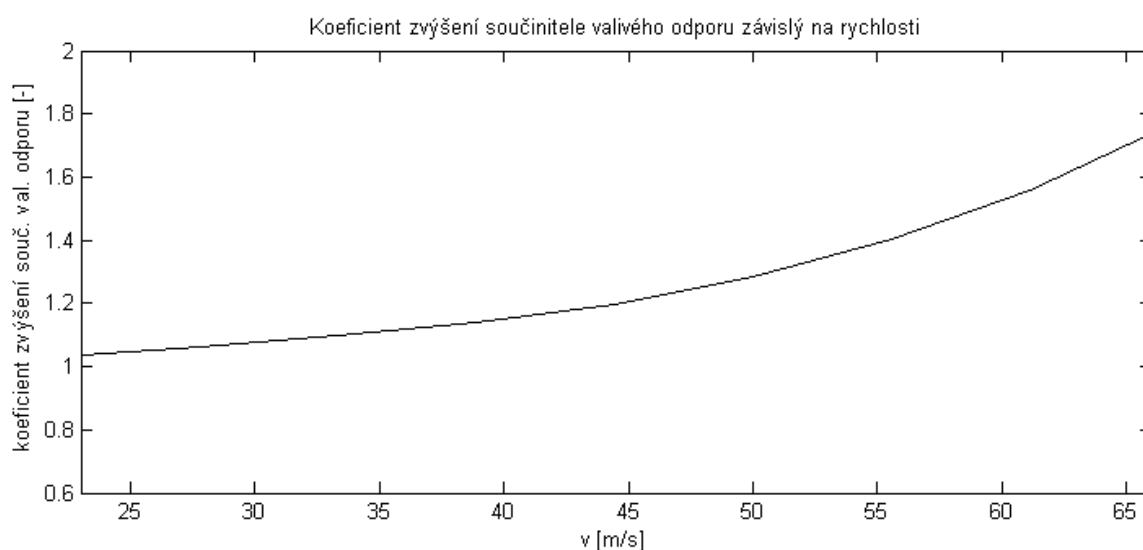
Tab. 3 Momenty setrvačnosti současné el. motokáry

Součinitel valivého odporu

Součinitel valivého odporu byl vypočten z koeficientu k_2 , dosazením (14) do (15):

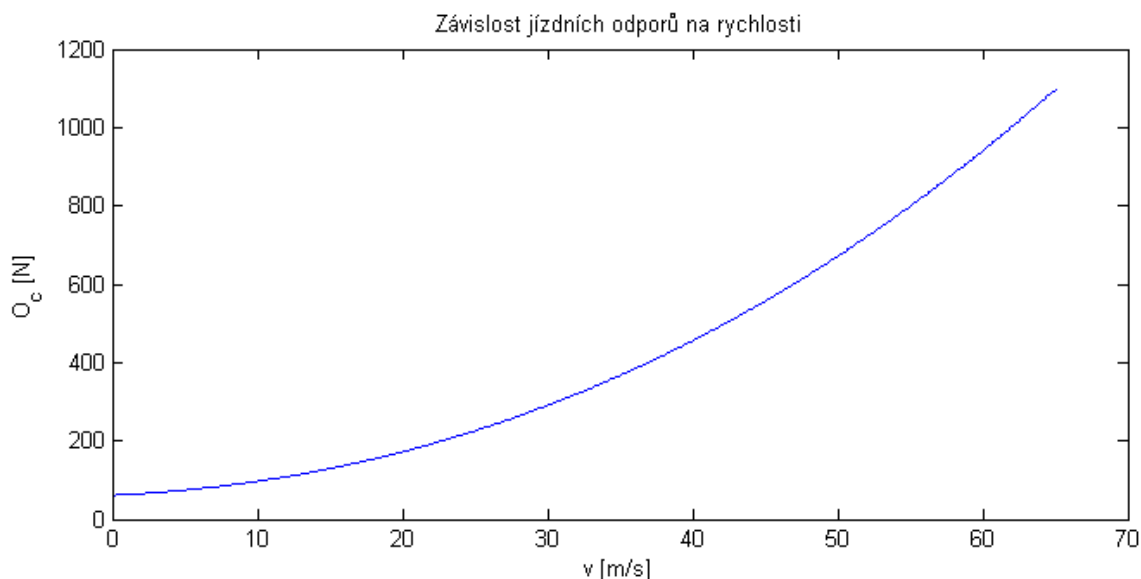
$$k_2 = \frac{f_k \cdot g}{g} \Rightarrow f_k = \frac{g \cdot k_2}{g} = \frac{1,06 \cdot 0,3073}{9,81} = 0,0332. \quad (18)$$

Naměřený součinitel odporu odpovídá rychlosti 40-50 km/h. Pro simulaci je však zapotřebí uvažovat rychlosti přesahující 200km/h. Proto byla závislost součinitele na rychlosti upravena (Obr. 10) s ohledem na teoretickou závislost pro osobní automobily (Obr. 4), rozdílné otáčky kol, odstředivou sílu působící na pneumatiku a údaje z datarecordingu.



Obr. 10 Uvažovaný vliv rychlosti na součinitel valivého odporu

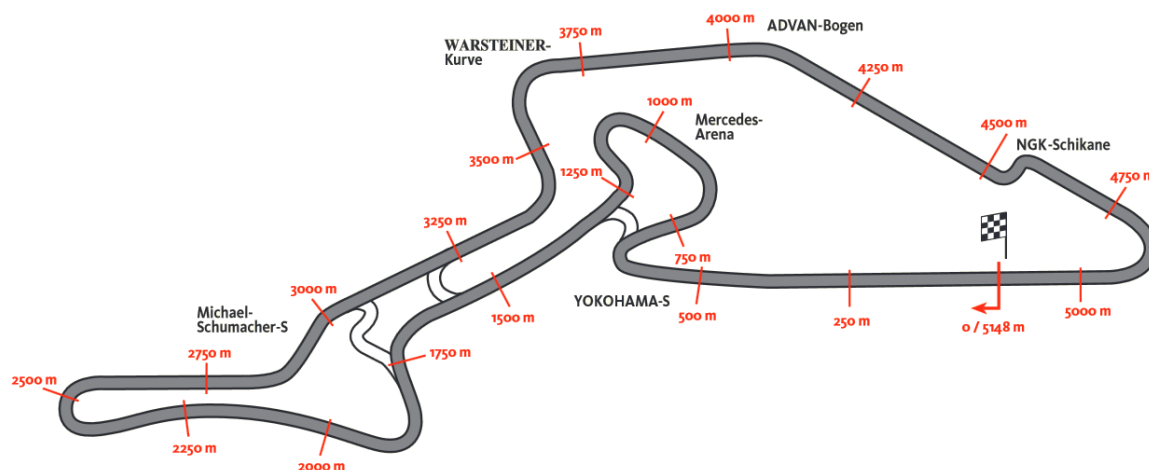
Výsledná závislost celkového jízdního odporu na rychlosti je na Obr. 11.



Obr. 11 Charakteristika jízdních odporů získaná na základě měření a prodloužená do $v = 65$ m/s

2 Analýza jízdy spalovací motokáry

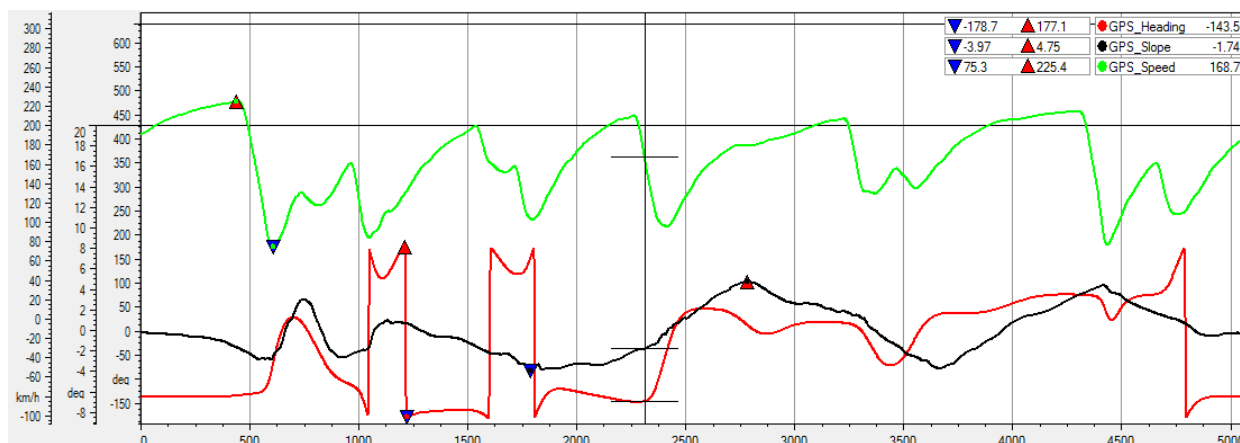
Pro analýzu jízdy závodní motokáry se spalovacím motorem byl zvolen okruh GP Nürburgring. Okruh měří 5148 metrů a závod Superkart 250 divize 1 se jede na 10 kol. Současní nejrychlejší jezdci třídy Superkart dosahují času na kolo těsně pod hranicí dvou minut [8].



