



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

**FAKULTA STROJNÍ**

**Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**

**Využití 48 V technologie v hybridních pohonech**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Autor práce: Jan Macháček

Vedoucí práce: Ing. Josef Morkus, CSc.

Akademický rok: 2018/2019

Studijní program: Dopravní, letadlová a transportní technika

Studijní obor: Motorová vozidla

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Macháček** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **423330**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**  
Studijní program: **Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Dopravní, letadlová a transportní technika**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Využití 48 V technologie v hybridních pohonech**

Název diplomové práce anglicky:

**Using of 48 V technology in hybrid powertrains**

Pokyny pro vypracování:

Zpracujte rešerši použití 48 V technologie ve vozidlech s hybridním pohonem. Posuďte výhody a limity jejího použití. Na základě měření jízdy vozidla se spalovacím motorem na konkrétní trase vypočtete energickou bilanci jízdy. Zvolte vhodný motor/generátor a porovnejte možné energetické úspory použitím mild hybridního BSG pohonu. Pokud možno dodržte stejný stav nabití 48V baterie na začátku i na konci trati.

Seznam doporučené literatury:

Internet, přednášky Hybridní pohony

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Josef Morkus, CSc., ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **18.04.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **10.07.2019**

Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_

  
Ing. Josef Morkus, CSc.  
podpis vedoucí(ho) práce


  
doc. Ing. Oldřich Vitek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

  
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

29.4.2019  
Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta

**Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou prací s názvem „Využití 48 V technologie v hybridních pohonech“ zpracoval samostatně pod vedením Ing. Josefa Morkuse, CSc. s použitím literatury uvedené na konci mé diplomové práce v seznamu použité literatury.

V Praze dne 1.7.2019

Bc. Jan Macháček

**Poděkování**

Chtěl bych poděkovat panu Ing. Josefu Morkusovi, CSc., za ochotu a cenné rady v průběhu psaní diplomové práce. Rovněž si velmi vážím podpory od svých blízkých a své přítelkyně, nejen během studia. Díky směřují i těm, kteří v průběhu psaní této práce zasahovali do mého života a významně mě obohatili.

## Abstrakt

Diplomová práce je zaměřena na využití současných trendů ve stále více využívané 48 voltové elektrické síti automobilů, zejména v mild-hybridních vozidlech. V první části této práce je seznámení s rozdělením hybridních pohonů podle stupně hybridizace a vysvětlení motivace k zavedení 48 V sítě. Následuje představení hlavních částí 48 V systému a jejich předních distributorů. Představená jsou i vozidla, která tuto technologii využívají v produkčním, či koncepčním stádiu. Praktická část práce se zaměřuje na výpočet energetické náročnosti konvenčního vozidla Škoda Octavia na dané trase. Pro vozidlo je navržen BSG elektromotor, který spolu s ostatními částmi systému simuluje jízdu, již mild hybridního vozidla, po stejné trati. Ve výsledcích práce se dostáváme k finální úspoře paliva na ujeté trati za použití 48 V systému a grafu reprezentující stav nabití baterie během jízdy. Závěr je věnovaný shrnutí výsledků a vysvětlení širšího potenciálu 48 V sítě vedoucího k větším úsporám paliva a výfukových exhalací.

**Klíčová slova:** 48 V systém, Mild hybrid, BSG, Škoda Octavia, MHEV, Lithium-Ion akumulátor

## Abstract

This thesis is focused on the use of current trends in the increasingly used 48 volt electric network of cars, especially in mild-hybrid vehicles. In the first part of this thesis is introduced the division of hybrid drives according to the degree of hybridization and explanation of the motivation to introduce 48 V network. Following is the introduction of the main parts of the 48 V system and their leading distributors. Also presented are vehicles that use this technology in production or conceptual stages. The practical part focuses on the calculation of the energy performance of a conventional Škoda Octavia on a given route. A BSG electric motor is designed for the vehicle, which, along with other parts of the system, simulates the ride, already of a mild hybrid vehicle, along the same track. In the work results we get to the final fuel economy on the track, using a 48 V system and a graph representing the battery state-of-charge while driving. The conclusion is devoted to summarizing the results and explaining the wider potential of the 48 V network leading to lower fuel economy and exhaust emissions.

**Keywords:** 48 V system, Mild hybrid, BSG, Skoda Octavia, MHEV, Lithium Ion battery

## Obsah

Úvod.....	9
<b>1) Rozdělení hybridních vozidel a jejich specifikace .....</b>	<b>10</b>
<b>1.1. Micro hybrid.....</b>	<b>10</b>
<b>1.2. Mild hybrid .....</b>	<b>10</b>
<b>1.3. Full hybrid .....</b>	<b>11</b>
<b>1.4. Plug-in hybrid.....</b>	<b>12</b>
<b>1.5. Hybridní elektromobil .....</b>	<b>12</b>
<b>1.6. Range extender .....</b>	<b>12</b>
<b>2) Využití 48 V sítě v hybridních vozidlech .....</b>	<b>12</b>
<b>2.1. Důvody zavedení 48 V sítě .....</b>	<b>12</b>
<b>2.1.1. Cena .....</b>	<b>12</b>
<b>2.1.2. Bezpečnost.....</b>	<b>13</b>
<b>2.1.3. Zlepšení jízdních vlastností.....</b>	<b>13</b>
<b>3) Přední výrobci 48 V systémů pro automobilový průmysl.....</b>	<b>13</b>
<b>3.1. Valeo .....</b>	<b>13</b>
<b>3.2. Bosch.....</b>	<b>16</b>
<b>3.3. Continental.....</b>	<b>17</b>
<b>3.4. Delphi Technologies .....</b>	<b>18</b>
<b>4) Přehled vozidel s 48 V technologií.....</b>	<b>19</b>
<b>4.1. Osobní vozidla: .....</b>	<b>19</b>
<b>4.2. Sportovní vozidla:.....</b>	<b>19</b>
<b>4.3. SUV:.....</b>	<b>19</b>
<b>4.4. Užitková vozidla: .....</b>	<b>20</b>
<b>5) Agregáty pro 48 V systém.....</b>	<b>20</b>
<b>5.1. Belted Starter-Generator.....</b>	<b>20</b>
<b>5.2. DC/DC měnič napětí .....</b>	<b>21</b>
<b>5.3. Elektrický turbokompresor .....</b>	<b>21</b>
<b>5.4. Elektricky vyhřívaný katalyzátor .....</b>	<b>22</b>
<b>5.5. Akumulátory.....</b>	<b>22</b>
<b>5.5.1. Nikl-Kadmiové akumulátory (Ni-Cd).....</b>	<b>24</b>
<b>5.5.2. Nikl-Metal Hydridové akumulátory (Ni-MH) .....</b>	<b>24</b>
<b>5.5.3. Lithium-iontové akumulátory (Li-Ion).....</b>	<b>24</b>
<b>5.6. Ostatní .....</b>	<b>25</b>
<b>6) Energetická náročnost standardního 12 V vozidla.....</b>	<b>26</b>

6.1.	Představení měřené trasy .....	26
6.1.1	Tvorba výškového profilu.....	26
6.2.	Představení měřeného vozidla.....	27
6.2.1.	Tvorba rychlostního profilu .....	28
6.3.	Rozdělení trasy na výpočetní úseky .....	29
7)	Výpočet energetické bilance vozidla na ujeté trase .....	29
7.1.	Stanovení jízdních odporů.....	29
7.1.1.	Odpor valivý .....	29
7.1.2.	Odpor stoupání.....	30
7.1.3.	Odpor zrychlení.....	30
7.1.4.	Odpor vzdušný.....	31
7.2.	Stanovení energie spotřebované na kolech vozidla .....	32
7.2.1.	Energie z odporu valení .....	32
7.2.2.	Energie z odporu stoupání.....	33
7.2.3.	Energie ze změny rychlosti .....	33
7.2.4.	Energie z odporu vzduchu .....	34
7.3.	Výpočet momentů a výkonů na kolech vozidla a jejich přepočítání na hodnoty motoru..	34
8)	Regresní analýza spalovacího motoru (metoda prof. Macka).....	36
8.1.	Regresní výpočet naměřených dat z válcové brzdy .....	36
8.2.	Stanovení účinnosti spalovacího motoru v průběhu měřené trati .....	39
9)	Možnosti využití 48 V systému na měřené trati.....	40
9.1.	Implementace systému .....	40
9.1.1.	Návrh BSG elektromotoru.....	41
9.1.2.	48 V Baterie.....	46
9.1.3.	DC/DC měnič napětí .....	48
9.2.	Strategie řízení Mild-hybridu Škoda Octavia.....	48
9.2.1.	Pohon elektromotorem.....	48
9.2.2.	Rekuperační brzdění.....	50
9.2.3.	Zvýšení účinnosti spalovacího motoru.....	51
9.3.	Výpočet stavu nabití baterie v průběhu trati.....	52
9.4.	Porovnání spotřebovaného paliva.....	53
9.5.	Optimalizace 48 V systému.....	55
9.5.1.	Režim plachtění .....	55
9.5.2.	Režim E-Boosting .....	57
9.5.3.	Pokročilý Start/Stop systém.....	58
10)	Závěr.....	59

---

<b>Seznam použitých zkratek a symbolů .....</b>	<b>61</b>
<b>Seznam použité literatury .....</b>	<b>63</b>
<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>67</b>
<b>Seznam příloh .....</b>	<b>68</b>



## Úvod

Celosvětový nárůst emisí CO<sub>2</sub> spolu s nárůstem znečištění ovzduší ve městech zapříčiňují, že legislativní regulace pro automobilový průmysl stále snižují limity výfukových exhalací. Jedna z klíčových technologií ke splnění těchto regulací je hybridizace pohonného ústrojí. Především Evropský trh čeká již od roku 2021 velká výzva s příchodem nového emisního limitu 95 gCO<sub>2</sub>/km měřeného dle WLTP (Worldwide harmonized Light vehicle Test Procedure).

Technická řešení se soustředí na elektrifikaci automobilů, a to z hlediska různých stupňů hybridních pohonů po plně bateriová vozidla. Z ekonomického i ekologického hlediska je jedním z prvních kroků směrem k elektrické mobilitě hybridní pohon, jmenovitě pak 48 V Mild-hybrid.

## 1) Rozdělení hybridních vozidel a jejich specifikace

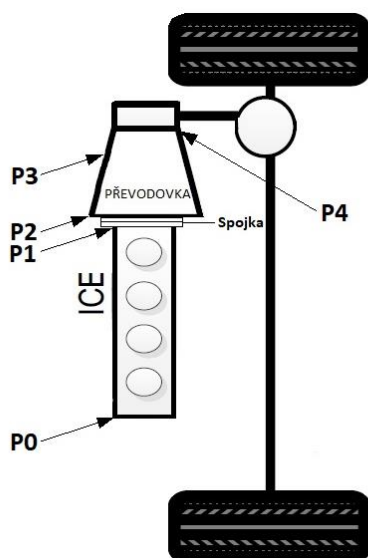
Hybridní automobil, je vozidlo využívající k trakci více než jeden druh pohonu a má tedy zpravidla nejméně dva zásobníky energie. Elektrifikace pohonu je v současnosti jedním z největších trendů a téměř veškerí přední výrobci automobilů se jím zabývají. Hlavní motivace k vývoji v oblasti hybridních a elektrických vozidel je stále se zhoršující stav životního prostředí, zpřísnující se emisní limity a v neposlední řadě vývoj ceny ropy. [1]

### 1.1. Micro hybrid

Automobil s palubním napětím 12 voltů, vybavený výkonnějším elektrickým příslušenstvím (startér, alternátor, akumulátor). Dále je vybaven systémem Start-Stop, který umožňuje vypínání motoru při zastavení a jednoduchou rekuperaci. Jedná se tedy spíše o marketingový výraz nežli o reálný hybridní pohon. [2], [3]

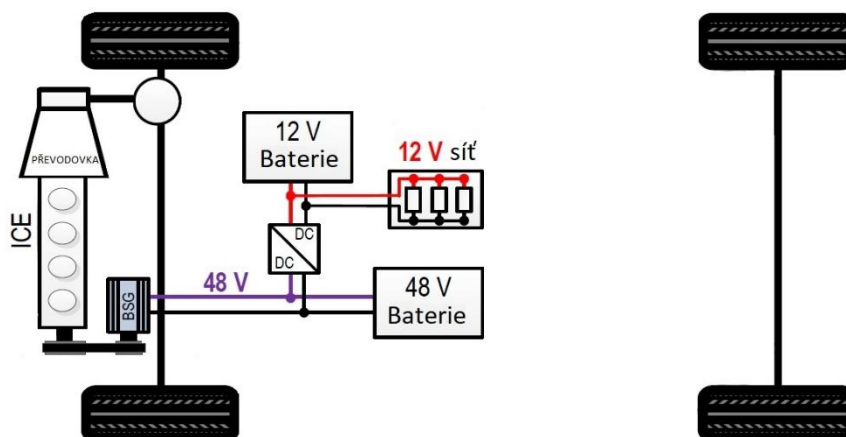
### 1.2. Mild hybrid

Palubní napětí oloveného 12 voltového akumulátoru je navíc vybaveno i 48 voltovým akumulátorem pro pohon elektrického stroje a případně pomocných agregátů (elektrický kompresor, ...). Vůz využívá spalovací motor, zatímco elektrický stroj pracuje pouze ve vybraných situacích (studený start, podpora spalovacího motoru, ...). Některá vozidla jsou vybavena navíc elektromotorem, který umožňuje jízdu čistě na elektřinu na omezené vzdálenosti (do 2 km). Na Obr. 1 lze vidět uspořádání pohonného ústrojí mild hybridního vozidla s označením jednotlivých pozic, P0 až P4, pro umístění 48 voltového BSG elektromotoru.



Obr. 1: Architektura Mild hybridního pohonného ústrojí

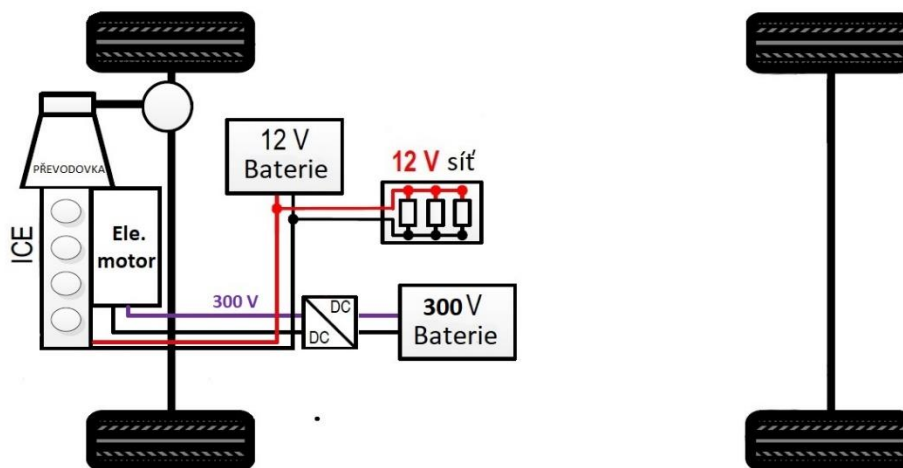
Architektura celého 48 V systému v konfiguraci P0 zabudovaného do vozidla s pohonem přední nápravy je znázorněna na Obr. 2. [2], [3], [4]



Obr. 2: 48 V Mild hybrid v konfiguraci P0

### 1.3. Full hybrid

Spalovací motor pracuje ve spolupráci s elektromotorem. Možnost jízdy pouze pomocí elektromotoru, spalovacího motoru, či kombinací obou. Vozidlo převážně využívá elektromotor při nízkých rychlostech, či při potřebě akcelerace. Ve vyšších rychlostech je připojen spalovací motor. Automobily této kategorie jsou vybaveny vysokonapěťovou baterií, která je dobíjena regenerativním brzděním. Například Toyota Prius. [2], [3]



Obr. 3: Full hybrid architektura

## 1.4. Plug-in hybrid

Jedná se o plně hybridní vozidlo, které lze navíc síťově dobíjet. Dojezd na elektromotor je již v řádech desítek kilometrů, což je způsobeno akumulátorem s větší kapacitou. V dnešní době má Plug-In hybridní variantu v nabídce každá významnější automobilka. Například Toyota Prius plug-in, VW Golf GTE, BMW i8 a podobně. [3]

## 1.5. Hybridní elektromobil

Jedná se v podstatě již o elektromobil, jenž je poháněn primárně elektrickou cestou a lze dobíjet z elektrické sítě. Navíc je ovšem vybaven spalovacím motorem, který je uveden do chodu v případě potřeby dobití baterie pro zvýšení dojezdu nebo lze, v případě nutnosti, pevně spojit s nápravou. Kapacita baterií je opět vyšší než u Plug-in hybridů a vozidlo je vybaveno planetovým děličem výkonu. Mezi typické zástupce tohoto modelu patří Opel Ampera, Mercedes Benz B-Class E-Cell plus a další. [1], [3]

## 1.6. Range extender

Elektromobil s přidavným spalovacím motorem, také nazývaný sériový Range extender, je automobil, který využívá k pohonu pouze elektrickou cestu. Vůz je, oproti elektromobilu, vybaven spalovacím motorem, který lze spustit a pomocí generátoru jím dobíjet vysokonapětovou baterii. Spalovací motor již, oproti hybridnímu elektromobilu, nelze připojit k pohonu nápravy. Dojezd čistě na baterii zpravidla do 100 km. [1], [3]

# 2) Využití 48 V sítě v hybridních vozidlech

## 2.1. Důvody zavedení 48 V sítě

Motivace k zavedení 48 V sítě do vozidel se může u rozličných typů vozidel zásadně lišit, ale mezi hlavní přednosti této technologie patří:

### 2.1.1. Cena

Jelikož se jedná v současnosti o nejdostupnější hybridní řešení, lze očekávat vyšší zájem ze strany veřejnosti i automobilek. 48 V systém znamená stále ještě bezpečné napětí, tudíž není nutná specializovaná obsluha v servisech. Náklady na samotnou výrobu vozu s tímto systémem jsou také řádově nižší oproti vysokonapětovým systémům. To je především způsobeno tím, že lze systém implementovat do již existujících vozidel, kde je schopen pracovat paralelně s 12 V rozvodem. Původní 12 V systém ve vozidle zajišťuje napájení ostatního elektrického příslušenství (osvětlení, GPS, ...). Ve srovnání s vozidlem využívajícím

pouze spalovací motor, se tato vozidla vyznačují úspornějším provozem s ohledem na spotřebu paliva a nižšími koncentracemi exhalací ve výfukových plynech. [5], [6]

### **2.1.2. Bezpečnost**

Napětí je nižší než DC 60 V a nehrozí tedy úraz vysokým napětím. To mimo jiné znamená i vyšší odolnost vůči požáru ve srovnání s vysokonapěťovými systémy. [6], [7]

### **2.1.3. Zlepšení jízdních vlastností**

Vozidlo je vybaveno BSG elektrickým strojem, který je schopen vypomáhat spalovacímu motoru při nutnosti akcelerace, studeného startu, či dosažení vysoké rychlosti. 48 V elektrická síť umožňuje nahrazení mechanicky poháněných agregátů elektricky poháněnými (E-turbokompresor, kompresor klimatizace, stabilizátor, ...). [8], [9], [10]

## **3) Přední výrobci 48 V systémů pro automobilový průmysl**

### **3.1. Valeo**

Francouzská technologická firma pro automobilový průmysl a partner automobilek po celém světě v současné době nabízí 48 V řešení pro mild-hybridní vozidla. Systém se skládá z 48 V, řemenem poháněného, startér-generátoru (BSG – Belt Starter Generator), DC/DC měniče a 48 V Li-ion baterie. BSG elektromotor je schopný rekuperovat energii získanou při brzdění, ukládat ji do 48 V baterie a využít ji například při potřebě prudké akcelerace. Jedná se o mild-hybridní řešení, které nevyžaduje velké změny v konstrukci vozidla a lze tedy za přijatelné náklady snadno implementovat do již existujících vozidel. Výrobce uvádí, že s jejich systémem, lze dosáhnout snížení emisí CO<sub>2</sub> a snížení spotřeby paliva až o 10-13 %. [11], [12]

Tato technologie přináší řadu dalších uplatnění elektricky ovládaných komponent v automobilu. Valeo například nabízí elektronicky ovládanou spojku, elektronicky ovládaný turbokompresor či dokonce aktivní zavěšení kol.



