

**Ing. Eduard Ribar**

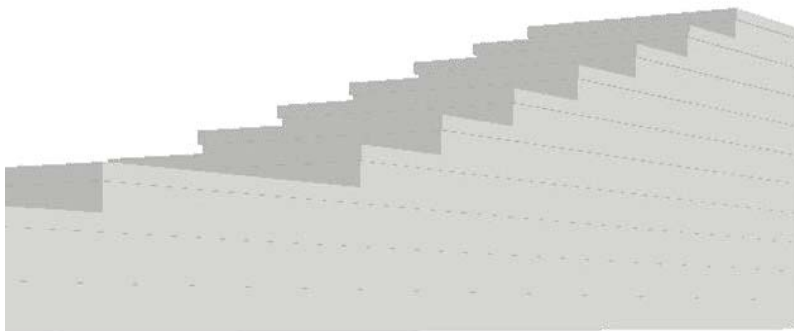
**Autoreferát dizertačnej práce**

**OPTIMALIZÁCIA ENERGETICKÝCH PROCESOV HYBRIDNÝCH POHONOV VOZIDIEL**

**na získanie** akademickej hodnosti doktor (philosophiae doctor, PhD.)

**v doktorandskom študijnom programe:** Mechatronické systémy

**v študijnom odbore** 5.2.16 mechatronika



**Miesto a dátum:** Bratislava, 16.05.2016



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

**Ing. Eduard Ribar**

**Autoreferát dizertačnej práce**

**OPTIMALIZÁCIA ENERGETICKÝCH PROCESOV HYBRIDNÝCH POHONOV VOZIDIEL**

**na získanie** akademickej hodnosti doktor (philosophiae doctor, PhD.)

**v doktorandskom študijnom programe:**  
Mechatronicke systémy

**Miesto a dátum:** Bratislava, 16.05.2016

**Dizertačná práca bola vypracovaná** v dennej forme doktorandského štúdia

**Na** Ústave automobilovej mechatroniky  
Fakulty elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave

**Predkladateľ:** Ing. Eduard Ribar  
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

**Školiteľ:** prof. Ing. Justín Murín, DrSc.  
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

**Oponenti:** doc. Ing. Ľuboš Magdolen, CSc.  
Ústav dopravnej techniky a konštruovania  
Strojnícka fakulta STU v Bratislave  
Námestie slobody 17, 812 31 Bratislava

doc. Ing. Peter Schreiber, CSc.  
Ústav aplikovanej informatiky, automatizácie a mechatroniky  
Materiálovo technologická fakulta STU v Bratislave  
Paulínska 16, 917 24 Trnava

**Autoreferát bol rozoslaný:** .....

**Obhajoba dizertačnej práce sa koná:** ..... o ..... hod.

**Na** Ústave automobilovej mechatroniky  
Fakulty elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave  
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

prof. Dr. Ing. Miloš Oravec  
Dekan FEI STU

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Prehľad súčasného stavu</b>	<b>2</b>
2.1	Prehľad pohonných systémov vozidiel .....	2
2.2	Zásobníky energie v hybridných vozidlách .....	3
2.2.1	Palivá.....	4
2.2.2	Elektrochemické akumulátory .....	4
2.3	Riadiaci systém hybridnej pohonnej sústavy .....	5
<b>3</b>	<b>Ciele doktorandskej dizertačnej práce</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>Dosiahnuté výsledky</b>	<b>7</b>
4.1	Komplexný matematický model hybridného vozidla .....	7
4.1.1	Subsystém vstupných veličín .....	7
4.1.2	Matematický model vozidla .....	8
4.1.3	Matematický model trakčného elektromotora .....	8
4.1.4	Matematický model trakčného akumulátora.....	8
4.1.5	Matematický model generačnej jednotky .....	9
4.1.6	Subsystém manažmentu .....	9
4.2	Overenie matematického modelu a algoritmov riadenia.....	10
4.3	Vyhodnotenie simulácií.....	13
4.4	Realizácia elektronickej riadiacej jednotky vhodnej pre hybridné vozidlá....	14
<b>5</b>	<b>Hlavné prínosy dizertačnej práce a ďalšie smery rozvoja</b>	<b>15</b>
<b>6</b>	<b>Záver</b>	<b>16</b>
<b>7</b>	<b>Summary</b>	<b>17</b>
	<b>PodĎakovanie</b>	<b>17</b>
	<b>Zoznam použitej literatúry</b>	<b>17</b>
	<b>Publikačná činnosť autora</b>	<b>19</b>

# 1 Úvod

Elektrické vozidlá (EV) predstavujú jedno z možných riešení problému hromadenia skleníkových plynov (GHG) a preto sa v posledných rokoch dostávajú do pozornosti odbornej a laickej spoločnosti. V posledných desaťročiach minulého storočia svetová energetická kríza upriamila pozornosť na sféru automobilov, kvôli zvýšenému povedomiu o globálnom otepľovaní. Sektor dopravy je jedným z najväčších prispievateľov v zmysle globálnych emisií skleníkových plynov (GHG). Konvenčné vozidlá sú poháňané pomocou spaľovacieho motora, pri spaľovaní fosílnych palív (napr. benzínu, alebo motorovej nafty), pričom sa do ovzdušia vypúšťajú škodlivé plyny, ako oxid uhličitý (CO<sub>2</sub>), oxid uhoľnatý (CO), oxidy dusíka (NO<sub>x</sub>) a ďalšie.

Elektricky poháňané vozidlá ponúkajú aj iné výhody okrem čistejšieho a menej hlučného prostredia, napr. menej nákladnú prevádzku a údržbu v porovnaní s vozidlami s konvenčným pohonom. Náklady spojené s prevádzkou elektrického vozidla v súčasnosti predstavujú približne iba 28% z nákladov na prevádzku vozidla so spaľovacím motorom. Avšak súčasné elektrické vozidlá dosahujú dojazd približne 6-13 kilometrov na jednotku uloženej elektrickej energie (1 kWh) [1]. Dá sa povedať, že elektrické (EV) a hybridné vozidlá (HEV) zápasia so znižovaním nákladov spojených s akumulátormi elektrickej energie, keďže minimálne jedna tretina konečnej ceny elektrického vozidla predstavuje cena modulu akumulátora.

Pri súčasných cenách elektrických vozidiel a zároveň ich značne nízkom ponúkanom dojazde na jedno nabitie, je pravdepodobné, že hybridné vozidlá v najbližšej dobe nastúpia miesto nich. Hybridné vozidlá ponúkajú dostatočný dojazd pri nižšej spotrebe fosílnych palív a zároveň nižšej nákupnej cene. Preto sa aj predložená práca zaoberá práve hybridnými vozidlami a optimálnym manažmentom energetických procesov v nich.

## 2 Prehľad súčasného stavu

### 2.1 Prehľad pohonných systémov vozidiel

Vozidlá vo všeobecnosti je možné rozdeliť do troch skupín: vozidlá so spaľovacím motorom (ICEV), hybridné elektrické vozidlá (HEV) a plne elektrické vozidlá (AEV).

