

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

**NÁVRH TRAKČNÉHO SYSTÉMU BATÉRIOVÉHO
ELEKTROMOBILU**

Nekonvenčné pohony automobilov a elektromobilov

Bc. Oliver Hollý

Obsah

1	Úvod.....	2
2	Výber a parametre analyzovaného vozidla	3
3	Generovanie a výber jazdného cyklu	3
4	Návrh elektrického trakčného pohonu a zdroja energie.....	5
4.1	Úprava vozidla odstránením spaľovacieho pohonu.....	5
4.2	Simulácia jazdného cyklu a výpočet potrebného výkonu.....	6
4.2.1	Výpočet odporových síl pôsobiacich proti pohybu vozidla.....	6
4.2.2	Simulácia síl pôsobiacich na kolesách počas jazdného cyklu.....	8
4.2.3	Výpočet spotrebovanej a rekuperovanej energie	9
4.3	Výber reálneho elektromotoru pre vozidlo	12
4.4	Návrh battery packu pre elektromobil	14
4.5	Simulácia a výpočet zmeny spotreby v rôznych stúpaniach	17
5	Návrh zdroja energie pomocou palivového článku PEMFC	21
5.1	Výpočet zmeny hmotnosti vozidla po implementovaní PEMFC	22
6	Zhodnotenie a záver	23
7	Zdroje.....	24
8	Prílohy.....	24

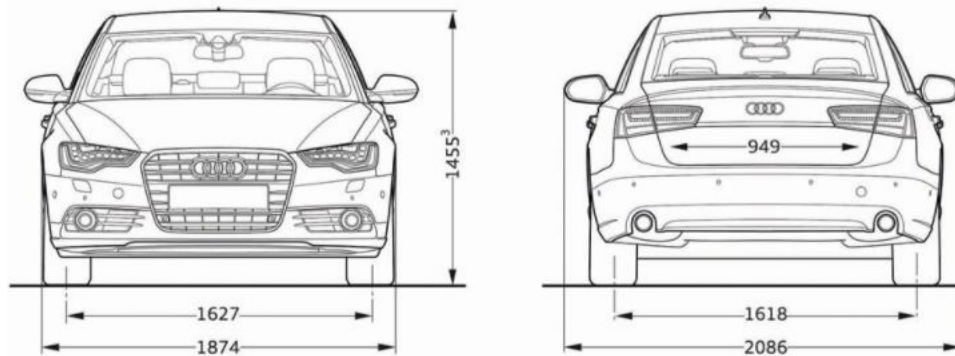
1 Úvod

Táto práca popisuje návrh klasického osobného automobilu na elektromobil a analýzu elektrických a jazdných vlastností počas dynamického pohybu vozidla. Prestavba spočíva v nahradení spaľovacieho motora a pohonného mechanizmu elektrickým trakčným motorom s vhodným zdrojom elektrickej energie.

2 Výber a parametre analyzovaného vozidla

Návrh trakčného systému budeme navrhovať pre parametre klasického osobného automobilu, použijem primerané fyzikálne hodnoty vzťahujúce sa na osobný druh automobilu.

Pre lepšiu predstavu pri práci na projekte sa budem odkazovať na automobil Audi A6 ročník 2012.



Obrázok 1. Rozmery analyzovaného vozidla [1].

Tabuľka 1. Parametre vozidla

Parameter	Značka	Hodnota	Jednotka	Popis
Hmotnosť vozidla	m0	1700	kg	Celková hmotnosť
Front dimensions		1874x1455	mm	
Drag koeficient	Cx	0.26	-	Koeficient odporu vzduchu. [2]
Čelná plocha	Sx	2.3	m ²	Zdroj [3]
Polomer kolies	r	16	inch	Zdroj [5] 205/55R 16 85 T
Hmotnosť motora	mm	150	kg	
Hmotnosť prevodovky	mp	75	kg	

Tabuľka 2. Fyzikálne parametre prostredia

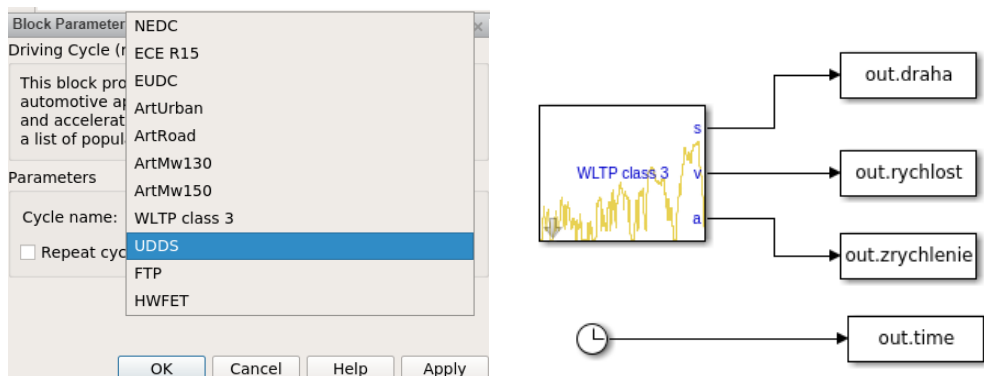
Parameter	Značka	Hodnota	Jednotka	Popis
Merná hmotnosť vzduchu	pm	1.25	kg/m ³	
Koeficient valivého odporu	fvo	0.025	-	
Súčiniteľ rotujúcich hmotností	delta	1.05	-	Moment zotrvačnosti kolies, atď.

V tabuľkách Tabuľka 1 a Tabuľka 2 uvádzam potrebné parametre automobilu [1] a ďalšie fyzikálne vlastnosti, ktoré budeme neskôr potrebovať pri návrhu a výpočtoch. Väčšinu potrebných parametrov potrebných na simuláciu sa mi podarilo nájsť na internete a uvádzam k nim zdrojové odkazy. Ďalšie vypočítané parametre popíšem neskorej pri ukážke zdrojového kódu.

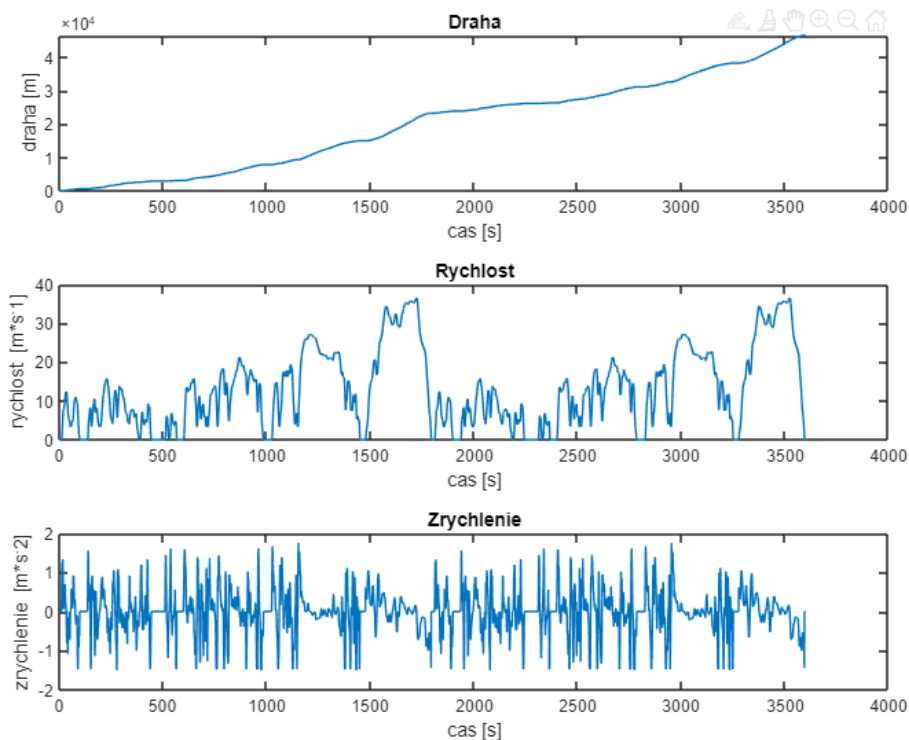
3 Generovanie a výber jazdného cyklu

V tejto kapitole vykonáme príkladnú simuláciu a generovanie jazdného cyklu pre automobil. V reálnych podmienkach jazdný cyklus predstavuje veľmi variabilný a nedeterministický proces. Pri ďalších analýzach a návrhoch by sme chceli navrhnuť trakčný systém na základe reálnych požiadaviek.