Obr. 4: Valeo 48 V Mild hybrid systém [60]

Základní BRS systém nabízí:

**a) Rekuperace:**

- Kinetická energie je při brzdění transformována na energii elektrickou pomocí BSG elektrického stroje, zastupujícího funkci generátoru, a ukládána do 48 V baterie.

**b) Boost (podpora spalovacího motoru):**

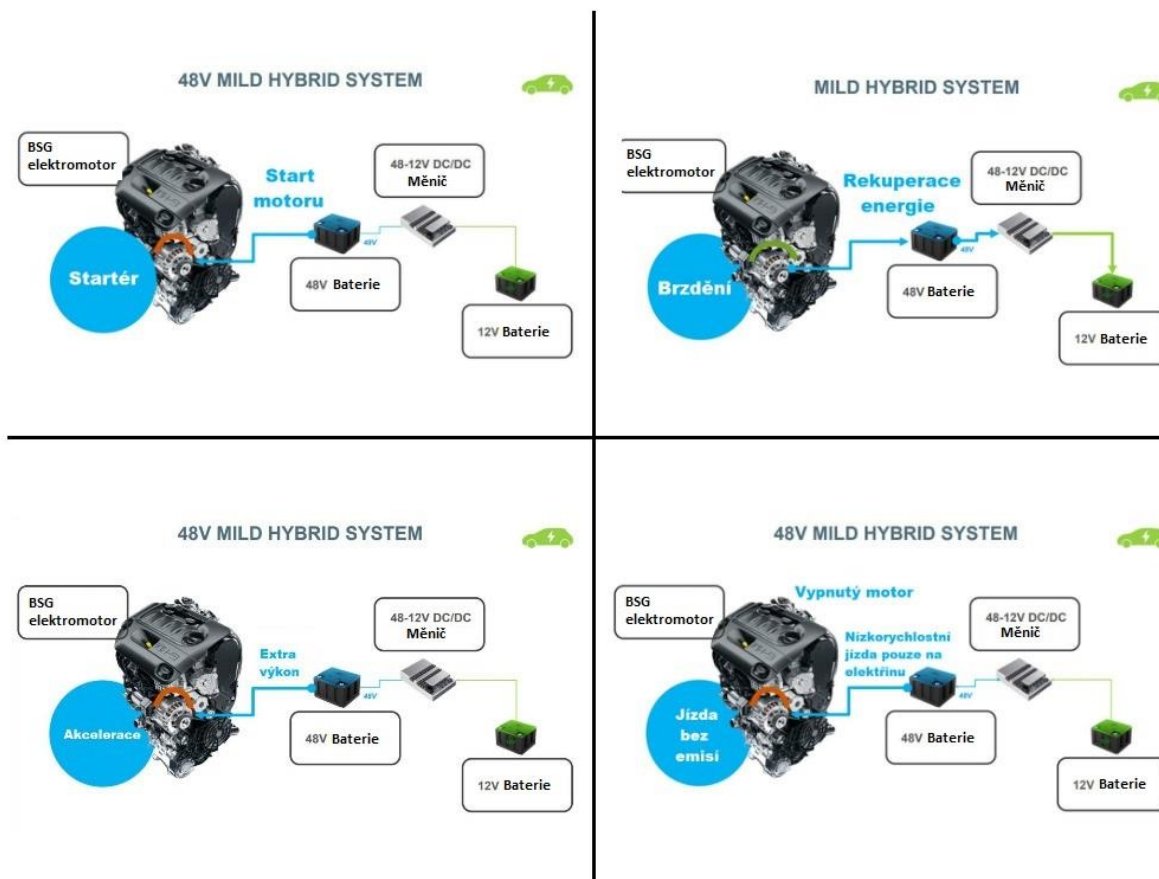
- Zvýšení krouticího momentu spalovacího motoru je zde v případě potřeby dosaženo pomocí BSG elektrického stroje, ve funkci elektromotoru, který je poháněn 48 V baterií. Pokud je vozidlo vybaveno elektronickým turbokompresorem, lze také dosáhnout navýšení výkonu.

**c) Start/Stop:**

- Se systémem Start/Stop přišla právě firma Valeo jako první, a to s upraveným, výkonnějším startérem pro klasická vozidla s 12 V sítí. Nyní u 48V sítě je klasický startér a alternátor nahrazen elektrickým BSG strojem, který zde přebírá funkci startéru. Rozběh spalovacího motoru má vlivem řemenového propojení s klikovou hřídelí měkčí a rychlejší průběh. BSG spolu s elektronickou spojkou může zajistit vozidlu mód „plachtění“, kdy je za jízdy vypnutý spalovací motor.

**d) Jízda pouze na elektřinu:**

- Elektromotor BSG umožňuje jízdu čistě na elektřinu. Tato možnost je omezena na krátké vzdálenosti a nízkou rychlost jízdy. [13], [14], [12]

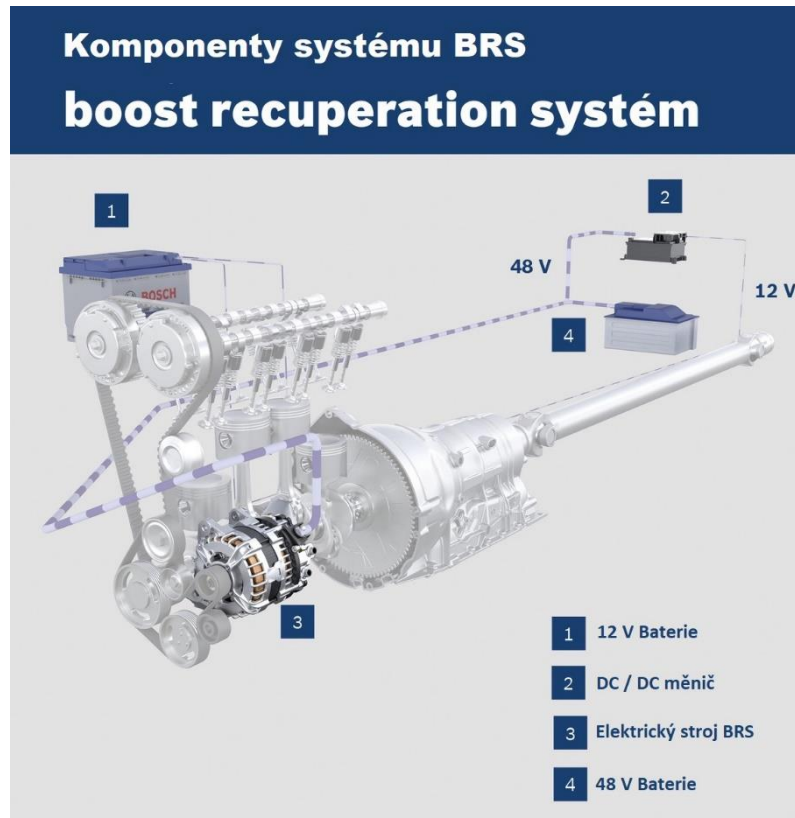


Obr. 5: Valeo - možnosti systému [13]

Společnost Valeo ve spolupráci se společností Siemens založili podnik Valeo Siemens eAutomotive, který nabízí vysokonapěťové řešení (> 60 V) pro full-hybridní, plug-in hybridní a plně elektrická vozidla. Na začátku roku 2018 firma Valeo představila 48 voltové, plně elektrické vozidlo (Low Power BEV – Battery Electric Vehicle). Elektromobil je vybavený 48 V elektromotorem umístěným na zadní nápravě s redukcí rychlosti, DC/DC měničem a 48 V Li-ion baterií. Nízký výkon elektromotoru (15 – 25 kW) zajišťuje maximální rychlost do 100 Km/h a dojezd do vzdálenosti 100 km. Vozidlo je vhodné pro krátké cesty a nízké rychlosti, tedy ideální pro městský provoz. Navíc se jedná systém využívající 48 V baterii a lze tedy očekávat pořizovací cenu nižší až o 20 % oproti vysokonapěťovým elektromobilům. [15]

### 3.2. Bosch

Německý výrobce elektronických komponent pro automobilový průmysl Bosch nabízí mild-hybridní systém Boost Recuperation System (BRS). Využívá 48 V + 12 V architekturu, přičemž 48 V síť je využívána pro napájení elektrického stroje, 48/12 Voltového DC/DC měniče a využívá 48 V Li-ion baterii, která je běžně umístěna v kufru vozidla. [16]



Obr. 6: Bosch BRS systém [17]

Elektromotor BRS je vzduchem chlazený stroj s účinností  $\eta=88\%$ . Vytváří krouticí moment pro start spalovacího motoru maximálně 56 Nm, což vzhledem k řemenovému převodu činí moment 160 Nm na klikovém hřídeli. Váha stroje je 8,5 Kg při rozměrech  $\text{Ø} \times \text{L} = 148 \times 169$  mm. Kompatibilita s téměř všemi typy převodovek a motorů přislubuje široké využití v již existujících vozidlech. Bosch uvádí, že s jejich systémem lze ušetřit až 15 % paliva a snížit emise  $\text{CO}_2$ . Systém pracuje ve 4 hlavních režimech [17]:



**a) Rekuperace:**

- Výrobce uvádí, že samotnou brzdou rekuperací se s jejich systémem sníží spotřeba paliva až o 7 %. Elektrický výstup elektromotoru během rekuperace je maximálně 11,5 kW při 48 V. Vyprodukovaná elektrická energie je uchovávána v 48 V Li-ion baterii o kapacitě 9 Ah. [16] [17]

**b) Boost (podpora spalovacího motoru):**

- Přídavný elektrický stroj je schopen v požadované situaci krátkodobě zvýšit výkon motoru až o 9,7 kW. Energie je využívána z 48 V Li-ion baterie.

**c) Plachtění:**

- Pokud se vozidlo pohybuje jízdou z kopce a řidič při tom neakceleruje, motor se vypne a umožní vozidlu „plachtit“. Ve chvíli, kdy řidič znovu sešlápne akcelerátor, systém BRS okamžitě a tiše nastartuje motor.

**d) Start/Stop:**

- Bosch místo klasického alternátoru a startéru využívá elektrický BRS stroj, který je schopen pracovat v obou režimech. Elektrický stroj je s motorem spojen pomocí řemenu a je tedy schopen nastartovat motor za jízdy vozidla rychle, tiše a bez velkého mechanického namáhání. Za jízdy vozidla pak funguje jako generátor elektrické energie. [17]

### 3.3. Continental

Continental AG je Německý výrobce automobilových komponent zastupující široké spektrum, od výroby pneumatik po vstřikovací systémy spalovacích motorů. Společnost nabízí 48 V Eco-Drive systém, který je tvořen 48 V řemenem poháněným startér-generátorem s integrovaným střídačem, DC/DC měničem a 48 V Li-ion baterií. Startér-generátor je kapalinou chlazený elektrický stroj, který je schopen dodávat výkon 15 kW, krouticí moment 150 Nm a dosahovat otáček až 20 000 min<sup>-1</sup>. Elektromotor nahrazuje klasický alternátor a startér. Systém je dle výrobce schopný snížit spotřebu paliva až o 13 %.

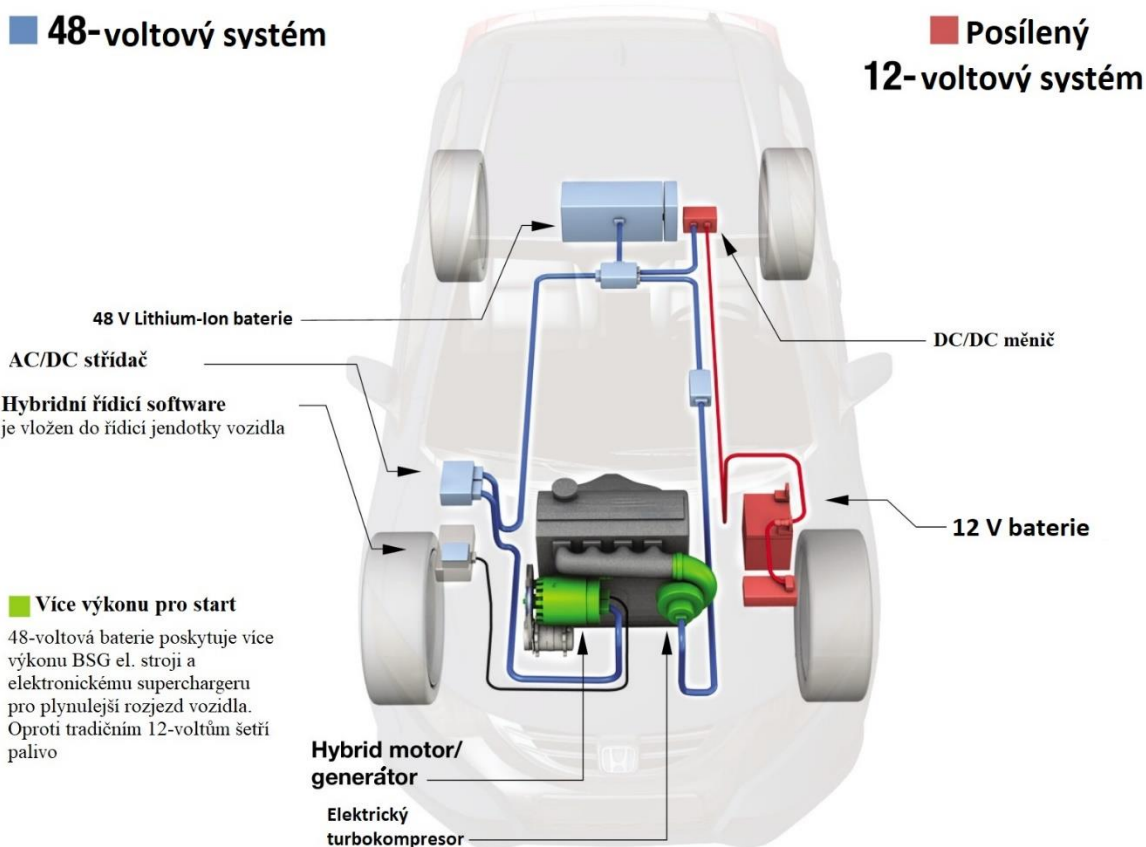
Hlavním cílem je cenově efektivní masová hybridizace a umožnění provozu v režimu rekuperace, boost motoru, plachtění, či Start/Stop systému. [18], [19]

### 3.4. Delphi Technologies

Jako další významnou společnost, zabývající se výrobou 48 V systémů je nutné zmínit technologickou firmu Delphi, která přišla se systémem umožňujícím „chytrou“ elektrifikaci. Upravená architektura vozidla využitím 48 V sítě umožňuje snížení požadavků na výkon spalovacího motoru, čímž se sníží emise CO<sub>2</sub> až o 10 %. Akumulátor a BSG elektrický stroj tvoří až polovinu nákladů typických 48 V mild hybridů.

Společnost Delphi se zaměřuje na výkonovou elektroniku, přesněji na vývoj lepší, méně rozměrné a levnější výkonové elektroniky. Výsledkem toho je optimalizace a přizpůsobení architektury vozidla na dvojitý systém, tedy 12 i 48 voltů.