Hybridné elektrické vozidlo (HEV) je také, ktoré k pohonu používa zároveň spaľovací motor aj elektromotor. Faktor hybridizácie bol odvodený pre vyjadrenie stupňa hybridizácie vozidla [2],[3] a určený je rovnicou (2.1.1):

$$HF = \frac{P_{EM}}{P_{EM} + P_{SM}} \quad (2.1.1)$$

Rovnica (2.1.1) vyjadruje pomer výkonu trakčného elektromotora a celkového dostupného trakčného výkonu vozidla ( $P_{EM} + P_{SM}$ ). Za predpokladu, že vozidlo nie je pripojené na prídavný zdroj energie, hybridné elektrické vozidlá (HEV) je možné rozdeliť na mierne, príp. stredne (mild-HEV) a plne hybridné elektrické vozidlá (full-HEV). Full-HEV vozidlá možno rozdeliť podľa typu konfigurácie pohonného systému nasledovne: sériové - EREV - elektrické vozidlá s predĺženým dojazdom, paralelné a kombinované.

Typ konfigurácie EREV využíva elektromotor, ako jediný prvok pre pohon vozidla, rovnako ako je to aj v prípade BEV ("battery electric vehicle") vozidiel, s tým rozdielom, že zároveň využíva vysokoúčinný spaľovací motor spojený s generátorom, pre nabíjanie integrovaného zásobníka elektrickej energie. Výhodou EREV, oproti BEV je možnosť redukovania kapacity zásobníka elektrickej energie, využitím spaľovacieho motora, generátora a paliva. Medzitým, využívanie spaľovacieho motora v takomto režime, znižuje celkovú účinnosť vozidla na hodnotu približne 26%, čo je najnižšia hodnota spomedzi všetkých typov full-HEV vozidiel. EREV typ konfigurácie je výhodný pre mestský spôsob jazdy, ktorý zahŕňa časté zastavovanie a rozbeh vozidla, kedy je energia brzdenia v pomerne veľkom množstve uchovaná v ESS [4],[5],[6].

Predložená dizertačná práca a výskum s ňou spojený využíva existujúce princípy a poznatky o hybridnej pohonnej sústave a zameriava sa na konfiguráciu sériového hybridného vozidla, ktorého ekvivalentný názov je elektrické vozidlo s predĺženým dojazdom (EREV).

## 2.2 Zásobníky energie v hybridných vozidlách

Pre každú energetickú doménu je charakteristických niekoľko zásobníkov energie, ktoré ju uskladňujú v tejto forme. V rámci domény chemickej energie sa uskladnenie energie realizuje chemickými väzbami v pracovnej látke. V doméne tepelnej energie uskladnenie energie sa realizuje vo forme tepla akumulovaného v pracovnej látke. V doméne mechanickej energie uskladnenie energie sa realizuje vo forme kinetickej, príp. potenciálnej energie pracovnej hmoty. Nakoniec v doméne elektrickej energie uskladnenie energie sa realizuje vo forme akumulovaného elektrického náboja v pracovnej látke - na elektróde.

V hybridných vozidlách sa používajú nasledovné zásobníky energie:

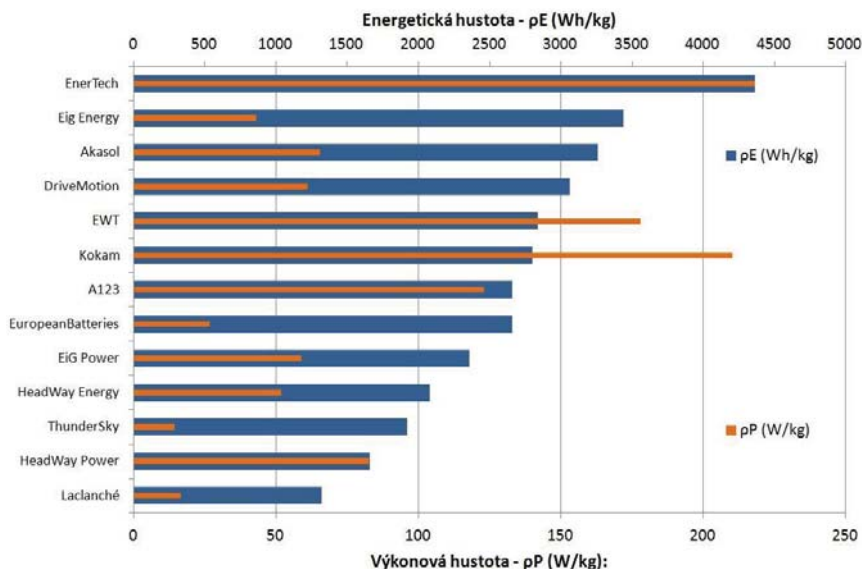
- rôzne palivá (ropné deriváty, vodík a iné),
- elektrochemické akumulátory,
- superkondenzátory a
- zotrvačníky.

Okrem uvedených, sa využíva aj energia uložená vo forme kinetickej a potenciálnej energie samotnej hmoty vozidla. V tejto kapitole sú predstavené súčasné technológie zásobníkov energie vhodné pre hybridné vozidlá.

## 2.2.1 Palivá

V súčasnosti sa na pohon v automobilovej doprave najčastejšie používajú vznetové, alebo zážihové motory. V zážihových motoroch sa spaľujú motorové benzíny, petrolej a motorový lieh. Vo vznetových motoroch zase motorová nafta. Okrem týchto najrozšírenejších palív sa v automobilovej doprave používajú aj nasledovné, alternatívne palivá:

- LPG - skvapalnený ropný plyn,
- CNG/LNG - stlačený/skvapalnený zemný plyn
- biopalivá (etanol, metanol, bionafta) a
- vodík.



Obr. 1 Porovnanie energetických a výkonových hustôt článkov rôznych výrobcov I

## 2.2.2 Elektrochemické akumulátory

Elektrochemické akumulátory sú zásobníky energie, ktoré pozostávajú z jedného, alebo viacerých elektro-chemických článkov. Články premieňajú uloženú chemickú energiu na elektrickú. Dnes najčastejšie používaným typom akumulátorov v automobilovom priemysle sú olovené akumulátory, vo funkcii štartovacej batérie a zabezpečenia chodu rozmanitých systémov vozidla. Najvýraznejším nedostatkom olovených akumulátorov je ich energetická a výkonová hustota:

- $\rho^E = 30-40 \text{ Wh/kg}$ , a

<sup>1</sup> uvádzané informácie sú výsledkom prepočtu údajov poskytnutých priamo výrobcom článku, alebo uvádzaných voľne na internete



- $\rho^r = 180 \text{ W/kg}$ .

Lítiové akumulátorové články sa vyznačujú výrazne lepšími parametrami v porovnaní s olovenými akumulátorovými článkami. Pre porovnanie dvoch, alebo viacerých typov článkov je najvhodnejšie použiť hodnoty ich energetickej a výkonovej hustoty -  $\rho^E$ ,  $\rho^P$ . Toto porovnanie nesie informáciu o možnosti článku uskladniť elektrickú energiu, alebo vydať elektrický výkon.

Z porovnania na Obr. 1 vyplýva, že najlepšie články sú od výrobcov EnerTech, EWT, Kokam a A123, lebo sú charakterizované zároveň vysokou výkonomou aj energetickou hustotou.

### 2.3 Riadiaci systém hybridnej pohonnej sústavy

V kapitole 2 boli predstavené viaceré konfigurácie pohonnej sústavy osobných vozidiel, ako aj konfigurácie elektrických pohonných sústav. Všetky hybridné elektrické vozidlá musia obsahovať riadiace systémy, aby bola zabezpečená spolupráca obsiahnutých pohonných jednotiek. Činnosť všetkých uvedených prvkov pohonnej sústavy je potrebné sledovať a vhodne riadiť. Z počtu riadených prvkov vyplýva, že celkový riadiaci systém bude zložitejší, ako pri iných vozidlách, ktoré obsahujú iba jednu pohonnú jednotku.