Aby sme nemuseli aproximovať jazdný cyklus (závislosť dráhy, rýchlosti a zrýchľovania automobilu na čase) použijeme **Simulink Driving Cycle block** [6], ktorý ponúka viacero rozličných jazdných cyklov používaných pre analýzu jazdy z hľadiska emisií, dojazdu a spotrebovanej energie. Napríklad cyklus WLTP class 3 vyzerá nasledovne:



Obrázok 2. Simulink schéma demo simulácie WLTP jazdného cyklu



Obrázok 3. Jazdný cyklus WLPT class 3

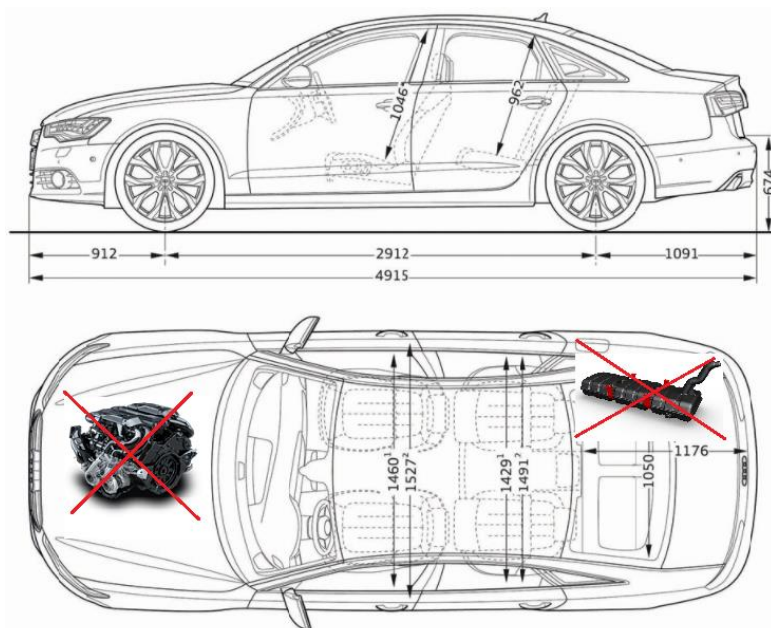
Na Obrázok 2 je printscreen zo simulačného modelu, kde naľavo je vidieť možnosti výberu jazdného cyklu. Obrázok 3 ilustruje už samotný jazdný cyklus reprezentovaný dátami v troch grafoch. V ďalších simuláciách budem vychádzať práve z jazdného cyklu WLPT class 3.

4 Návrh elektrického trakčného pohonu a zdroja energie

Teraz pristúpim k návrhu elektrického trakčného systému a zdroja elektrickej energie, ktorý implementujem na vybraný automobil z kapitoly 2 Výber a parametre analyzovaného vozidla. Budem sa snažiť zachovať fyzikálne a bezpečnostné obmedzenia pri nahradení funkčných komponentov. Pri výbere elektromotora a battery packu budem zachovávať maximálnu nosnosť automobilu.

4.1 Úprava vozidla odstránením spaľovacieho pohonu

V tejto kapitole sa zameriame na odstránenie spaľovacieho motoru, nádrže na palivo a prevodového mechanizmu.



Obrázok 4. Ilustračný obrázok priestorového rozmiestnenia odstránených komponentov

Tabuľka 3. Výpočet hmotnosti plnej palivovej nádrže nádrže

Parameter	Hodnota	Jednotka	Popis
Objem nádrže	65	l	
Hmotnosť paliva	0.73	kg/l	
Hmotnosť prázdnej nádrže	10	kg	
Celková hmotnosť plnej nádrže	58	kg	

Tabuľka 4. Výpočet hmotnosti vozidla po odstránení spaľovacieho pohonu

Parameter	Hodnota	Jednotka	Popis
Pôvodná hmotnosť automobilu	1700	kg	
Hmotnosť motora	-150	kg	
Hmotnosť prevodovky	-75	kg	
Hmotnosť plnej nádrže	-58	kg	
Nová hmotnosť automobilu	1417	kg	

Na Obrázok 4 sú označené hlavné odstránené komponenty, je dôležité aby pri návrhu dbali aj na rozmiestnenie komponentov a tak definovanie ťažiska vozidla.

Tabuľka 5. Výpočet hmotnosti k dispozícii pre implementovanie elektrického pohonu

Parameter	Hodnota	Jednotka	Popis
Max. hmotnosť nákladu	560	kg	Zdroj [4]
Povolená hmotnosť automobilu	2260	kg	Pôvodná hmotnosť + max. nákladu
Hmotnosť automobilu bez pohonu	-1417	kg	
Hmotnosť posádky	-300	kg	
Hmotnosť k dispozícii	543	kg	

Cieľom tejto podkapitoly bolo získať lepšiu predstavu o hmotnostných možnostiach návrhu elektrického pohonu. Navyše musíme navrhnúť odhad hmotnosti vozidla s elektrickým trakčným pohonom. Podľa Tabuľka 5 vidíme, že na zachovanie bezpečnej prevádzky vzhľadom na mechanický dizajn osobného automobilu máme k dispozícii takmer 550 kg, ktoré môžeme využiť na implementovanie elektromotora a battery packu.

Ak by sme navrhli trakčný systém s hmotnosťou 550 kg, výsledná hmotnosť vozidla by bola $1417 + 550 = 1967$ kg. Pre istotu navrhujem nechať si bezpečnostnú a výkonovú rezervu a počítať potrebný výkon elektro pohonu automobilu s hmotnosťou **1800 kg**.

4.2 Simulácia jazdného cyklu a výpočet potrebného výkonu

Predtým ako pristúpime k návrhu a výberu trakčného systému musíme poznať približný potrebný výkon pohonu. V predchádzajúcej kapitole sme určili hmotnosť analyzovaného automobilu rovnú 1800 kg. Navrhovaná hmotnosť vozidla 1800 kg je o 100 kg viacej ako mal pôvodný automobil so spaľovacím motorom, čo je ale pochopiteľné, nakoľko teoretická „energetická hustota“ alebo presnejšie pomer dojazdu/výkonu ku hmotnosti spaľovacieho trakčného systému a elektrického je rozdielny.

4.2.1 Výpočet odporových síl pôsobiacich proti pohybu vozidla

Pri výpočte síl pôsobiacich proti pohybu automobilu prenášaných pneumatikou na vozovku budeme uvažovať štyri hlavné zložky: odpor vzduchu, odpor valenia pneumatiky, zotrvačný odpor a odpor do stúpania.

Pre **odpor vzduchu** platí známy vzťah:

$$O_{vzd} = \frac{1}{2} * \rho * S_x * C_x * v^2$$

Kde v je rýchlosť vozidla, ostatné označenia parametrov a ich hodnoty z rovnice sú v Tabuľka 1 a Tabuľka 2.

Odpor valenia pneumatiky vypočítame

$$O_f = m * g * f_{vo}$$

Kde m je hmotnosť automobilu, g je gravitačné zrýchlenie a f_{vo} koeficient valivého odporu.

Odpor valenia je závislý od takzvaného dynamického polomeru kolesa, čo je skutočná vzdialenosť osi otáčania kolesa od vozovky a počas jazdy sa nerovná polomeru pneumatiky v statickom (a nezaťaženom) stave. Na zmenu vplýva hmotnosť vozidla, odstredivá sila otáčania, pohyb vozidla (deformácia valením a trením, brzdné hnacie sily) a navyše tepelné vplyvy vzduchu v pneumatike. Ako vyplýva z popisu dynamický polomer je ťažko určiť presne, preto sa nepoužíva teoretický výpočet ale zaužíval sa koeficient valivého odporu f_{vo} .

Pre zaujímavosť uvediem výpočet teoretického dynamického polomeru pneumatiky r_{dyn} . Pre našu pneumatiku 205/55R 16 85 T platí:



Parameter	Značka	Hodnota	Jednotka
Šírka pneumatiky	w_p	205	mm
Výška profilu	h_p	55	%
Konštrukcia plášt'a (radiálna)		R	-
Priemer ráfikov	d_r	16	Inch (palec)
Index nosnosti		85	-
Kategória rýchlosti		T	-

Teraz keď poznáme parametre pneumatiky, môžeme vyjadriť vzťah pre dynamický polomer:

$$r_{dyn} = \frac{1}{2} * d_r * 0.0254 + w_p * h_p$$

Konštanta 0.0254 vo vzťahu vyjadruje prepočet z palcov na metre. Po vyčíslení dostávame:

$$r_{dyn} = \frac{1}{2} * 16 * 0.0254 + 0.205 * 0.55$$

$$r_{dyn} = 0.316 \text{ m}$$

Teoretický výpočet koeficientu valivého odporu C_r vyjadríme pomocou získaného dynamického polomeru:

$$C_r = \frac{ep}{r_{dyn}}$$

Kde ep je ďalší teoretický parameter, tentoraz predstavujúci rameno valivého odporu prejavovaný pri deformácií pneumatiky. V prípade deformácie gumenej pneumatiky o asfalt, normované tabuľky uvádzajú hodnotu pre ep v rozmedzí 2,5 ÷ 4,5 mm. Po vyčíslení:

$$C_r = \frac{0.0045}{0.316}$$

$$C_r = 0.0142$$

Teoretickú hodnotu koeficientu valivého odporu $f_{vo} = 0.025$ je takmer dvojnásobne väčšia pre náš prípad, preto budeme v ďalších analýzach vychádzať z našich výpočtov $C_r = 0.0142$.