Delphi využívá pro své systémy BSG stroj, elektrický turbokompresor (E-supercharger), AC/DC střídač, DC/DC měnič napětí a 48 V Li-Ion baterii. [20]



Obr. 7: Delphi - mild hybridní systém [20]

## 4) Přehled vozidel s 48 V technologií

S příchodem nové evropské emisní normy pro emise CO<sub>2</sub> (od roku 2021) a požadavky trhu na masovější hybridizaci pohonu, se stále více výrobců automobilů snaží využít potenciálu 48 voltových technologií. V současné době výrobci kombinují tuto technologii se všemi druhy motorizace a využívají ji pro navýšení výkonu u sportovních vozidel nebo pro snížení spotřeby paliva, která je spjata s produkcí emisí oxidu uhličitého CO<sub>2</sub>. V této kapitole je k nalezení seznam vozidel, využívajících tuto technologii buďto již v sériové výrobě nebo ve stavu konceptu. Důležité je zmínit, že lze očekávat prudký nárůst tohoto seznamu a v následujících letech plný přechod stávajících 12 V sítí vozidel na 48 V síť. [21]

### 4.1. Osobní vozidla:

- a. Koncepty:
  - Audi A3, [22]
- b. Sériová výroba:
  - Buick LaCrosse (2.5 l), [23]
  - Audi A8 (3.0 TFSI), [24]
  - Hyundai i40 (TDI 1.7 l), [25]
  - Renault Scénic hybrid assist (1.5 dCi), [26]
  - VW Golf (1.5 TSI), [27]

### 4.2. Sportovní vozidla:

- a. Koncepty:
  - Audi RS5 (TDI), [28]
  - Mercedes-Benz AMG A45 (4.0 V8), [29]
- b. Sériová výroba:
  - Mercedes-Benz E-class, [30]
  - Mercedes-Benz CLS Eq boost, [30]

### 4.3. SUV:

- a. Koncepty:
  - Škoda Vision X (1.5 TSI G-tec), [31]
  - Kia Cee'd (TDI), [32]
  - Kia Sportage (TDI), [32]
  - Land Rover Evoque, [33]

b. Sériová výroba:

- Audi SQ7 (4.0 TDI), [34]
- Cadillac XT5 (3.6, V6), [35]
- Bentley Bentayga (4.0 TFSI), [36]
- Hyundai Tucson (2.0 TDI), [37]

#### 4.4. Užitková vozidla:

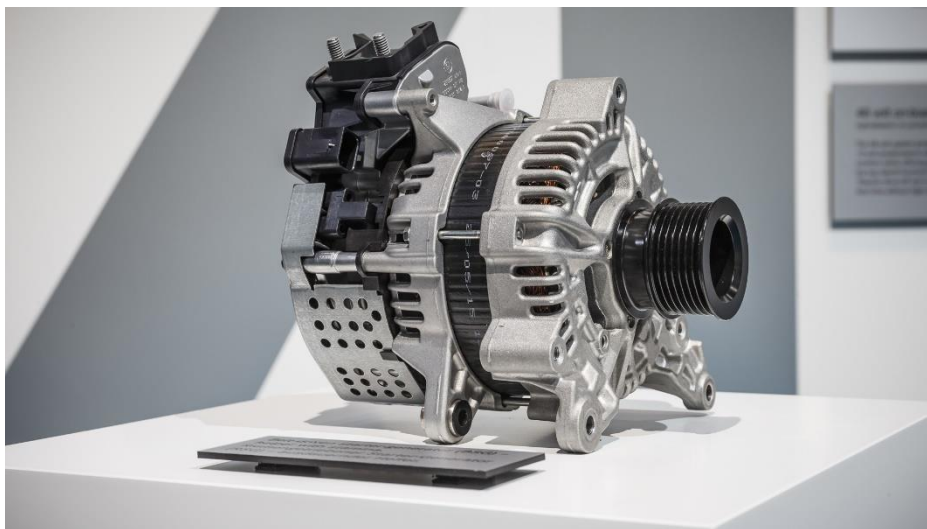
a. Koncepty:

- Dodge RAM pick-up, [38]
- Jeep Wrangler, [39]

## 5) Agregáty pro 48 V systém

### 5.1. Belted Starter-Generator

Jedná se v podstatě o elektrický stroj s permanentními magnety, který je schopen pracovat jako elektromotor i jako generátor elektrické energie. Jak je patrné již z názvu, je poháněn řemenem od klikového hřídele spalovacího motoru. Stroj dosahuje, ve špičkách, výkonu 14 kW, momentu 150 Nm a permanentních otáček 20 000 za minutu. [18] V množství výrobců je možné se setkat se stroji vzduchem chlazenými i kapalinou chlazenými. Tento elektrický stroj umožňuje v motorickém režimu boost spalovacího motoru, pokročilý start/stop systém, možnost plachtění vozidla s opětovným rychlým startem motoru, i částečnou (max. 3 km) pomalou jízdu čistě na elektřinu. V generátorickém režimu umožňuje částečnou rekuperaci brzdě energie. [1]



Obr. 8: Belt Startér Generátor (BSG), [61]

## 5.2. DC/DC měnič napětí

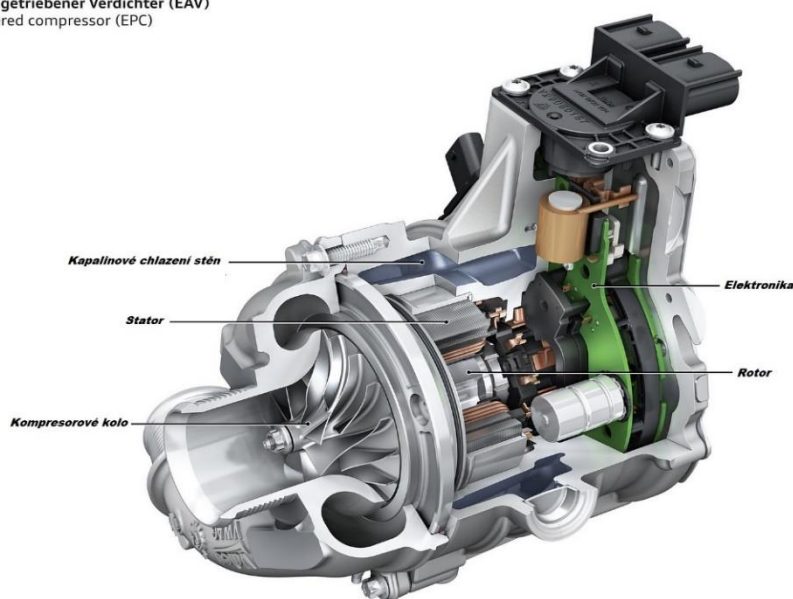
Úkolem měniče napětí je propojení přídatné 48 V sítě s původními 12 V. Můžeme se setkat s řadou výrobců těchto obousměrných měničů, avšak je pravidlem, že mají vysokou účinnost, až 95 %. Měniče mají digitálně řízený proud i napětí a jsou schopny pracovat se vstupním napětím v rozmezí od 24–54 V a dodávat výstupní napětí 6–16 V. Výkony těchto měničů se pohybují okolo 3 kW. [40]

## 5.3. Elektrický turbokompresor

S 48 V elektrickou sítí vozidla přišla možnost reálného využití elektricky poháněného turbokompresoru. Zatímco klasické turbodmychadlo je poháněno energií výfukových plynů, elektrický turbokompresor je poháněn energií z 48 V akumulátoru. Hlavní výhodou elektrického turbokompresoru je, že podstatně snižuje reakční dobu nárustu tlaku v sacím potrubí. To znamená, že spalovací motor reaguje rychleji na požadavek akcelerace od řidiče, a vozidlo tak vykazuje živější chod.

Automobilka Audi využila jako první elektrický turbokompresor pro sériově vyráběné SUV Audi SQ7 TDI. 7 kW turbokompresor je díky nízkému momentu setrvačnosti schopen dosáhnout během 250 milisekund až 70 000 otáček za minutu. Jinými slovy, je schopen poskytnout plný nárůst plnicího tlaku za čtvrt sekundy. Audi využívá kapalinové chlazení elektromotoru s permanentními magnety.

**Audi SQ7 TDI**  
Elektrisch angetriebener Verdichter (EAV)  
Electric powered compressor (EPC)



Obr. 9: Elektrický kompresor (Electric supercharger) - Audi SQ7 [41]

Se současným trendem zavádění 48 V sítě, lze pozorovat stále větší popularitu elektrických turbokompresorů ve sportovních vozidlech. Například firma Aeristech produkuje 48 V elektrický turbokompresor o výkonu 10 kW, který je schopen dosáhnout otáček až 120 000  $\text{min}^{-1}$ . Jedná se o vysokorychlostní elektromotor s permanentními magnety. Tyto elektrické stroje jsou schopny dodávat vysoký plnicí tlak již od nízkých otáček motoru, kde klasické turbokompresory nemají dostatečné otáčky turbíny. [41]

#### 5.4. Elektricky vyhříváný katalyzátor

48 V elektricky vyhříváný katalyzátor přináší hlavní benefit v rychlém nahřátí na provozní teplotu, při které katalyzátor nejefektivněji redukuje emise. Vyhřívací systém od firmy Continental, pojmenovaný EMICAT, také podporuje využívání rozsáhlejších strategií, jako plachtění při vypnutém motoru. Přičemž výrobce uvádí, že rychlé elektronické vytápění katalyticky potažené konstrukce přivádí katalyzátor na provozní teplotu téměř okamžitě, jakmile řidič opět stiskne plynový pedál. S rychlým náběhem na provozní teplotu přichází možnost více využívat Start/Stop systém, který přináší snížení spotřeby paliva mezi 3 až 4 %. [42]



Obr. 10: Elektricky vyhříváný katalyzátor - Continental EMICAT [62]

#### 5.5. Akumulátory

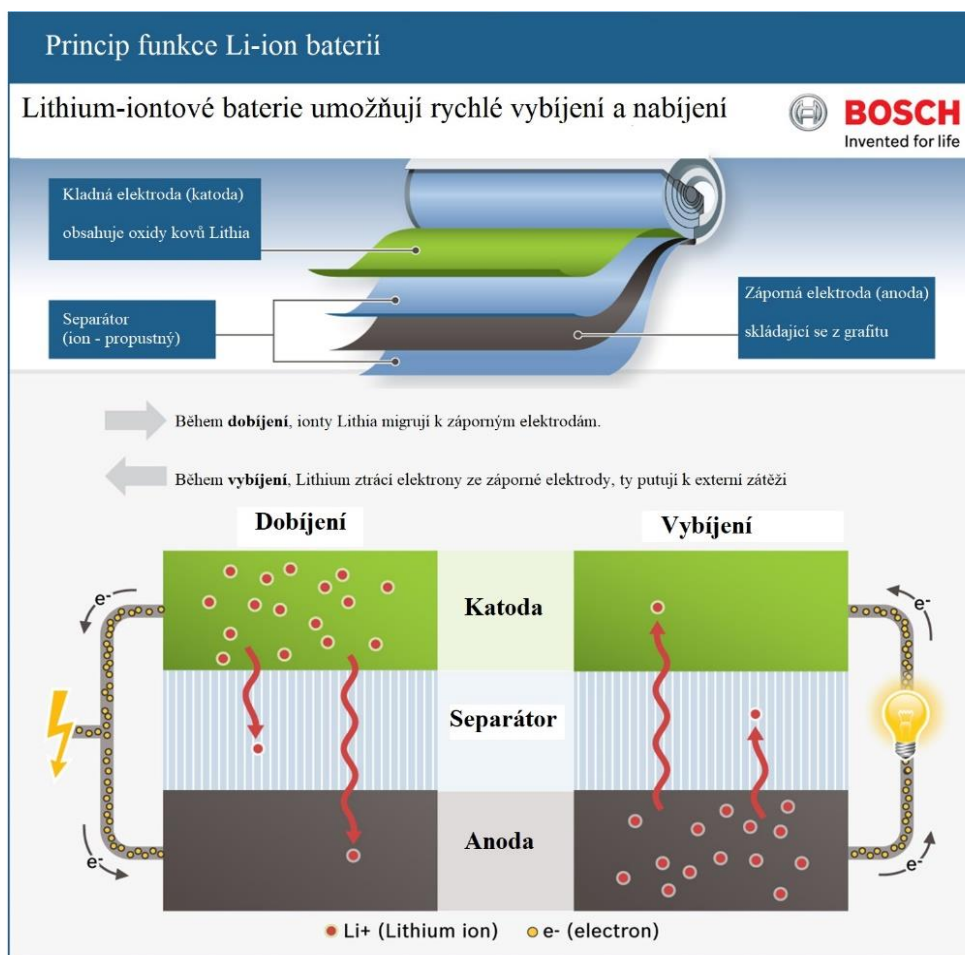
V elektromobilitě jsou 2 hlavní požadavky na funkci akumulátorů. Zaprvé, baterie pro veškerá vozidla s elektrickým pohonem, od které majoritně požadujeme, aby vozidlo bylo schopné urazit co nejdelší vzdálenost na 1 nabití. Taková baterie má tedy vysokou kapacitu, kvůli které je rozměrná a nákladná.

Zadruhé, 48 V baterie pro mild hybridní vozidla, která je namáhána častým vybíjením kvůli podpoře spalovacího motoru a nabíjením během rekuperačního brzdění.

To znamená, že baterie musí být schopna odolat mnoha nabíjecím cyklům. Je řízena elektronikou, která zpracovává signály o provozním stavu vozidla a chrání tak články baterie před nízkým nebo vysokým napětím. Elektronika poskytuje vozidlu přehled o tom, kolik energie může v daný okamžik baterie poskytnout a na jak dlouhou dobu.

V současné době jsou nejvíce využívány 48 V Lithium-iontové, které mají největší výhodu v rozměrech, úspoře váhy, ale především v možnosti dobíjení vysokými proudy. Baterie jsou nejčastěji umístěny v kufru vozidla.

Zatímco 48 V Li-ion baterie je využívána pro hybridní systém, palubní napětí je stále 12 V, což zajišťuje převážně 12 V olověná baterie.



Obr. 11: Bosch - princip funkce Lithium-iontového akumulátoru [63]

Na trhu existuje celá řada výrobců Li-ion akumulátorů, mezi nejvýznamnější se však řadí Samsung SDI, HITACHI, LG chem view a v současnosti i německý výrobce Bosch.



Mezi nejpoužívanější 3 druhy akumulátorů v automobilovém průmyslu patří:

### **5.5.1. Nikl-Kadmiové akumulátory (Ni-Cd)**

Jedná se o starší typ galvanického článku na bázi niklu. Mezi velké výhody patří odolnost proti vysokým teplotám (až 85 °C) a možnost skladování ve vybitém stavu. Lze také dobíjet vysokými proudy.

Záporná elektroda je vyrobena z jedovatého kadmia a je tedy nutné bezpečně skladovat a složitě recyklovat použité baterie. Hustota energie ve srovnání s Ni-MH a Li-Ion akumulátory je značně nižší. Dále pak trpí samovybíjením a tzv. paměťovým efektem. [43]

### **5.5.2. Nikl-Metal Hydridové akumulátory (Ni-MH)**

Nikl-Metal Hydridový akumulátor je druh galvanického článku. Záporná elektroda byla oproti Nikl-Kadmiovým nahrazena netoxickou kovovou slitinou, obvykle složenou z niklu, kobaltu a manganu. Kladná elektroda je tvořena oxidem-hydroxidem niklitým (NiO(OH)). Mezi hlavní přednosti patří velmi nízká cena, která je způsobena především nízkou cenou elektrolytu, ten je tvořen vodným roztokem hydroxidu draselného (KOH).

Mezi hlavní výhody, pro které má akumulátor široké uplatnění v automobilovém průmyslu, patří schopnost dodávat relativně vysoké proudy, dlouhá životnost a jak již bylo zmíněno, nízké pořizovací náklady. Mohlo by se zdát, že se jedná o ideální baterii, která navíc dobře snáší rychlé nabíjení. Bohužel již při teplotách pod 5 °C skokově klesá napětí a baterie se jeví jako vybitá. Akumulátor také trpí tzv. paměťovým efektem, což znamená, že při opakovaném nesprávném dobíjení může nastat trvalý pokles kapacity. Toto jsou hlavní důvody, proč jsou tyto akumulátory postupně vytlačovány Lithium-iontovými. [44]

### **5.5.3. Lithium-iontové akumulátory (Li-Ion)**

Tyto v současnosti nejpoužívanější a nejperspektivnější baterie, na bázi lithia, nachází velké uplatnění i v mild hybridních vozidlech. Lithium iontové baterie jsou stále ve vývoji a v automobilovém průmyslu jsou v ně vkládány velké naděje. Anoda je vyrobena z uhlíku a katoda je oxid kovu. Lithium je zde obsaženo v elektrolytu, který se skládá z lithiové soli v organickém rozpouštědle. Mezi největší výhody bezesporu patří vysoká hustota uložené energie, velmi nízký efekt samovybíjení a fakt, že netrpí paměťovým efektem a disponují dlouhou životností. Navíc má vysoké nominální napětí 3,6 V. Mezi nevýhody naopak patří vysoká cena, bezpečnost a fakt, že s nárůstem nabíjecích cyklů ztrácí svou kapacitu. [45]



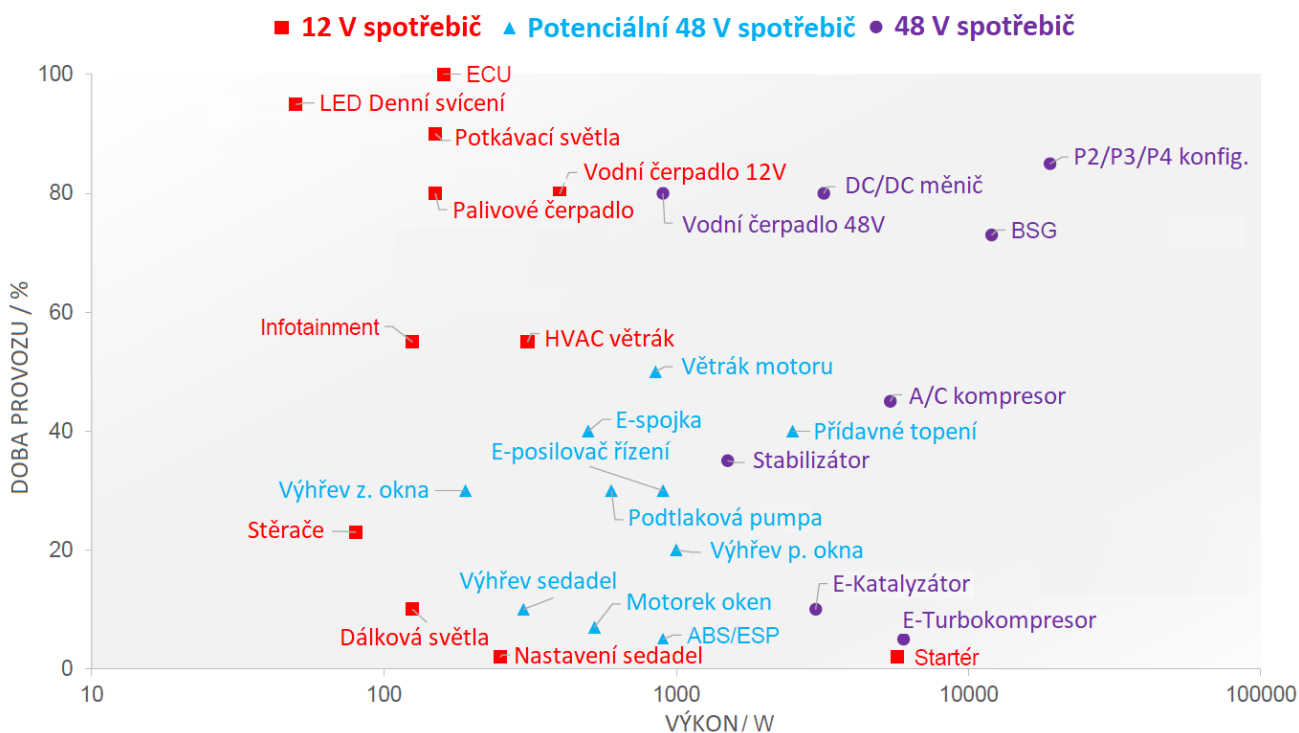
## 5.6. Ostatní

Další elektrické příslušenství automobilu, které vyžaduje vyšší elektrický výkon, a má tedy potenciál ve využívání 48 V elektrické sítě:

1. Kompresor klimatizace
2. Posilovač řízení
3. Posilovač brzdného účinku
4. Vodní čerpadlo, apod...

Rozdělení a přehled dalších potenciálních komponent 48 V systému ve vozidle v závislosti na jejich jmenovitém výkonu a průměrné době provozu v procentech je zobrazeno na Obr. 12.

