

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY**

**NÁVRH PRESTAVBY KLASICKÉHO AUTOMOBILU NA
ELEKTROMOBIL**

Nekonvenčné pohony automobilov a elektromobilov

Adrian Beke
Oliver Hollý

Obsah

1 Úvod.....	3
2 Výber klasického automobilu.....	3
2.1 Hmotnosť ušetrená odstránením klasického pohonu.....	4
3 Návrh elektrického pohonu a zdroja.....	5
3.1 Výber elektrického pohonu.....	5
3.2 Výber monočlánku.....	6
3.3 Návrh battery packu.....	7
3.4 Určenie približnej spotreby.....	8
3.5 Nabíjanie a životnosť battery packu.....	10
3.6 Mechanické vlastnosti pohonu.....	12
4 Výpočty charakteristických parametrov elektromobilu.....	12
4.1 Výpočet závislosti dojazdu od ustálenej rýchlosti automobilu.....	12
4.2 Výpočet priebehu momentu a výkonu na EMG od rýchlosti.....	14
4.3 Zrýchlenie z 0 na 100 km/h.....	16
5 Záver.....	17
6 Zdroje.....	18
7 Prílohy.....	18

1 Úvod

Táto práca popisuje projekt prestavby nami vybratého klasického automobilu na elektromobil. Prestavba spočíva v nahradení spaľovacieho motora a pohonného mechanizmu elektrickým trakčným motorom s vhodným zdrojom elektrickej energie.

2 Výber klasického automobilu

Prestavbu a návrh elektromobilu budeme implementovať pre spaľovací automobil Mercedes CLS.



Obr. 1 Mercedes CLS

Mercedes CLS

Coast down test

A	172.5	$[N]$
B	2.4	$[Ns/m]$
C	0.26	$[Ns^2/m^2]$

Karoséria

Čelná plocha	2.31	$[m^2]$
cd	0.26	$[-]$

Polomer kolesa	0.33	$[m]$
Hmotnosť	1970	$[kg]$
Hmotnosť motora	204	$[kg]$
Hmotnosť prevodovky	80	$[kg]$

V tabuľkách uvádzame potrebné parametre automobilu [1], ktoré budeme neskôr potrebovať pri návrhu a výpočtoch.

2.1 Hmotnosť ušetrená odstránením klasického pohonu

Prvým krokom pretvorenia klasického automobilu na elektromobil je odstránenie spaľovacieho motoru, nádrže na kvapalné palivo a prevodového mechanizmu.

Tabuľka hmotností nádrže na kvapalné palivo:

Objem nádrže	59 l
Hmotnosť paliva	0.73 kg/l
Hmotnosť prázdnej nádrže	7 kg
Celková hmotnosť plnej nádrže	50 kg

Tabuľka výpočtu hmotnosti automobilu po odstránení pôvodného pohonného systému:

Pôvodná hmotnosť automobilu	1970 kg
Hmotnosť motora	-204 kg
Hmotnosť prevodovky	-80 kg
Hmotnosť plnej nádrže	-50 kg
Nová hmotnosť automobilu	1636 kg

Tabuľka výpočtu hmotnosti k dispozícii pre implementovanie elektrického pohonného systému:

Povolená hmotnosť automobilu	2495 kg
Hmotnosť automobilu bez pohonu	-1636 kg
Hmotnosť posádky	-160 kg
Hmotnosť k dispozícii	699 kg

Ušetrenú hmotnosť určíme až v nasledujúcej kapitole, keď bude hotový návrh battery packu a výber EMG.

3 Návrh elektrického pohonu a zdroja

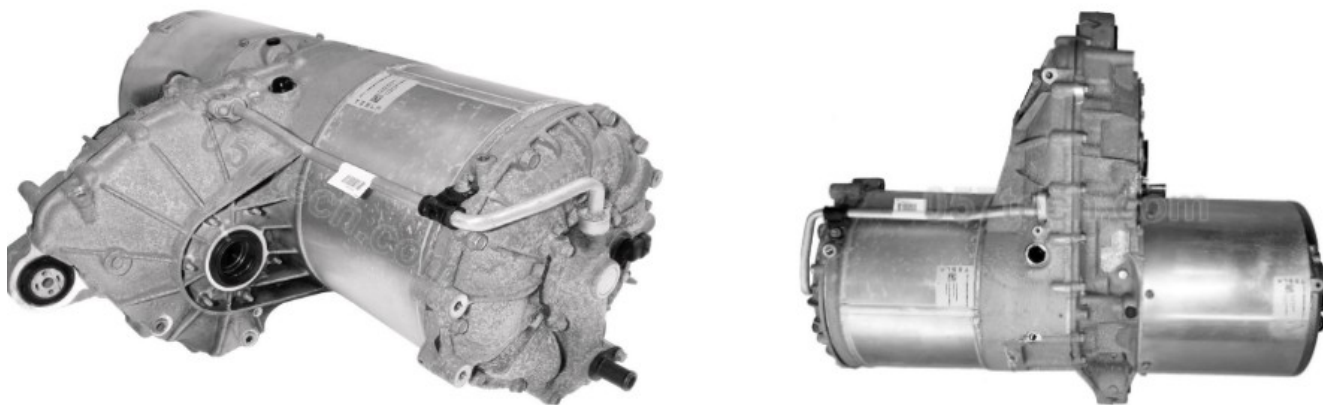
V tejto kapitole si vyberieme vhodný elektrický pohon (EMG) a navrhujeme battery pack pre tento automobil a dohľadáme potrebné parametre.