Zotrvačný odpor proti pohybu automobilu vypočítame ak reakciu zrýchlenia na hmotnosť podľa Netonového zákona:

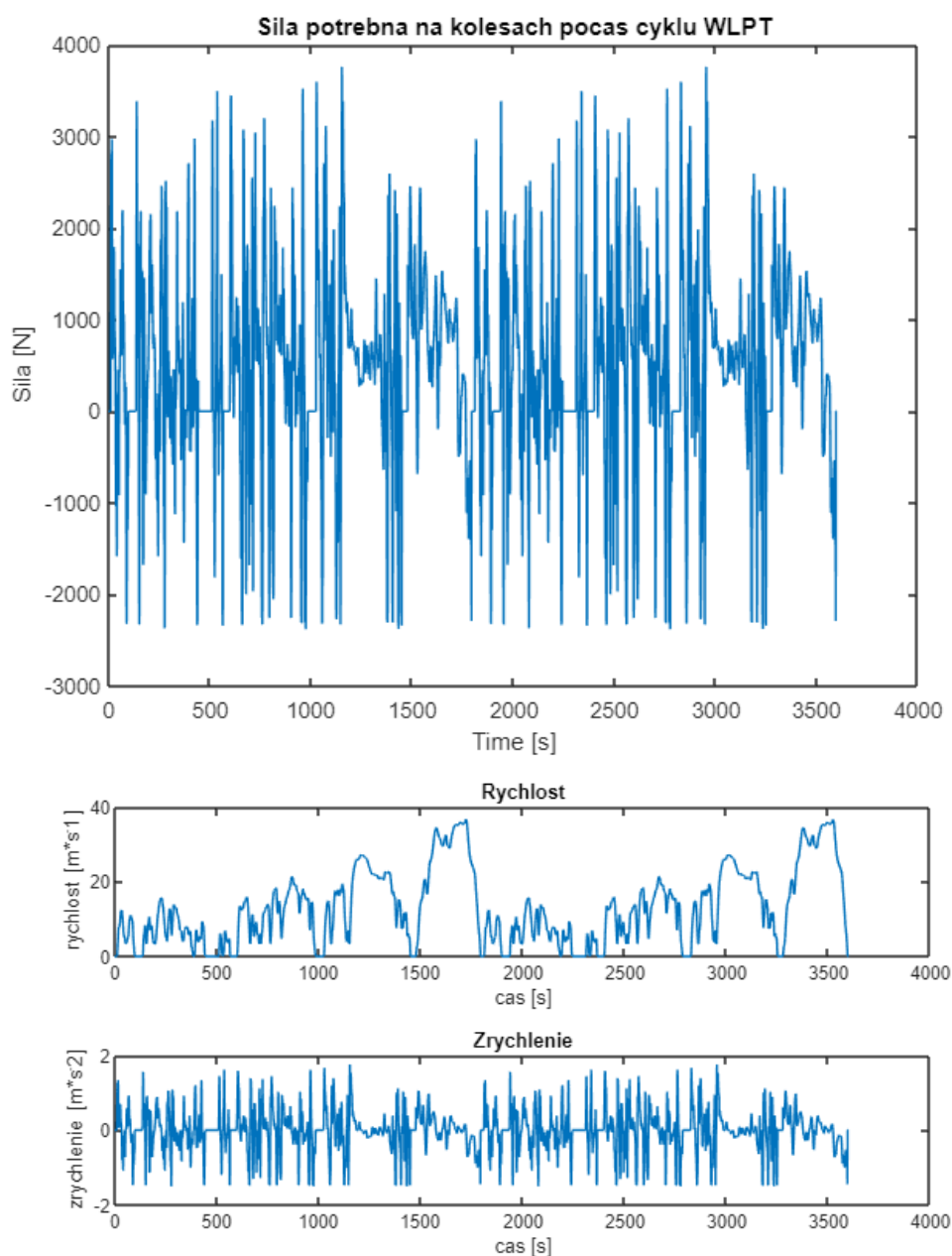
$$F_a = m * a * \text{delta}$$

Kde parameter delta vyjadruje súčiniteľ vplyvu rotujúcich hmotností, napríklad kvôli rotovaniu kolies, kľukových hriadeľov a ďalších rotujúcich súčastí automobilu.

4.2.2 Simulácia síl pôsobiacich na kolesách počas jazdného cyklu

Teraz pristúpime k simulácii určenia grafického priebehu síl prenášaných pneumatikami počas vybraného jazdného cyklu v kapitole 3 Generovanie a výber jazdného cyklu.

Vozidlo bude v tomto jazdnom cykle musieť zrýchľovať a spomaľovať pričom naň budú pôsobiť odporové sily, ktoré budú pôsobiť proti pohybu. Avšak tieto odporové sily nebudú dostatočne silné aby dokázali vozidlo v určitých časových okamžikoch jazdného cyklu zastaviť, preto budeme musieť vygenerovať brzdnú silu, ktorá bude v priebehu reprezentovaná zápornými hodnotami. Je dôležité si uvedomiť, že **vozidlo dokáže rekuperovať elektrickú energiu iba v prípade aktívneho brzdenia**.



Obrázok 5. Priebeh trakčnej sily potrebnej na kolesách počas jazdného cyklu

Zdrojový kód výpočtu priebehu trakčných síl zo simulácie:

```
fvo = 0.025; % Koeficient valiveho odporu
pm = 1.25; % Merna hnotnost vzduchu
delta =1.05; %Sucinitel vplyvu rotujucich hmot

Ovzd = 0.5*pm*Sx*Cx*ans.rychlost.^2; % Odpor vzduchu
Of = m*g*fvo; % Odpor valenia pneumatiky
Fa=m*ans.zrychlenie*delta; % Zotravačný odpor
F=[]; % Vysledna sila posobiaca na pneumatiku

for i=1:1:length(ans.zrychlenie)
    if ans.rychlost(i) > 0
        F(i)=Of+Ovzd(i)+Fa(i);
    else
        F(i)=0;
    end
end
```

Na Obrázok 5. Priebeh trakčnej sily potrebnej na kolesách počas jazdného cyklu je simulovaný grafický priebeh prenášaných jazdných síl pneumatikou na vozovku v jednotlivých časových okamžikoch. Vidíme, že v tomto jazdnom cykle bolo nutné často prudko brzdiť, čo je pre náš projekt vhodné, nakoľko sa budeme zaoberať rekuperáciou energie.

Ďalšiu vec, čo si môžeme všimnúť na grafe je, aké maxima nadobúda trakčná (kladná) a brzdná (záporná) sila. Pre trakčnú silu to je približne 3700 N a pri brzdnnej sile 2300 N. Je zaujímavé, že tieto maximá nie sú pre oba smery pôsobenia sily rovnaké. Pravdepodobne to bude súvisieť s nastavením elektronických podporných systémov. Konkrétne ASR pri rozbehu a akcelerácií a ABS pri brzdení. Pre zachovanie adhézných obmedzení by malo platiť, že ak je pri trakcii možné preniesť 3700N na vozovku bez sklzu, malo by sa dať rovnakou silou brzdiť. Na druhej strane, je logické, že systém ABS je nastavený bezpečnejšie voči sklzu ako ASR.

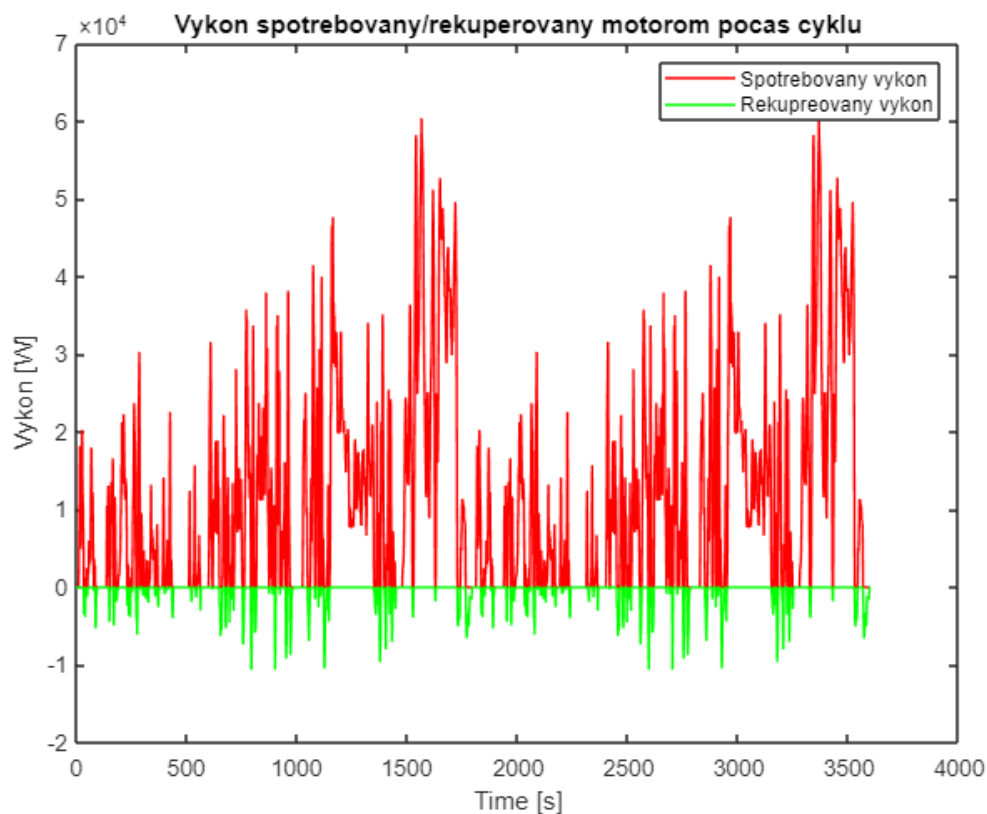
4.2.3 Výpočet spotrebovanej a rekuperovanej energie

V tejto kapitole budeme analyzovať spotrebu a rekuperáciu elektrickej energie počas jazdného cyklu. Energiu budeme vyjadrovať ako výkon P , ktorý vypočítame zo sily F pôsobiacej na pneumatiku (z predošlej kapitoly) a z aktuálnej rýchlosti vozidla v .

$$P = F * v * ef$$

Parameter ef vyjadruje efektivitu využitia elektrickej energie, v prípade trakcie je to efektivita elektromotora a v prípade brzdenia je to efektivita rekuperácie. Pričom efektivitu rekuperácie budeme uvažovať maximálne 30%.