[46]



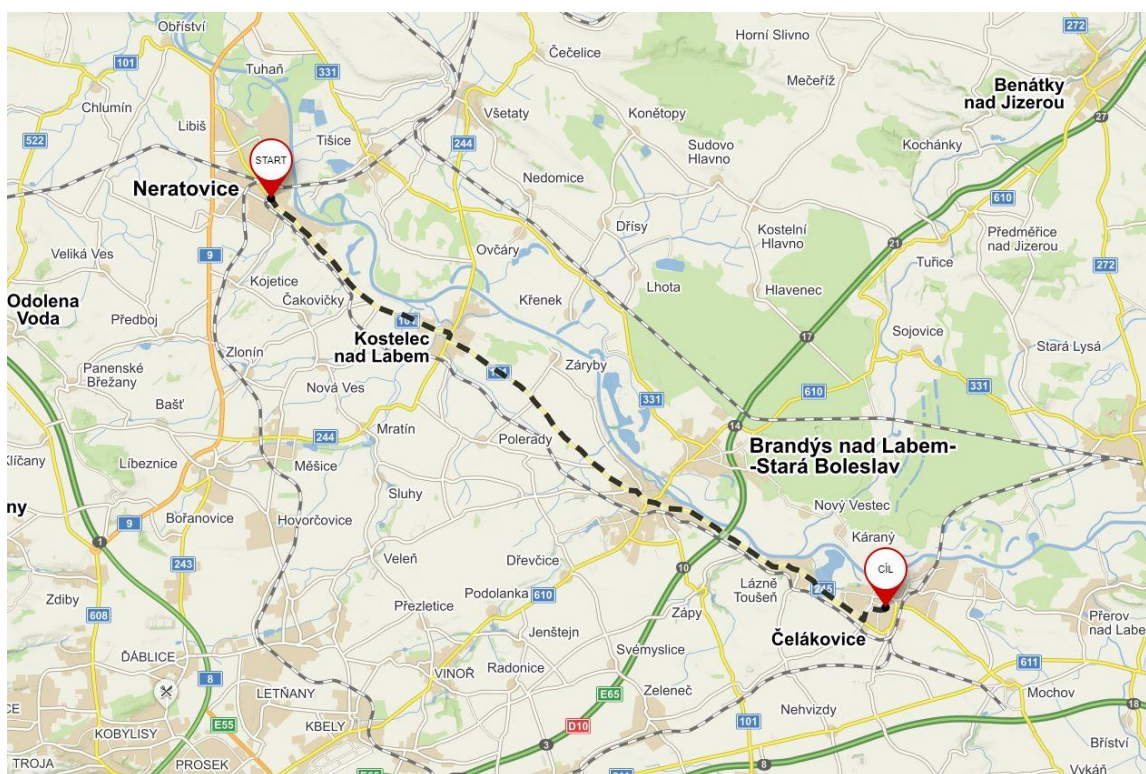
Obr. 12: Srovnání spotřebičů v závislosti na jejich výkonu a době provozu [46]

## 6) Energetická náročnost standardního 12 V vozidla

Pro realizaci výpočtu energetické náročnosti vozidla je nutné nejprve vytvořit rychlostní a výškový profil trati. V následující kapitole jsou popsány prostředky k jejich získání a dalšímu zpracování.

### 6.1. Představení měřené trasy

Pro výpočet energetické náročnosti byla použita trasa o vzdálenosti 24,6 Km mezi městy Neratovice a Čelákovice. Tato trasa kombinuje jak částečně městský provoz, tak i mimoměstský. Legislativně omezená rychlost pro jízdu ve městě je 50 km/h a mimo město 90 km/h.



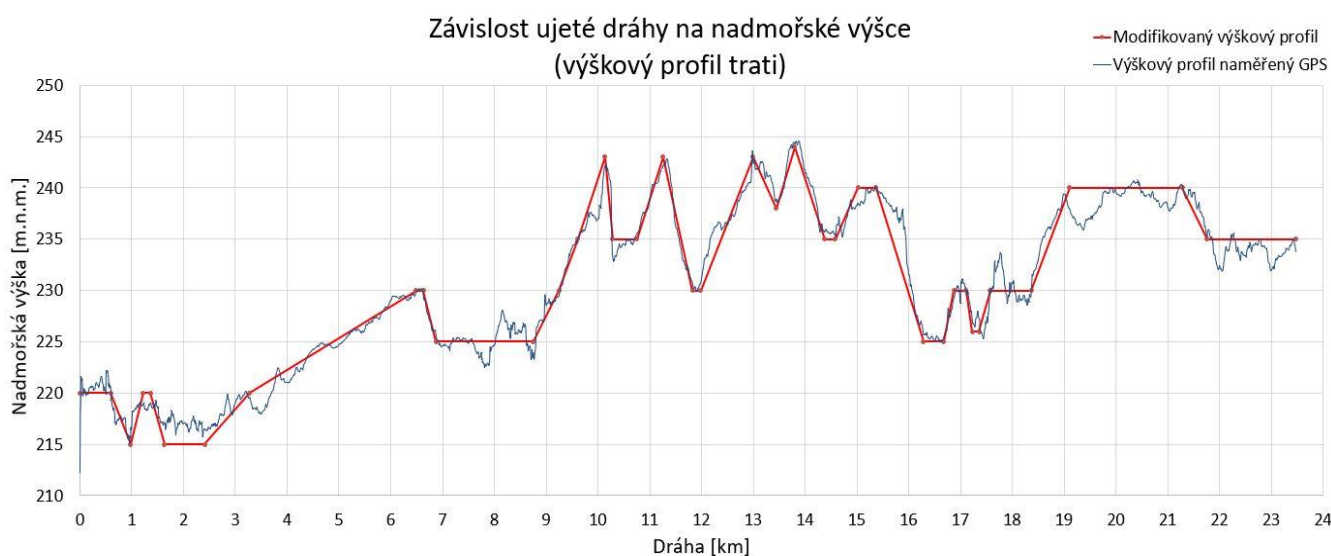
Obr. 13: Trasa Neratovice – Čelákovice [64]

#### 6.1.1 Tvorba výškového profilu

Během 2 měřených jízd byla trasa snímána po časovém kroku 1 sekundy, za pomoci GPS stanice Garmin EDGE 500.

Jízdy proběhly po asfaltovém povrchu za slunného počasí v odpoledních hodinách dne 16.09.2015 a byly vytvořeny na základě měření VTP Roztoky. Naměřené jízdy byly společně zprůměrovány a částečně oproštěny o náhodné jevy.

Na Obr. 14 je zobrazený výškový profil naměřený pomocí GPS (modrá křivka) a již modifikovaný (červená křivka).



Obr. 14: Výškový profil trati Neratovice-Čelákovice

Z obrázku je patrné, že modifikovaný výškový profil nedosahuje úplné korespondence s naměřeným. To je způsobeno jak nepřesností měření pomocí GPS, tak finálním zpracováním dat.

## 6.2. Představení měřeného vozidla

Vozidlo, které bylo využito pro měření výškového a rychlostního profilu trati je Škoda Octavia Combi III. Generace s přeplňovaným zážehovým motorem s přímým vstřikem paliva o objemu 1395 cm<sup>3</sup>. O vozidle jsou známy veškeré potřebné technické údaje, které byli využity pro další výpočty, viz Obr. 15.

Motor	Přeplňovaný zážehový s přímým vstřikem paliva
Zdvihový objem	$V_z=1395$ [cm <sup>3</sup> ]
Palivo	BA 95
Točivý moment	$M=250$ Nm / 1500-3500 [1/min]
Výkon	$P=103$ [kW]
Pohotovostní hmotnost	$m_p=1277$ [Kg]
Přední kola	Continental 195/55 R16
Zadní kola	Continental 195/55 R16
Čelní plocha vozidla	$S_x=2,2$ [m <sup>2</sup> ]
Součinitel odporu vzduchu	$C_x=0,304$
Valivý poloměr kol	$r_v=0,295$ [m]
Dynamický poloměr kol	$r_d=0,299$ [m]
Převodovka	Manuální 6.st.
Stálý převod	$i_{s0}=3,647$
Převody jednotlivých převodových stupňů	$i_1=3,78, i_2=2,12, i_3=1,36, i_4=1,03, i_5=0,86, i_6=0,73, i_2=3,6$

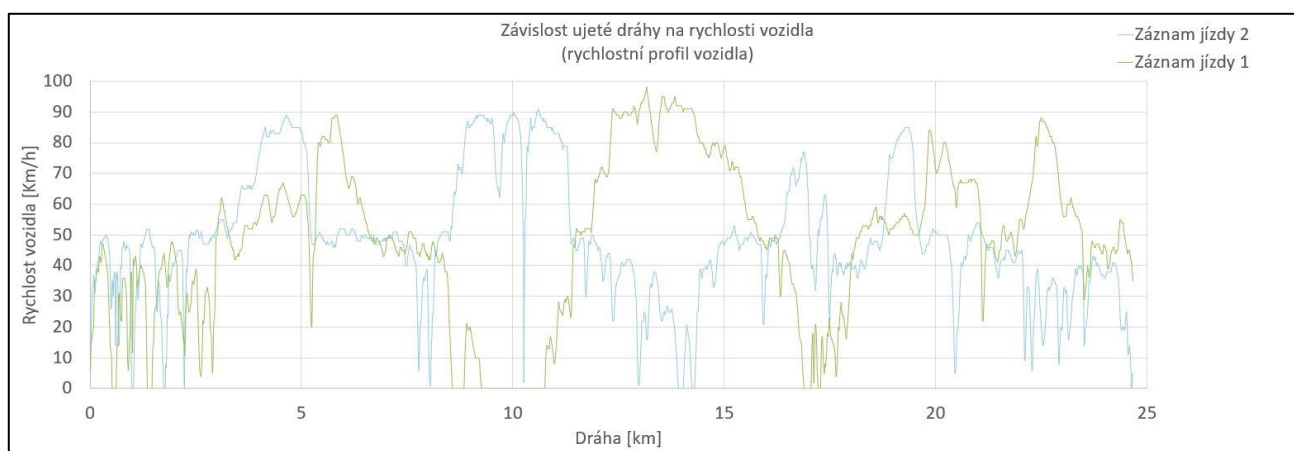
Obr. 15: Technická data Octavia III. generace 1.4 TSI [59], [58]

Pomocí OBD-II byla s časovým krokem 1 sekundy zaznamenávána data o aktuální rychlosti vozidla, otáčkách motoru, poloze škrtkové klapky, spotřebě paliva a tlaku v sacím potrubí z průběhu jízdy.

### 6.2.1. Tvorba rychlostního profilu

Pro výpočet jízdních odporů je mimo výškový profil důležitý i profil rychlostní. Jedná se o průběh okamžité rychlosti vozidla v závislosti na ujeté vzdálenosti. Výslednou energetickou náročnost vozu ovlivňuje především styl jízdy řidiče. Nejvýznamnější část energie je spotřebovávána na akceleraci vozidla.

Na trati proběhly 2 měřené jízdy viz. Obr. 16, které byly zaznamenávány pomocí OBD-II.



Obr. 16: 2 Měřené jízdy Neratovice-Čelákovice

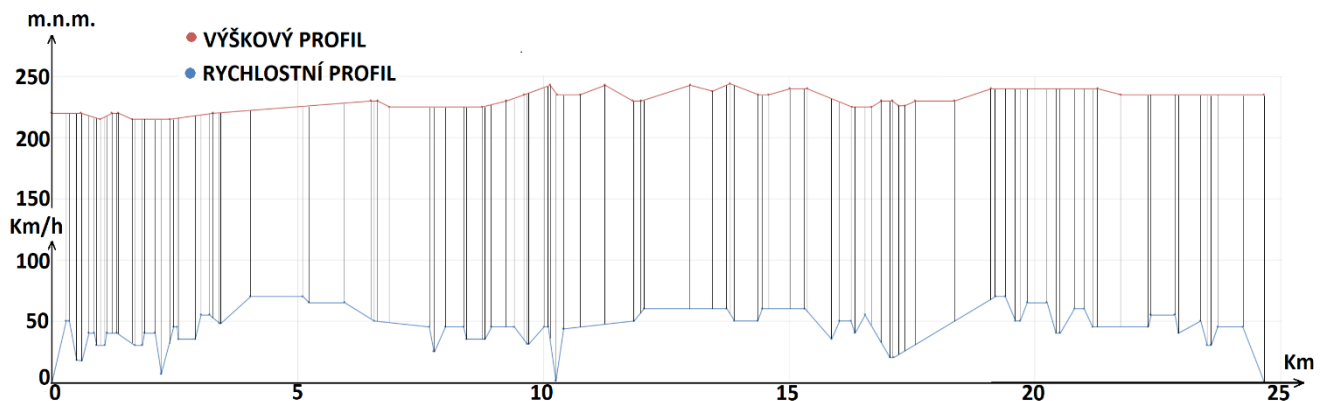
Získané rychlostní profily byly dále zpracovány. Jako výpočetní rychlostní profil byl použit průměr z těchto 2 měření, který byl dále oproštěn o náhodné jevy a legislativní omezení rychlosti. Výpočetní modelový rychlostní profil (viz. Obr. 17) nedosahuje 100 % podobnosti s reálnou jízdou, ale snaží se co nejpravděpodobněji simulovat jízdu, která může nastat.



Obr. 17: Modelový rychlostní profil

### 6.3. Rozdělení trasy na výpočetní úseky

Pro další zpracování je nutné rozdělit trasu na výpočetní úseky. Toho bylo docíleno kombinací výškového a rychlostního profilu, kdy při změně rychlosti vozidla nebo nadmořské výšky vzniká další úsek. Toto rozdělení bylo zvoleno k dosažení konstantních hodnot sklonu trati a zrychlení vozidla v každém výpočetním úseku. Na trati z Neratovic do Čelákovic tímto způsobem vzniklo 116 výpočetních úseků, viz. Obr. 18.



Obr. 18: Průnik rychlostního a výškového profilu

## 7) Výpočet energetické bilance vozidla na ujeté trase

### 7.1. Stanovení jízdních odporů

Stanovením jízdních odporů získáme číselnou hodnotu sil, které působí proti pohybu vozidla. Některé jízdní odpory působí proti pohybu vozidla vždy, jiné naopak za určitých situací (decelerace, jízda z kopce) vozidlo urychlují. Vozidlo bylo po dobu měření obsazeno řidičem a spolujezdcem, pro které bylo počítáno s hmotností 75 Kg/osoba. Pohotovostní hmotnost prázdného vozidla činí 1277 Kg, viz Obr. 15.

#### 7.1.1. Odpor valivý

Tato složka jízdního odporu vzniká deformací odvalující se pneumatiky po vozovce. Je tedy přímo úměrná hmotnosti vozidla ve svislém směru, tedy hmotností vynásobenou kosinovou složkou sklonu trati. Celková hmotnost vozidla je v tomto případě počítána jako hmotnost pohotovostní + hmotnost aktuálního obsazení vozidla.