3.1 Výber elektrického pohonu

Ako elektrický pohon EMG sme vybrali pohon Tesla drive unit [2], čo je trakčný elektromotor s jednostupňovou prevodovkou.

Parametre EMG

U_{max}	404	V DC
I_{max}	950	A DC
P_{nom}	335	kW
T_{nom}	450	Nm
Hmotnosť	132	kg
Otáčky	14900	RPM



Obr. 2 Tesla drive unit

3.2 Výber monočlánku

Základom zdroja elektrickej energie a teda celého battery packu je batériový článok. Vybrali sme Lithium Iónový článok Panasonic NCR18650B [3].

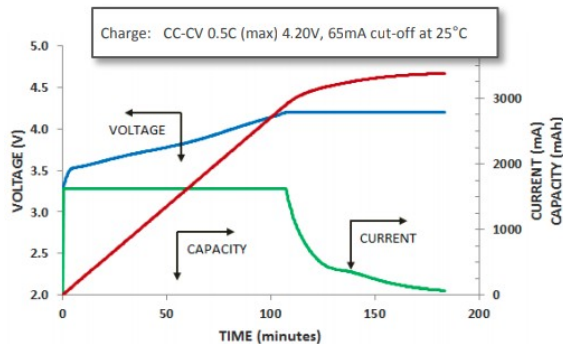
Panasonic NCR15650B

Kapacita	3.2	Ah
U_{nom}	3.6	V
I_{charge}	6.4	A
Hmotnosť	0.0485	kg
Energ. hustota	243	Wh/kg
R_{vnutro}	0.056	Ohm
I_{max}	64.28	A
L	2	-

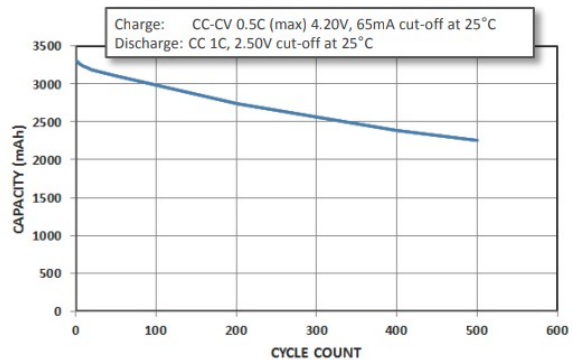
$$I_{max} = U_{nom}/R_{vnuto} = 3.6/0.056 = 64.28 \text{ A}$$

$$I_{charge} = \text{Kapacita} * \text{C-rate} = 3.2 * 2 = 6.4 \text{ A}$$

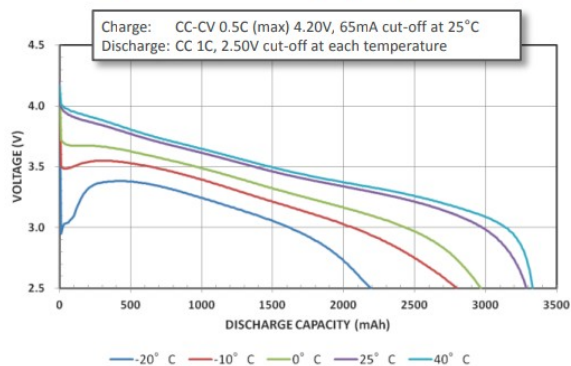
Charge Characteristics



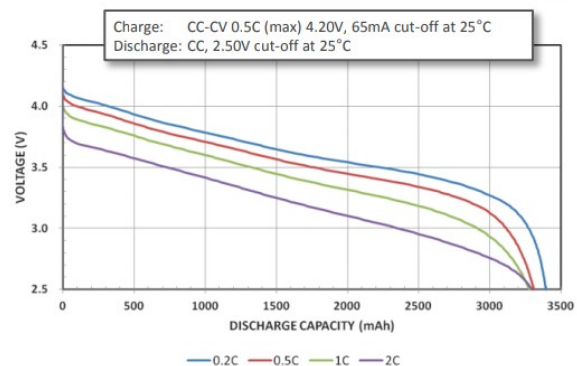
Cycle Life Characteristics



Discharge Characteristics (by temperature)



Discharge Characteristics (by rate of discharge)



Obr. 3 Charakteristiky batériového článku NCR18650B

3.3 Návrh battery packu

Návrh battery packu znamená vhodne zostaviť a navrhnuť konfiguráciu sériovo paralelného zapojenia článkov, resp. modulov do jedného celku – battery packu. Battery pack musí mať vhodné nominálne napätie k nášmu EMG a kapacitu. Pri výpočte sme pripočítali +10% hmotnosti pre každý modul a +20% pre celý battery pack, aby sme znázornili hmotnosť samostatnej konštrukcie pri poskladaní.