Obr. 12 Závodní okruh Grand-Prix Nürburgring [9]

K simulaci byl poskytnut firmou MSkart s.r.o. záznam z datarecordingu AIM Evo 4, umístěném na závodní motokáře během závodu. Pro analýzu bylo vybráno nejrychlejší, 6. kolo druhého závodu s časem 1:58,13. Na Obr. 13 jsou vyobrazena data závislá na vzdálenosti použitá k simulaci okruhu. Jmenovitě je to úhel stoupání (záznam slope) a

vektor rychlosti, který se skládá z úhlu natočení motokáry během jízdy a rychlosti.



Obr. 13 Záznam vybraných dat z datarecordingu: GPS_Heading – úhel natočení motokáry, GPS_Slope – úhel stoupání, GPS_Speed - rychlost

Z těchto záznamů a se znalostí dalších údajů z předchozích kapitol lze numericky spočítat spotřebovanou energii během jednoho kola závodu. Nejprve je třeba určit dílčí síly působící proti pohybu motokáry.

Odpor stoupání byl určen podle vztahu (7), kde γ je známý úhel stoupání *slope* a m je uvažovaná hmotnost motokáry včetně jezdce (váha během závodu se pohybuje okolo 230 kg).

Odpor valivého tření se skládá z naměřeného valivého odporu navýšeného o vliv směrové úchytky α viz kapitola 1.1.2. Podle simulací průjezdu zatáčkou dle odborné zprávy [9], byla zjištěna v podobných režimech jízdy závislost mezi úhlovou rychlostí a úhlem směrové úchytky α viz rovnice výpočtu valivého odporu:

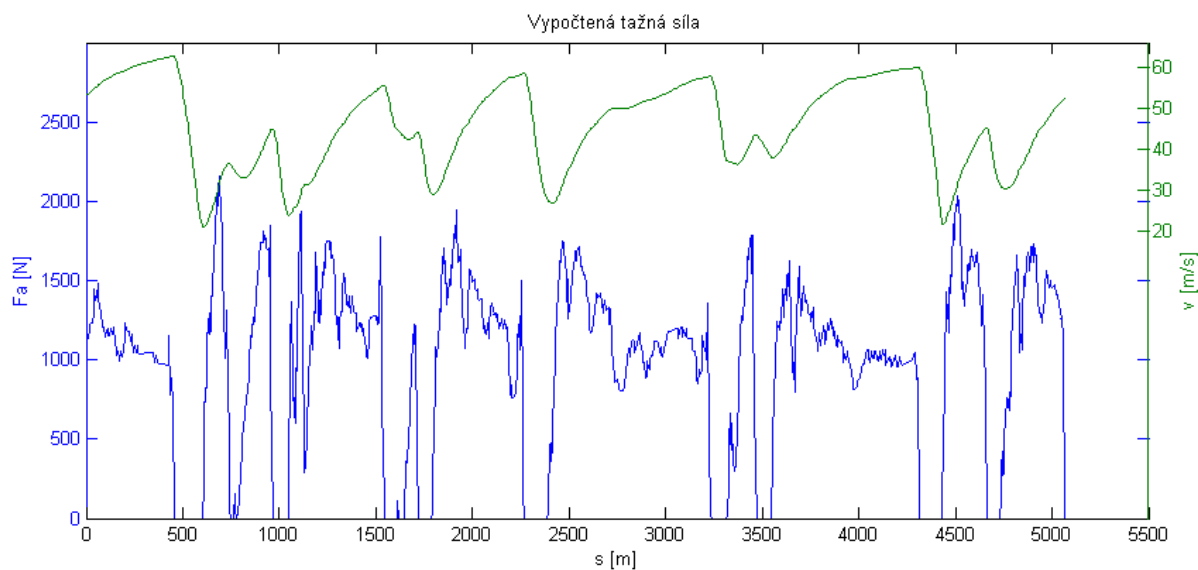
$$\begin{aligned} O_f &= O_{fk} \cdot \cos \alpha + S_k \cdot \sin \alpha = m \cdot g \cdot f_k \cdot \cos(0,2 \cdot \beta) + m \cdot v \cdot \omega \cdot \sin(0,2 \cdot \beta) = \\ &= m \cdot g \cdot f_k \cdot \cos(0,2 \cdot \beta) + m \cdot v \cdot \left(\frac{\beta \cdot \pi}{180} \right) \cdot \sin(0,2 \cdot \beta) \end{aligned} \quad (19)$$

kde ω je úhlová rychlost v *rad/s* a β představuje úhlovou rychlost ve *%*. Tyto parametry jsou počítány z údaje *GPS_Heading*.

Odpor aerodynamický byl vypočten dle vztahu (2), kde byly dosazeny parametry poskytnuté firmou MSkart, konkrétně čelní plochou $S_x = 0,6 \text{ m}^2$ a součinitelem aerodyn. odporu $c_x = 0,5$.

Odpor zrychlení byl určen podle vztahu (10) se zvoleným součinitelem rotujících hmot $\vartheta = 1,3$ a uvažovanou hmotností spalovací motokáry (vč. jezdce) $m = 230 \text{ kg}$.

Tažná síla během jednoho kola, vypočtená jako součet dílčích jízdních odporů je uvedena na následujícím grafu.



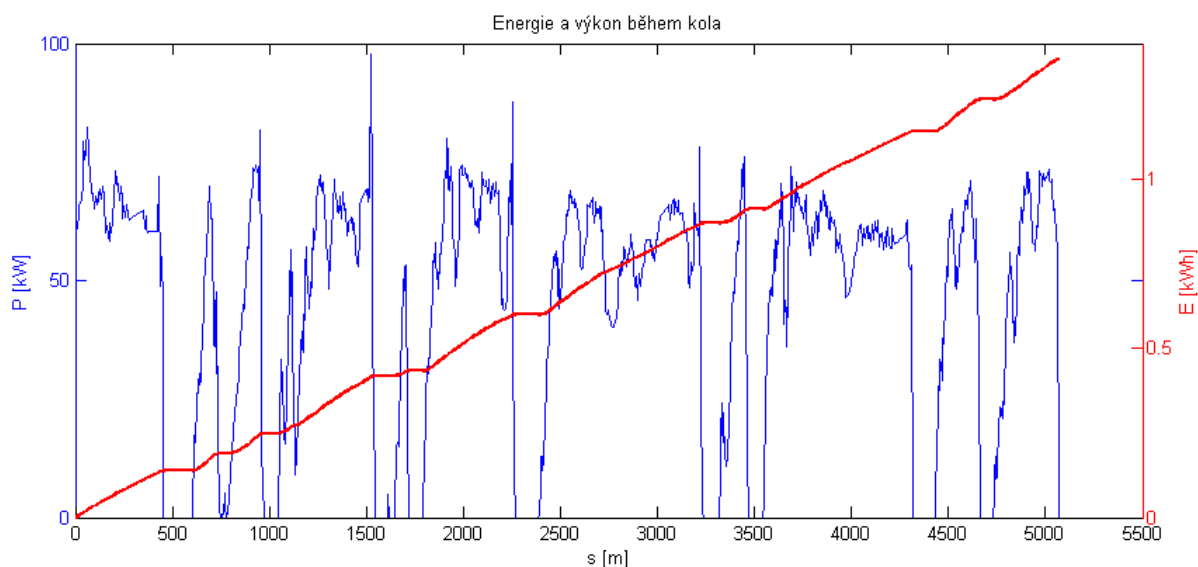
Obr. 14 Tažná síla (F_a) motokáry se spalovacím motorem během jednoho kola

Energie potřebná na ujetí jednoho kola závodu se vypočítá jako plocha pod obálkou tažné síly dle vztahu

$$E = \int_{s_1}^{s_2} F_a ds, \quad (20)$$

kde E je energie, F_a tažná síla a s dráha.

Tato energie je vztažena k zadní ose motokáry a nejsou zde uvažovány účinnosti převodů, spojky, motoru atp.