Prediktívne riadenie je robustná forma riadenia, ktorá pomocou modelu riadeného systému predikuje odozvu systému na riadiace zásahy a zároveň neustále optimalizuje budúcu trajektóriu riadenia. Základná rovnica opisujúca MPC prediktívne riadenie, ktorá definuje spôsob výpočtu predikovaných výstupov -  $Y$  riadeného systému pri uvažovaní zvoleného horizontu predikcie je nasledovná:

$$Y = G \cdot U + Y_0 \quad (2.3.1)$$

Pričom  $Y$  predstavuje vektor budúcich (predikovaných) odoziev riadeného systému,  $Y_0$  predstavuje maticu voľných odoziev riadeného systému,  $G$  je matica konštánt a  $U$  je vektor budúcich prírastkov riadenia. Základná rovnica prediktívneho riadenia je založená na koeficientoch stavového modelu a jej odvodenie je uvedené v práci, v kapitole 4. Účelová funkcia použitá pri prediktívnom riadení je kvadratická, lebo zahŕňa výpočet vzdialenosti výstupu systému od požadovanej hodnoty (2.3.2).

$$J = \sum_{i=N1}^{N2} [\hat{y}(k+i) - w(k+i)]^2 + \lambda \sum_{i=1}^{NU} [\Delta u(k+i-1)]^2 \quad (2.3.2)$$

Rovnicu (2.3.2) je možné zapísať aj maticovom zápise:

$$J = (Y - W)^T (Y - W) + \lambda \cdot U^T U \quad (2.3.3)$$

Po dosadení rovnice prediktívneho riadenia (2.3.1) do rovnice účelovej funkcie (2.3.3):

$$J = U^T G^T G U + U^T G^T (Y_0 - W) + (Y_0 - W)^T G U + (Y_0 - W)^T (Y_0 - W) + \lambda \cdot U^T U \quad (2.3.4)$$

Uvedená rovnica (2.3.4) predstavuje rozvinutý tvar účelovej funkcie optimalizačného problému prediktívneho riadenia. Minimalizáciou tejto funkcie sa získa jej globálny extrém, v ktorom je riadenie optimálne:

$$\frac{\partial J}{\partial \mathbf{U}} = \mathbf{G}^T \mathbf{G} \mathbf{U} + \mathbf{G}^T (\mathbf{Y}_0 - \mathbf{W}) + \lambda \cdot \mathbf{I} \mathbf{U} = 0 \quad (2.3.5)$$

Ďalšími úpravami sa dosiahne konečný tvar rovnice na výpočet predikovanej trajektórie riadenia:

$$\mathbf{U} = -(\mathbf{G}^T \mathbf{G} + \lambda \cdot \mathbf{I})^{-1} \mathbf{G}^T (\mathbf{Y}_0 - \mathbf{W}) = \mathbf{c}_0 \cdot (\mathbf{Y}_0 - \mathbf{W}) \quad (2.3.6)$$

Hodnota riadiaceho zásahu MPC regulátora v aktuálnom kroku sa potom vypočíta nasledovne:

$$u(k) = \mathbf{U}(1) + u(k-1) = \Delta u(k) + u(k-1) \quad (2.3.7)$$

Súčasnú hybridnú a elektrické vozidlá v metódach a algoritmoch riadiacich systémov pohonnej sústavy nevyužívajú informácie o zvolenej trase: napr. jej prislúchajúce rýchlostné obmedzenia, aktuálnu dopravnú situáciu a výškový profil trasy, ktoré môžu výrazne ovplyvňovať spotrebu energie vozidla a s tým priamo spojený jeho dojazd. Predložená dizertačná práca a výskum s ňou spojený je zameraný práve na zahrnutie týchto významných vstupných informácií v metódach a algoritmoch riadenia hybridnej pohonnej sústavy.

### 3 Ciele doktorandskej dizertačnej práce

Problémy spojené s nízkou kapacitou akumulátorov elektrickej energie, zásobou energie a optimalizáciou jej spotreby vo vozidlách sú neustále stredobodom základného výskumu. Pre dizertačnú prácu a výskum s ňou spojený boli stanovené nasledovné ciele:

- Analýza súčasného stavu v oblasti hybridných pohonov vozidiel metód a algoritmov pre optimalizáciu spotreby energie v hybridných elektrických vozidlách. Zhrnutie významných vstupných informácií v metódach a algoritmoch riadenia hybridnej pohonnej sústavy.
- Odvodiť matematický model hybridného vozidla, so zameraním na spotrebu energie, a overiť jeho správnu funkciu simuláciami v prostredí MATLAB/Simulink.
- Navrhnuť metódy a algoritmy prediktívneho riadenia pre vytvorený matematický model hybridného vozidla za účelom optimalizácie spotreby energie tohto vozidla.
- Overiť matematický model a algoritmy prediktívneho riadenia s využitím reálnych parametrov hybridného vozidla a so zohľadnením aktuálnych cien energií využívaných v týchto vozidlách.

## 4 Dosiahnuté výsledky

### 4.1 Komplexný matematický model hybridného vozidla

Komplexný matematický model hybridného vozidla, ktorým sa predložená práca zaoberá je zostavený z nasledovných subsystémov:

1. subsystém vstupných veličín,
2. matematický model vozidla,
3. matematický model trakčného elektromotora,
4. matematický model trakčného akumulátora,
5. matematický model generačnej jednotky a
6. subsystém manažmentu (riadenia).

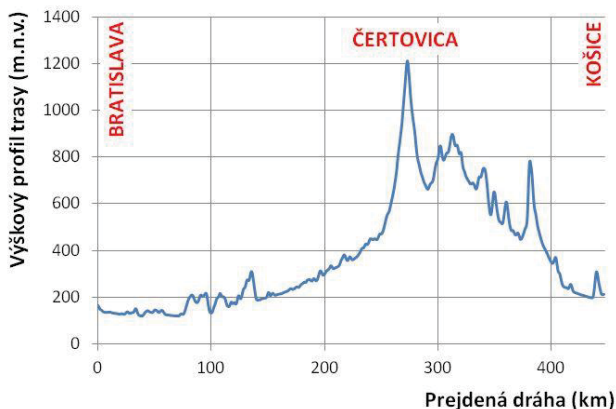
Zostavený model je možné ďalej použiť pri hľadaní najvhodnejších prvkov hybridnej pohonnej sústavy a jej riadiacich algoritmov.

#### 4.1.1 Subsystém vstupných veličín

Subsystém simulovaných vstupných veličín zahŕňa nasledovné súbory dát: predpis rýchlosti vozidla, výškový profil trasy a statické parametrov a okrajové podmienky.

Výškový profil trasy bol zostavený za pomoci verejne dostupnej on-line databázy, ktorá na základe vstupných údajov - zemepisnej šírky a dĺžky vráti údaj o nadmorskej výške daného geografického bodu (Obr. 2).

Zostavený vlastný jazdný cyklus sa líši od štandardizovaných jazdných cyklov najmä v tom, že okrem predpisu rýchlosti vozidla zahŕňa aj predpis sklonu vozovky, počas celého priebehu trasy a oba predpísané priebehy sú vzťahnuté na prejdenú dráhu.