Konfigurácia modulu	52p10s
Počet modulov v sérii	10

Návrh battery packu:

	Cells num	Voltage [V]	Capacity [Ah]	Energy [Wh]	Weight [kg]	Specific energy [Wh/kg]
Cell	1	3.6	3.2	11.5	0.0485	237
Module	520	36	166.4	5990	27.5	217.8
Pack	5200	360	166.4	59904	326	183.75

Výpočty realizujeme pre zvolenú životnosť battery packu a zvoleného denného nájazdu km. Preto si zvolíme denný nájazd a počet rokov prevádzky.

S_{day}	65 km	Denný nájazd
$N_{100\%}$	1000	Počet nabíjacích cyklov
N	2190	Počet plánovaných nabíjacích cyklov

Nabíjame každý deň 6 rokov: $N = 365 * 6 = 2190$

Uskladnená energia v battery packu $E = 360V * 3.2Ah * 52p = 360 * 166.4 = 59.9kWh$

Napäťový rozsah battery packu:

$$U_{bDOD0\%} = 2.5V \quad U_{bpDOD0\%} = 250V$$

$$U_{bDOD100\%} = 4.15V \quad U_{bpDOD100\%} = 415V$$

$$N_{seriovo} = 100$$

Teraz skontrolujeme hmotnosti navrhnutých komponentov.

Hmotnosť k dispozícií	699 kg
EMG + prevodovka	-132 kg
Battery pack	-326 kg
Hmotnostná rezerva	241 kg

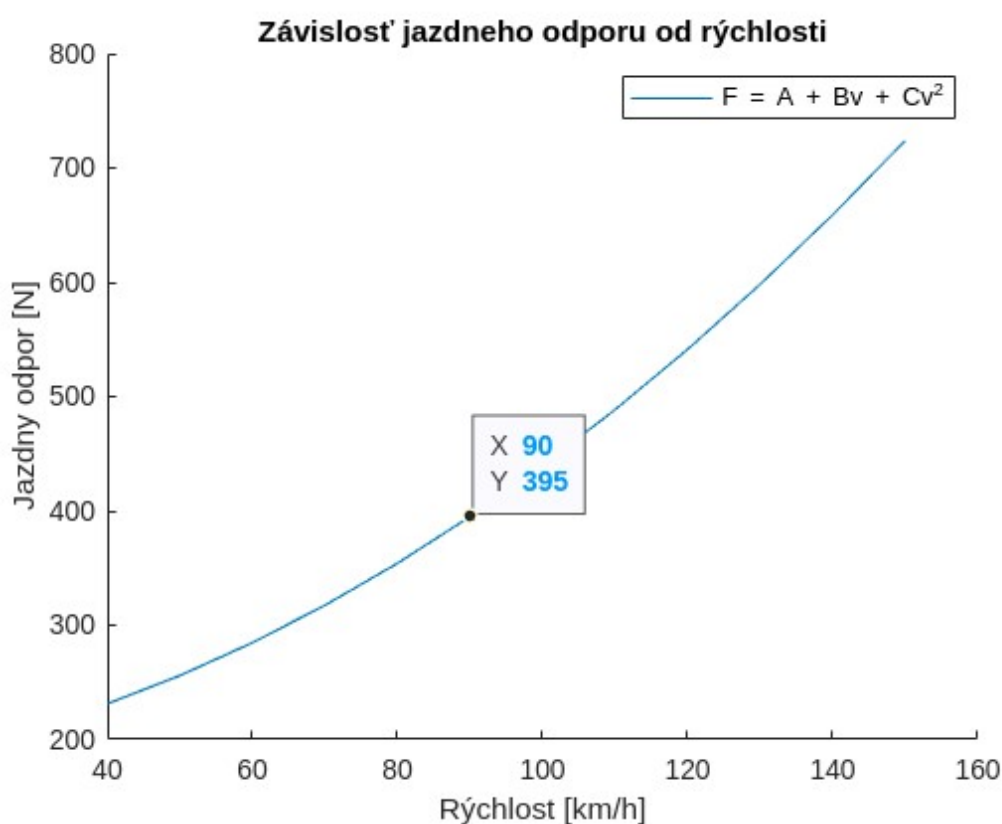
Hmotnostná rezerva vyšla kladná +241 kg, teda sme bezpečne splnili hmotnostné obmedzenia návrhu elektrického pohonu. Avšak oproti automobilu so spaľovacím pohonom, ktorý vážil 1970 kg, nám celková hmotnosť automobilu stúpila na **2094 kg**, čo je o 124 kg viacej.

3.4 Určenie približnej spotreby

V tomto okamihu máme navrhnutý MEG pohon aj zdroj energie, poznáme dynamické vlastnosti vďaka parametrom z coast down test (A, B, C). Preto môžeme teraz určiť závislosť približne energetickej spotreby elektromobilu od ustálenej rýchlosti.

Proti pohybu automobilu pôsobí odpor prostredia F_v , charakterizovaný koeficientami A, B, C.