Obr. 15 Vypočtená energie a výkon během vybraného kola závodu

Zjištěná energie potřebná na pokrytí jízdních odporů na jedno kolo činí $E = 1,35 \text{ kWh}$. Po uvážení 95% účinnosti převodů $E = 1,42 \text{ kWh}$. Ze zkušeností týmu MSkart, lze odvodit

spotřebu benzínu $0,91 \text{ l/kolo}$, které přibližně odpovídá energii $8,1 \text{ kWh}$. V poměru se zjištěnou vykonanou prací (včetně ztrát převodů) pak vychází účinnost $17,5 \%$. Teoretická účinnost dvoutaktního motoru by se měla pohybovat okolo 20% , je tedy možné, že se simulace liší o nedefinované ztráty, či zvolený koeficient rotačních hmot je nízký (účinnost spalovacího motoru 20% vychází při $g = 1,66$, kdy energie na kolo $E = 1,62 \text{ kWh}$). Za daných podmínek však lze považovat přesnost výpočtu za uspokojující.

3 Simulace jízdy elektrické motokáry

Vzhledem k rozdílným vlastnostem el. motokáry, zejména hmotnosti a momentové charakteristice motoru, je vhodné pro návrh parametrů vytvořit model jízdy elektrické motokáry. Výsledkem provedených simulací jsou průběhy základních veličin během jízdy na okruhu, např. výkon, velikost odebíraného proudu z baterie, spotřebovaná energie a přibližný čas kola.

Na rovném úseku v režimu akcelerace je počítána rychlost podle

$$v = v_0 + \sum_{i=t_1}^{t_2} a_{(i)} \cdot \Delta t, \quad (21)$$

kde v_0 je hodnota rychlosti vycházející z nulových podmínek časového intervalu ohraničeného časy t_0 a t_1 .

Zrychlení a v časovém úseku představuje

$$a = \frac{F_a - O_v - O_f - O_s}{m} = \frac{M \cdot pp \cdot \eta_p}{r_d \cdot m} - \frac{O_v + O_f + O_s}{m}, \quad (22)$$

kde M je moment el. motoru, p převod a η_p účinnost převodu.

Čas v průběhu kola se počítá podle následující rovnice. Jelikož v elementárním časovém úseku lze zrychlení a považovat za konstantní, je změna času rovna změně dráhy, dělené součtem počáteční rychlosti a polovině přírůstku rychlosti.

$$\Delta t = \frac{\Delta s}{v} \Rightarrow t = t_0 + \sum_{i=s_1}^{s_2} \frac{\Delta s}{v_{(i)}} = t_0 + \sum_{i=s_1}^{s_2} \frac{1}{v_0 + \frac{1}{2} \sum_{i=t_1}^{t_2} a_{(i)} \cdot \Delta t} \Delta s = t_0 + \frac{s_2 - s_1}{v_0 + \frac{1}{2} a(t_2 - t_1)}, \quad (23)$$

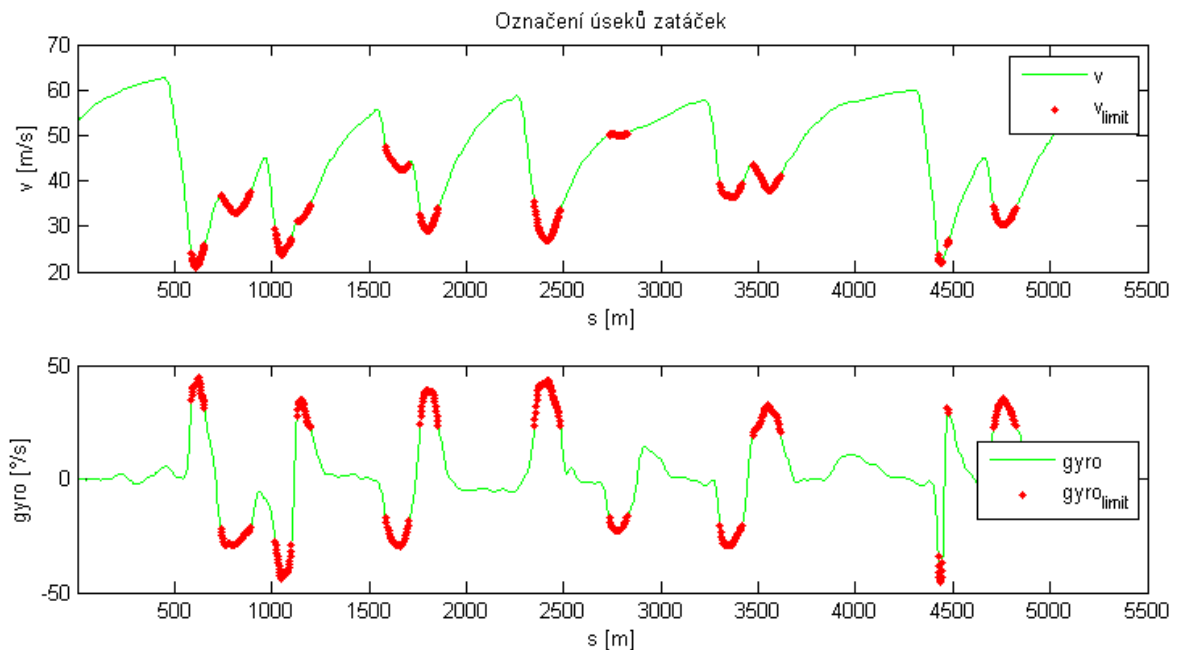
kde t_0 je čas vycházející z nulových podmínek úseku ohraničeného vzdáleností s_0 a s_1 .

Pro simulaci jízdy je zapotřebí definovat úseky zatáčky, kde musí být za zjednodušeného předpokladu rychlost spalovací motokáry větší, nebo rovná rychlosti elektrické motokáry. Definování úseků se provádí pomocí součinu

$$k_z = \omega \cdot v, \quad (24)$$

kde k_z je hodnota sloužící k definování úseku zatáčky na okruhu a je závislá na adhezních podmínkách. Proto je zapotřebí v simulaci experimentálně zjistit její hodnotu, aby platilo, pokud je na okruhu hodnota tohoto součinu překročena, motokára se nachází v zatáčce.

Na Obr. 16 jsou takto označeny úseky zatáčky v závislosti rychlosti a údaje *gyro* na vzdálenosti. Jednotky záznamu *gyro* jsou $^{\circ}/s$ a svým charakterem odpovídá úhlové rychlosti.



Obr. 16 Označení úseků zatáček

Kvůli vyšší hmotnosti elektrické motokáry vznikají větší setrvačné síly. Při stejném počátečním bodu brždění by nebylo možno motokáru zpomalit na požadovanou rychlost v zatáčce. Za tímto účelem je zapotřebí aplikovat v simulaci cílové brždění, kdy je vypočítávána vzdálenost počátku brždění od bodu s definovanou cílovou rychlostí. Pokud zanedbáme zpoždění brzd, brzdná dráha L_b se vypočte vztahem

$$L_b = \frac{1}{2 \cdot a_b} (v_0^2 - v_c^2) = \frac{m}{2 \cdot F_b} (v_0^2 - v_c^2), \quad (25)$$

kde a_b je zrychlení při brždění, F_b síla působící proti směru pohybu motokáry při brždění, v_0 počáteční rychlost a v_c cílová rychlost při ukončení brždění (upraveno podle [10]).

Síla F_b je dána součtem brzdící síly brzd, která je rovněž odečtena z poskytnutých dat a průměru jízdních odporů v úseku:

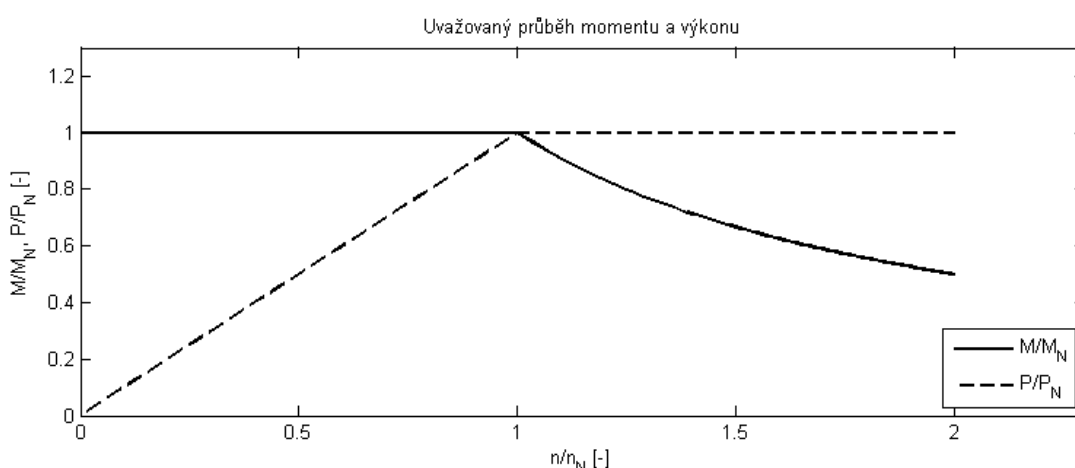
$$F_b = F_{brzd} + \frac{\sum_{i_0=s_0}^{s_c} O_{c(i)}}{i_c - i_o}, \quad (26)$$

kde F_{brzd} je síla působící účinkem brzd proti směru pohybu motokáry a vzdálenost s s indexy 0 a c ohraničuje počátek a konec úseku brždění.