Obr. 2 Vlastný jazdný cyklus - výškový profil zvolenej trasy

## 4.1.2 Matematický model vozidla

Zostavený model je matematický. Základné parametre vozidla s ktorými model uvažuje sú uvedené v Tabuľka 1. Zostavený komplexný model vozidla sa líši od bežných matematických modelov vozidla najmä v tom, že prihliada na reálne parametre a obmedzenia pohonnej sústavy takým spôsobom, že priliehavo reguluje požadovaný krútiaci moment a tak poskytuje informáciu o skutočnej rýchlosti vozidla a jeho polohe - prejdenej dráhe.

Tabuľka 1 Základná špecifikácia uvažovaného vozidla

Základné parametre vozidla:	
Prevádzková hmotnosť (m)	1200 kg
Dynamický polomer kolesa (rd)	0.3 m
Čelná plocha vozidla (A)	3 m <sup>2</sup>
Súčiniteľ odporu vzduchu (cx)	0.4 -
Súčiniteľ valivého odporu (f)	0.09 -

## 4.1.3 Matematický model trakčného elektromotora

Matematické vyjadrenie modelu je nasledovné:

$$P_{EM-M}[W] = M_{EM}[Nm] * \omega_{EM} \left[ \frac{rad}{s} \right] = \frac{M_{EM}[Nm] * n_{EM} \left[ \frac{1}{min} \right] * 2\pi}{i_{C[-]} * 60} \quad (4.1.1)$$

$$P_{EM-E}[W] = \frac{P_{EM-M}[W]}{\mu_{EM}[-] * \mu_{MENIČ}[-]} \quad (4.1.2)$$

pričom  $P_{EM-M}$  je mechanický výkon a  $P_{EM-E}$  elektrický výkon elektromotora.

Základné parametre navrhnutého elektromotora sú uvedené v nasledujúcej tabuľke.

Tabuľka 2 Základná špecifikácia trakčného elektromotora

Základné parametre trakčného elektromotora:	
Maximálny výkon elektromotora (PEM-E)	100 kW
Maximálny krútiaci moment elektromotora (MEM)	490 Nm
Maximálne otáčky elektromotora (nEM)	8000 1/min
Maximálne el. napätie elektromotora (VEM)	500 V
Maximálny el. prúd elektromotora (IEM)	500 A

Model trakčného elektromotora je zjednodušený na úroveň výpočtu aktuálnej hodnoty elektrického prúdu, čerpaného z (resp. doplneného do) trakčného akumulátora počas jazdy hybridného vozidla.

## 4.1.4 Matematický model trakčného akumulátora

Základné parametre navrhnutého akumulátora sú uvedené v nasledujúcej tabuľke.

Tabuľka 3 Základná špecifikácia trakčného akumulátora

<b>Základné parametre trakčného akumulátora:</b>		
Počet článkov modulu akumulátora	63	-
Nominálne el. napätie akumulátora (VAKU)	201.6	V
Maximálny el. prúd akumulátora (IAKU)	400	A
Nominálna el. kapacita akumulátora (EAKU)	4	kWh

Simulačný model trakčného akumulátora je veľmi presným priblížením skutočného správania sa trakčných akumulátorov v súčasných elektrických a hybridných vozidlách. Keďže predložená práca je orientovaná na výskum energetických tokov vo vozidle, model trakčného akumulátora predstavuje kľúčovú časť zostaveného simulačného modelu hybridného vozidla. Tomu nasvedčuje aj využitie fyzikálneho modelu akumulátora z knižnice programu Matlab.

#### 4.1.5 Matematický model generačnej jednotky

Pre účely výskumu predloženej práce bol vytvorený vlastný matematický model spaľovacieho motora, ktorý zahŕňa definíciu troch pracovných bodov - S, zvolené podľa výstupného mechanického výkonu, s ohľadom na mapu účinností spaľovacieho motora (Tabuľka 4).

Tabuľka 4 Stanovené pracovné body spaľovacieho motora

S (-)	M <sub>SM</sub> (Nm)	n <sub>SM</sub> (1/min)	μ <sub>GJ</sub> (-)	P <sub>SM</sub> (kW)	P <sub>GJ</sub> (kW)	m <sub>e</sub> (l/h)
1	26.4	1356	94.7%	3.7	3.5	3.02
2	45.1	1998	95.3%	9.4	9.0	3.68
3	82	2030	97.6%	17.4	17.0	4.21

#### 4.1.6 Subsysém manažmentu

Subsysém manažmentu sleduje stav nabitia trakčného akumulátora, odoberaný výkon a stav spaľovacieho motora, predikuje hodnotu SOC trakčného akumulátora v krátkodobom horizonte 10 minút, a zároveň riadi prácu spaľovacieho motora v generačnej jednotke a obmedzuje výkon trakčného elektromotora v prípade dosiahnutia nízkej hodnoty SOC trakčného akumulátora [9].

Krátkodobá predikcia je založená na princípe Holtovho exponenciálneho vyhladenia, ktorá je matematicky popísaná nasledovnými rovnicami:

$$S_t = \alpha y_t + (1 - \alpha)(S_{t-1} + \beta_{t-1})$$

$$0 \leq \alpha \leq 1$$
(4.1.3)

$$\beta_t = \gamma(S_t - S_{t-1}) + (1 - \gamma)\beta_{t-1}$$

$$0 \leq \gamma \leq 1$$
(4.1.4)

$$F_{t+m} = S_t + m\beta_t$$
(4.1.5)

Komplexný matematický model hybridného vozidla predstavuje základnú platformu na výskum a vývoj riadiacich algoritmov pohonnej sústavy hybridného vozidla so sériovou konfiguráciou.

## 4.2 Overenie matematického modelu a algoritmov riadenia

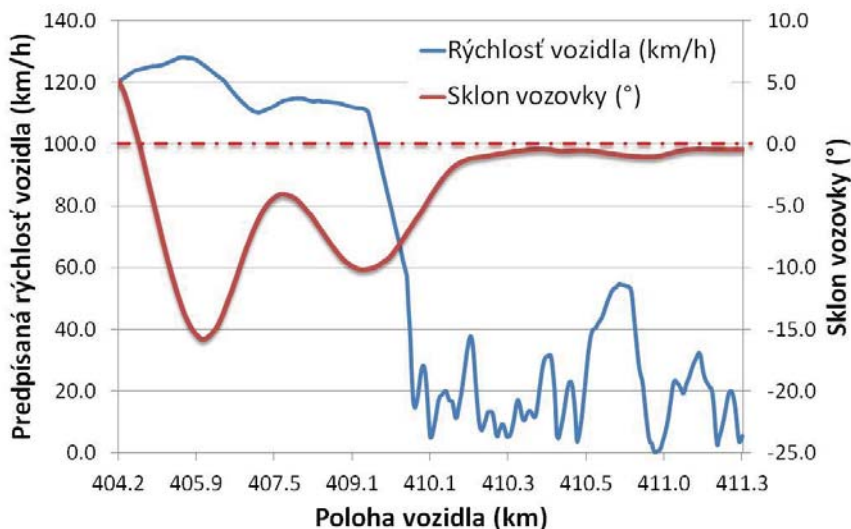
Subsystem vstupných veličín generuje priebeh požadovanej rýchlosti a sklon vozovky, pre aktuálnu polohu vozidla (Obr. 3). Vybraná časť trasy zahŕňa koniec diaľničného a začiatok mestského úseku. Zvolená časť trasy bude sledovaná aj v prípade ďalších veličín na nasledujúcich obrázkoch.

Subsystem trakčného elektromotora (kapitola 5.3) generuje výstupný signál - požadovaný prúd elektromotora (Obr. 4). Prúd elektromotora je priamoúmerný krútiacemu momentu motora.