Ukážeme si príklad priebehu a výpočtu výkonu pri efektivite elektromotora 90% a efektivite rekuperácie 30%.



Obrázok 6. Pribeh spotrebovanej a rekuperovanej energie počas jazdného cyklu

Zdrojový kód výpočtu spotrebovaného a rekuperovaného výkonu:

```
EF_MOTORA = 0.9
EF_REKUPERACIE = 0.3
P_SUM_30=0;
for i=1:1:length(zrychlenie)
    if F(i) < 0
        P_IN(i) = 0;
        P_OUT(i) = F(i) * rychlost(i) * EF_REKUPERACIE;
        P_FINAL(i) = P_OUT(i);
    else
        P_IN(i) = F(i) * rychlost(i) / EF_MOTORA;
        P_OUT(i) = 0;
        P_FINAL(i) = P_IN(i);
    end
    P_SUM_30 = P_SUM_30 + P_FINAL(i);
end
```

Na Obrázok 6 je zobrazený výsledný priebeh spotrebovaného a rekuperovaného výkonu, resp. energie počas jazdného cyklu.

Rovnaký postup použijeme pri ďalších výpočtoch pre menšie hodnoty efektívnosti rekuperácie. Nasleduje výpočet spotreby elektrickej energie pričom budeme meniť účinnosť rekuperácie (0%, 10%, 20%, 30%). Budeme vychádzať z jazdného cyklu Obrázok 3. Jazdný cyklus WLPT class 3, ktorý má celkovú dráhu 46.5 km (script: max(draha)/1000). Čiže bude nás zaujímať aj prepočet potrebnej energie (spotreby) na 100 km.

Tento výpočtový/simulačný skript je trochu dlhší, ale v prípade detailnej analýzy poskytuje informácie o postupe, ktoré by bolo zdĺhavé popisovať slovné, preto tento zdrojový kód pridávam sem do dokumentácie tiež.

Zdrojový kód výpočtu spotrebovaného a rekuperovaného výkonu pre rôzne účinnosti rekuperácie:

```
EF_MOTORA = 0.9
EF_REKUPERACIE_LIST = [0.3 0.2 0.1 0.0]
P_SUM_LIST=[0 0 0 0];
P_IN_SUM_LIST = [0 0 0 0]
P_OUT_SUM_LIST = [0 0 0 0]
for x=1:1:length(EF_REKUPERACIE_LIST)
    for i=1:1:length(zrychlenie)
        if F(i) < 0
            P_IN(i) = 0;
            P_OUT(i) = F(i) * rychlost(i) * EF_REKUPERACIE_LIST(x);
            P_SUM_LIST(x) = P_SUM_LIST(x) + P_OUT(i);
        else
            P_IN(i) = F(i) * rychlost(i) / EF_MOTORA;
            P_OUT(i) = 0;
            P_SUM_LIST(x) = P_SUM_LIST(x) + P_IN(i);
        end
    end
    P_IN_SUM_LIST(x) = sum(P_IN)
    P_OUT_SUM_LIST(x) = sum(P_OUT)
end
```

```
d=draha(length(draha))/1000;
draha_celk=100/d;
```

```
E_KWH_CYKLUS_LIST = P_SUM_LIST./3600000;
E_KWH_OUT_CYKLUS = P_OUT_SUM_LIST./3600000;
E_KWH_100_LIST = E_KWH_CYKLUS_LIST.*draha_celk;
```

```
% Tabulka
SPOTREBA_KWH_CYKLUS = E_KWH_CYKLUS_LIST';
SPOTREBA_KWH_NA_100KM = E_KWH_100_LIST';
REKUPERACIA_KWH_CYKLUS = abs(E_KWH_OUT_CYKLUS');
```

```
ROW_NAMES = {'Rekuperacia 30%'; 'Rekuperacia 20%'; 'Rekuperacia 10%'; 'Rekuperacia 0%'}
T = table(ROW_NAMES, SPOTREBA_KWH_CYKLUS, REKUPERACIA_KWH_CYKLUS, SPOTRE-
```

ROW_NAMES	SPOTREBA_KWH_CYKLUS	REKUPERACIA_KWH_CYKLUS	SPOTREBA_KWH_NA_100KM
{ 'Rekuperacia 30%' }	10.231	0.53133	21.989
{ 'Rekuperacia 20%' }	10.408	0.35422	22.37
{ 'Rekuperacia 10%' }	10.585	0.17711	22.751
{ 'Rekuperacia 0%' }	10.762	0	23.132

Tabuľka 6. Spotreba elektrickej energie podľa účinnosti rekuperácie

Účinnosť rekuperácie	Spotreba elektrickej energie na cyklus (46.5 km) v kWh	Energia získaná rekuperáciou na cyklus v kWh	Spotreba elektrickej energie na 100 km v kWh
30%	10.231	0.531	21.989
20%	10.408	0.354	22.37
10%	10.585	0.177	22.751
0%	10.762	0	23.132

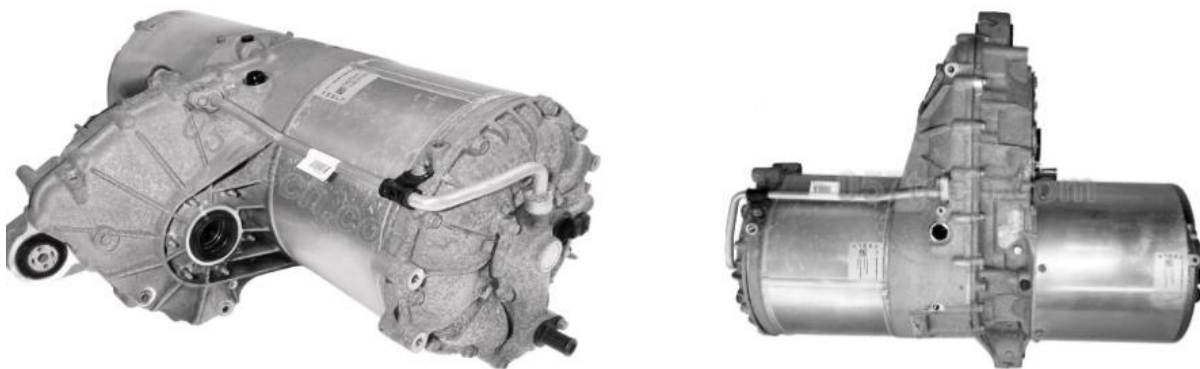
V Tabuľka 6 je výstup tejto časti simulácie. Vypočítali sme spotrebu elektrickej energie na 100 km počas rôznych účinnosti elektrickej rekuperácie. Grafické výstupy energie/výkonu som nepridal do tejto dokumentácie, lebo principiálne sú podobné s Obrázok 6. Priebeh spotrebovanej a rekuperovanej energie počas jazdného cyklu, ktorý zobrazuje maximálnu účinnosť rekuperácie.

Ak sa pozrieme na číselne výsledky tejto sekcie, môžeme zhodnotiť že pravdepodobne sme postupovali bez chyby, nakoľko spotreba na 100 km vyhovuje predstavám a reálnym spotrebám elektromobilov. Napríklad elektromobil Tesla model S má tiež spotrebu 22 kWh. Aj keď je pravda, že väčšina (menších) elektromobilov dosahuje spotreby okolo 12-17 kWh, naša spotreba je väčšia aj preto, že jazdný cyklus bol veľmi členitý s prudkým zrýchľovaním a brzdením. Tabuľka 1

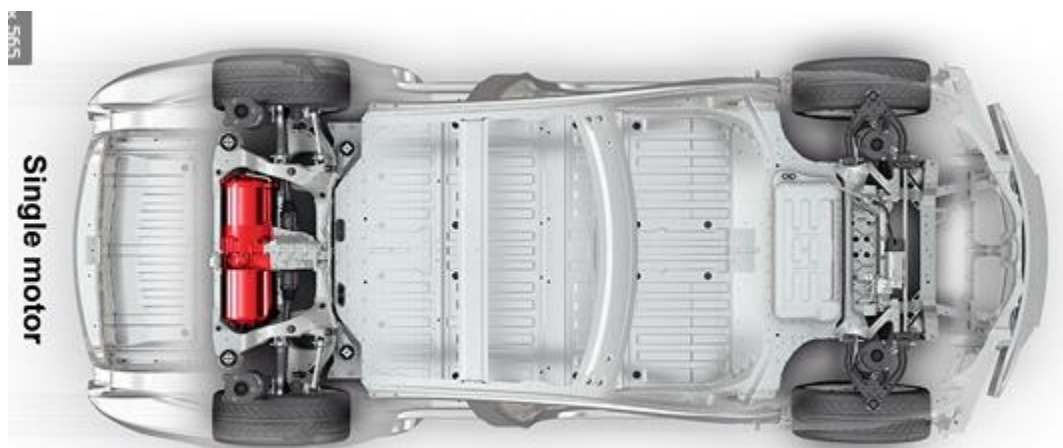
4.3 Výber reálneho elektromotoru pre vozidlo

V tejto kapitole vyberieme vhodný eklektický trakčný pohon na základe predstavy o spotrebe a požadovanom výkone z predchádzajúcich výpočtov a simulácií. Potom k elektromotoru navrhne úložisko potrebnej energie – batterypack.