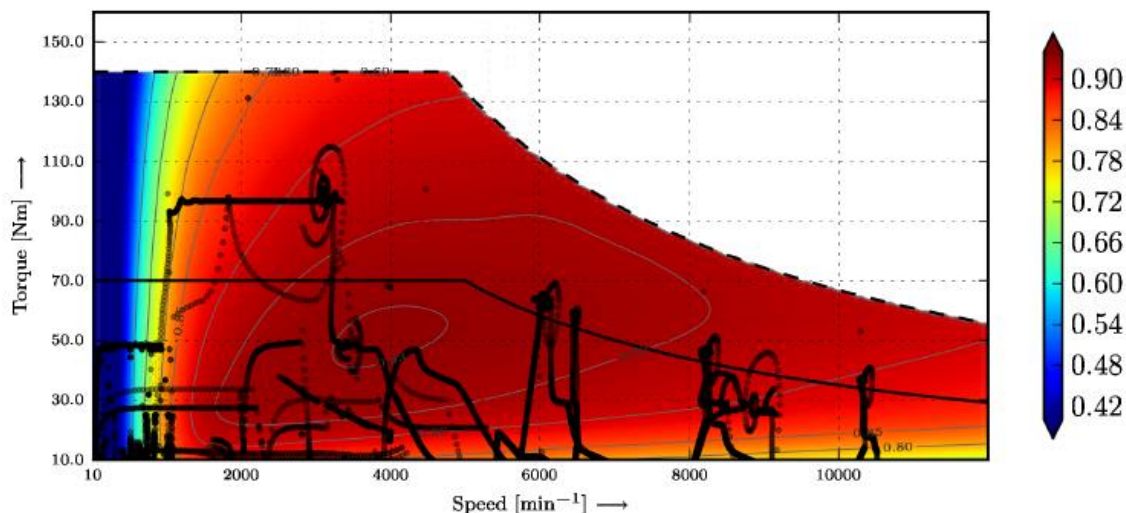
Tato síla F_b se uplatňuje i při výpočtu rychlosti a času v režimu brždění, kde se dosazuje přepočtena na zrychlení do rovnic (21) a (23).

V úseku zatáčky je rychlost limitována rychlostí motokáry se spalovacím motorem. V momentě akcelerace (kolem apexu zatáčky) je rychlost a čas vypočítáván stejným způsobem jako na rovném úseku s tím rozdílem, že rychlost nesmí být větší než u motokáry se spalovacím motorem. Dále je zde možno motor krátkodobě přetížít po dobu výjezdu ze zatáčky, kdy je reflektována opět maximální rychlost v dané části. V bodě ukončení úseku zatáčky je možnost navolit přetížení motoru definované číslem zatáčky a dobou přetížení.

Vzhledem k vysokým nárokům na nízkou hmotnost a rozměry byl zvolen synchronní motor buzený permanentními magnety a bylo určeno, že motokára bude osazena dvěma motory. Při simulaci byly uvažovány teoretické průběhy maximálního momentu a výkonu pohonu dle Obr. 17. Účinnost motoru byla odvozena ze zdroje [10] (Obr. 18). Z výsledků simulací bylo zjištěno, že otáčky motoru neklesnou během kola pod 4270 ot/min , což v přepočtu na charakteristiku Obr. 18 odpovídá 3800 ot/min (při uvažování maximálních otáček 13500 ot/min). Při těchto otáčkách je zpravidla motor zatížen momentem nižším, než jmenovitým. Účinnost motoru se pak pohybuje v rozmezí 89-92%.



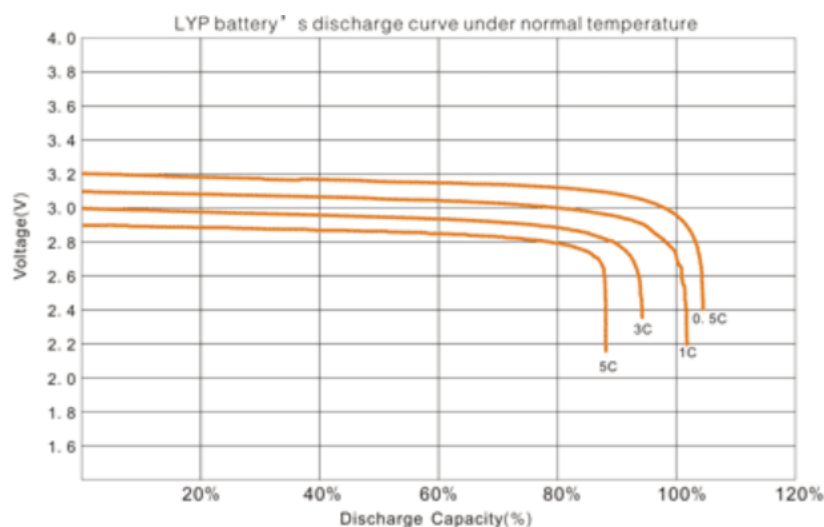
Obr. 17 Uvažovaný průběh maximálního momentu a výkonu



Obr. 18 Uvažovaná účinnost synchronního motoru s permanentními magnety [11]

V simulaci byla uvažována baterie typu LiFeYPO_4 , sestavená z 40Ah baterií (odkaz [12]). Model je nastaven tak, aby bylo možné parametry baterie změnit pro případ použití jiného typu.

Z vybíjecí charakteristiky (Obr. 19) byla odečtena závislost kapacity baterie na vybíjecím proudu. Snížení kapacity při nadproudu je důsledkem poklesu napětí na článku a tepelných ztrát při chemické přeměně energie a má podstatný vliv na dojezd motokáry.



Obr. 19 Vybíjecí charakteristika baterie LiFeYPO_4 [12]

Při simulaci je z baterie odebírán fiktivní proud, který simuluje pokles kapacity baterie

$$I_{bf} = \frac{I_b}{\Delta E_b}, \quad (27)$$

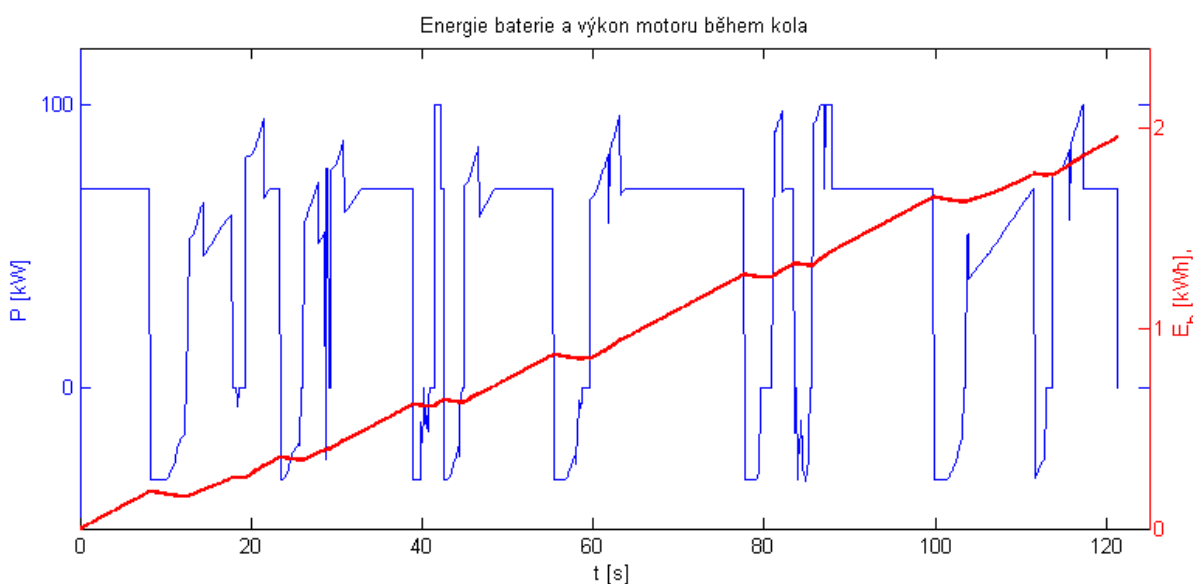
kde I_{bf} je fiktivní proud odebíraný z baterie, I_b proud odebíraný z baterie a ΔE_b snížená kapacita baterie v procentech.