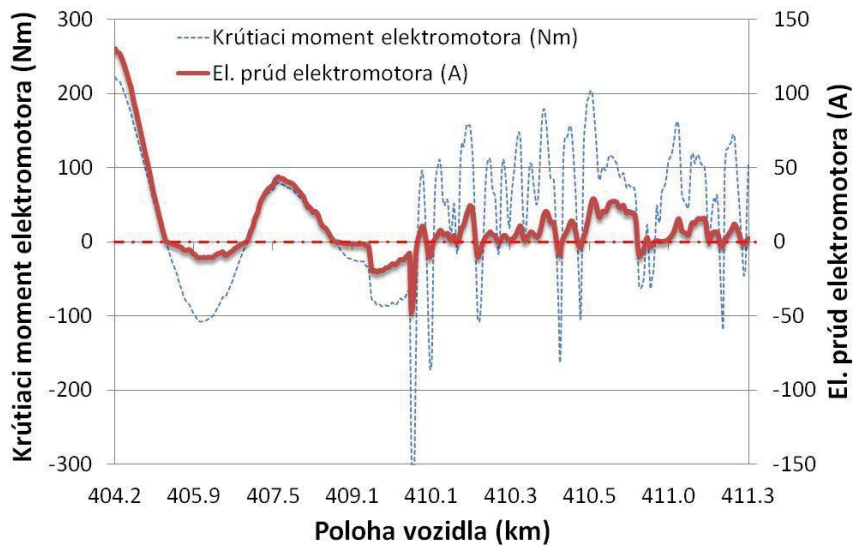
Subsystem generačnej jednotky (kapitola 5.5) generuje výstupný signál - generovaný elektrický prúd (Obr. 5). V treťom pracovnom stupni generačná jednotka dodáva do trakčného akumulátora elektrický výkon o konštantnej hodnote 17 kW, pri druhom pracovnom stupni 9 kW.

Subsystem trakčného akumulátora (kapitola 5.4) generuje výstupné signály - elektrický prúd, elektrické napätie a stav nabitia trakčného akumulátora. Kladné hodnoty elektrického prúdu predstavujú prúd vystupujúci z akumulátora a záporné hodnoty - prúd, ktorý vstupuje do akumulátora a nabíja ho (Obr. 6).

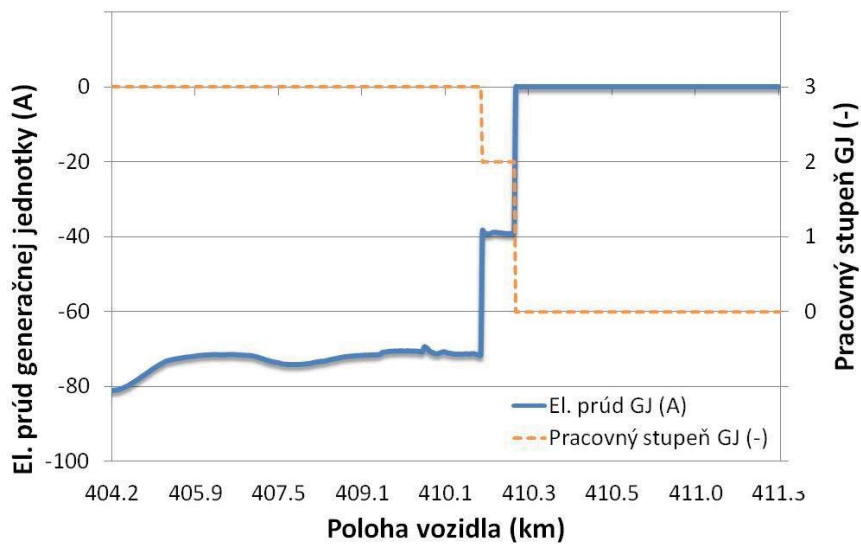
Subsystem manažmentu (kapitola 5.6) generuje výstupné signály - pracovný stupeň spaľovacieho motora a štartovací signál. Vstupné veličiny pre subsystem manažmentu sú zároveň výstupy subsystemu trakčného akumulátora (SOC a predikované SOC) sú zobrazené na Obr. 7.



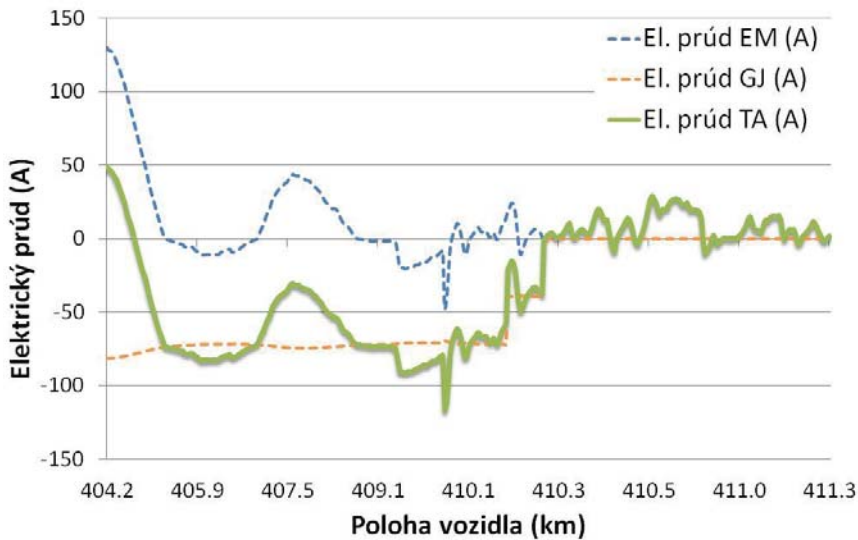
Obr. 3 Predpis rýchlosti a sklonu vozovky na vybranom úseku trasy



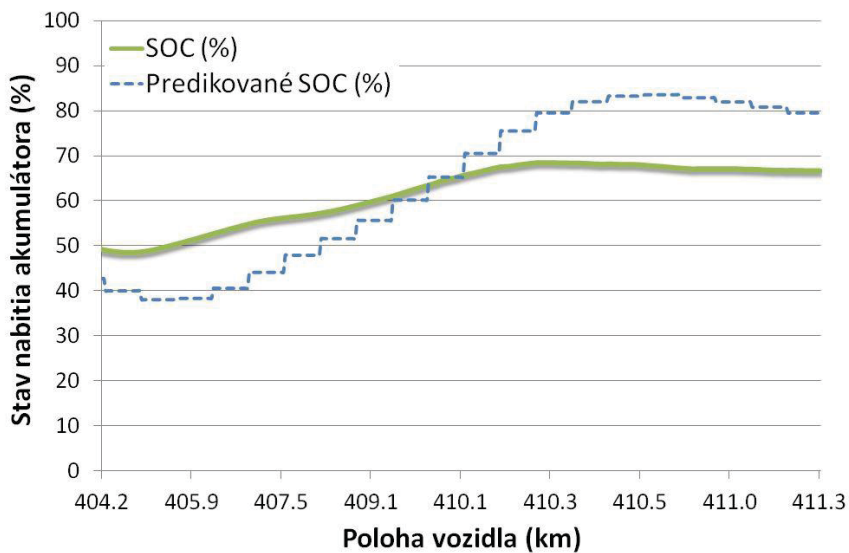
Obr. 4 Priebeh el. prúdu elektromotora na vybranom úseku trasy



Obr. 5 Priebeh el. prúdu generačnej jednotky na vybranom úseku trasy



Obr. 6 Priebeh el. prúdu trakčného akumulátora na vybranom úseku trasy



Obr. 7 Priebeh stavu nabitia trakčného akumulátora na vybranom úseku trasy



### 4.3 Vyhodnotenie simulácií

Jedným z hlavných prínosov práce je zahrnutie výškového profilu trasy vo výpočte spotreby energie. Pre overenie predpokladu, že doplnenie výškového profilu poskytne presnejší výpočet bola zostavená tabuľka, obsahujúca výsledné hodnoty ukazovateľov pre porovnanie oboch prípadov - simulácie so zahrnutím informácie o výškovom profile trasy a simulácie bez tejto informácie (Tabuľka 5).