Podľa kapitoly 4.2.3 sme zistili, že spotreba elektrickej energie a teda požadovaný výkon na zdolanie vybraného jazdného cyklu je približne 22 kWh. Z kapitoly 4.1 Úprava vozidla odstránením spaľovacieho pohonu sme zistili, že pre návrh elektrického pohonu máme k dispozícii 400 až 550 kg. Konštrukcia, mechanický dizajn nášho automobilu aj potrebný výkon je podobný ako napríklad Tesla model S, preto navrhujem použiť elektromotor práve Tesla Drive Unit [7], ku ktorému je v súčasnosti na internete veľa informácií a je to state of the art pohon. Tesla drive unit obsahuje jednostupňový prevodový mechanizmus.



Obrázok 7. Tesla Drive Unit – elektromotor s prevodovkou



Obrázok 8. Umiestnenie Tesla Drive Unit vo verzii Single motor

Tabuľka 7. Špecifikácia vybraného elektro pohonu

Parameter	Hodnota	Jednotka	Popis
Vstupné napätie	240-404	V DC	
Hmotnosť	132	kg	
Maximálny prúd	950	A DC	
Maximálny výkon	335	kW	Peak value, 335kW = 449 HP
Kontinuálny výkon	35	kW	
Krátkodobý výkon	90	kW	15 minut
Krútiaci moment	450	Nm	
Menovité otáčky	14 900	RPM	
Výstupný výkon	60	kWh	regenerative braking, peak
Účinnosť	90	%	

Tesla Drive Unit je napájaný jednosmerným zdrojom elektrickej energie podľa Tabuľka 7. Špecifikácia vybraného elektro pohonu. Samotný elektromotor je však synchronný 3-fázový, preto TDU (Tesla Drive Unit) obsahuje High Voltage DC to AC invertor a diferenciálny prevod. Riadiaca elektronika je umiestnená mimo TDU [7].

V kapitole 4.1 Úprava vozidla odstránením spaľovacieho pohonu sme zistili, že vozidlo bez spaľovacieho pohonu má hmotnosť 1417 kg. Teraz pripočítame hmotnosť TDU a dostaneme hmotnosť 1549 kg.

4.4 Návrh battery packu pre elektromobil

Základom každého batterypacku je batériový článok, tieto články sú potom spájané do modulov sériovo-paralelne za účelom dosiahnuť požadovanú kapacitu, menovité napäte a maximálny možný odberový prúd.

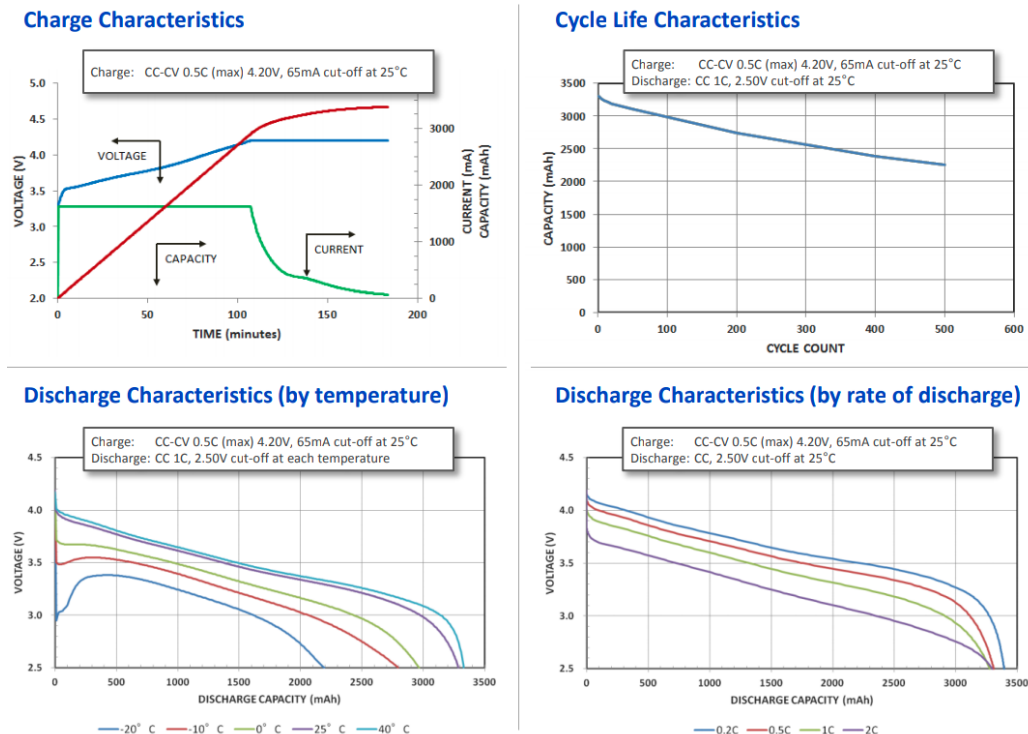
Pri výbere batériového článku som sa znovu inšpiroval automobilkou Tesla a vybral som Lítium Iónový článok Panasonic NCR18650B [8].

Tabuľka 8. Špecifikácia batériového článku Panasonic NCR18650B

Parameter	Značka	Hodnota	Jednotka	Popis
Kapacita	C	3200	mAh	
Nominálne napätie	U_{nom}	3.6	V	
Nabíjací prúd	I_{charge}	1.625	A	
Vybíjací prúd	I_{max}	64.28	A	
Hmotnosť	m	0.0485	kg	
Vnútny odpor	$R_{vnutron}$	0.056	Ohm	
Energetická hustota		237.52	Wh/kg	
C-rate	C-rate	2		

Niektoré parametre v **Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.** sa nenachádzajú v dostupných dokumentoch, ale dajú sa dopočítať nasledovne:

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



Obrázok 9. Charakteristiky batériového článku Panasonic NCR18650B

Teraz prejdeme na zostavenie finálnej konfigurácie 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 elektromotoru (240 - 404 V DC) a kapacitu na dojazd 3502 km. Pri výpočte som pripočítal +5% pre každý modul a +10% pre celý battery pack, aby som uvažoval aj s hmotnosťou samostatnej mechanickej konštrukcie pri poskladaní.

V kapitole 4.2.3 Výpočet spotrebovanej a rekuperovanej energie, sme zistili, že naše vozidlo pri účinnosti rekuperácie 30% ma spotrebu elektrickej energie 22 kWh na 100 km. Zo zadania máme navrhnuť battery pack na dojazd 350 km. Pre istotu navrhujem aby dojazd bol o 10% väčší ako je zadaný limit. Potom pre potrebnú energetickú kapacitu battery packu C_{bp} platí:

$$C_{bp} = 3.5 * 22 * 1.1$$

$$C_{bp} = 84.7 \text{ kWh}$$

$$C_{bp} = 84700 \text{ Wh}$$

Tabuľka 9. Návrh konfigurácie battery packu

	Konfig. článkov	Konfig. modulov	Napätie [V]	Kapacita [Ah]	Energia [Wh]	Hmotnosť [kg]	Energetická hustota [Wh/kg]
Článok	1	-	3.6	3.2	11.52	0.0485	237
Modul	74p10s	1	36	236.8	8524.8	37.6	226.72
Pack	74p100s	10s	360	236.8	85248	413	206.41

Priklad výpočtov a vzorce použité v Tabuľka 9:

$$\text{Energia} = \text{Napätie} * \text{Kapacita}$$

$$\text{Energetická hustota} = \text{Energia} / \text{Hmotnosť}$$

$$\text{Počet článkov v 74p10s} = 74 * 10 = 740$$

$$\text{Hmotnosť pre konfiguráciu modulu 74p10s} = 74 * 10 * 0.0485 * 1.05 = 37.6 \text{ kg}$$

V Tabuľka 9 je kompletný návrh battery packu. Cieľom bolo dosiahnuť požadovanú energetickú kapacitu 84700 Wh, navrhol som battery pack na 85248 Wh, teda spĺňa požadovaný dojazd 350 km.

Postupoval nasledovne:

- Stanovil som si požadovanú energiu (84700 Wh) a požadované napätie battery packu (360V). Vypočítal som $84700/360 = 235$ a získal som tak požadovanú kapacitu battery packu 235 Ah.
- Na dosiahnutie kapacity 236 Ah a napätia 360 V potrebujem mať zapojených 100 článkov v sérii a 73.75 paralelne. Navrhol som že zapojím 10 modulov v sérii, takže pre jeden modul platí konfigurácia 73.75p10s.
- Z návrhu modulu som sa dostal na úroveň článkov a musel som výpočet opakovať reverzne aby mi sedeli celé čísla pri počte článkov (počet článkov musí byť celé číslo samozrejme). A preto je **výsledná konfigurácia 74p100s**.
- Pri výpočte hmotnosti je započítaných +5% pre modul a +10% pre celý battery pack
- Energetická hustota sa vypočíta ako Energia [Wh] delene hmotnosť [kg].