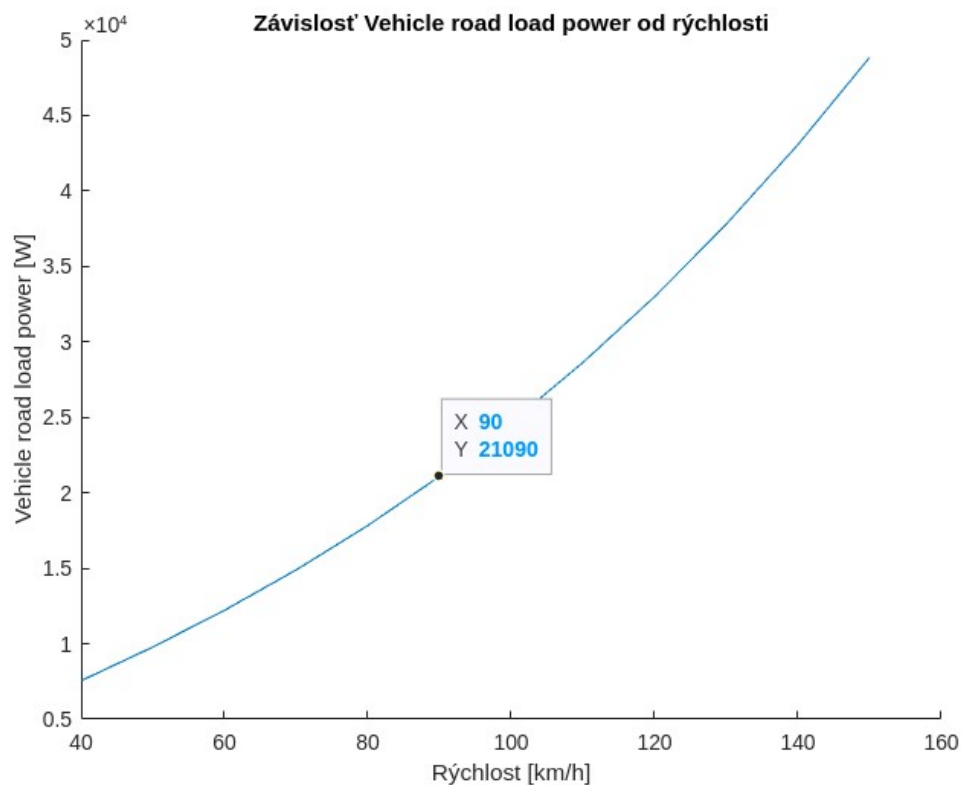
$$F_v = A + Bv + Cv^2 \quad 1 \left[\frac{Wh}{hm} \right] = 3.6 [N]$$



Obr. 4 Priebeh závislosti jazdného odporu od ustálenej rýchlosti automobilu

Na Obr. 4 vidíme priebeh pôsobenia prostredia počas pohybu automobilu, je zrejmé, že exponenciálny nárast je kvôli odporu vzduchu, ktorý sa zväčšuje s druhou mocninou rýchlosti. Naším cieľom je určiť energetickú spotrebu, preto si radšej pôsobenia prostredia vyjadríme cez vehicle read load power P_v .

$$P_v = F_v v = Av + Bv^2 + Cv^3$$



Obr. 5 Priebeh závislosti výkonu jazdného odporu od ustálenej rýchlosti automobilu

Z priebehu na Obr. 5 vieme vyčítať závislosť vehicle road load power od rýchlosti automobilu. Spotreba elektromobilu bude potom

$$E_{km} = \frac{\text{vehicle road load power}}{\text{rýchlosť}} \left[\frac{\text{Wh}}{\text{km}} \right]$$

Rýchlosť [km/h]	Vehicle road load power [kW]	Spotreba [Wh/km]
40	7.5	187
60	12.2	203
80	17.8	225
100	24.6	246
120	33	275
140	43	307

Priemerná spotreba:

$$E_{1km} \text{ average} = 230 \text{ Wh/km}$$

Určili sme priemeru spotrebu nášho elektromobilu 230 Wh/km, s ktorou budeme počítat' v ďalšom návrhu.

3.5 Nabíjanie a životnosť battery packu

Battery pack máme navrhnutý a vieme, že je vhodný z hľadiska nominálneho výkonu pre náš EMG. V tejto kapitole skontrolujeme, či bol návrh vhodný vzhľadom na kapacitu a životnosť batérií. Pri životnosti battery packu hovoríme o dvoch časových horizontoch. Prvý je BOL – beginning of life alebo stav pri výrobe batérií. Druhý horizont je EOL – end of life, to je moment, kedy kapacita batérie klesne na 80% pôvodnej kapacity.

Depth of discharge:

$$DOD = \left(\frac{N_{100} \%}{N} \right)^{1/L} 100 \% = \left(\frac{1000}{2190} \right)^{\frac{1}{2}} 100 = 67.57 \%$$

Energetická spotreba na 1 km:

$$E_{1km} = 230 \text{ Wh/km}$$

Energetická spotreba na jeden deň:

$$E_{daily} = s_{day} * E_{1km} = 65 * 0.230 = 14.95 \text{ kWh}$$

Minimálna potrebná energia v battery packu at beginning of life:

$$E_{BOL} = \frac{E_{daily}}{DOD} = \frac{14.95 \text{ kWh}}{0.67} = 22.3 \text{ kWh}$$

Vidíme, že minimálna potrebná energia battery packu je 22.3 kWh aby sme dosiahli požadovaný denný dojazd 65 km počas šiestich rokov. Nakoľko máme battery pack s energetickou kapacitou 59 kWh, návrh je v poriadku.