Tabuľka 5 Porovnanie výsledkov simulácie s a bez výškového profilu trasy

Typ modelu		Počiatkové SOC (%)	Požadované SOC (%)	Konečné SOC (%)	Odhýlka SOC (%)
bez výškového profilu trasy		65	65	67.7	2.7
s výškovým profilom trasy		65	65	66.9	1.9
<b>Zmena</b>					<b>71%</b>
Počet zapnutí SM (-)	Zmena predpisu (%)	Spotreba paliva (l/100km)	Spotrebovaná energia (Wh)	Rekuperovaná energia (Wh)	
21	2.2%	3.33	53912	-127	
18	3.3%	3.4	55222	-462	
<b>86%</b>	<b>150%</b>	<b>102%</b>	<b>102%</b>	<b>364%</b>	

Podľa údajov o zmene predpisu, z uvedenej tabuľky je zrejmé, že zahrnutie výškového profilu vo výpočte spotreby energie spôsobilo významné zvýšenie hodnoty tohto údajov. Rozdiel vo výsledných hodnotách je badateľný aj v prípade spotrebovanej energie na jazdu vozidla, kde v prípade simulácie bez informácie o výškovom profile trasy hodnota sa líši o 1.31 kWh (33% celkovej kapacity navrhnutého akumulátora), čo nie je zanedbateľná čiastka. Rovnako podstatný rozdiel je badateľný v prípade rekuperovanej energie, kde v prípade simulácie bez informácie o výškovom profile trasy hodnota sa líši o 335 Wh (8% celkovej kapacity navrhnutého akumulátora).

V simuláciách a porovnaní boli použité nasledovné hodnoty cien energií:

- elektrická energia zo štandardnej elektrickej siete (1 kWh): 0.2 € a
- palivo - benzín (1 liter): 1.197 €.

V prípade, že počiatková hodnota SOC trakčného akumulátora (pri štarte vozidla) je vyššia ako požadovaná hodnota, predpokladá sa, že tento rozdiel vznikol nabíjaním z externého zdroja (štandardnej elektrickej siete) a preto sa hodnotí tarifou pre elektrickú energiu. Elektrická energia dodaná do trakčného akumulátora z generačnej jednotky sa nepočíta, ale miesto nej sa počíta množstvo paliva spotrebované generačnou jednotkou, ktoré sa hodnotí aktuálnou tarifou pre zvolené palivo - benzín.

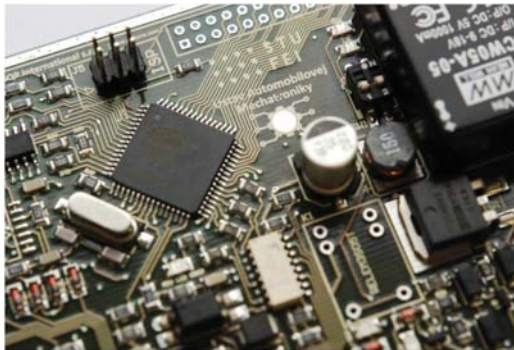
Takým spôsobom je získaný výsledok, že v prípade jazdy navrhnutého hybridného vozidla zvolenou trasou (445.7 km), pričom počiatková hodnota SOC akumulátora bola maximálna - 90%, celkové náklady činia: 17.84 €. Čiastkovo, za:

- elektrickú energiu, zo štandardnej elektrickej siete:  $0.5 \text{ kWh} * \text{tarifa} = 0.1 \text{ €}$ , a
- palivo:  $14.82 \text{ l} * \text{tarifa} = 17.74 \text{ €}$ .

Navrhnuté hybridné vozidlo s vlastnými algoritmiami riadenia dosahuje úsporu nákladov 29%, voči porovnateľnému komerčnému hybridnému vozidlu a úsporu 64%, voči porovnateľnému komerčnému vozidlu s konvenčným pohonom. Toto porovnanie uvažuje so zvolenou trasou (opísanou v kapitole 5.1) a s verejne dostupnými technickými údajmi o prevádzkových nákladoch porovnávaných vozidiel [10],[11].

#### 4.4 Realizácia elektronickej riadiacej jednotky vhodnej pre hybridné vozidlá

V rámci výskumu spojeného s predmetnou prácou bola na Ústave automobilovej mechatroniky, Fakulty elektrotechniky a informatiky v Bratislave vyvinutá a zostrojená univerzálna automobilová riadiaca jednotka (Obr. 8), ktorá je vhodná pre riadenie systémov a procesov v hybridnom vozidle. Napr. aj pre riadenie zapínania generačnej jednotky na základe predikovanej hodnoty stavu nabitia akumulátora navrhnutého hybridného vozidla.



Obr. 8 Mikroprocesor a okolité elektronické obvody

Základné úlohy zostrojenej riadiacej jednotky sú zber údajov (z analógových, resp. číslicových snímačov a stavových spínačov), ich spracovanie a ovládanie elektromechanických aktuátorov a zároveň indikátorov prístrojovej dosky vo vozidle. Vyznačuje sa integráciou veľkého počtu funkcií, vrátane vlastnej diagnostiky a ochranných obvodov proti nepriaznivým vplyvom existujúcej elektrickej sústavy vozidla a externých zdrojov elektromagnetického rušenia. Navrhnutá je v súlade s platnými normami v oblasti automobilového priemyslu a v súlade s požiadavkami na elektromagnetickú kompatibilitu. Je programovateľná v jazyku C za chodu jednotky, priamo v implementovanom systéme. Vhodné hybridné vozidlo nebolo pre testovanie riadiacej jednotky k dispozícii, preto jej

funkcia bola overená na inom než hybridnom vozidle, pričom úlohy riadiacej jednotky zodpovedali danému vozidlu.

Kompletná dokumentácia a výrobné podklady k predstavenej automobilovej riadiacej jednotke podlieha zákonom o priemyselnom vlastníctve, a preto nie je vo väčšom rozsahu sprístupnená v predloženej práci.

## 5 Hlavné prínosy dizertačnej práce a ďalšie smery rozvoja

Predložená práca svojím obsahom spĺňa vytýčené ciele. Hlavné prínosy je možné zhrnúť do nasledujúcich bodov:

- rozšírenie poznatkov v oblasti pohonných systémov hybridných vozidiel a poznatkov v oblasti riadiacich algoritmov týchto systémov (bližšie opísané v kap. 2 a 4 predloženej práce),
- rozšírenie poznatkov, definícia fyzikálnych závislostí a tvorba univerzálneho automatizovaného výpočtu pre trakčné akumulátory elektrických a hybridných vozidiel (bližšie opísané v kap. 3.1.2 predloženej práce),
- rozšírenie dátového modelu trasy (jazdného cyklu) o predpis sklonu vozovky (resp. výškový profil trasy), pri orientácii na prejdenú dráhu vozidla (bližšie opísaný v kap. 5.1 a 6.1 predloženej práce),
- zostavenie komplexného modelu hybridného vozidla, ktorý zahŕňa modely jednotlivých komponentov pohonnej sústavy spolu so systémom manažmentu (bližšie opísaný v kap. 5 a 6 predloženej práce),
- vývoj a zostrojenie funkčnej univerzálnej automobilovej riadiacej jednotky, ktorá vznikla v spolupráci so spoločnosťou GreenWay Operator a.s. a bude prihlásená v Registri úžitkových vzorov Slovenskej Republiky (bližšie opísaný v kap. 7 predloženej práce).