Proud baterií I_b je možno omezit pro režim vybíjení a režim rekuperace. Jízda je rovněž omezena maximálními otáčkami motoru. Při přetížení motoru je kontrolována doba přetěžování v závislosti na výkonu motoru. Výkon odebíraný z baterie je vypočítáván jako výkon motoru navýšený o ztráty motoru a měniče. Potřebná energie na kolo, odebíraná z baterie se určí dle následujícího vztahu

$$E_b = \int_{t_1}^{t_2} P_b dt, \quad (28)$$

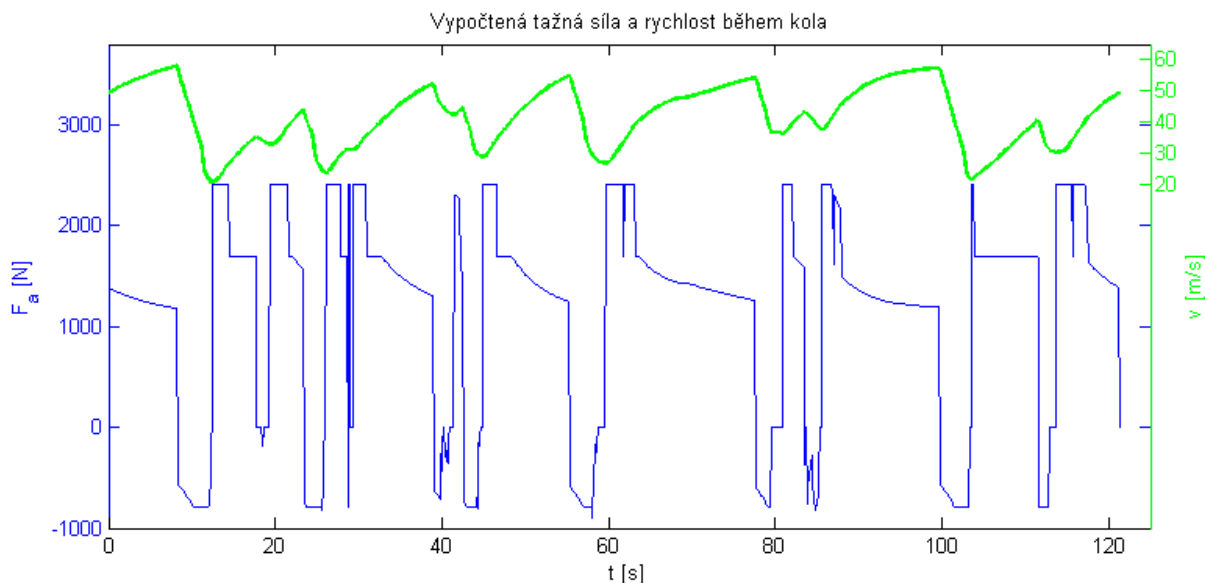
kde E_b je energie potřebná na ujetí jednoho kola a P_b je výkon odebíraný z baterie.

Průběh výkonu motoru a energie E_b v závislosti na čase je na následujícím obrázku. Při této simulaci bylo povoleno přetěžování motoru v úseku zatáčky. Elektrická motokára potřebuje na ujetí jednoho kola se srovnatelným časem okolo 2 kWh energie v závislosti na použité baterii a volbě přetěžování motoru. Nárůst oproti závodní motokáře se spalovacím motorem je způsoben větší hmotností motokáry.



Obr. 20 Vypočtená energie baterie a výkon motoru během jednoho kola na okruhu Nürburgring

Na Obr. 21 je vykreslen graf tažné síly motokáry během jednoho kola spolu s průběhem vypočtené rychlosti elektrické motokáry. V porovnání s motokárou se spalovacím motorem dosahuje elektrická motokára větších hodnot tažné síly, zejména při výjezdech ze zatáček, kdy je motor přetěžován. Proto by bylo vhodné na motokáře uplatnit kontrolu trakce, která by omezovala případný smyk zadních kol.



Obr. 21 Tažná síla a rychlost el. motokáry během jednoho kola na okruhu Nürburgring

Matematický model i veškeré numerické výpočty byly provedeny v programu MATLAB (Matrix laboratory) R2012a. Vzhledem k obsáhlosti simulačního programu je zdrojový kód simulačního programu na disku CD-ROM, jako příloha č. 2.

4 Návrh parametrů

Při návrhu parametrů elektrické motokáry byly do simulace zadány hodnoty zjištěné měřením na současné motokáře. Výjimku tvoří přepočtené momenty setrvačnosti uvedené v Tab. 4.

	<i>rozměr</i>	<i>J [kgm²]</i>
<i>přední disk</i>	<i>6x6"</i>	<i>3.86E-03</i>
<i>zadní disk</i>	<i>6x9"</i>	<i>5.67E-03</i>
<i>př. pneumatika</i>	<i>11x6.0-6"</i>	<i>2.91E-02</i>
<i>z. pneumatika</i>	<i>11x9.0-6"</i>	<i>4.37E-02</i>
<i>zadní hřídel</i>	<i>40x4/950mm</i>	<i>1.17E-03</i>
<i>převod</i>	-	<i>3.50E-03</i>
<i>rotor</i>	-	<i>3.50E-02</i>

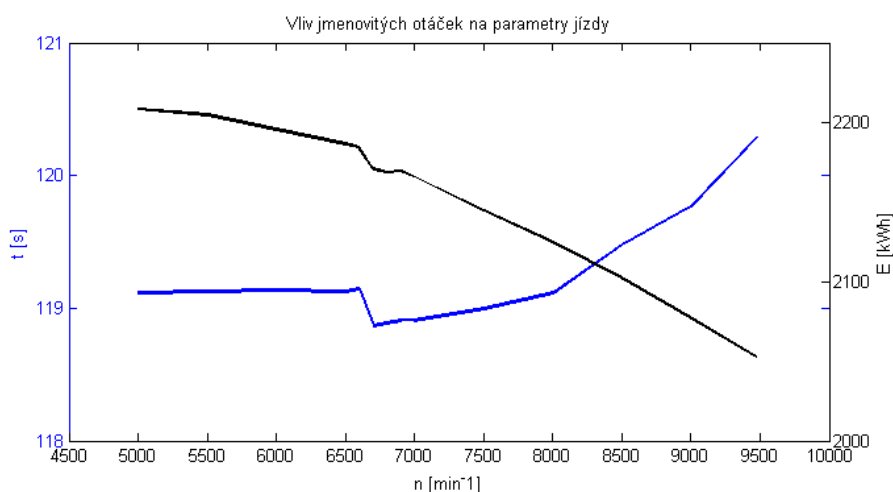
Tab. 4 Momenty setrvačnosti el. motokáry Superkart

Ze simulací bylo zjištěno, že pro získání srovnatelného času s motokárou Superkart

a zároveň absolvování celého závodu, by musela elektrická motokára disponovat jmenovitým výkonem 100 kW , jmenovitou kapacitu baterie 32 kWh (platí pro zvolenou baterii LiFeYPO_4). Celková hmotnost motokáry během jízdy by byla přibližně 635 kg . Při srovnání s hmotností závodní motokáry 230 kg by váha elektrické motokáry vyžadovala navrhnout zcela nový odpružený rám s přenosem výkonu přes diferenciál. Proto s běžně dostupnými bateriemi motokáru pro závody Superkart divize 1 nelze postavit. V brzké době by však měla vstoupit na trh technologie lithium sírových baterií, která by mohla učinit návrh takovéto motokáry možným. Dále byly provedeny simulace za účelem určení parametrů el. motokáry schopné ujet snížený počet kol, avšak se srovnatelnými výkony divize 1.

Součástí návrhu výkonu byl i převod otáček motoru na zadní osu motokáry, jehož ideální poměr pro dosažení nejlepšího času se liší podle parametrů motokáry a je uveden pro každou konfiguraci zvlášť.

Dále byly zkoumány parametry motoru, konkrétně jmenovité hodnoty a maximální otáčky. Po konzultaci s návrháři motorů byly stanoveny maximální otáčky motoru 13500 ot/min . Stanovení jmenovitých otáček má velký vliv na dosahované výkony motokáry. Vypočtený čas kola a spotřebovaná energie na kolo v závislosti na jmenovitých otáčkách je na Obr. 22. Při stanovování jmenovitých otáček bylo zjištěno, že nejrychlejší časy na kolo vychází při zvolení v polovině otáčkového pásma. Kvůli snaze o snížení hmotnosti stroje, byly však následně jmenovité otáčky posazeny do $2/3$ maximálních otáček, tedy 9000 ot/min .