Další složkou výpočtu je součinitel valivého odporu, který byl zvolen pro asfaltový povrch vozovky  $f_k = 0,015$ . Součinitel je dále kromě povrchu vozovky ovlivněn velikostí deformace pneumatiky a rychlostí kola. [47]

Valivý odpor pro jednotlivé úseky je definován dle rovnice (1):

$$O_f = m_c \cdot g \cdot f_k \cdot \cos \alpha \quad [N] \quad (1)$$

### 7.1.2. Odpor stoupání

Výškový profil trati nám určuje, že v daném okamžiku a v dané vzdálenosti překonává vozidlo určitý sklon trati. Jedná se o složku tíhové síly vozidla, která působí ve směru rovnoběžném s vozovkou. Úhel sklonu vozovky  $\alpha$  je definován mezi vodorovnou rovinou a rovinou vozovky, viz (2).

$$O_\alpha = \pm m_c \cdot g \cdot \sin \alpha \quad [N] \quad (2)$$

Pro celkovou hmotnost vozidla byl odpor stoupání vypočten pro každý výpočetní úsek trati. [47]

### 7.1.3. Odpor zrychlení

Při každé změně rychlosti zrychlujeme nebo zpomalujeme rotační hmoty vozidla, včetně kol. Pokud akcelerujeme, zvyšujeme rychlost otáčení rotačních hmot a výsledný odpor působí proti směru jízdy vozidla. Naopak při deceleraci působí výsledný odpor ve směru jízdy. Odpor zrychlení má složky působící od zrychlení posuvných částí hmoty a složku od rotačních částí hmoty. Výsledný odpor je tedy jejich součtem dle rovnice (3).

$$O_{zr} = O_{zr_p} + O_{zr_r} = \left( m_c + \sum_i \frac{J_{Ki}}{r_d \cdot r_v} \right) \cdot a \quad (3)$$

Kde odpor ze zrychlení posuvných hmot vozidla (4):

$$O_{zr_p} = m_c \cdot a \quad (4)$$

A odpor ze zrychlení rotujících hmot vozidla (5):

$$O_{zr_r} = \sum_i \frac{J_{Ki}}{r_d \cdot r_v} \cdot a \quad (5)$$



Výsledný odpor lze poté zapsat pomocí (6):

$$O_{zr} = \left\{ 1 + \frac{\sum_i J_{ki} + (J_m \cdot i_c^2 + J_p \cdot i_{sp}^2) \cdot \eta}{m_c \cdot r_d \cdot r_v} \right\} \cdot m_c \cdot a = \delta \cdot m_c \cdot a \text{ [N]} \quad (6)$$

Z rovnice pro výpočet součinitele vlivu rotačních součástí je patrné, že je zatížen jak konstantními, tak proměnlivými parametry. Pro určení součinitele je použita tabulka dle Obr. 19, která znázorňuje závislost součinitele rotačních hmot na zařazeném rychlostním stupni.

Vozidlo	Součinitel rotačních částí	
	Nejvyšší rychlostní stupeň	Nejnižší rychlostní stupeň
Osobní	1,04 - 1,07	1,2 - 1,8
Nákladní silniční	1,06 - 1,1	1,4 - 3
Nákladní terénní	1,08 - 1,25	5 - 8

Obr. 19: Průměrné hodnoty součinitele rotačních částí [48]

Pro výpočet odporu zrychlení v jednotlivých úsecích trati je použita konstantní hodnota součinitele vlivu rotačních hmot  $\delta = 1,2$ . [48]

#### 7.1.4. Odpor vzdušný

Při pohybu vozidla prostředím vzniká odpor, který vyjadřuje sílu laminárního a turbulentního obtékání karoserie vozidla. Tato složka jízdního odporu je nejvíce ovlivněna rychlostí vozidla, která zde roste s 2. mocninou, dle (7). Měrná hmotnost vzduchu byla v našem případě pro teplotu okolí 20 °C zvolena  $\rho_{vzd} = 1,2047 \text{ Kg/m}^3$  a byla uvažována pro všechny výpočetní fáze trati konstantní. [49] Mezi další konstantní složky výpočtu patří čelní plocha vozidla  $S_x = 2,2 \text{ m}^2$  a součinitel odporu vzduchu  $C_x = 0,304$ .

$$O_{vzd} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{vzd} \cdot S_x \cdot C_x \cdot v^2 \text{ [N]} \quad (7)$$

## 7.2. Stanovení energie spotřebované na kolech vozidla

V této části práce se dostáváme k výpočtu energie spotřebované na kolech vozidla pro jednotlivé úseky trati. Jedná se o energii potřebnou na překonání jízdních odporů vypočtených v předchozí kapitole.

Celková energie spotřebovaná na kolech vozidla je součtem jednotlivých složek viz (8).

$$E_{wheel} = E_f + E_\alpha + E_{zr} + E_{vzd} \quad (8)$$

Tento krok spočívá v integraci jednotlivých složek jízdního odporu vozidla pro dílčí úseky trati. Pokud je výsledná energie  $E_{wheel} > 0$ , je nutné vozidlo pohánět pomocí spalovacího motoru. V situacích, kdy je spotřebovávaná energie na kolech vozidla vysoká, se dostává spalovací motor do oblasti nižší účinnosti. V této oblasti je nasnadě využít BSG jako podporu spalovacího motoru a snížit tak spotřebu paliva, či škodlivé emise.

V opačném případě, pokud  $E_{wheel} < 0$ , je možné využít potenciálu 48 V technologie v podobě rekuperace energie nebo využít možnost plachtění.

### 7.2.1. Energie z odporu valení

Hodnota energie na překonání odporu valení je získána integrací odporu valení po ujeté dráze, v každém výpočetním úseku. Indexy 1, 2 označují počátek a konec dráhy výpočetního úseku, viz (9).

$$E_f = \int_{s_1}^{s_2} O_f ds = \int_{s_1}^{s_2} (m_c \cdot g \cdot f_k \cdot \cos \alpha) ds = \int_{t_1}^{t_2} (m_c \cdot g \cdot f_k \cdot \cos \alpha) \cdot v \cdot dt \quad (9)$$

Pro úseky, ve kterých dochází k akceleraci, či deceleraci, vzniká po integraci vztah (10). Kde  $a$  je hodnota průměrného zrychlení v dané fázi.

$$E_f = m_c \cdot g \cdot f_k \cdot \cos \alpha \cdot \frac{1}{a} \cdot \left( \frac{v_2^2}{2} - \frac{v_1^2}{2} \right) \quad (10)$$

Pro výpočet v úseku, ve kterém vozidlo jede konstantní rychlostí bude výpočet vypadat dle (11). [50]

$$E_f = m_c \cdot g \cdot f_k \cdot \cos \alpha \cdot v \cdot t = m_c \cdot g \cdot f_k \cdot \cos \alpha \cdot s \quad (11)$$



### 7.2.2. Energie z odporu stoupání

Tato složka energetické náročnosti nabývá kladných, či záporných hodnot ve chvíli, kdy vozidlo překonává určitý sklon trati. Výpočet se řídí integrací dle rovnice (12).

$$E_{\alpha} = \int_{s_1}^{s_2} O_{\alpha} ds = \int_{s_1}^{s_2} (m_c \cdot g \cdot \sin \alpha) ds = \int_{t_1}^{t_2} (m_c \cdot g \cdot \sin \alpha) \cdot v \cdot dt \quad (12)$$

Integrací jsme získali vztah (13), pro případ, kdy vozidlo překonává stoupání/klesání trati a současně mění svoji rychlost jízdy.

$$E_{\alpha} = m_c \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot \frac{1}{a} \cdot \left( \frac{v_2^2}{2} - \frac{v_1^2}{2} \right) \quad (13)$$

Pokud vozidlo překonává stoupání/klesání trati při konstantní rychlosti, řídíme se vztahem dle (14). [50]

$$E_{\alpha} = m_c \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot v \cdot t = m_c \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot s \quad (14)$$

V případě, kdy vozidlo jede po rovině je tato složka energie nulová. Kladných hodnot energie nabývá, když musí pohonné ústrojí dodávat energii na kola vozidla. V opačném případě, tedy sjíždění z kopce dolů, energie dosahuje záporných hodnot. Tuto přebytečnou energii jsme potenciálně schopni uchovat pomocí rekuperace v baterii.

### 7.2.3. Energie ze změny rychlosti

Tato složka vyjadřuje množství energie potřebné k překonání akcelerace. Jako v předchozích případech se jedná o integraci složky jízdního odporu, která je znázorněna ve vztahu (15).

$$E_{zr} = \int_{s_1}^{s_2} O_{zr} \cdot ds = \int_{s_1}^{s_2} (\delta \cdot m_p + m_n) \cdot a \cdot ds = \int_{t_1}^{t_2} (\delta \cdot m_p + m_n) \cdot a \cdot v \cdot dt \quad (15)$$

V případě akcelerace/decelerace vozidla se výpočet řídí dle rovnice (16).

$$E_{zr} = (\delta \cdot m_p + m_n) \cdot \left( \frac{v_2^2}{2} - \frac{v_1^2}{2} \right) \quad (16)$$

Tento odpor nevzniká při jízdě konstantní rychlostí a je tedy pro tyto případy nulový. V úsecích, kde je určitá změna rychlosti nabývá kladných, či záporných hodnot. Kladné hodnoty musí pohonné ústrojí překonávat, oproti tomu záporné hodnoty mají potenciál v rekuperaci energie do baterie. [50]

#### 7.2.4. Energie z odporu vzduchu

Výpočet energie potřebné k překonání odporu vzduchu se řídí stejnými pravidly jako ostatní složky celkové energie, viz (17).

$$E_{vzd} = \int_{s_1}^{s_2} O_{vzd} ds = \int_{s_1}^{s_2} \left( \frac{1}{2} \rho_{vzd} \cdot S_x \cdot C_x \cdot v^2 \right) ds = \int_{t_1}^{t_2} \left( \frac{1}{2} \rho_{vzd} \cdot S_x \cdot C_x \cdot v^2 \right) \cdot v \cdot dt \quad (17)$$

Po integraci získáváme rovnici (18), která platí pro případy zrychlení/zpomalení vozidla.

$$E_{vzd} = \frac{1}{2} \rho_{vzd} \cdot S_x \cdot C_x \cdot \frac{1}{a} \cdot \left( \frac{v_2^4}{4} - \frac{v_1^4}{4} \right) \quad (18)$$

Naopak v úsecích, kde se vozidlo pohybuje konstantní rychlostí použijeme zjednodušený vztah popsany, dle (19).

$$E_{vzd_k} = \frac{1}{2} \rho_{vzd} \cdot S_x \cdot C_x \cdot \frac{1}{a} \cdot \left( \frac{v_2^4}{4} - \frac{v_1^4}{4} \right) \quad (19)$$

Odpor vzduchu působí vždy proti pohybu vozidla a jeho hodnoty jsou tedy nenulové v každém úseku výpočetní trati. [50], [47]

### 7.3. Výpočet momentů a výkonů na kolech vozidla a jejich přepočít na hodnoty motoru

Moment na kole vozidla byl počítán pro jednotlivé úseky pomocí rovnice (20), kde  $r_d$  značí dynamický poloměr pneumatik kol vozidla a  $F_{wheel}$  představuje sílu vypočtenou z jízdnic odporů.

$$M_{wheel} = r_d \cdot F_{wheel} \quad (20)$$

Ze znalosti rychlosti jízdy vozidla a dynamického poloměru pneumatiky dále určíme úhlovou rychlost otáčejícího se kola  $\omega_{wheel}$ . Poté již ze známého vztahu (21) stanovíme výkon na kolech vozidla.

$$P_{wheel} = M_{wheel} \cdot \omega_{wheel} \quad (21)$$

Výsledky pro jednotlivé úseky na kolech vozidla jsou dále přepočítány na hodnoty motoru. Účinnosti jsou v tomto případě pro všechny úseky uvažovány jako konstantní. Neměnná je i hodnota stálého převodu v rozvodovce. Zmíněné hodnoty jsou uvedeny v Tabulka 1.

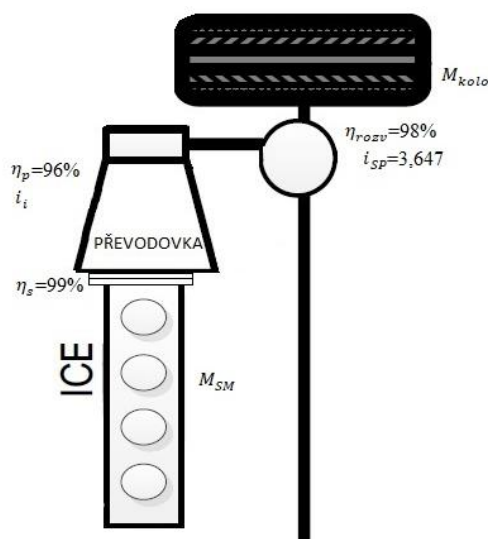
$\eta_{rozv}$	98 %	Účinnost stálého převodu s diferenciálem
$\eta_p$	96 %	Účinnost převodového ústrojí
$\eta_s$	99 %	Účinnost spojky
$i_{SP}$	3,647	stálý převod

Tabulka 1: Tabulka účinností hnacího ústrojí a stálého převodu

Důležitou proměnnou pro jednotlivé úseky je hodnota momentu na kolech a také hodnota převodu, která je závislá na zrovna zařazeném rychlostním stupni. Pro každý výpočetní úsek byl z aktuální rychlosti vozidla dopočten aktuálně zařazený rychlostní stupeň  $i_i$ , který je v každém úseku uvažován jako neměnný.

V tomto okamžiku jsou tedy známy veškeré hodnoty pro výpočet krouticího momentu na spalovacím motoru, viz (22) a Obr. 20.

$$M_{SM} = \frac{M_{wheel}}{i_{SP} \cdot i_i \cdot \eta_{rozv} \cdot \eta_p \cdot \eta_s} \quad (22)$$



Obr. 20: Účinnosti a převody hnacího ústrojí

Obdobně byly přepočteny otáčky kol na otáčky spalovacího motoru, viz rovnice (23).

$$n_{SM} = i_{sp} \cdot i_i \cdot \frac{30 \cdot \omega_{wheel}}{\pi} \quad (23)$$

Výkon spalovacího motoru v daném úseku vypočteme z rovnice (24).

$$P_{SM} = M_{SM} \cdot \frac{\pi \cdot n_{SM}}{30} \quad (24)$$

Po aplikaci tohoto výpočtu jsou známy hodnoty výkonů, momentů a otáček spalovacího motoru v průběhu měřené trati. Do těchto hodnot ovšem není uvažován potřebný výkon pro pohon alternátoru a dalších, řemenem poháněných, agregátů. Pro potřeby diplomové práce byl tedy výkon spalovacího motoru navýšen o 450 W, které jsou použity pro napájení palubní sítě vozidla. Otáčky motoru jsou zde zachovány a krouticí moment je přepočítán dle navýšeného výkonu, na základě rovnice (22).

## 8) Regresní analýza spalovacího motoru (metoda prof. Macka)

Zkoušené vozidlo bylo změřeno na válcové brzdě Ústavu spalovacích motorů a kolejových vozidel, ČVUT v Praze. Naměřená data byla dále zpracována a vynesena do vnější zatěžovací křivky spalovacího motoru. Pro potřeby dalších výpočtů byla sestavena i protáčetí křivka motoru. Naměřené účinnosti spalovacího motoru v charakteristických bodech nepokrývají celé potřebné spektrum, ve kterém se spalovací motor pohyboval během reálné jízdy. Pro zjištění účinností v těchto bodech, byl sestaven výpočet pomocí regresní analýzy.

### 8.1. Regresní výpočet naměřených dat z válcové brzdy

Pro zjištění účinnosti spalovacího motoru v rozdílných úsecích měřené trati bylo využito výpočtu pomocí regresní funkce. Regresní funkce počítá pomocí metody nejmenších čtverců statistické hodnoty pro křivku, která nejlépe odpovídá uvedeným datům. Umožní nám tedy odhadovat hodnotu náhodné veličiny, na základě znalosti jiných veličin. V našem případě jsou známé veličiny naměřené na válcové brzdě a náhodné veličiny jsou takové, ve kterých se spalovací motor pohyboval během jízdy.

Účinnost spalovacího motoru je závislá na mechanických a termodynamických ztrátách. Tato účinnost může být popsána v závislosti na užitečné práci nebo jmenovitých efektivních tlacích, viz rovnice (25).

$$\eta_{SM} = \frac{W_b}{W_b + W_F + Q_0} = \frac{p_b}{p_b + p_F + q_0} \quad (25)$$

$$P_{b,rel} = \frac{P_{SM}}{P_{b,nom}}; \quad \omega_{rel} = \frac{\omega}{\omega_{nom}}; \quad P_{b,rel} = p_{b,rel} \cdot \omega_{rel} \quad (26)$$

$$\eta_{SM} = \frac{1}{1 + \frac{p_F + q_0}{p_e}} \quad (27)$$

Regresní vztah v závislosti na otáčkách motoru, výkonu a práci je definován jako rovnice (28).

$$\begin{aligned} p_F + q_0 &= \left( \frac{1}{\eta_b} - 1 \right) \cdot p_b = \\ &= A_0 + A_1 \cdot \frac{p_b}{p_{b,ref}} + A_2 \cdot \left( \frac{p_b}{p_{b,ref}} \right)^2 + A_3 \cdot \frac{n_M}{n_{M,ref}} + A_4 \cdot \left( \frac{n_M}{n_{M,ref}} \right)^2 + A_5 \cdot \frac{p_b}{p_{b,ref}} \\ &\quad \cdot \frac{n_M}{n_{M,ref}} + \dots \end{aligned} \quad (28)$$

Polynomická závislost využívá nelineární regresní vzorec s obecnými exponenty. Nominální hodnoty jsou zde konstanty, které ovlivňují pouze regresní koeficienty.

Využitím nelineární regrese získáme lepší přizpůsobení naměřeným a vypočteným hodnotám. Výsledná závislost pro účinnost spalovacího motoru je v závislosti na relativních hodnotách krouticího momentu, otáčkách a výkonu motoru.

$$\eta_{SM} = \frac{P_b}{P_b + P_F + Q_0} = \frac{1}{1 + \frac{p_F + q_0}{P_{b,nom} \cdot P_{b,rel}} \cdot \omega_{rel} \cdot \omega_{nom}} \quad (29)$$

Aplikací nelineární regrese docílíme vyšší korespondence s měřenými hodnotami. Výsledná závislost pro ztráty a účinnost je v závislosti na relativních hodnotách krouticího momentu, rychlosti otáčení a výkonu. Pro  $x_1=y_1=z_1$  a  $z=0$ ,  $x=y=2$  platí vztah (30).