Možnosti pre ďalší rozvoj:

- doplnenie dopravných informácií a informácií o poveternostných podmienkach za účelom ďalšieho vylepšenia predikcie stavu energetických zásobníkov hybridného vozidla.
- vylepšenie krátkodobej predikcie, výmenou súčasného algoritmu za algoritmus, schopný prevádzky v reálnom čase,
- vylepšenie modelu elektromotora a modelu generačnej jednotky,
- overenie simulačných výsledkov experimentom.

## 6 Záver

Technologický pokrok v oblasti výkonovej elektroniky, materiálov, zásobníkov energie a výpočtovej techniky umožnil realizáciu nových technických riešení aj v oblasti hybridných a elektrických vozidiel. Príchod nových technológií pohonu a nových možností uskladnenia energie si vyžaduje aj opätovné zamyslenie sa nad vhodnými riadiacimi metódami týchto nových prvkov. Výskum v tejto oblasti je na vysokej úrovni a dosiahnuté výsledky sú ohromujúce.

V práci je predstavený prieskum súčasných technológií zdrojov (resp. jednotiek transformácie energie) a zásobníkov energie pre elektrické a hybridné vozidlá a zároveň aj metód vysoko-úrovňového manažmentu energie vo vozidlách. Ústredným problémom, ktorým sa práca zaoberá je optimálne hospodárenie s dostupnou energiou v uzavretom systéme hybridného elektrického vozidla. S uvedeným ústredným problémom je spojená aj otázka vhodnej konfigurácie pohonnej sústavy a výber vhodných komponentov, čím sa zaoberá kapitola 1 a 3. Z prieskumu súčasného stavu riešenej problematiky vyplýva, že využitie hybridných a elektrických vozidiel má najväčšie opodstatnenie v dynamických jazdných režimoch (v mestskej premávke).

V kapitole 4 je predstavený prieskum súčasného stavu v oblasti vrcholového manažmentu energie v rámci možností, ktoré ponúka daná koncepcia vozidla. Z prieskumu vyplýva, že manažment hybridných pohonných sústav je zameraný na vyrovnávanie zaťaženia jednotlivých pohonných agregátov, pri zohľadnení ich mapy účinnosti. Riadiace algoritmy zahŕňajúce predikciu sú predmetom viacerých vedeckých výskumov, pričom súčasné hybridné vozidlá zahŕňajú iba základné predikcie stavu nabitia trakčného akumulátora. Výsledok výskumu je predstavený v kapitolách 5, 6 a 7, kde je postupne predstavený model hybridného vozidla (kapitola 5), zostavený zo šiestich subsystémov, výsledky získané v simuláciách (kapitola 6) a riadiaca jednotka, navrhnutá pre automobily (kapitola 7). Všetky subsystémy modelu boli navrhnuté výhradne za účelom predloženej práce a výsledky prezentované na konferenciách a vo vedeckých publikáciách. Zostrojená univerzálna riadiaca jednotka, je určená pre použitie v automobiloch, pre rôzne riadiace úlohy. Je vhodná aj na použitie v hybridnom vozidle, vo funkcií manažmentu pohonnej sústavy vozidla. Pri vyhodnotení výsledkov boli zohľadnené aj ceny paliva a elektrickej energie dodávanej z distribučnej siete. Navrhnuté hybridné vozidlo s vlastnými algoritmi riadenia dosahuje náklady na zvolenú trasu (opísanú v kapitole 5.1) v hodnote 17.74 € (pri súčasných tarifikách). Úspora nákladov navrhnutého hybridného vozidla voči porovnateľnému komerčnému hybridnému vozidlu sa dosahuje v hodnote 29%, a úspora voči porovnateľnému vozidlu so spaľovacím motorom, v hodnote 64%.

Výskum, predstavený v predloženej práci potvrdzuje, že zahrnutie dlhodobej predikcie (výškového profilu trasy) a krátkodobej predikcie (Holtovho vyhladenia) vo výpočte spotreby energie vozidla

značne prispieva k presnosti výpočtu. Simulované vozidlo, používajúce zostavené algoritmy dosahuje lepšie výsledky.

## 7 Summary

Rapid development in the field of power electronics, engineering materials, energy accumulation units and computational devices stimulated innovation also in the field of hybrid and electric vehicles. New technologies of power-train and energy accumulation also demand innovation of acceptable control methods and algorithms. Research in aforementioned field is at high level and results are astonishing. Presented thesis deals with a subject of accurate energy consumption estimation as well as optimization of energy processes in energy storage of serial hybrid vehicle (extended-range electric vehicle). After basic introduction and categorization of given vehicle configuration, energy storage and transformation units are presented. Existing management methods are introduced next, as well as author's contribution in the control algorithms of hybrid vehicle power-train.

In the following section of the thesis a complete simulation model of hybrid vehicle is presented as well as evaluation of designed algorithms of energy management and power-train control.

Prior to conclusion results obtained by simulations are presented and universal automotive control unit, developed by the Institute of automotive mechatronics is introduced. The control unit is applicable in hybrid vehicle control, where the proposed algorithms can be implemented. In conclusion, results and benefits of the thesis are assessed.

## Pod'akovanie

Dizertačná práca bola podporená z projektu APVV-0246-12, za čo vyslovujem úprimné pod'akovanie.

## Zoznam použitej literatúry

- [1] Meridian International Research, „High Impedance Batteries,“ Meridian International Research, 2006. [Online]. Available: <http://www.meridian-int-res.com/Energy/Battery.htm>. [Cit. 2013].
- [2] S. Lukic a e. al., „Energy Storage Systems for Automotive Applications,“ *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, zv. 55, %1, vyd.6, p. 10, 2008.
- [3] S. Lukic a A. Emadi, „Effects of Drivetrain Hybridization on Fuel Economy and Dynamic Performance of Parallel Hybrid Electric Vehicles,“ *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, zv. 53, %1, vyd.2, p. 5, 2004.
- [4] X. Li a S. Williamson, „Assessment of Efficiency Improvement Techniques for Future Power

- Electronics Intensive Hybrid Electric Vehicle Drive Trains," *Electrical Power Conference*, p. 6, 2007.
- [5] A. Emadi, Y. Lee a K. Rajashekara, „Power Electronics and Motor Drives in Electric, Hybrid Electric, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles," *Industrial Electronics*, zv. 55, %1. vyd.6, p. 9, 2008.
- [6] C. Chan, „The State of the Art of Electric, Hybrid and Fuel Cell Vehocles," *Proceedings of the IEEE*, zv. 95, %1. vyd.4, p. 15, 2007.
- [7] E. Ribar, J. Murín a G. Mušič, „Energy management possibilities in extended range electric veicles (EREVs)," rev. *EEE 2014*, Tatranské Matliare, 2014.
- [8] Anonymous, „Toyota Prius (XW30)," Wikipedia, [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Toyota\\_Prius\\_\(XW30\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Toyota_Prius_(XW30)). [Cit. 14 9 2015].
- [9] Anonymous, „Autoplenum.de," Autoplenum.de, [Online]. Available: <http://www.autoplenum.de/Auto/MAZDA/5/Van/2005-2010>. [Cit. 14 9 2015].