Obr. 22 Závislost vypočteného času kola a energie na volbě jmenovitých otáček

4.1 Návrh výkonu

Z Obr. 15, kde je graf výkonu spalovací motokáry během jednoho kola, lze usoudit, že výkon elektrické motokáry by měl být přibližně 70 kW. Velikost výkonu byla následně ověřena v simulaci, kde byly vhodně zvoleny okamžiky přetěžování přibližně na 1,43 násobek jm. výkonu. Na Obr. 23 lze vidět porovnání průběhu rychlosti motokáry se spalovacím motorem $v_{sp.mot.}$ s průběhy rychlosti el.motokáry s motory o jmenovitých výkonech

65 kW ($P_{max}=93$ kW),

70 kW ($P_{max}=100$ kW),

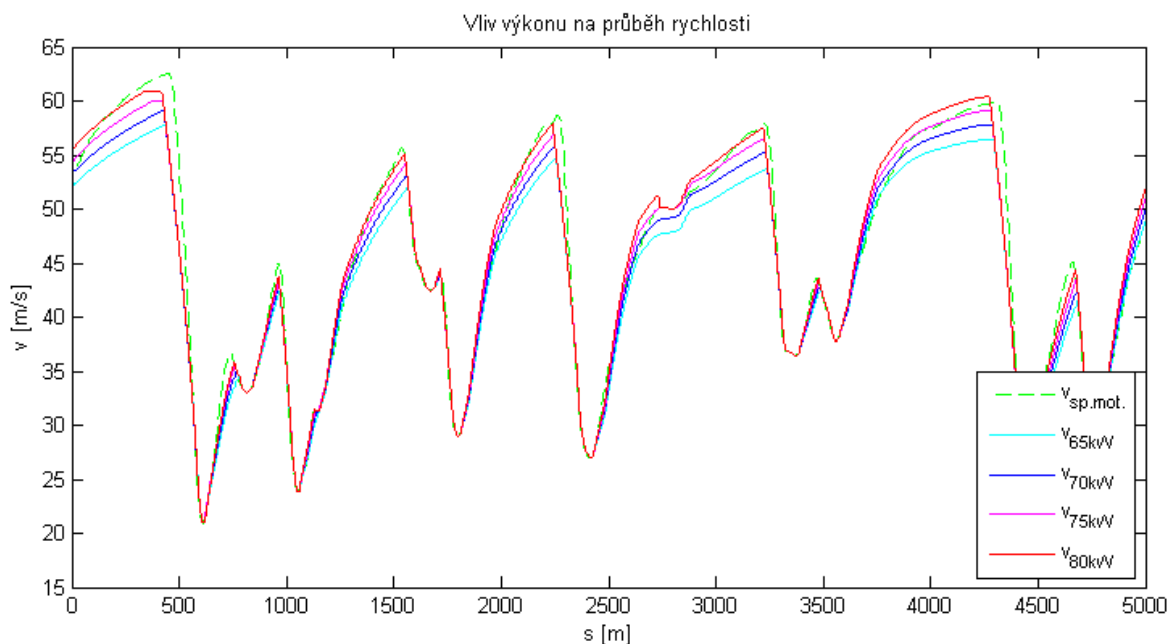
75 kW ($P_{max}=107$ kW),

80 kW ($P_{max}=114$ kW).

V Tab. 5 jsou uvedeny základní parametry jízdy na okruhu Nürburgring při jednotlivých výkonech motoru. Z výsledků vyplývá, že jmenovitý výkon by měl být dostatečně konkurence schopný v rozmezí 70-75 kW. Hodnoty byly nadále porovnány na okruhu Hockenheim (Obr. 24) a okruhu Snetterton (Obr. 25). Při simulaci byla uvažována baterie LiFeYPO_4 [12] o jmenovité kapacitě 12,8 kWh, podrobný popis viz níže.

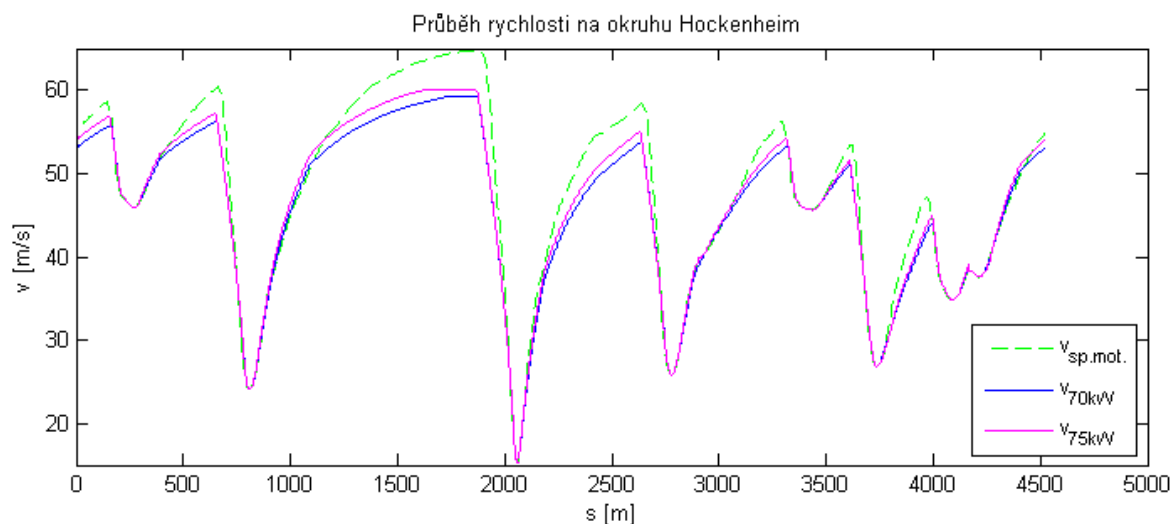
jm. výkon P_N [kW]	● 65	● 70	● 75	● 80
čas kola t [s]	122.00	120.35	118.96	117.86
ujetá vzdálenost [kol]/[m]	4/3984	4/2705	4/1539	4/337
energie/kolo E [kWh]	1.860	1.938	2.011	2.087
celkové ztráty ΔE [%]	37.5	38.4	39.3	40.1
ztráty kap. ΔE_b [%]	23.0	24.2	25.2	26.3
převod p [-]	3.55	3.5	3.45	3.4

Tab. 5 Parametry jízdy na okruhu Nürburgring s různými výkony motoru

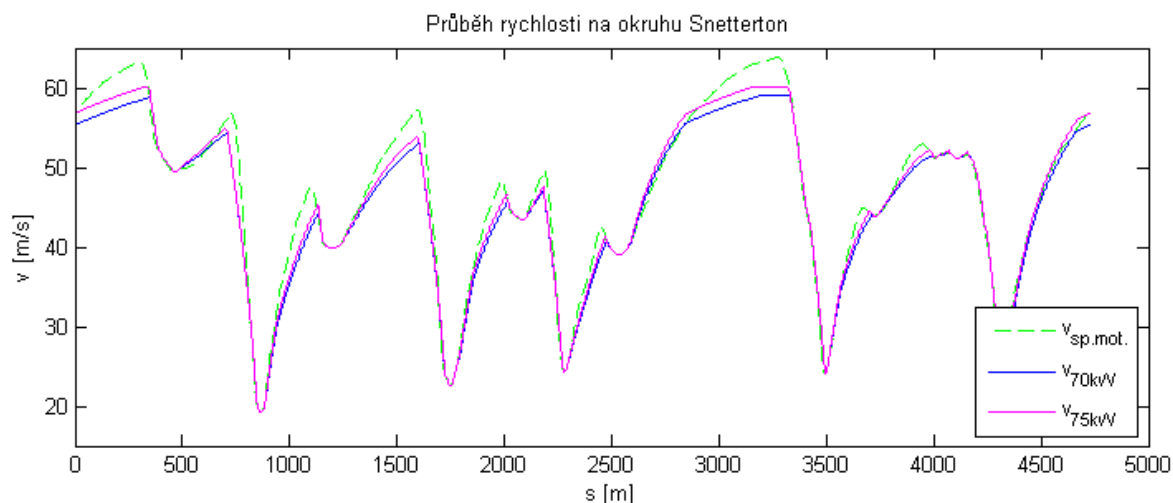


Obr. 23 Vliv výkonu el. motoru na průběh rychlosti (okruh Nürburgring)

Z výsledků simulace jízdy na okruzích Hockenheim a Snetterton je zřejmé, že elektrická motokára dosahuje srovnatelných výkonů v porovnání se závodní motokárou, jako na okruhu Nürburgring. V průběhu rychlosti na okruhu Hockenheim si lze rovněž všimnout na nejdelší rovince dosažení maximálních otáček. Simulacemi bylo ověřeno, že snížením převodového poměru za účelem nepřetržité akcelerace na rovince by nedošlo k zlepšení času na kolo. Srovnání parametrů jízdy jmenovitých výkonů motoru 70 a 75 kW na simulovaných okruzích je provedeno v Tab. 6.