Hodnota energie v battery packu at end of life, ak by mal battery pack minimálnu potrebnú energiu:

$$E_{EOL} = 0.8 E_{BOL} = 17.85 \text{ kWh}$$

Teoretické dojazdy budeme počítať už z navrhnutého battery packu:

$$dojazd_{BOL} = \frac{E_{BOL}}{E_{1km}} = \frac{59904 \text{ Wh}}{145 \text{ Wh/km}} = 413 \text{ km}$$

$$dojazd_{EOL} = \frac{E_{EOL}}{E_{1km}} = \frac{59904 \text{ Wh} * 0.8}{145 \text{ Wh/km}} = 330 \text{ km}$$

Stanovíme a skontrolujeme maximálny nabíjací prúd pri vybitom battery packu vrátane strát do tepla:

Potrebné známe parametre:

E_{nom}	59.9 kWh
U_b	3.6 V
$U_{b(nl)}$	2.5 V
U_{bp}	360 V
R_v	0.056 Ohm
N_{serial}	100
$N_{paralel}$	52
N_{total}	520

Vnútročný odpor battery packu:

$$R_{bp} = \frac{N_{serial}}{N_{paralel}} * R_b = \frac{100}{52} * 0.056 = 0.107 \text{ Ohm}$$

Nabíjací výkon zvolíme pre prípad elektrickej inštalácie klasického obytného domu, kedy máme k dispozícii trojfázové napätie po 16 ampér:

$$P_{charge} = U_{ef} * N_{fazy} * I_{istic} = 230 * 3 * 16 = 11 \text{ [kW]}$$

Nominálny (priemerný) nabíjací prúd:

$$I_{charge} = \frac{P_{charge}}{U_{bp}} = \frac{11000}{360} = 30.5 \text{ [A]}$$

Skutočný nabíjací prúd v momente začiatku nabíjania:

$$I_b = \frac{-N_{serial} U_{b(nl)} + \sqrt{\left(\left(N_{serial} U_{b(nl)} \right)^2 - 4 R_{bp} (-P_{charge}) \right)}}{2 R_{bp}}$$

$$I_b = \frac{-100 * 2.5 + \sqrt{\left(100 * 2.5 \right)^2 + 4 * 0.107 * 11000}}{2 * 0.107} = 43.2 \text{ [A]}$$

Teplotné straty pri nabíjaní

$$P_{straty} = R_{bp} I_b^2 = 0.107 * 43.2^2 = 0.199 \text{ kW}$$

Účinnosť nabíjania:

$$U_{bp(ch)} = N_{serial} U_{b(nl)} + R_{bp} I_b = 254.6 \text{ V}$$

$$u_{charge} = \frac{U_{bp|ch} I_{bp} - R_{bp} I_{bp}^2}{U_{bp|ch} I_{bp}} = 0.98$$

3.6 Mechanické vlastnosti pohonu

Zvolili sme si vhodný pevný prevod a mechanickú účinnosť pohonného ústrojenstva a power-trainu. Vychádzame z datasheetu výrobcu EMG [2]

Pevný prevod	9.73
Účinnosť	90%

4 Výpočty charakteristických parametrov elektromobilu

V tejto kapitole budeme počítat charakteristické vlastnosti nášho navrhnutého elektromobilu pri zohľadnení dynamických vlastností prostredia a obmedzení elektrického pohonu.

4.1 Výpočet závislosti dojazdu od ustálenej rýchlosti automobilu

Vypočítame závislosť dojazdu od ustálenej rýchlosti po rovine bez vetra pre náš prerobený elektromobil. Na výpočet využijeme dáta A, B, C z coast down testu. Začíname rovnakým postupom ako pri výpočte spotreby.

Odporová sila prostredia:

$$F_v = A + B * v + C * v^2$$

$$A = 172.5 [N]$$

$$B = 2.4 [Ns/m]$$

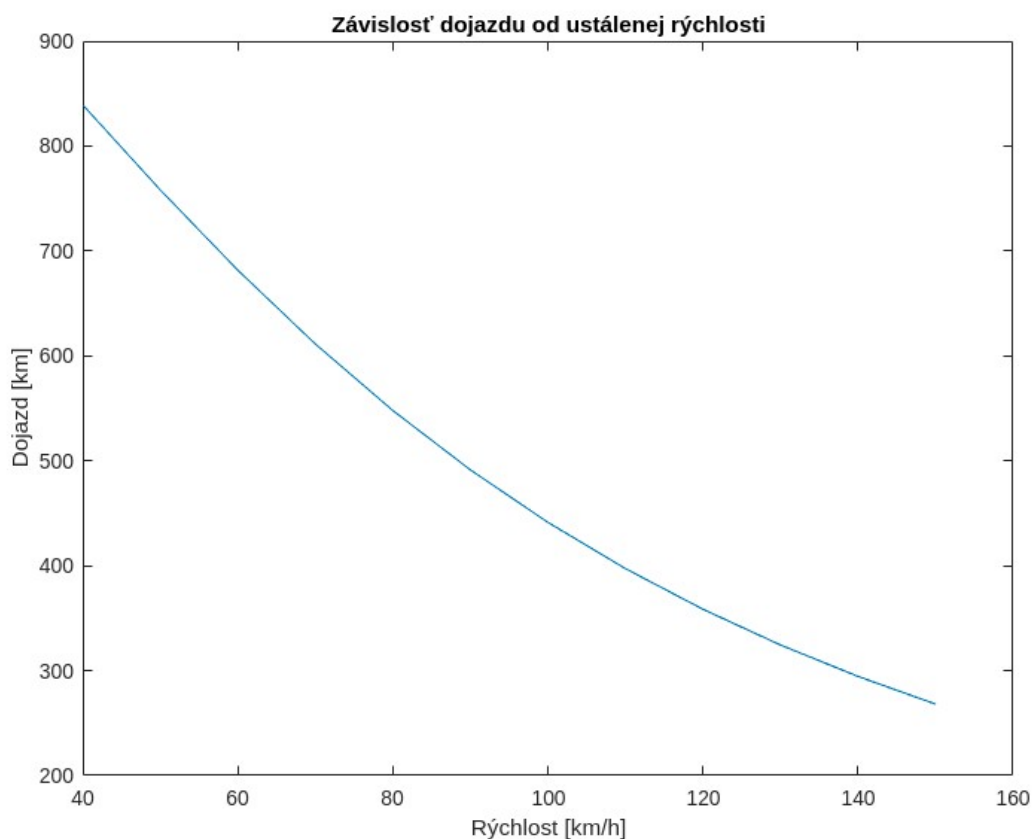
$$C = 0.26 [Ns^2/m^2]$$

$$E = 59.9 kWh$$

$$P_v = F_v * v = A * v + B * v^2 + C * v^3$$

$$P_t = \frac{P_v}{u_{pt}} \quad t = \frac{E}{P_t} \quad s = v * t$$

Implementácia výpočtu a vizualizácie v Matlabe. Zdrojový kód v prílohe práce (dojazd.m).



Obr. 6 Závislosť dojazdu automobilu od ustálenej rýchlosti automobilu.

Na Obr. 6 je priebeh dojazdu automobilu v km, v závislosti na ustálenej rýchlosti automobilu, je zrejmé, že so stúpajúcou rýchlosťou stúpa energetická spotreba ako sme ukázali v kapitole 3.4.

Dojazd v závislosti od ustálenej rýchlosti automobilu s dodatočným odberom HVAC (heating, ventilation, air conditioning)

Teraz si ukážeme ako sa zmení dojazd automobilu ak budeme zohľadňovať prídavnú elektrickú spotrebu na interné systémy ako sú ventilácia, klimatizácia atď. Zvolíme si tento dodatočný výkon P_{HVAC} rovný:

$$P_{HVAC} = 4 \text{ kW}$$

Pre jazdný výkon naďalej platí:

$$P_v = F_v \cdot v = A \cdot v + B \cdot v^2 + C \cdot v^3$$

Výsledný výkon je súčtom:

$$P_{t+aux} = \frac{P_v}{u_{pt}} + P_{HVAC} \quad t = \frac{E}{P_{t+aux}}$$



Obr. 7 Závislosť dojazdu automobilu od ustálenej rýchlosti automobilu + HVAC.

4.2 Výpočet priebehu momentu a výkonu na EMG od rýchlosti

V tejto kapitole budeme sledovať závislosť krútiaceho momentu T a výkonu P trakčných elektromotorov od aktuálnej rýchlosti otáčania.

Menovité hodnoty momentu a výkonu EMG:

$$P_{nom} = 335 \text{ kW}$$

$$T_{nom} = 450 \text{ Nm}$$

Prevodový pomer:

$$i = 9.73$$

Polomer kolesa sme vypočítali na 18 palcový disk s pneumatikou 225/40 R18:

$$r = 0.33 \text{ m}$$

Nominálna uhlová rýchlosť EMG

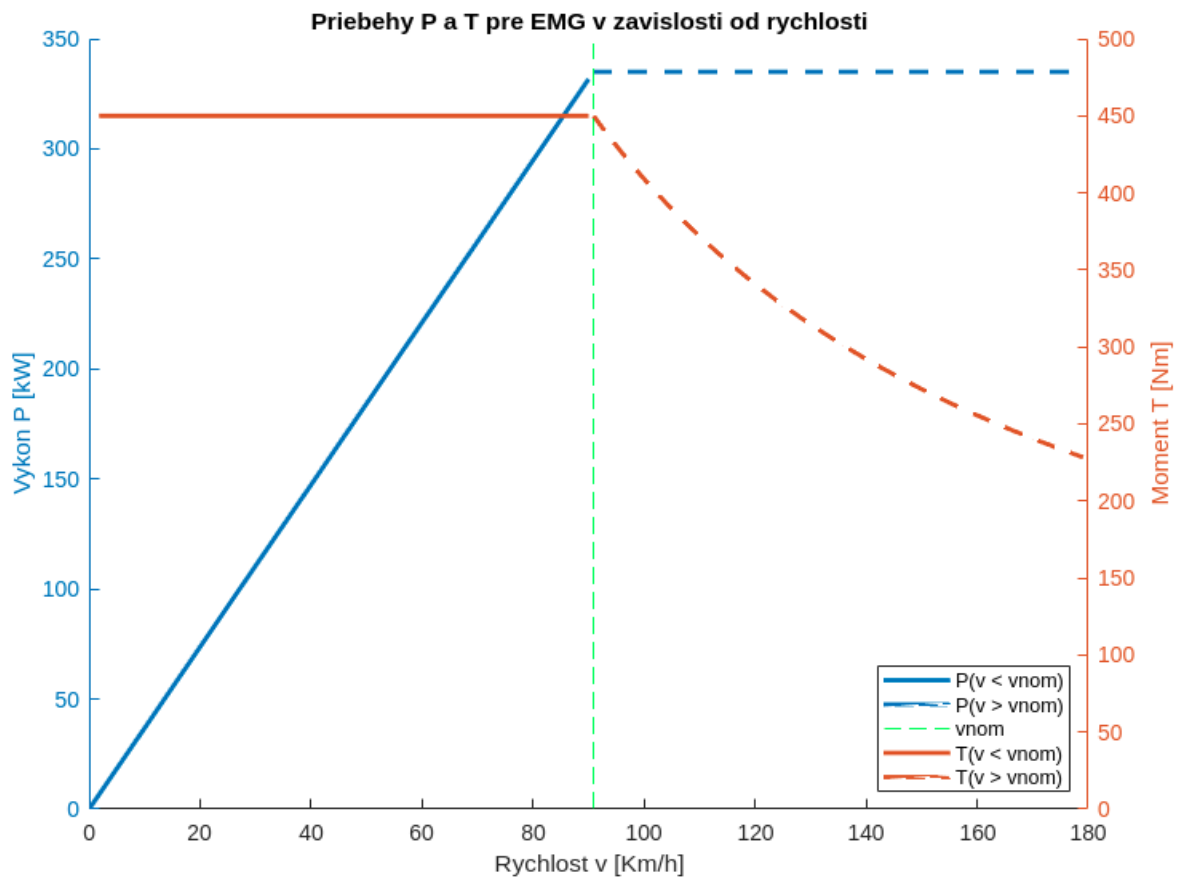
$$\omega_{nom} = \frac{P_{nom}}{T_{nom}} = \frac{335000}{450} = 744.44 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Nominálna dopredná rýchlosť automobilu:

$$v_{nom} = \frac{1}{i} w_{nom} * r = \frac{1}{9.73} * 744.4 * 0.33 = 25.24 \frac{m}{s}$$

$$v_{nom} = 25.8 * 3.6 = 90.6 \frac{km}{h}$$

Implementácia výpočtu a vizualizácie v Matlabe. Zdrojový kód v prílohe práce (PT.m)



Obr. 8 Priebeh P a T pre EMG v závislosti od rýchlosti

Zistili sme, že nominálna dopredná rýchlosť automobilu ktorá závisí na parametroch trakčného elektromotoru je 90 km/h. Pri tejto rýchlosti sa menia priebehy krútiaceho momentu a výkonu EMG ako je znázornené na Obr. 8. Trakčné elektromotory si držia svoj menovitý krútiaci moment pri malých rýchlostiach – rozbehu, čo je veľmi žiadaná vlastnosť.