## Publikačná činnosť autora

### ADF Vedecké práce v ostatných domácich časopisoch

ADF01 STAŇÁK, Vladimír - RIBAR, Eduard - TSOUMANIS, Anastasis. Computer Simulation of Propulsion System for Small Electric Vehicle. In *Technológ*. Roč. 5, č. 4 (2013), s.179-182. ISSN 1337-8996.

### ADM Vedecké práce v zahraničných časopisoch registrovaných v databázach Web of Science alebo SCOPUS

ADM01 RIBAR, Eduard - MURÍN, Justín - KOZÁK, Štefan. Vehicle Route Complex Modelling. In *International Review of Automatic Control*. Roč. 9, č. 2 (2016). ISSN 1974-6059. *Príspevok bol prijatý dňa: 7. apríla 2016.*

### AFD Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

AFD01 RIBAR, Eduard - MURÍN, Justín. Mathematical Model of a Supercapacitor Cell. In *ELITECH'13 [elektronický zdroj] : 15th Conference of Doctoral Students; Bratislava, Slovakia, 5 June 2013*. 1. vyd. Bratislava : Nakladateľstvo STU, 2013, s.CD-ROM, [5] s. ISBN 978-80-227-3947-4.

AFD02 RIBAR, Eduard - BUGÁR, Martin - STAŇÁK, Vladimír. Propulsion System Design for a Small Electric Scooter with Hybrid Energy Storage. In *Renewable Energy Sources 2013 : 4th International Scientific Conference OZE 2013. Tatranské Matliare, Slovakia, May 21-23, 2013*. 1.vyd. Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2013, s.301-306. ISBN 978-80-89402-64-9.

AFD03 RIBAR, Eduard - MURÍN, Justín - MUŠIČ, G. Energy management possibilities in extended range electric vehicles (EREVS). In *Power Engineering 2014. Energy - Ecology - Economy 2014 : Proceedings of the 12th International Scientific Conference EEE 2014; Tatranské Matliare, Slovakia; May 20-22, 2014*. 1. vyd. Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2014, s. 131-136. ISBN 978-80-89402-69-4.

AFD04 RIBAR, Eduard - MURÍN, Justín - NOGE, Filip. Power supply protection for automotive electronics. In *ELITECH'14 [elektronický zdroj] : 16th Conference of Doctoral Students; Bratislava, Slovakia, 4 June 2014*. 1.vyd. Bratislava : Nakladateľstvo STU, 2014, CD-ROM, [6] p. ISBN 978-80-227-4171-2.

AFD05 RIBAR, Eduard - MURÍN, Justín. Route elevation impact on predictive control in power-train of hybrid vehicle. In *ELITECH'15 [elektronický zdroj] : 17th Conference of doctoral students. Bratislava, Slovak Republic, May 25, 2015*. 1. vyd. Bratislava : Nakladateľstvo STU, 2015, CD-ROM, [4] s. ISBN 978-80-227-4358-7.

AFD06 RIBAR, Eduard - MURÍN, Justín. Road slope introduction in vehicle route modelling. In *2016 Cybernetics & informatics (K&I) [elektronický zdroj] : 28th International conference. Levoča, Slovak Republic. February 2-5, 2016*. 1. ed. [s.l.] : IEEE, 2016, CD-ROM, [5] s. ISBN 978-1-5090-1834-5. V databáze: IEEE.

AFD07 STAŇÁK, Vladimír - RIBAR, Eduard. Technical Description of Electric Vehicle Conversion. In *Transfer 2013 [elektronický zdroj] : 14. medzinárodná vedecká konferencia. Trenčianske Teplice, 17.-18.10.2013*. Trenčín : Trenčianska univerzita Alexandra Dubčeka v Trenčíne, 2013, s.CD ROM, 8 p. ISBN 978-80-8075-607-9.

AFD08 STAŇÁK, Vladimír - BUGÁR, Martin - RIBAR, Eduard - MADARÁS, Juraj - NOGE, Filip. Propulsion System of Advanced Electric Vehicle. In *Renewable Energy Sources 2013 : 4th International Scientific Conference OZE 2013. Tatranské Matliare, Slovakia, May 21-23, 2013*. 1.vyd. Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2013, s.317-322. ISBN 978-80-89402-64-9.

#### **AGJ Autorské osvedčenia, patenty, objavy**

AGJ01 RIBAR, Eduard - NOGE, Filip - MURÍN, Justín - KOZÁK, Štefan. Elektronická riadiaca jednotka pre elektrické vozidlo : dátum oznámenia pôvodcu o vytvorení predmetu priemyselného vlastníctva: 9.2.2015

#### **BDF Odborné práce v ostatných domácich časopisoch**

BDF01 RIBAR, Eduard. Elektrický skúter z dielne FEI STU - "Feiter 1". In *EE časopis pre elektrotechniku, elektroenergetiku, informačné a komunikačné technológie*. Roč. 19, č. 1 (2013), s.príloha Volt, s.16. ISSN 1335-2547.

BDF02 STAŇÁK, Vladimír - RIBAR, Eduard. Desať otázok a odpovedí o elektromobilite. In *EE časopis pre elektrotechniku, elektroenergetiku, informačné a komunikačné technológie*. Roč. 19, č. 5 (2013), s.príloha Volt, s. 12-14. ISSN 1335-2547.

#### **GII Rôzne publikácie a dokumenty, ktoré nemožno zaradiť do žiadnej z predchádzajúcich kategórií**

GII01 KUKUČKA, Marek - BUGÁR, Martin - RIBAR, Eduard. ELOSYS 2014. In *Spolok absolventov a priateľov FEI STU - EF SVŠT. Ročenka 2014*. 1. vyd. Bratislava : STU v Bratislave, 2015, S. 83-85. ISBN 978-80-227-4328-0.





Meno autora: **Ing. Eduard Ribar**

Názov práce: “OPTIMALIZÁCIA ENERGETICKÝCH PROCESOV HYBRIDNÝCH  
POHONOV VOZIDIEL”

Náklad: 15 ks

Dizertačná práca spolu s autoreferátom je uložená na Fakulte elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave.

Termín vytlačenia: 2016



## **Ing. Eduard Ribar**

(\*1988) Absolvoval Fakultu elektrotechniky a informatiky, Slovenskej technickej univerzity v Bratislave, kde v roku 2012 úspešne ukončil inžinierske štúdium v odbore automobilová mechatronika. Po ukončení inžinierskeho štúdia pôsobil ako interný doktorand na Ústave automobilovej mechatroniky, Oddelení aplikovanej mechaniky a mechatroniky, Fakulty elektrotechniky a informatiky, Slovenskej technickej univerzity v Bratislave. Je autorom a spoluautorom viacerých vedeckých a odborných článkov publikovaných na domácich konferenciách, v domácich a zahraničných periodikách, spolupôvodcom predmetu priemyselného vlastníctva a spoluautorom úžitkového vzoru. Ako spoluriešiteľ sa podieľal na projekte KEGA, VEGA, projektov APVV. Ako zodpovedný riešiteľ viacerých grantových projektov Nadácie Pontis, Nadácie VW, Nadácie Tatra banky. Vo svojej výskumnej činnosti sa venuje problematike modelovania hybridných a elektrických pohonných sústav vozidiel so zvláštnym zameraním na trakčné akumulátory automobilov a ich riadiace systémy.

**Bratislava 2016**