Bezpečnosť návrhu battery packu:

Overenie bezpečnosti návrhu sa skladá z troch častí:

- hmotnostná kontrola
- prúdová kontrola
- kontrola konfigurácie

Po pridání elektro pohonu v predchádzajúcej kapitole malo naše vozidlo hmotnosť 1549 kg. V kapitole 4.1 Úprava vozidla odstránením spaľovacieho pohonu sme zistili, že povolená nosnosť automobilu je 2260 kg, pri odpočítaní hmotnosti posádky nám ostáva aktívna nosnosť 1960 kg.

Súčasný návrh battery packu ma hmotnosť 413 kg. Ak pripočítame ku vozidlu s elektro pohonom o hmotnosti 1549 váhu 413 kg dostávame **1962 kg**. Takže sme na hrane odporúčanej bezpečnosti nosnosti automobilu.

Výpočet energetických požiadaviek sme navrhovali pre vozidlo s hmotnosťou 1800kg, takže v tomto prípade som sa netrafil v odhade. Na druhej strane som sa snažil v každej časti návrhu pridávať percentuálne bezpečnostné a výkonové rezervy, takže pre účely laboratórneho návrhu myslím, že je návrh v poriadku.

Prúdová kontrola spočíva v prepočte, či battery pack dokáže dávať dostatočný maximálny prúd pre elektromotor. Tesla drive unit ma maximálny peak prúd 950A, náš monočlánok ma vybíjací prúd 64.28 A. Monočlánkov je zapojených paralelne 74. Takže maximálny možný dodávaný prúd je $74 * 64.28$ čo sa rovná 4756 A. To znamená, že tato kontrola je v poriadku.

Konfigurácia battery packu by mala okrem elektrických parametrov splňovať aj bezpečnostné odporúčania. Napríklad konfigurácia modulov v battery packu by mala byť sériovo a konfigurácia článkov v module by mala byť sériovo-paralelne. Medzi dôvody odporúčaní patrí pravidlo, aby napätie modulu bolo bezpečne nízke. V prípade mechanického poškodenia alebo servisovania je vtedy menšie riziko skratov a požiaru. Pre predstavu, konfigurácia modulu battery packu Tesly je 6s74p, čo je podobné môjmu návrhu.

4.5 Simulácia a výpočet zmeny spotreby v rôznych stúpaniach

V tejto sekcii budem simulovať a počítať zmeny spotreby vozidla s elektrickým pohonom a novou väčšou hmotnosťou pri rôznych stúpaniach. Zmena spotreby sa prejaví kvôli prítomnosti odporovej sily do stúpania 0s. Nezabudnime aplikovať zmenu pôsobenia gravitačnej sily aj pre odpor valenia pneumatiky 0ff.

Zdrojový kód výpočtu spotrebovaného a rekuperovaného výkonu pre rôzne scenáre sklonu vozovky:

```
Os(:,:)=m*g*sin(atan(SKLON(:,:)./100));
Off(:,:)=m*g*fvo*cos(atan(SKLON(:,:)./100)); % Valivý odpor
Ovzd=0.5*pm*Sx*Cx*rychlost.^2; % Odpor vzduchu
Fa=m*zrychlenie.*delta; % Zotravačný odpor

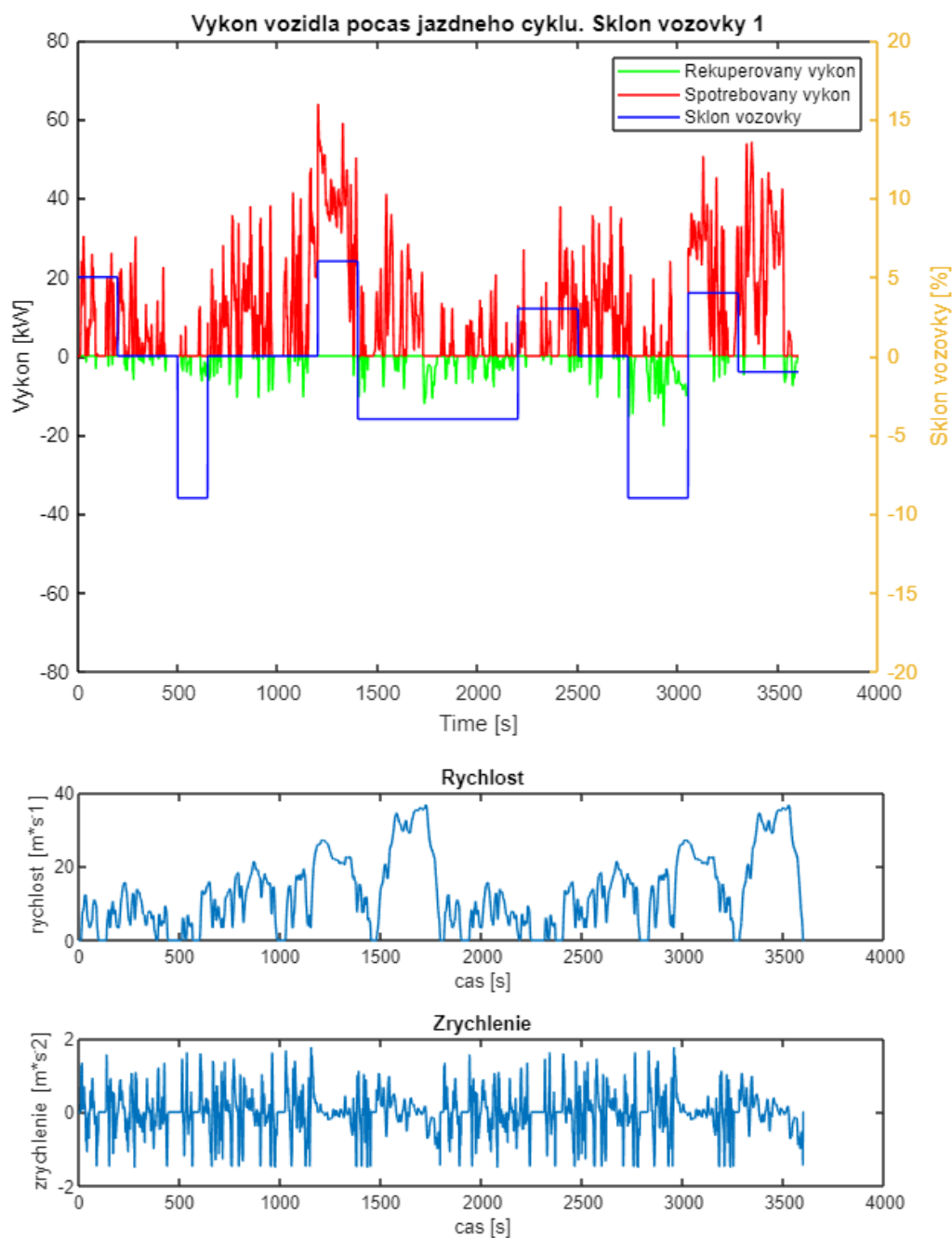
EF_MOTORA=0.9;
EF_REKUPERACIE=0.3;
P_SUM_LIST=[0 0 0];
P_IN_SUM_LIST=[0 0 0];
P_OUT_SUM_LIST=[0 0 0];
P_IN_LIST=[0 0 0];
P_OUT_LIST=[0 0 0];
for x=1:1:3
    for i=1:1:length(zrychlenie)
        if rychlost(i)>0
            F(x,i)=Off(x,i)+Ovzd(i)+Fa(i)+Os(x,i);
        else
            F(x,i)=0;
        end
    end
    for i=1:1:length(zrychlenie)
        if F(x,i)<0
            P_IN_LIST(x,i)=0;
            P_OUT_LIST(x,i)=F(x,i)*rychlost(i)*EF_REKUPERACIE;
            P_SUM_LIST(x)=P_SUM_LIST(x)+P_OUT_LIST(x,i);
        else
            P_IN_LIST(x,i)=F(x,i)*rychlost(i)/EF_MOTORA;
            P_OUT_LIST(x,i)=0;
            P_SUM_LIST(x)=P_SUM_LIST(x)+P_IN_LIST(x,i);
        end
    end
    P_IN_SUM_LIST(x)=sum(P_IN_LIST(x,:));
    P_OUT_SUM_LIST(x)=sum(P_OUT_LIST(x,:));
end

E_KWH_CYKLUS_LIST=P_SUM_LIST./3600000;
E_KWH_OUT_CYKLUS=P_OUT_SUM_LIST./3600000;
E_KWH_100_LIST=E_KWH_CYKLUS_LIST.*draha_celk;
SPOTREBA_KWH_CYKLUS=E_KWH_CYKLUS_LIST';
SPOTREBA_KWH_NA_100KM=E_KWH_100_LIST';
REKUPERACIA_KWH_CYKLUS=abs(E_KWH_OUT_CYKLUS');
ROW_NAMES={'Sklon vozovky 1';'Sklon vozovky 2';'Sklon vozovky 3'};
```