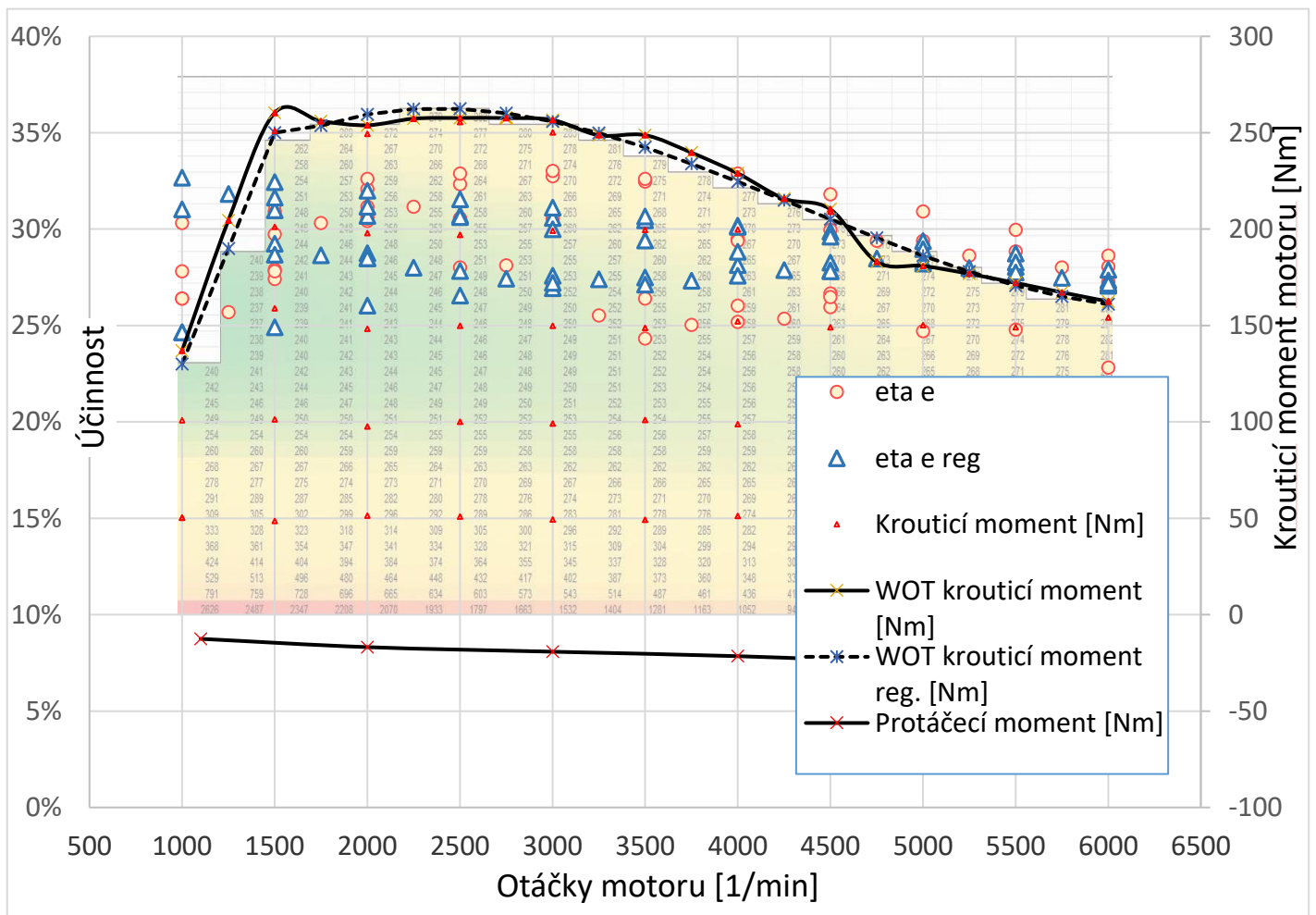
$$\eta_{e,reg} = \frac{1}{1 + \left[ A_0 + A_1 \cdot \left( \frac{P_{b,rel}}{\omega_{rel}} \right)^{y_1} + A_2 \cdot \left( \frac{P_{b,rel}}{\omega_{rel}} \right)^y + A_3 \cdot (\omega_{rel})^{x_1} \right] \cdot \frac{\omega_{rel}^{x_g}}{P_{b,rel}} + A_4 \cdot (\omega_{rel})^x + A_5 \cdot (P_{b,rel})^{z_1} + A_6 \cdot (P_{b,rel})^z} } = \frac{1}{1 + \frac{J}{P_{b,rel}}} \quad (30)$$

Pro výpočet měrné spotřeby paliva (BSFC - Brake Specific Fuel Consumption) je využita vypočtená účinnost spalovacího motoru  $\eta_{e,reg}$  pro každý úsek trati a výhřevnost paliva  $H_u = 46,4 \text{ MJ/Kg}$ .

$$BSFC = \frac{3600}{H_u \cdot \eta_{e,reg}} \quad (31)$$

Pro vypočtené účinnosti spalovacího motoru  $\eta_{e\_reg}$  (eta e reg) nedosahuje regrese plné korespondence s naměřenými daty  $\eta_e$  (eta e) a z tohoto důvodu vnášíme do vypočtených účinností motoru průměrnou chybu 5,62 %. [51]

Výsledná data z regresního vztahu a měření jsou vynesena do charakteristiky zážehového motoru, dle Obr. 21. Krouticí moment motoru byl měřen po otáčkových krocích, v celém rozsahu, až po maximální moment v dané oblasti. Maximální hodnotám krouticího momentu odpovídá křivka WOT (Wide Open Throttle), které se snaží korespondovat vypočtená vnější křivka WOT pomocí regrese. V oblasti záporného momentu spalovacího motoru je vykreslená protáček křivka, která značí maximální brzdňý moment motoru. V této oblasti je uzavřený přívod paliva do motoru.



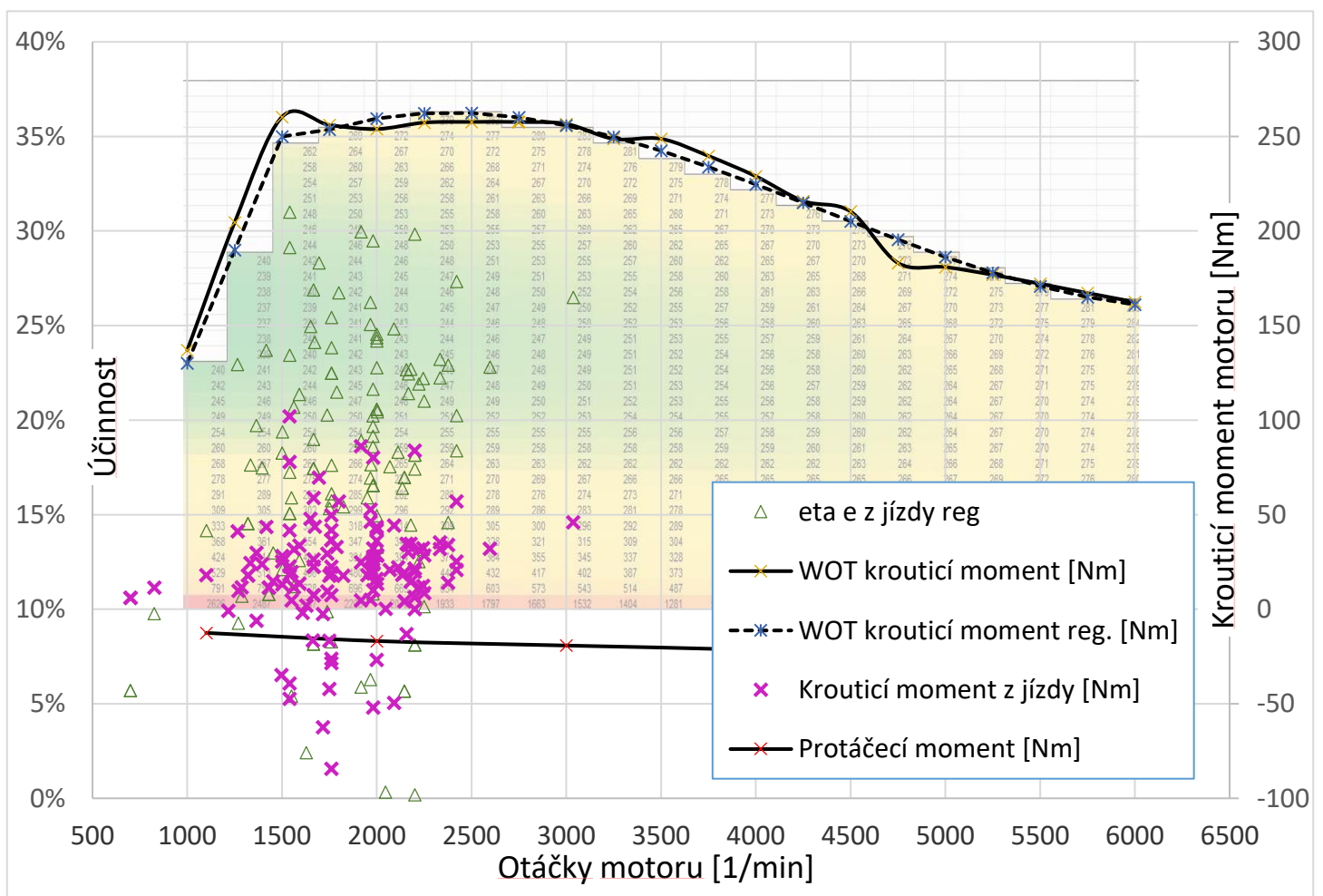
Obr. 21: Regresní analýza S. M. pomocí dat z válčové brzdy

Barevné spektrum na pozadí grafu, společně s hodnotami měrné specifické spotřeby paliva BSFC, značí oblast, ve které pracuje spalovací motor s ideální účinností z pohledu spotřebovávaného paliva.

## 8.2. Stanovení účinnosti spalovacího motoru v průběhu měřené trati

Do regresního výpočtu uvedeného v 8.1 zavedeme vypočtená data momentů, otáček a výkonů spalovacího motoru a vypočteme tak účinnosti v daných úsecích. Na následném vyobrazení charakteristiky spalovacího motoru, Obr. 22, jsou zobrazeny ony body, ve kterých se motor pohyboval během měřené jízdy. Jedná se o 116 bodů, reprezentujících jednotlivé úseky trati. Z vynesené závislosti je patrné, že převážnou část měřené jízdy motor pracoval v oblasti nízkého zatížení, převážně v rozsahu otáček od 1000 do 3100 1/min a momentů do 50 Nm.

Pro úseky, ve kterých pracoval motor v příliš nízkém zatížení, společně s účinností, vzniká potenciál pro mild hybridní systém. Vzhledem k umírněnému stylu jízdy vozidla, nevzniká na dané trati příliš příležitostí, pro které bychom využili podpory elektromotorem pro dosažení vyššího krouticího momentu potřebného k prudké akceleraci.



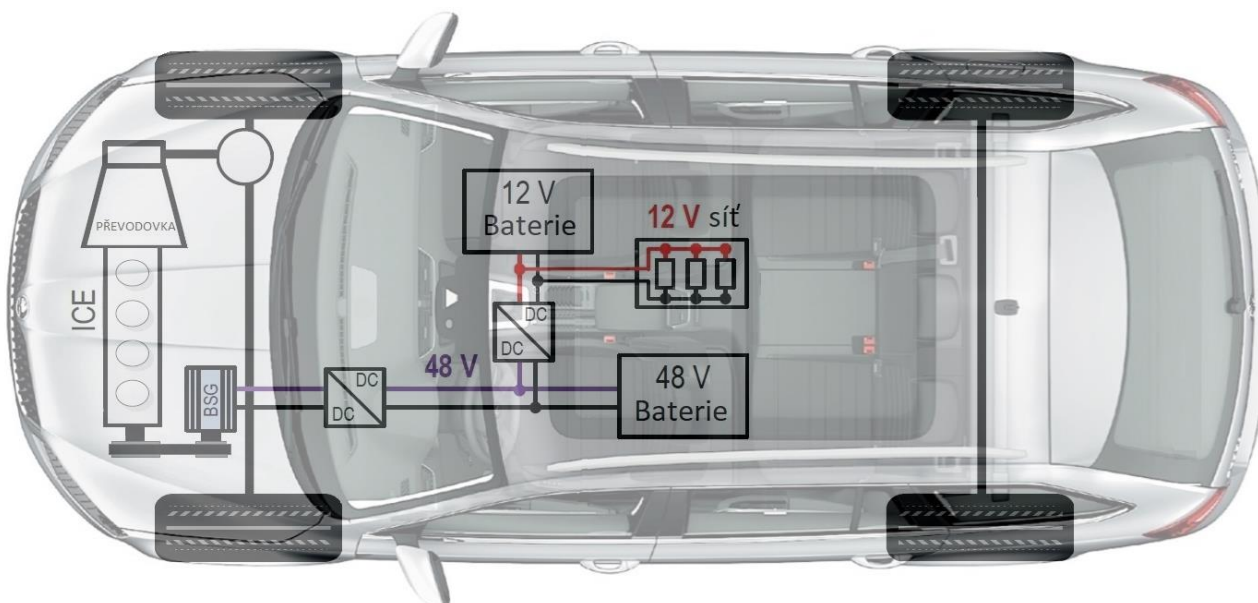
Obr. 22: Regresní analýza pro určení účinnosti S. M. na měřené trati

## 9) Možnosti využití 48 V systému na měřené trati

Jak již bylo řečeno, během trati nastávají případy, kdy je možné využít potenciálu 48 V mild hybridního systému. V následující kapitole se podíváme na konkrétní zvolené a navržené komponenty systému. Dále na jejich využití, omezení a logiku řízení na výpočetní trati v měřeném vozidle.

### 9.1. Implementace systému

Jeden z předních technologických přínosů 48 V systému je jeho možnost implementace do již stávajících vozidel. V rámci této diplomové práce počítáme s umístěním BSG synchronního elektromotoru do konfigurace P0. Tato konfigurace v našem případě znamená, že je elektromotor umístěn na místo původního alternátoru ve vozidle Škoda Octavia III. Generace. Pomocí řemenového převodu je elektromotor pevně spojen s otáčením klikového hřídele. Řemenice rozdílných velikostí vytváří celkový převod mezi otáčkami klikového hřídele spalovacího motoru a otáčkami elektromotoru  $i_{\text{řemen}} = 2,64$ . Jelikož výkon mezi spalovacím motorem a elektromotorem proudí neustále s možností obousměrného chodu (motorický nebo generátorický režim), je nutné v blízkosti elektromotoru umístit oboustranný napínák, který zajistí, že řemen nebude prokluzovat.



Obr. 23: ŠKODA Octavia MHEV – model [59]

Mezi další komponenty, které jsou zásobovány energií z 48 V sítě patří dvojice DC/DC měničů napětí, přičemž první, blíže k motoru, upravuje výstupní stejnosměrné napětí na 48 V a druhý již paralelně usměrňuje napětí pro 12 V síť. Rozvod pro 12 V síť zůstává ve



vozidle zachován pro napájení palubní sítě vozidla. Všechny komponenty 48 V sítě jsou propojeny samostatnou komunikační sběrnicí CAN a jsou blíže popsány v následujícím textu.

### 9.1.1. Návrh BSG elektromotoru

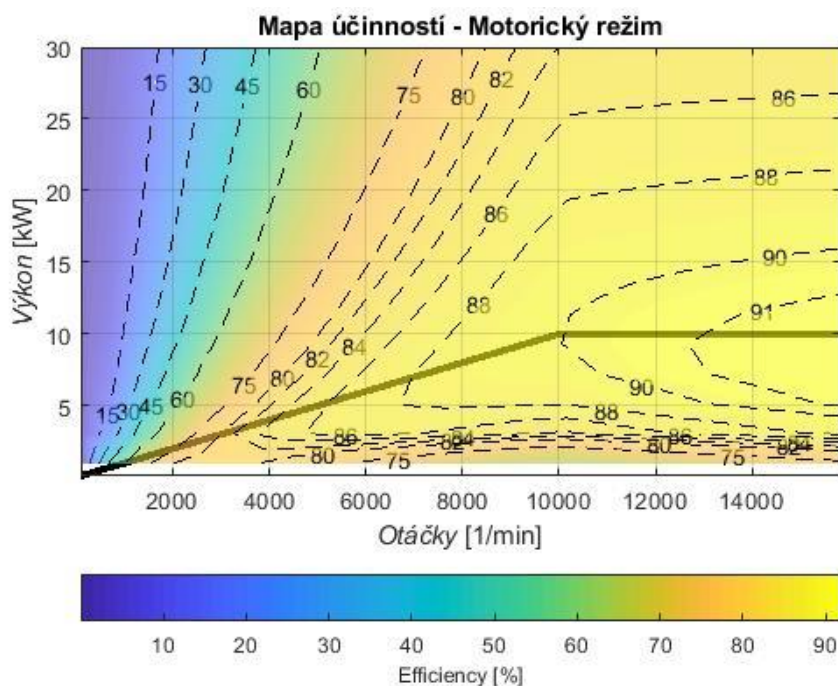
48 V technologie je na automobilovém trhu novinkou a jednotliví výrobci BSG elektromotorů si uchovávají jejich technické specifikace nezveřejněné. Z tohoto důvodu byl pro simulaci, na základě konzultace s prof. Jaroslavem Novákem, vytvořen fiktivní 48 V BSG synchronní elektromotor, jehož parametry jsou sepsány v Tabulka 2.