Obr. 24 Porovnání na okruhu Hockenheim



Obr. 25 Porovnání na okruhu Snetterton

okruh	Nürburgring		Hockenheim		Snetterton	
čas kola závodní mot. [s]	118.13		100.5		107.77	
délka okruhu [m]	5148		4522		4724	
jm. výkon P_N [kW]	● 70	● 75	● 70	● 75	● 70	● 75
čas kola t [s]	120.35	118.96	103.97	102.81	110.37	109.12
ujetá vzdálenost [kol]/[m]	4/2705	4/1539	5/279	4/3542	4/4520	4/3625
energie/kolo E [kWh]	1.938	2.011	1.736	1.809	1.778	1.826
celkové ztráty ΔE [%]	38.4	39.3	37.9	38.8	38.0	38.9
ztráty baterie ΔE_b [%]	24.2	25.2	23.9	24.9	23.9	25.0
převod p [-]	3.5	3.45	3.5	3.45	3.5	3.45

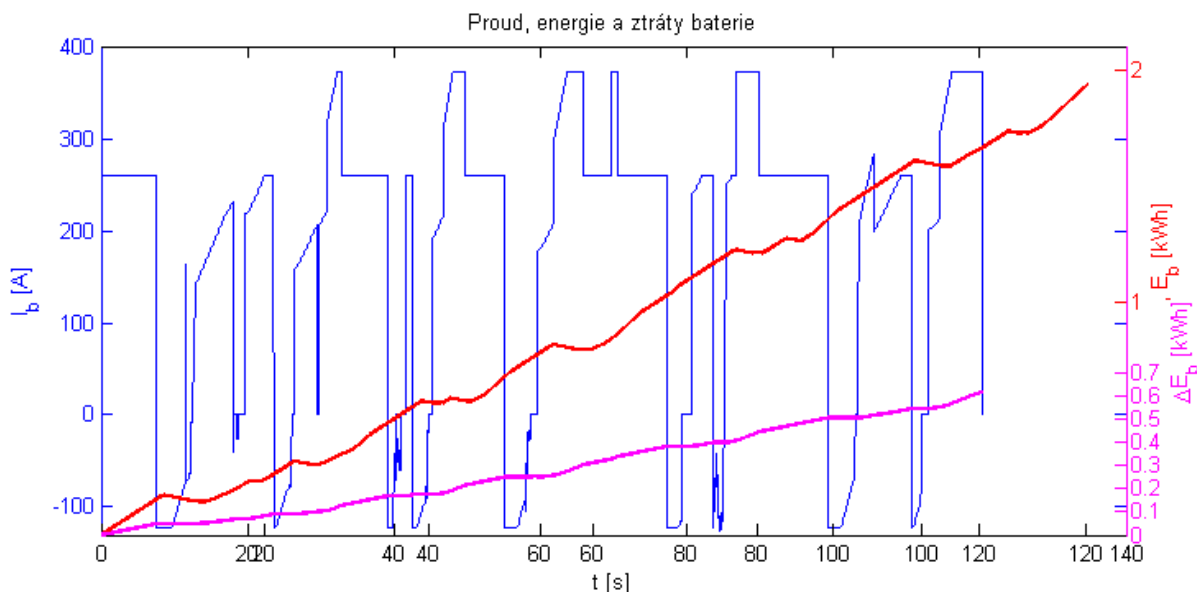
Tab. 6 Srovnání výkonu na okruzích Nürburgring, Hockenheim a Snetterton

Ze simulací zmíněných okruhů byl výsledně zvolen jmenovitý výkon 70 kW, i přes skutečnost, že časy okruhů v simulaci vychází o cca 1-3 sekundy pomalejší než časy motokáry se spalovacím motorem. Důvodem je snaha o snížení vybíjecích proudů baterie a budoucí možné osazení baterií s větší měrnou kapacitou.

4.2 Návrh baterie

Jak již bylo řečeno dříve, současné typy baterií nedosahují tak vysoké měrné kapacity aby bylo možné absolvovat celý závod při zachování konkurenceschopného výkonu. Je proto nutné kapacitu baterie snížit pro docílení přijatelné hmotnosti a ovladatelnosti motokáry. Zároveň musí mít baterie dostatečně velkou kapacitu, aby byla schopna dodávat požadovaný proud.

Za těchto provozních podmínek byla vyhodnocena jako nejlepší varianta baterie o jmenovitém napětí 320 V a jmenovité kapacitě $12,8\text{ kWh}$ tvořená 100 moduly Winnston Battery *WB-LYP40AHA* [12]. Hloubka vybití *DOD (Depth of Discharge)* byla určena s ohledem na přiměřenou životnost a doporučené minimální hodnoty napětí článků na 90% . Výrobce udává maximální špičkový vybíjecí proud $20C$ po dobu 5 s během jedné minuty a proud $3C$ po dobu 15 minut . Maximální nabíjecí proud, za předpokladu sledování teploty baterie, je $3C$. Přesné hodnoty mezních nabíjecích a vybíjecích proudů v závislosti na čase by byly zapotřebí ověřit měřením. Zjištěný průměrný proud baterie během závodu činí $219,3\text{ A}$. Bez přetěžování motoru se průměrný proud sníží na $205,4\text{ A}$, což odpovídá násobku jmenovité kapacity $5,1C$, po dobu necelých 9 minut jízdy, na které vystačí kapacita baterie. Pokud přepočteme proud při přetěžování na výrobcem udávaný interval 5 s , vyjde ekvivalentní špičkový proud $427,6\text{ A}$, tedy $10,7C$. Z hlediska velikosti odebíraného proudu by měla baterie vyhovovat. Průběh proudu energie baterie I_b a ztrát v baterii vlivem nadproudu, při zvoleném jmenovitém výkonu 70 kW , je na Obr. 26.



Obr. 26 Průběh proudu baterie, odebrané energie z baterie a ztrát vlivem nadproudu

V Tab. 7 jsou uvedeny výsledky simulace s články *AMP20MIHDA* společnosti A123 [13]. Kvůli malé dostupnosti informací od výrobce, byla uvažována vybíjecí charakteristika předchozích baterií. Vzhledem k absenci pouzdra byla připočtena hmotnost 15 kg na sestavení modulů. Při následném sestavení baterie 330 V, 39,4 Ah, 13 kWh by hmotnost klesla na 115 kg. Jelikož ale nejsou známy detailnější údaje, byla při modelech uvažována baterie Winston Battery [12].

Dále bylo nasimulováno použití dlouho očekávané produkční verze baterie typu Li-S, které se vyznačují velkou měrnou hustotou. Zvolen byl opět výrobce Winston Battery, model *WB-LSP600AHA* [14]. Článek má jmenovité napětí 1.7 V a váží jen 5,3 kg. Vzhledem k prioritě snížení hmotnosti oproti navýšení dojezdu a také pro možnost srovnání byla sestavena baterie z patnácti těchto článků, tedy 25,5 V, 600 Ah, 15,3 kWh. Vzhledem k plánované životnosti okolo 1500 nabíjecích cyklů byla snížena hloubka vybití na 80 %. Srovnání výsledků jízdy s ostatními články je v Tab. 7, kde je zároveň vypsána i baterie s potřebnou kapacitou pro absolvování celého závodu. Do doby než budou dostupné Li-S baterie, tak vychází nejlépe z uvažovaných baterií A123 složená z článků *AMP20MIHDA* s výše uvedenými parametry.

baterie	LYP 40AH	AMP20	LSP600AH	LSP600AH
jm.kap. baterie E [kWh]	12.8	13	15.3	31.62
čas kola t [s]	120.35	118.63	117.52	121.34
ujetá vzdálenost [kol]/[m]	4/2705	4/3622	4/3820	12/163
energie/kolo E [kWh]	1.938	1.906	1.864	1.879
celkové ztráty ΔE [%]	38.4	38.3	41.7	28.7
ztráty kap. ΔE_b [%]	24.2	24.0	28.0	10.6
převod p [-]	3.5	3.5	3.4	3.6
hmotnost motokáry [kg]	390	355	327	411

Tab. 7 Porovnání baterií LiFeYPO_4 výrobců Winston Battery a A123, s baterií LiS výrobce Winston Battery

Závěr

Na současné motokáře Katedry elektromechaniky a výkonové elektroniky byla provedena dojezdová zkouška za účelem identifikace součinitele aerodynamického odporu a valivého odporu. Byly vypočítány a určeny momenty setrvačnosti, z kterých byl následně určen součinitel rotujících hmot. Tyto koeficienty, společně se změřenou čelní plochou, byly aplikovány při výpočtech jízdních odporů motokáry ve vytvořeném simulačním modelu. Na základě poskytnutých dat ze závodů Superkart byla provedena podrobná analýza jízdy závodní motokáry se spalovacím motorem na okruhu Nürburgring, jejímž cílem bylo ověření přesnosti simulace a nastínění parametrů elektrické motokáry. Následně byla simulována jízda elektrické motokáry na závodním okruhu za účelem návrhu parametrů při zachování konkurenceschopnosti se závodními stroji.