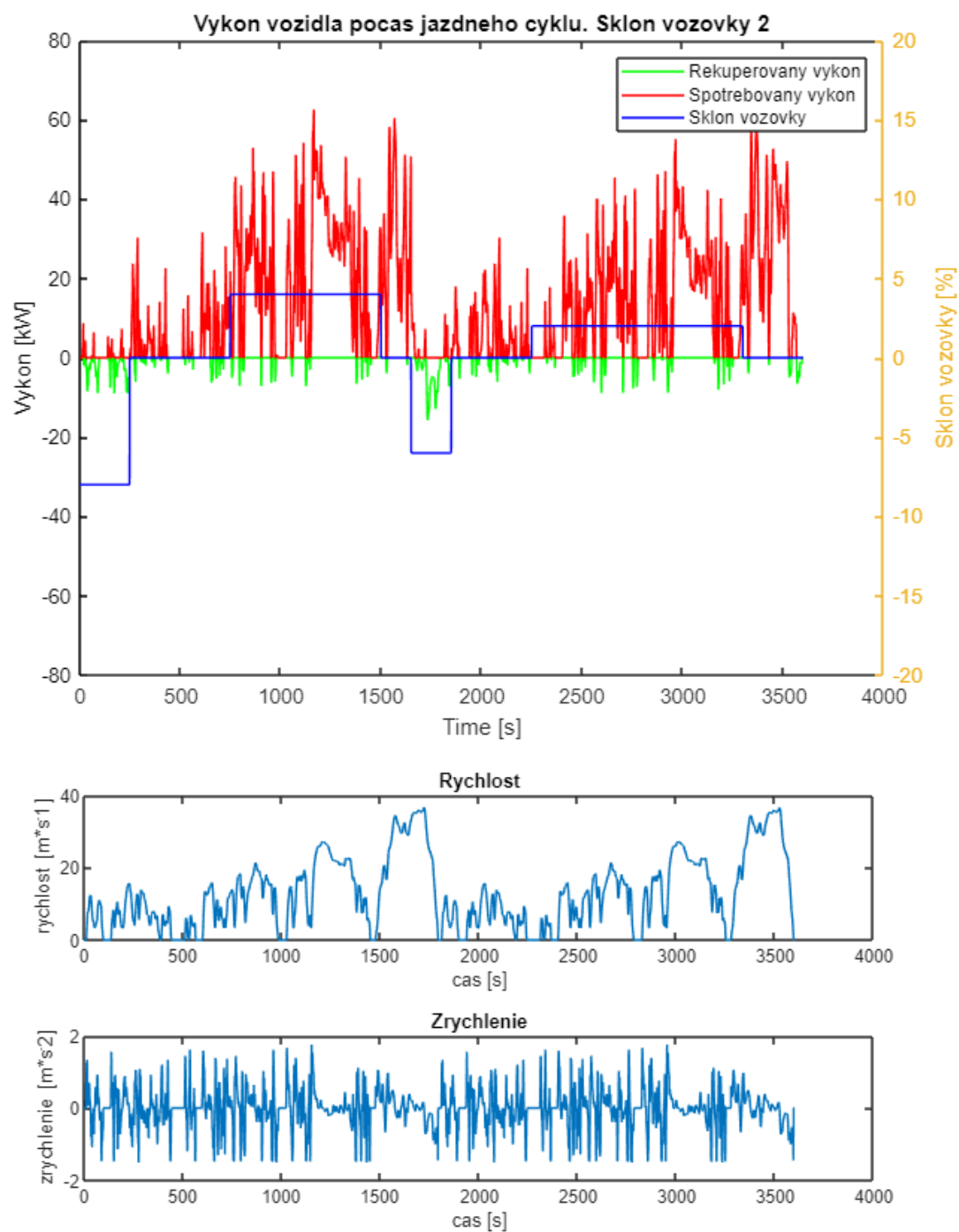
V premennej SKLON sú deklarované 3 konštantne scenáre sklonu vozovky v jednotlivých časových okamžikoch. Pre každý scenár počítame pôsobenie odporových síl, ktoré musím vozidlo prekonať spotrebovaným výkonom. V prípade aktívneho brzdenia využívame rekuperáciu s účinnosťou 30%.

```
T = table(ROW_NAMES, SPOTREBA_KWH_CYKLUS, REKUPERACIA_KWH_CYKLUS, SPOTRE-  
BA_KWH_NA_100KM)
```

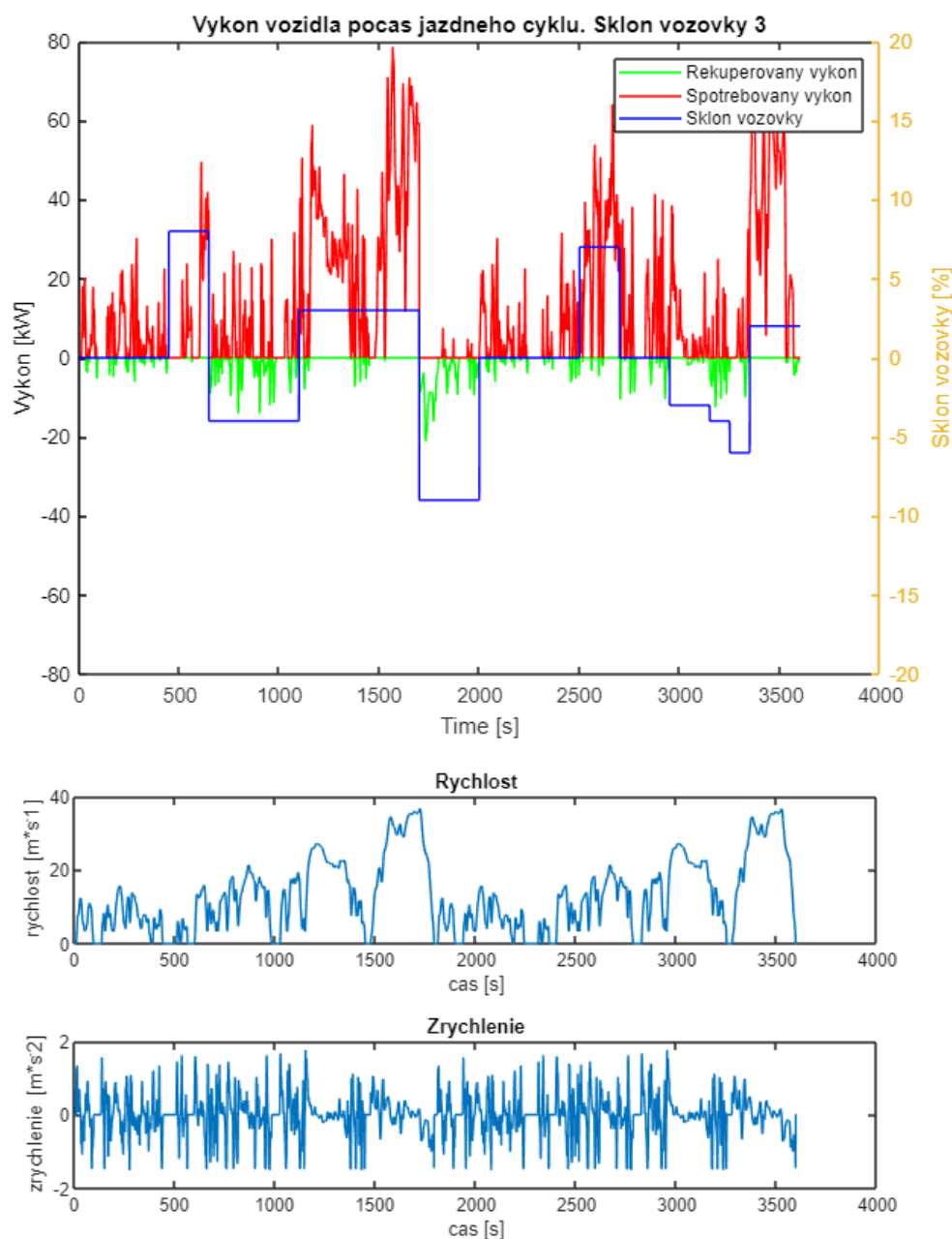
ROW_NAMES	SPOTREBA_KWH_CYKLUS	REKUPERACIA_KWH_CYKLUS	SPOTREBA_KWH_NA_100KM
{'Sklon vozovky 1'}	8.9266	1.0244	19.187
{'Sklon vozovky 2'}	12.093	0.6573	25.993
{'Sklon vozovky 3'}	11.334	0.93913	24.361



Obrázok 10. Priebeh spotreby a rekuperácie výkonu podľa scenáru sklonu vozovky 1.



Obrázok 11. Pribeh spotreby a rekuperácie výkonu podľa scenáru sklonu vozovky 2.



Obrázok 12. Priebeh spotreby a rekuperácie výkonu podľa scenáru sklonu vozovky 3.

Zhodnotenie simulácie a výpočtov:

Na Obrázok 10, Obrázok 11a Obrázok 12 sú zaznamenané výstupy simulácie v podobe grafických priebehov spotrebovaného a rekuperovaného výkonu k jednotlivým scenárom sklonu vozovky. Z potrebného výkonu na prekonanie odporových síl prostredia sme vypočítali celkovú spotrebovanú energiu na 100 km:

Tabuľka 10. Spotreba a rekuperácia elektrickej energie podľa scenára sklonu vozovky

Scenár sklonu vozovky	Spotreba elektrickej energie na cyklus (46.5 km) v kWh	Energia získaná rekuperáciou na cyklus v kWh	Spotreba elektrickej energie na 100 km v kWh
1	8.9266	1.0244	19.187
2	12.093	0.6573	25.993
3	11.334	0.9391	24.361

Podľa Tabuľka 10 je zrejmé, že najnižšia spotreba bola pre scenár sklonu vozovky číslo 1, vozidlo v jazdnom cykle spotrebovalo najmenej energie a navyše aj najviacej dokázalo rekuperovať. Z pohľadu energetickej spotreby bol scenár číslo 2. Tieto výsledky sú priamym dôsledkom efektívnosti a účinnosti prenosu elektrickej energie z batérie cez pneumatiku na vozovku. Treba mať na pamäti že cesta z kopca nikdy nenarekuperuje toľko energie ako je potrebné na jeho zdolanie.