48 V BSG synchronní elektromotor s permanentními magnety			
Jmenovitý výkon	$P_n$	10	[kW]
Jmenovité otáčky	$n_n$	10000	[1/min]
Maximální otáčky	$n_{max}$	15840	[1/min]
Napětí baterie	$U_{bat}$	48	[V]
Jmenovitý moment	$M_n$	9,5	[Nm]
Momentová přetížitelnost	$M_{maxrel}$	3	[-]
Maximální moment	$M_{max}$	28,5	[Nm]
Jmenovité sdružené napětí	$U_{In}$	34	[V]
Jmenovité fázové napětí	$U_{fáz}$	20	[V]
Účinník	$\cos\phi_n$	0,92	[-]
Jmenovitý proud	$I_{In}$	205	[A]
Maximální proud	$I_{max}$	615	[A]
Počet pólů	$S$	2	[-]
Jmenovitá frekvence	$f_n$	167	[Hz]
Maximální frekvence	$f_{max}$	264	[Hz]
Dělení ztrát	$B$	50/50	[-]

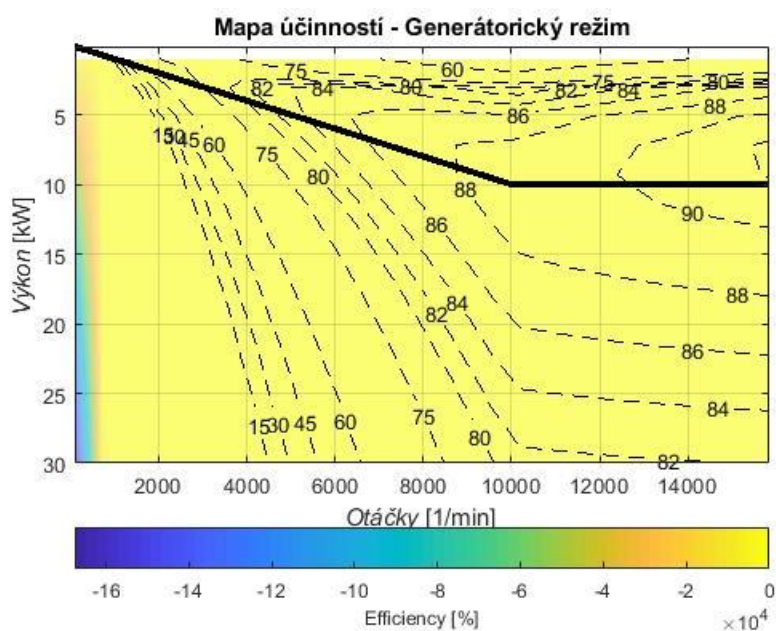
Tabulka 2: Specifikace 48 V BSG elektromotoru

Elektromotor s permanentními magnety nemusí mít přídavný obvod pro buzení a jeho magnetický tok se indukuje kdykoliv se jeho rotor otáčí. Zpětnovazební regulace DC/DC měniče ovlivňuje chování elektromotoru. Pokud je zadaná hodnota proudu v měniči nenulová, je tomu úměrná hodnota energie dodávané do baterie. Při nulové hodnotě proudu měniče, elektromotor žádnou energii nedodává.

Modifikací výpočetního algoritmu v programu Matlab byly získány mapy účinností fiktivního elektromotoru pro motorický a generátorický režim, viz Obr. 24 a Obr. 25. [65]



Obr. 24: Mapa účinností v motorickém režimu BSG elektromotoru



Obr. 25: Mapa účinností v generátorickém režimu BSG elektromotoru

Elektromotor pracuje v otáčkách závislých na spalovacím motoru, se kterým je pevně spojen pomocí řemenu. Pro další využití elektromotoru v diplomové práci bylo nutné sestavit výpočet regresní analýzy, za účelem získání hodnot účinností v konkrétních bodech, odpovídajících měřené trati. Pro regresní funkci byla použita vypočtená data v

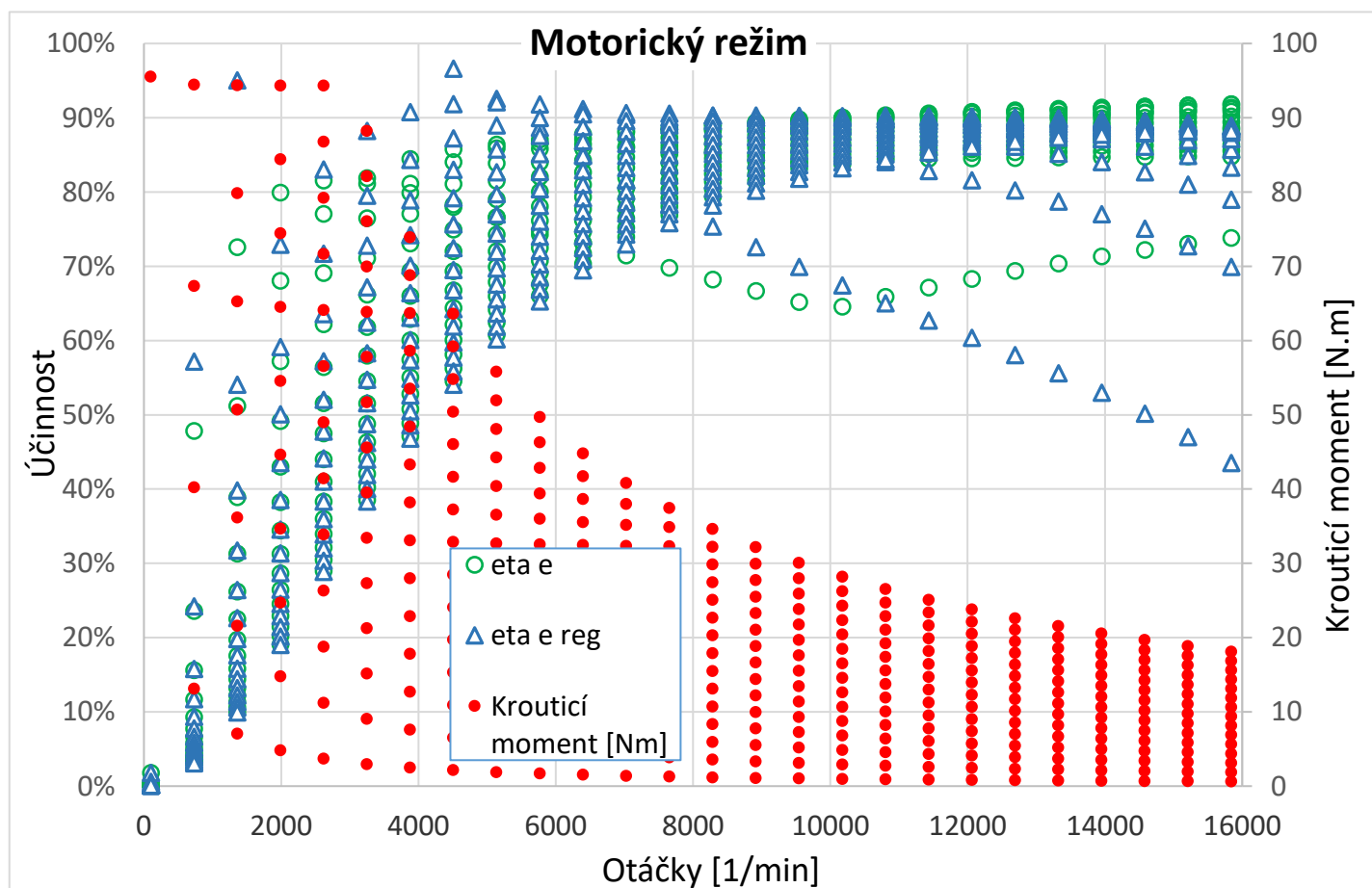
programu Matlab jako známé veličiny. Dále musel být, oproti výpočtu v případě spalovacího motoru, do výpočtu regrese zařazen rozdíl mezi vztahem pro motorický a generátorický stav, viz vztahy (32) a (33).

$$J_{mot.} = P_{rel} \cdot \left( \frac{1}{\eta_e - 1} \right) \quad (32)$$

$$J_{gen.} = P_{rel} \cdot (1 - \eta_e) \quad (33)$$

Následně je již postup obdobný jako v případě spalovacího motoru, dle (30).

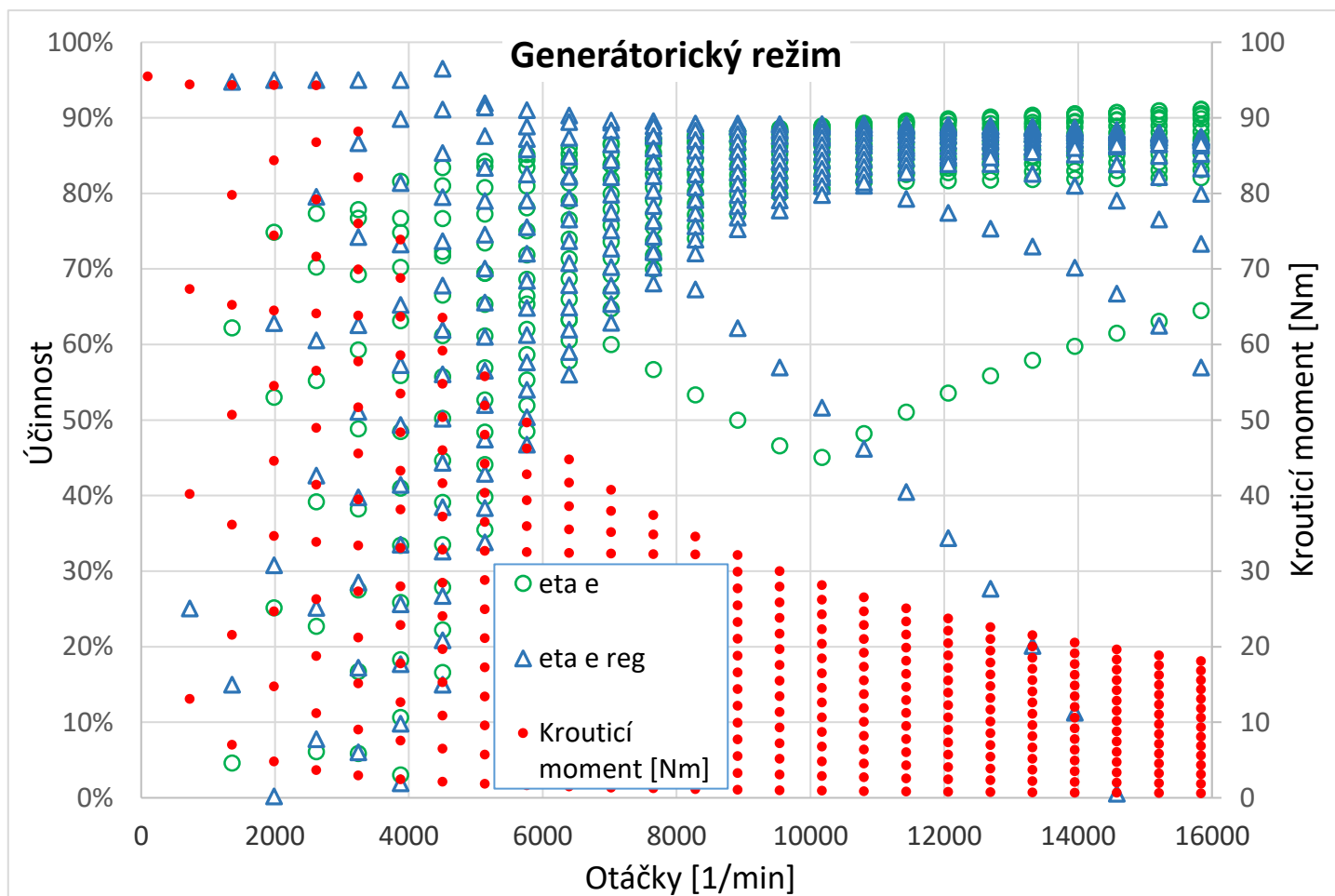
Regresní analýzou v motorickém režimu bylo dosaženo odchylky od vstupních dat 2,78 % a její reprezentace je vyobrazena na Obr. 26. Je zde dosaženo poměrně vysoké shody, ovšem mimo dat, která se pohybují ve vysokých otáčkách a nízkém zatížení elektromotoru. Jedná se o nízké procento dat, která nemají na výslednou odchylku velký vliv.



Obr. 26: Regresní analýza motorického režimu navrženého BSG elektromotoru

Generátorický režim proti tomu vykazuje vyšší odchylku od vstupních dat, a to 5,75 %.

V tomto případě je odchylka opět způsobena body v nízkém zatížení, které ovlivňují regresní výpočet, jak je znázorněno na Obr. 27.



Obr. 27: Regresní analýza generátorického režimu navrženého BSG elektromotoru

Do regresních funkcí obou režimů byly následně zařazeny data momentů, otáček a výkonů elektromotoru během jízdy na dané trati, pro které byly vypočteny odpovídající účinnosti. Jízdní režimy s využitím elektromotoru jsou popsány v následující kapitole. Na Obr. 28 jsou znázorněny body reprezentující moment elektromotoru potřebný na pohon spalovacího motoru během jízdy čistě na elektřinu při vypnutém spalovacím motoru. Dále jsou na obrázku zobrazeny odpovídající účinnosti, ve kterých se elektromotor pohybuje v motorickém režimu.



Na závislosti je viditelné, že řízení přídatného momentu od spalovacího motoru je omezeno jmenovitým momentem elektromotoru. Při brzdění motorem je naopak elektromotor krátkodobě zatížen i momentem vyšším než jmenovitým. Tato možnost je omezena dobou přetížení a chlazením elektromotoru.

### 9.1.2. 48 V Baterie

Pro účely diplomové práce byl použit 48 V Lithium-Ionový akumulátor od firmy A123 systems. Baterie 14S1P se skládá z 1 paralelně a 14 sériově zapojených článků. Údaje o baterii v Tabulka 3 jsou známy od výrobce a z odborné publikace. [52], [53]

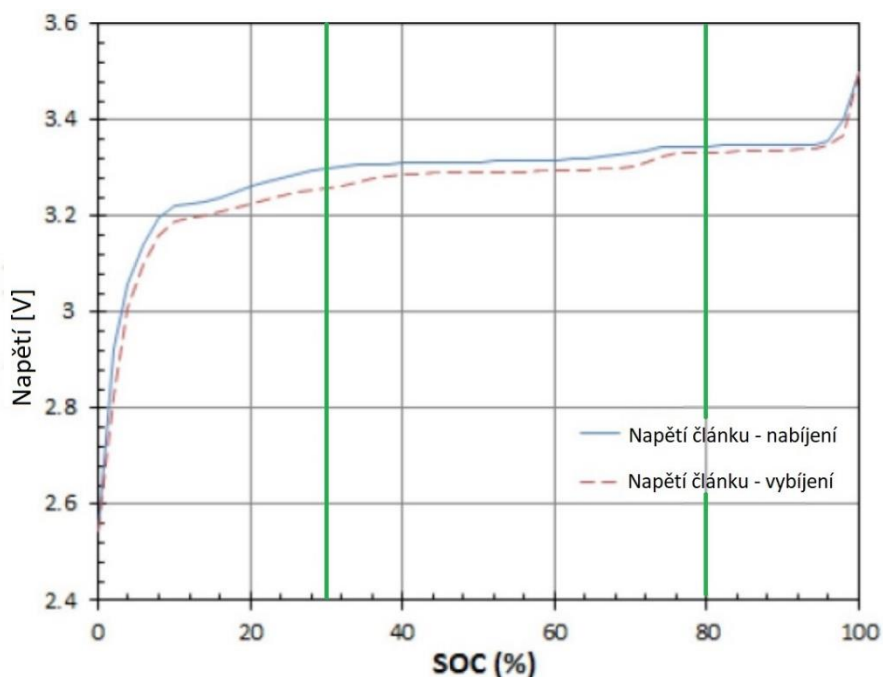
48 V Lithium-Ion baterie - A123 systems			
Konfigurace	14S1P		
Pracovní napětí	U <sub>bat</sub>	24-54	V
Počet článků	n <sub>cell</sub>	14	-
Kapacita	C	0,4	kWh
Váha	m <sub>bat</sub>	<8	kg
Rozměry	LxHxD	304 x 96 x 180	mm
Teploty pro skladování	T <sub>stor</sub>	-40 ÷ 65	°C
Pracovní teploty	T <sub>w</sub>	-30 ÷ 65	°C
Nabíjecí výkon	P <sub>ch</sub>	16	kW
Vybíjecí výkon	P <sub>disch</sub>	15	kW
Nabíjecí účinnost	η <sub>ch</sub>	94	%
Vybíjecí účinnost	η <sub>disch</sub>	94	%
Rozsah SOC pro MHEV	SOC	30 ÷ 80	%

Tabulka 3: Specifikace 48 V akumulátoru [52]

Výrobce předepisuje ideální rozsah stavu nabití baterie (SOC – State Of Charge) od 30 % do 80 % pro využití v mild hybridních vozidlech. Pro tento rozsah vykazuje baterie stabilní napětí článku při vybíjení i nabíjení. Napětí článku v případě vybíjení baterie je v pracovním rozsahu uvažováno jako konstantní  $U_{CELL_{disch}} = 3,28 V$  a v případě dobíjení  $U_{CELL_{ch}} = 3,31 V$ , viz Obr. 30.