Na základě série provedených simulací byly navrženy následující parametry motokáry. Synchronní motor buzený permanentními magnety s maximálními otáčkami 13500 min^{-1} , jmenovitými otáčkami 9000 min^{-1} , jmenovitým výkonem 70 kW s možností přetížení na výkon 100 kW po dobu 10 s během jedné minuty. Převod otáček motoru na zadní osu motokáry je zvolen na základě nejlepšího, v simulaci dosaženého času na kolo s převodovým poměrem $3,5$. Baterie byla navržena vzhledem k momentálně dostupným technologiím typu LiFeYPO_4 , složená z 200 článků AMP20M1HDA výrobce A123. Baterie se jmenovitým napětím 330 V disponuje jmenovitou kapacitou 13 kWh při hmotnosti 115 kg . Celková hmotnost motokáry s touto baterií by se měla pohybovat okolo 280 kg bez jezdce. S navrženými parametry motokáry se předpokládá ujetí 4 kol na okruhu Nürburgring s časem kola $118,4 \text{ s}$.

Při simulacích elektrické motokáry byl použit součinitel aerodynamického odporu a čelní plocha motokáry odpovídající současné elektrické motokáře. V případě použití aerodynamické kapotáže, používané u Superkart, se předpokládá snížení potřebné energie na jedno kolo o $3,5 \%$ a zlepšení času na kolo přibližně o $0,8$ sekundy.

Dojezd motokáry by bylo možné zvýšit použitím superkapacitorů, které by umožnily lépe využít rekuperační energii. Ze simulací vyplývá, že nevyužitá rekuperační energie, jež baterie není schopna přijmout, činí v maximálních hodnotách 13 Wh při jednom brždění, a 60 Wh během jednoho kola. Při použití superkapacitorů by bylo možné docílit nárůstu dojezdu o necelé 3% .

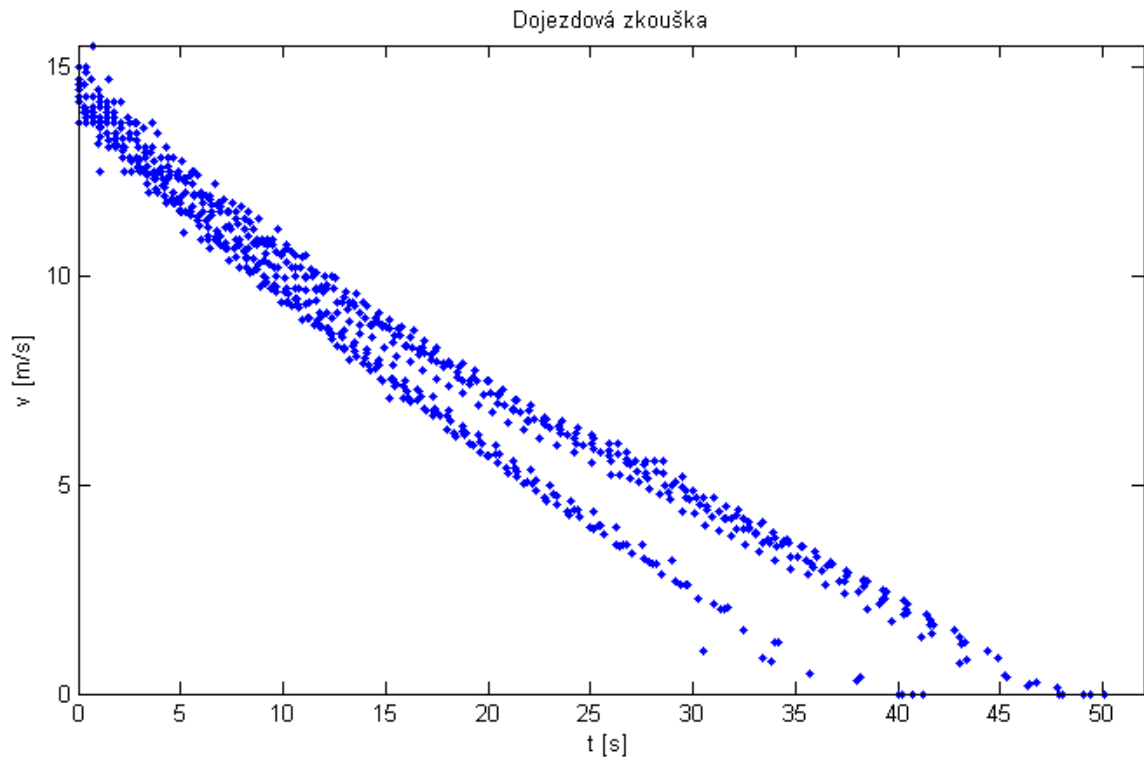
Za předpokladu uvedení na trh lithium sírových baterií, by bylo podle daných

parametrů možné zvýšit dojezd, či snížit váhu motokáry za účelem zvýšení ovladatelnosti. Pro absolvování celého závodu s časem na kolo pod 118 s a odhadovanou přijatelnou váhou 330 kg , by byla zapotřebí měrná kapacita baterie přibližně 385 Wh/kg , tedy dvojnásobek měrné kapacity baterie Li-S, kterou v současnosti prezentuje výrobce Winston Battery. Podle zdroje [15] byla u lithium sírových článků v roce 2013 maximální demonstrovaná materiálová měrná hmotnost 350 Wh/kg , přičemž očekávaným vývojem by měli v roce 2016 komerční články Li-S dosahovat měrné kapacity 400 Wh/kg .

Seznam literatury

- [1] MS KART. MS *Superkart with VM 250 engine* [online]. 2013 [cit.2014-04-06]. Dostupný z: <<http://www.mskart.fi/en/catalogue/ms-superkart-vm-250-engine.html>>
- [2] KEV ZČU. *KEV na kolech* [online]. 2010 [cit. 2014-01-25]. Dostupný z: <<http://kev.zcu.cz/uvodni-stranka/kev-na-kolech.xhtml>>
- [3] Adam Kout. *Závodní vůz* [online]. 2013 [cit. 2014-04-06]. Dostupný z: <<http://www.adamkout.cz/cs/zavodni-vuz/R5-A0/>>
- [4] Stepanek, J.; Bednar, B.; Streit, L.; Elis, L., "Electric kart "FeLis" with LiFeYPO4 batteries," Clean Electrical Power (ICCEP), 2013 International Conference on , vol., no., pp.151,154, 11-13 June 2013
- [5] VLK, F.: *Dynamika motorových vozidel*, 1. vyd. Brno: Nakladatelství a vydavatelství Vlk, Brno, 2000. 434 s. ISBN 80-238-5273-6
- [6] Vykouk, V.: *Aerodynamika a mechanika letu pro piloty závěsných kluzáků*, FEI VŠB-TU; Ostrava, 2002, 93 s
- [7] ČSN 30 0554. Silniční motorová vozidla.: *Dojezdová zkouška silničních motorových vozidel*. Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 1975.
- [8] Nürburgring. *The Grand Prix Track* [online]. 2014 [cit.2014-03-26]. Dostupný z: <<http://www.nuerburgring.de/en/angebote/motor-action/tourist-rides-grand-prix-track/oeffnungszeiten-grandprixstrecke.html>>
- [9] Brabec, P.; Hai Ho, H.; Voženílek, R.. *Simulace průjezdu vozidla zatáčkou*. Liberec, Technická Univerzita v Liberci, Katedra strojů a průmyslové dopravy, 2003, 19s. SM462/2003
- [10] Danzer, J., Šášek, J.: *Elektrická trakce: Řízení vozidel*. 1.vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2007. ISBN 978-80-7043-586-1.
- [11] Jacobs, S.; Hectors, D.; Henrotte, F.; Hafner, M.; Gracia, M., H.; Hameyer, K.; Goes, P., "Magnetic material optimization for hybrid vehicle PMSM drives", World Electric Vehicle Journal (WEVJ), EVS24. Stavanger, 13-16 May 2009. ISSN 2032-6653
- [12] Winston Battery. *WB-LYP40AHA* [online]. 2011 [cit.2014-04-12]. Dostupný z: <http://en.winston-battery.com/index.php/products/power-battery/item/wb-lyp40aha?category_id=176>
- [13] A123 Systems. *AMP20 Lithium Ion Prismatic Cell* [online]. 2013 [cit.2014-04-15]. Dostupný z: <<http://www.a123systems.com/prismatic-cell-amp20.htm>>
- [14] Winston Battery. *WB-LSP600AHA* [online]. 2011 [cit.2014-04-16]. Dostupný z: <http://en.winston-battery.com/index.php/products/power-battery/item/wb-lsp600aha?category_id=183>
- [15] Oxis Energy Ltd.. *Technology Li-S* [online]. 2013 [cit.2014-04-16] Dostupný z: <<http://www.oxisenergy.com/technology/>>

Příloha č. 1



Naměřená data při dojezdové zkoušce