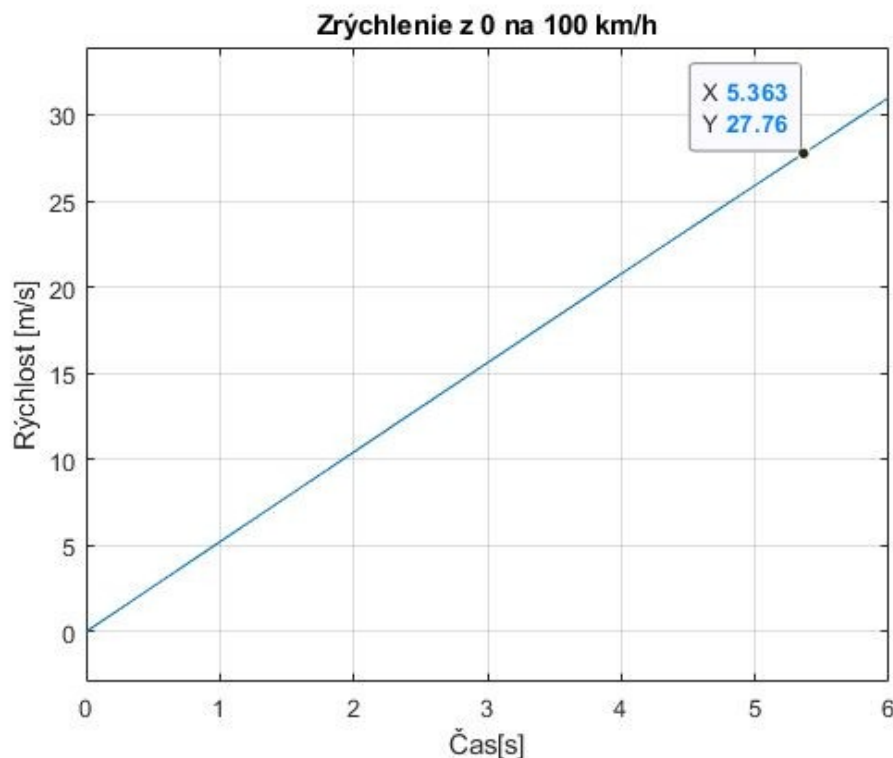
4.3 Zrýchlenie z 0 na 100 km/h

Teraz zistíme čas zrýchlenia z 0 na 100 km a spotrebovanú energiu pri tomto deji pre náš elektromobil.

Využijeme zápis pre diferenciálnu rovnicu časovej zmeny rýchlosti s uvažovaním jazdných odporov:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{T_t n_g \eta_g - r(A + mg \sin \theta + Bv + Cv^2)}{\left(mr + \frac{J_{náp.}}{r}\right)}$$

Implementácia výpočtu a vizualizácie v Matlabe. Zdrojový kód v prílohe práce (z0na100.m)



Obr. 9 Časový priebeh rýchlosti automobilu pri akcelerácii

Na Obr. 9 je časový priebeh rýchlostí automobilu pri akcelerácii, výstup je numerické riešenie diferenciálnej rovnice. Zaujímá nás čas, kedy vozidlo dosiahne konkrétnu rýchlosť 100 km/h = 27.76 m/s.

$$v_{end} = 100 \left[\frac{km}{h} \right] = 27.76 \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$t_{end} = 5.36 \text{ s}$$

Využitím zjednodušeného výpočtu bez uvažovania jazdných odporov

Overíme predošlé numerické / grafické riešenie jednoduchším výpočtom bez zohľadnenia jazdných odporov. Očakávame skoršie dosiahnutie požadovanej rýchlosti.

$$t_{end} = \frac{mr}{n_g u_g T_{nom}} \frac{(v_{end}^2 + v_{nom}^2)}{2 v_{nom}}$$

$$t_{end} = \frac{2245 * 0.33}{9.73 * 0.9 * 450} \frac{(27.76^2 + 25.24^2)}{2 * 25.24} = 5.25 [s]$$

Čas zrýchlenia z 0 na 100 km/h

S uvažovaním jazdných odporov	5.36 s
Bez uvažovania jazdných odporov	5.25 s

Overenie súhlasí s očakávaním, môžeme pokračovať.

Výpočet spotrebovanej energie pri zrýchľovaní z 0 na 100 km/h:

$$t_{nom} = \frac{m r^2 P_{nom}}{n_g^2 u_g T_{nom}^2} = \frac{2245 * 0.33^2 * 335000}{9.73^2 * 0.9 * 450^2} = 4.76 [s]$$

$$E = \frac{1}{2} P_{nom} t_{nom} + P_{nom} (t_{end} - t_{nom}) = \frac{1}{2} * 335000 * 4.76 + 335000 * (5.36 - 4.76) = 998300 [Ws]$$

$$E = 998300 [Ws] = 277 [Wh] = 0.277 [kWh]$$

Náš elektromobil spotrebuje 277 Wh elektrickej energie pri rozbehu z 0 na 100 km/h za čas 5.36 s.

5 Záver

Cieľom projektu bol koncepčný návrh prerobenia klasického automobilu na elektromobil. Vybrali sme si automobil Mercedes CLS, navrhli sme vhodný EMG pohon a battery pack. Battery pack bol v prvom kroku dimenzovaný na výkonové požiadavky EMG, neskôr sme overili návrh vzhľadom na životnosť battery packu. Pričom plánovaná prevádzka EV bola každodenný nájazd 65 km počas šiestich rokov. Sledovali sme závislosť dojazdu elektromobilu a spotrebu od ustálenej rýchlosti vozidla.

6 Zdroje

- [1] Mercedes CLS, dostupné online: <https://www.daimler.com/documents/innovation/other/cls-als-erstes-mercedes-modell-nach-wltp-geprueft-en.pdf>
- [2] Tesla drive unit, dostupné online: https://hsrmotors.com/products/driveunits/large/_base?fbclid=IwAR1E1Ny7_uGNbeSTRJRdltR0WGHNDCLD8aiWff4574F3wx_B9HqIw5D9WdI
- [3] Panasonic NCR18650B, dostupné online: https://stealthev.com/wp-content/uploads/2019/06/Tesla-Module-Spec-Sheet.pdf?fbclid=IwAR20222E8oKx1_HvBGD3ZuTH8sdARZeeun911BJHqrkd25pmyU9rltpGkv0

7 Prílohy

Zdrojové súbory numerických výpočtov a vizualizácií v prostredí Matlab.