5 Návrh zdroja energie pomocou palivového článku PEMFC

Teraz určíme výkon PEMFC palivového článku, ktorý možno použiť ako dostatočný zdroj elektrickej energie na zabezpečenie kontinuálnej jazdy elektromobilu.

Na zabezpečenie potrebného výkonu musím byť palivový článok schopný pokryť výkonnostne výdaje počas najväčšej záťaže akú sme v našich simuláciách dosiahli a ešte niečo väčšie. Grafické riešenie by mohlo byť pozrieť sa na grafy Obrázok 10, Obrázok 11, Obrázok 12 a pokúsiť sa nájsť maximálny peak spotrebovaného výkonu.

Počas jazdného cyklu a scenáru sklonu vozovky číslo 3 dosiahol spotrebovaný výkon peak takmer 80 kWh.



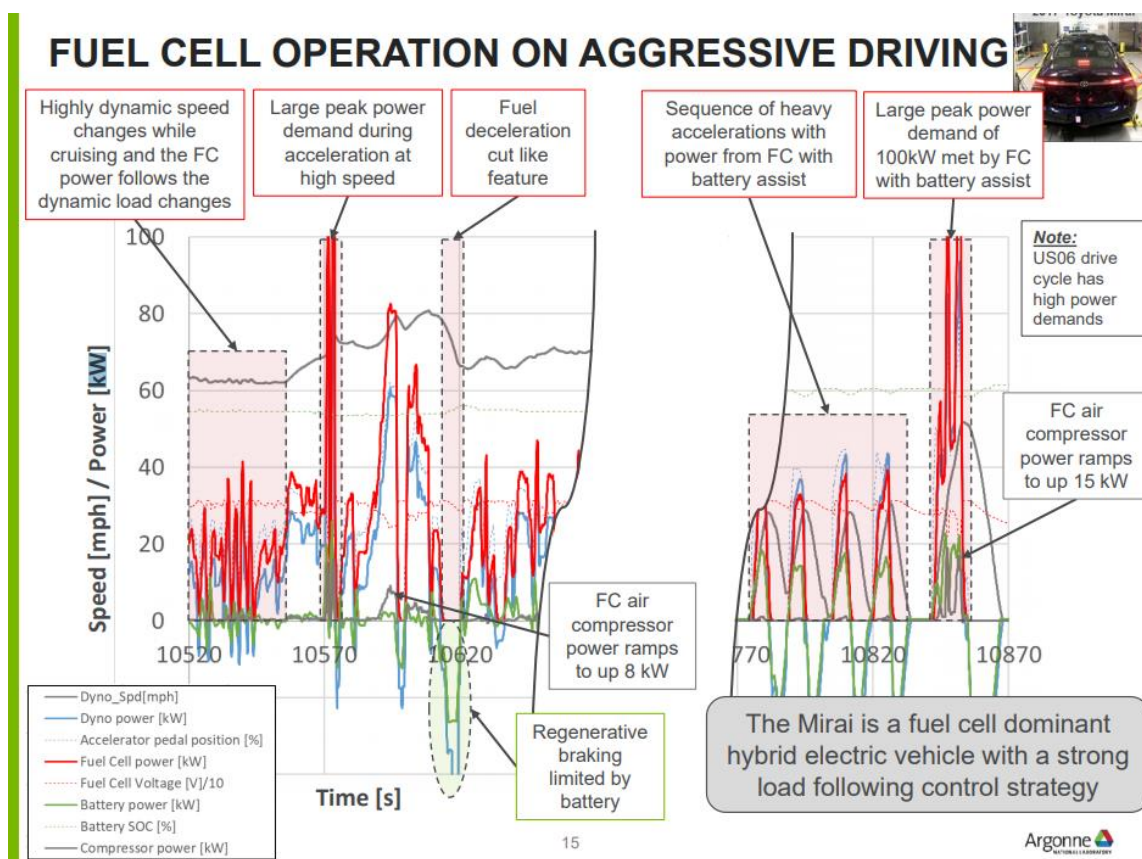
Obrázok 13. Hľadanie výkonnostného maxima počas simulácií

Presnejšie hľadanie vykonáme v Matlabe nasledovne:

```
>>max([max(P_IN_LIST(1,:)) max(P_IN_LIST(2,:)) max(P_IN_LIST(3,:))])
```

```
ans = 7.8636e+04
```

Mal som obavy zamerať sa na okamžité maximálne výdaje výkonu (cca 80 kWh) nakoľko tieto peaky energie v prevádzke budú zabezpečené aj prídavnými batériami alebo ideálne superkondenzátormy. Tak som si našťudoval správanie sa palivového článku počas agresívnej jazdy [9].



Obrázok 14. Správanie sa palivového článku počas agresívnej jazdy [9]

Na Obrázok 14. je zobrazený grafický priebeh výkonu palivového článku počas skutočnej prevádzky a agresívnej jazdy. Podľa meraní vidíme že výstupný výkon palivového článku v automobile dosahuje hodnoty, ktoré by som takmer presne potreboval pokryť aj ja podľa Obrázok 12.

Stack palivových článkov, ktorý je analyzovaný v článku [9] je z automobilu Toyota Mirai a poskytuje výkon až 114 kW. Preto Navrhujem použiť rovnaký PEMFC s výkonom 114 kW.

5.1 Výpočet zmeny hmotnosti vozidla po implementovaní PEMFC

V prípade použitia PEMFC sa zníži potrebná kapacita batérie na 20%. Elektromobil mal hmotnosť s pôvodným battery packom 1962 kg, pričom battery pack váži 413 kg. Budem počítať že zníženie kapacity na 20% spôsobí zníženie hmotnosti na 20%. Potom hmotnosť battery packu bude 82.6 kg.

Hmotnosť PEMFC určíme ako 10 kg + 114kg (za každý 1 kW), čo sa rovná 124 kg. Nádrž na palivo PEMFC budeme uvažovať 20kg + 3.5 kg (1 kg za každých 100 km dojazdu), čo sa rovná 23.5 kg. Potom výsledná hmotnosť automobilu bude 1779 kg. Teda toto riešenie ušetrí 182.9 kg na batériách.

Je dôležité teraz opakovanne skontrolovať bezpečnosť návrhu battery packu. V prípade odstránenia 80% batérie musíme zachovať menovité napätie. Preto musíme odstrániť paralelne zapojené články. Z pôvodných 74 článkov ostane 15. Vybíjací prúd jedného článku je 64.28 A, teda battery pack je stále schopný dodávať maximálne 964.2 A, čo splňuje požiadavky trakčného elektromotora.

6 Zhodnotenie a záver

V tejto práci som navrhol trakčný systém batériového elektromobilu podľa výkonnostných a energetických požiadaviek na vybraný jazdný cyklus. Vybral som si vozidlo s parametrami osobného automobilu a zaznamenal som tieto parametre do tabuliek a zdrojových kódov. Vybral som členitý a jazdný cyklus, podľa ktorého som simuloval pôsobenie odporových síl proti vozidlu, na základe ktorých som neskôr vypočítal potrebný výkon elektrického trakčného systému. Pre originálne vozidlo som navrhol elektrický trakčný motor a battery pack s výslednou hmotnosťou 1962 kg a dojazdom 350 km, pričom spotreba elektrickej energie na 100 km bola priemerne 22 kW. Skúmal som rôzne pôsobenia odporových síl a scenáre jazdného sklonu a porovnával a vyhodnocoval požadovaný elektrický výkon. Na základe získanej predstavy o výkonnostných potrebách na zdolanie jazdného cyklu som pristúpil k návrhu využitia PEMFC palivového článku ako primárneho zdroja elektrickej energie. Výsledná hmotnosť automobilu je 1779 kg, čo sedí s našim odhadom v prvotných simuláciách (1800 kg). Počas zadania som si osvojil viaceré praktické vedomosti z jazdnej dynamiky automobilu, získal cit pre energetické bilancie návrhu elektromobilu a nabral vedomosti z problematiky palivových článkov.

7 Zdroje

- [1] Rozmery a špecifikácia vozidla <https://sk.pinterest.com/pin/456833955932656286/>
- [2] Coast down test a aerodynamika [https://www.ultimatespecs.com/car-specs/Audi/60461/Audi-A6-\(C7\)-20-TFSI.html](https://www.ultimatespecs.com/car-specs/Audi/60461/Audi-A6-(C7)-20-TFSI.html)
- [3] Front area dimensions <https://www.carfolio.com/audi-a6-3.0-tdi-284724>
- [4] Loading weight <https://www.topgear.com/car-reviews/audi/s3rs3/20-tdi-se-5dr/spec-1>
- [5] Wheel ration <https://www.wheel-size.com/size/audi/a6/2012/>
- [6] Simulink driving block <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/46777-driving-cycle-simulink-block>
- [7] Tesla drive unit <https://hsrmotors.com/products/driveunits/large/base>
- [8] Panasonic NCR18650B <https://www.batteryspace.com/prod-specs/NCR18650B.pdf>
- [9] Fuel cell <https://publications.anl.gov/anlpubs/2018/06/144774.pdf#page=39&zoom=100,0,0>

8 Prílohy

Zdrojový súbor numerických výpočtov a vizualizácií v prostredí Matlab.