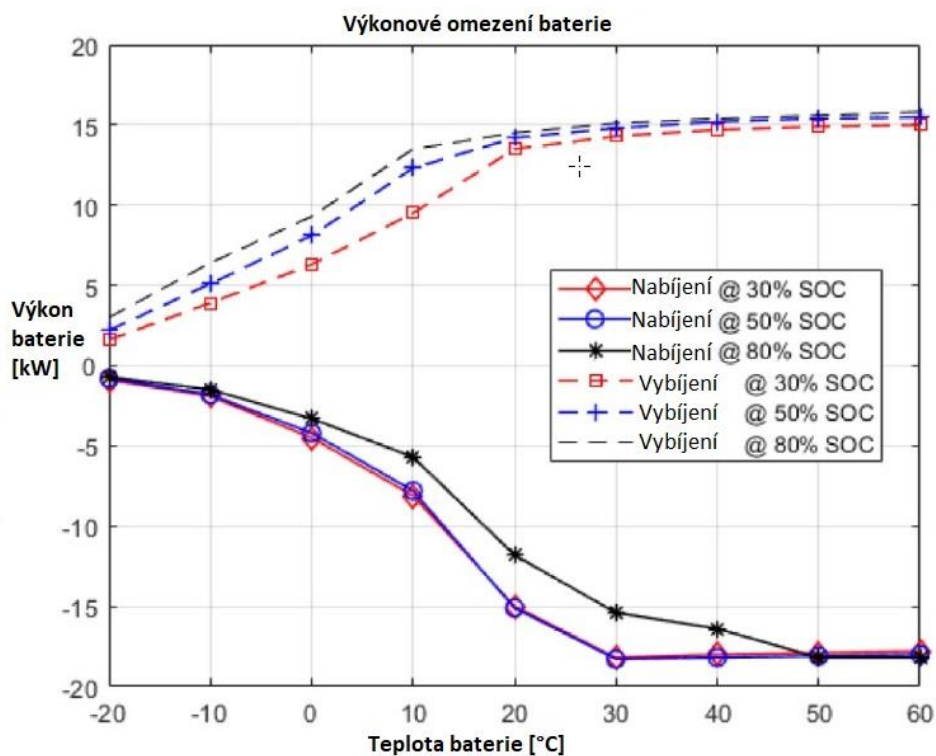
Pro aplikaci je dále výhodné, že baterie vyniká širokým teplotním rozsahem, který umožňuje studený start motoru, či splňuje požadavek na vyšší počet startovacích cyklů.

Akumulátor je vybaven nuceným chlazením vzduchem, pro zajištění malých rozměrů a vysoké využitelnosti pro 48 V systémy.



Obr. 30: Závislost stavu nabití článku akumulátoru na jmenovitém napětí článku [53]

Baterie má výkonové omezení pro nabíjení 16 kW a pro vybíjení 15 kW, viz Obr. 31 závislosti výkonu baterie na stavu nabití a teplotě. [53]



Obr. 31: Závislost výkonu akumulátoru na jeho teplotě [53]



### 9.1.3. DC/DC měnič napětí

Pro usměrnění napětí 48 V sítě a propojení paralelní 12 V sítě byl v této práci použit obousměrný 48 Voltový DC/DC měnič napětí od společnosti Continental.

Měnič je dle informací od výrobce schopen pracovat s účinností vyšší než 95 %. Pro potřeby výpočtu bylo tedy uvažováno se scénářem, ve kterém měnič pracuje s konstantní účinností  $\eta_m = 95 \%$  v obou směrech. Řízení napětí a proudu je prováděno digitálně, přičemž měnič je navíc vybaven vnitřní diagnostikou, která ho chrání proti přetížení. Zmíněno v kapitole 5.2.

[40]

## 9.2. Strategie řízení Mild-hybridu Škoda Octavia

Mezi hlavní cíle optimalizace spalovacího motoru pomocí 48 V systému patří minimalizace spotřebovaného paliva a udržování stavu nabití baterie v určitém rozsahu. Toho lze nejučinněji dosáhnout udržováním spalovacího motoru a elektromotoru v oblasti, ve které pracují s nejlepší účinností. Nevýhodou uspořádání P0 je omezená možnost využití BSG k plně elektrickému pohonu, jelikož musíme stále překonávat odpory spalovacího motoru. [4]

V současné době mají různí výrobci různé strategie řízení hybridních vozidel, avšak z podstaty 48 V systému vyplývají možnosti zmíněné v rešeršní části práce. Tato práce potenciálně počítá s provozními stavy, které umožňuje mild hybridní systém, avšak charakter trati a styl jízdy řidiče umožňuje pouze jeho částečné využití. Z tohoto důvodu bylo využito metody řízení, která optimalizuje spotřebu paliva na základě znalosti celé trati. Další možnosti k širšímu využití systému budou uvedeny v kapitole věnující se optimalizaci.

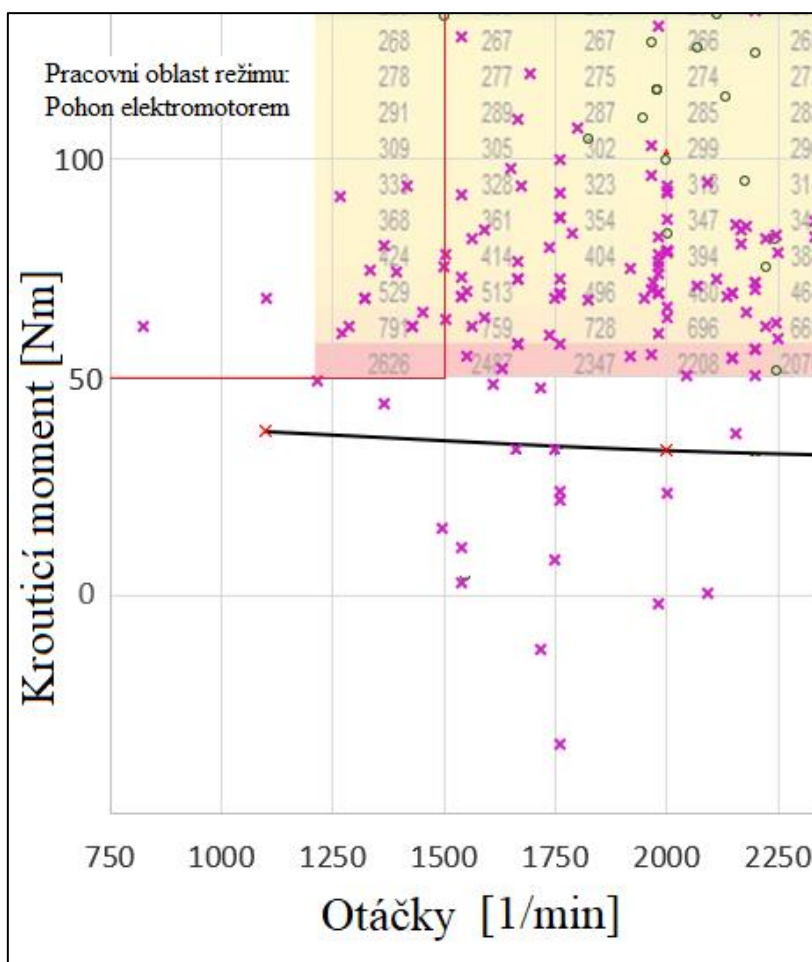
### 9.2.1. Pohon elektromotorem

Pro čistě bateriový pohon, při vypnutém spalovacím motoru, je v konfiguraci P0 nutné překonávání ztrát protáčením spalovacího motoru. Na výpočetní trati bylo vybráno 15 úseků, ve kterých se vozidlo pohybuje malými rychlostmi, otáčky spalovacího motoru nepřekračují  $1500 \text{ min}^{-1}$  a moment nepřesahuje 100 Nm. Oblast pro pohon elektromotorem je znázorněna na Obr. 32.

Jako další omezení je zde maximální moment BSG elektromotoru, který zde musí být větší než součet absolutní hodnoty protáčecího momentu spalovacího motoru a požadovaný moment přenášený na kola vozidla, dle rovnice (34).

$$M_{elm} = \frac{|M_{prot}| + M_{poz}}{i_{\xi men}} < M_{max} \quad (34)$$





Obr. 32: Pracovní oblast spalovacího motoru pro pohon elektromotorem

Analogicky k momentu jsou počítány otáčky elektromotoru a následně výkon, který uvažuje účinnost řemenového převodu 95 %. Energie odebíraná z baterie je pro každý úsek vypočítána dle vztahu (35), kde je reprezentována jako součin vybíjecího výkonu baterie a času v daném úseku.

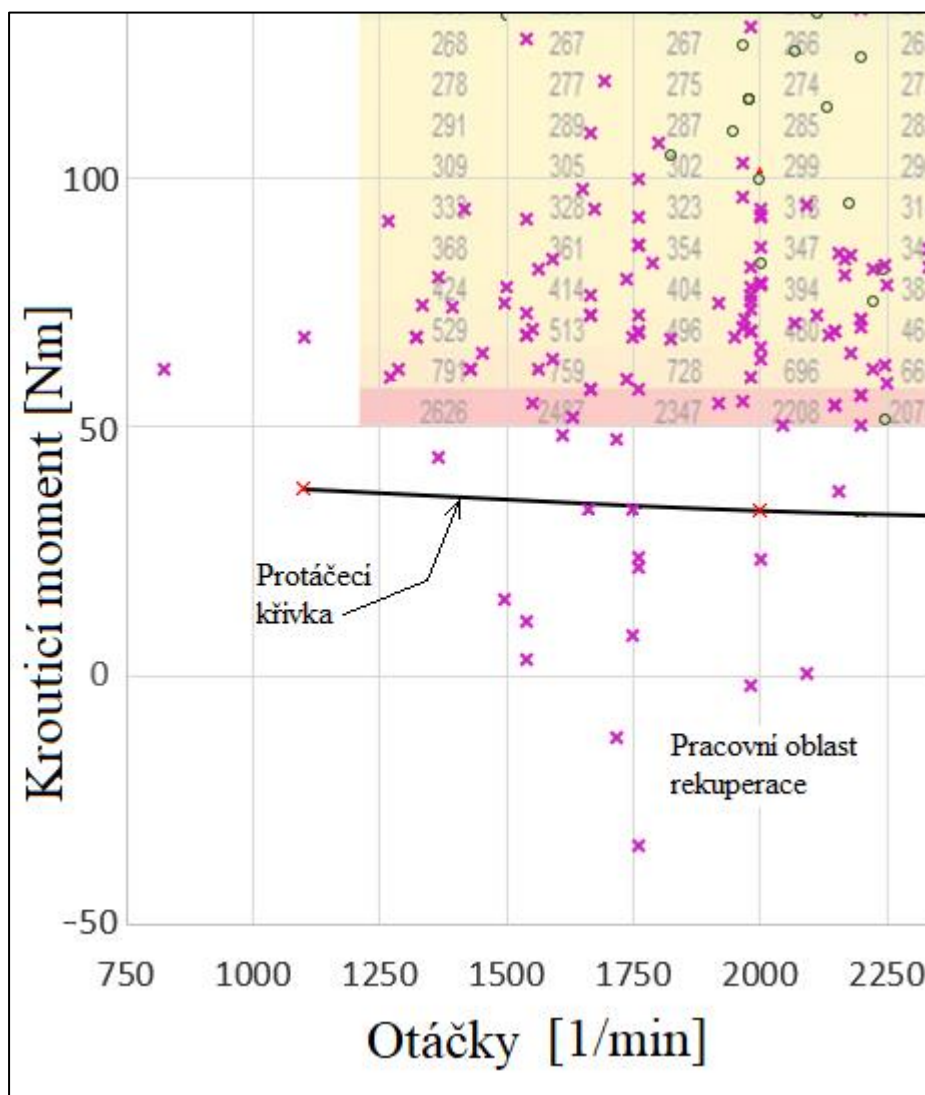
$$E_{bat\_disch} = P_{bat\_disch} \cdot t = \frac{P_{elm}}{\eta_{elm\_motor} \cdot \eta_m \cdot \eta_{bat\_disch}} \cdot t \quad (35)$$

Účinnost elektromotoru pro známé otáčky a potřebný moment je vypočtena pomocí regresního výpočtu elektromotoru v motorickém režimu, a je pro jednotlivé úseky rozdílná, viz kapitola 9.1.1..

Řídicí algoritmus dále omezuje dobu provozu čistě na elektřinu v závislosti na stavu nabití baterie, kdy nesmí klesnout pod 30 % SOC. Pokud se baterie blíží spodní hranici povoleného rozsahu SOC, řídicí algoritmus vyhodnotí požadavek nutnosti dobíjení vyšším výkonem.

### 9.2.2. Rekuperační brzdění

V úsecích, ve kterých řidič brzdí pomocí protáčení spalovacího motoru a zároveň pomocí třecích brzd, je možné nahradit třecí brzdy pomocí BSG elektromotoru pracujícího v generátorickém režimu. V charakteristice motoru se jedná o body, které leží pod protáčečí křivkou a motor je tedy není schopen sám dostatečně ubrzdít, viz Obr. 33.



Obr. 33: Pracovní oblast spalovacího motoru pro rekuperační brzdění

Touto metodou bylo na trati získáno 13 úseků, které bylo možno zatížit přidavným momentem. Přídavný moment  $M_{elm}$  byl volen jako rozdíl mezi celkovým požadovaným brzdňým momentem (reprezentován pomocí fialových bodů pod protáčečí křivkou na Obr. 33) a maximálním protáčečím momentem motoru při daných otáčkách, viz rovnice (36).

$$M_{elm} = \frac{M_{poz} - M_{prot}}{\dot{\varphi}_{remen}} \quad (36)$$

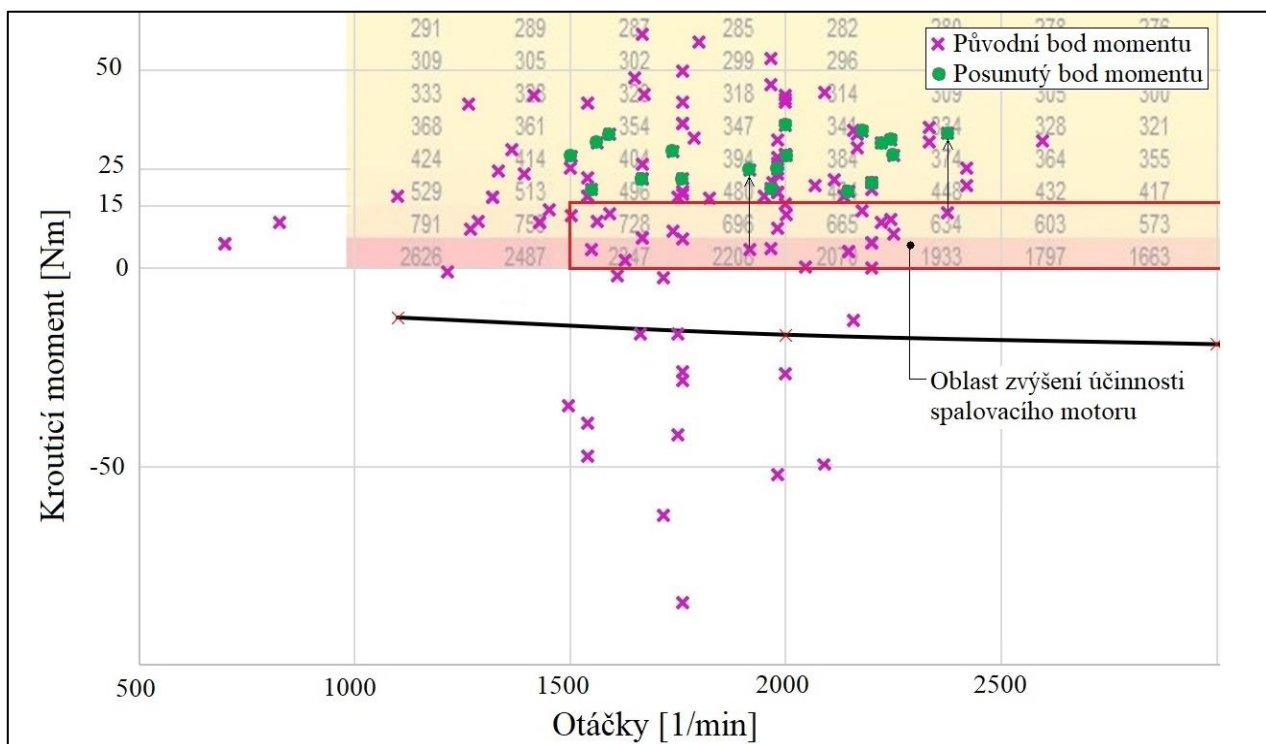
Následně byly, jako v předchozím případě, vypočteny otáčky a mechanický výkon vstupující do elektromotoru. Nyní ovšem BSG elektromotor pracuje jako generátor elektrické energie a jeho účinnost známe pro jednotlivé případy z regresního výpočtu, viz 9.1.1..

Energie ukládána do 48 V akumulátoru je ponížena o 10 %, což je zde uvažováno jako průměrná hodnota dostačující k napájení 12 V sítě.

$$E_{bat\_ch} = 0,9 \cdot P_{bat\_ch} \cdot t = 0,9 \cdot P_{elm} \cdot \eta_{elm\_generator} \cdot \eta_m \cdot \eta_{bat\_ch} \cdot t \quad (37)$$

### 9.2.3. Zvýšení účinnosti spalovacího motoru

Pokud je spalovací motor v režimu otáček vyšších než  $1500 \text{ min}^{-1}$  a zároveň nízkého zatížení (do  $M_{SM} = 15 \text{ Nm}$ ), je spalovací motor navíc zatížen přídavným momentem od elektromotoru, který posune spalovací motor blíže k nižší měrné specifické spotřebě paliva a vyšší účinnosti, viz Obr. 34. Přídavný, zátěžný, krouticí moment na spalovacím motoru byl v případě této práce volen v intervalu  $M_{přidavny} = \langle 5 - 20 \rangle [\text{Nm}]$  a byl použit pro 22 výpočetních úseků trati. Tato hodnota byla zvolena v závislosti na zatížení, ve kterém se spalovací motor na trati pohybuje, ale především v závislosti na požadavku dobíjení baterie. Vyšším zatěžováním bychom zdánlivě posunuli spalovací motor k vyšším účinnostem, nižší měrné specifické spotřebě paliva a rychlejšímu dobíjení baterie. Nicméně bychom dosáhli vyššího výkonu spalovacího motoru a reálná spotřeba paliva by nám v tomto případě zbytečně narůstala.



Obr. 34: Pracovní oblast spalovacího motoru s přídavným momentem

Pro přepočtení navýšeného momentu spalovacího motoru na moment elektromotoru využijeme rovnici (38). Přepočet pomocí převodu  $i_{\dot{\gamma}_{remen}}$  je aplikován pro otáčky elektromotoru, které ovšem zůstávají během navýšení momentu neměnné, viz rovnice (39).

$$M_{elm} = \frac{M_{přidavny}}{i_{\dot{\gamma}_{remen}}} \quad (38)$$

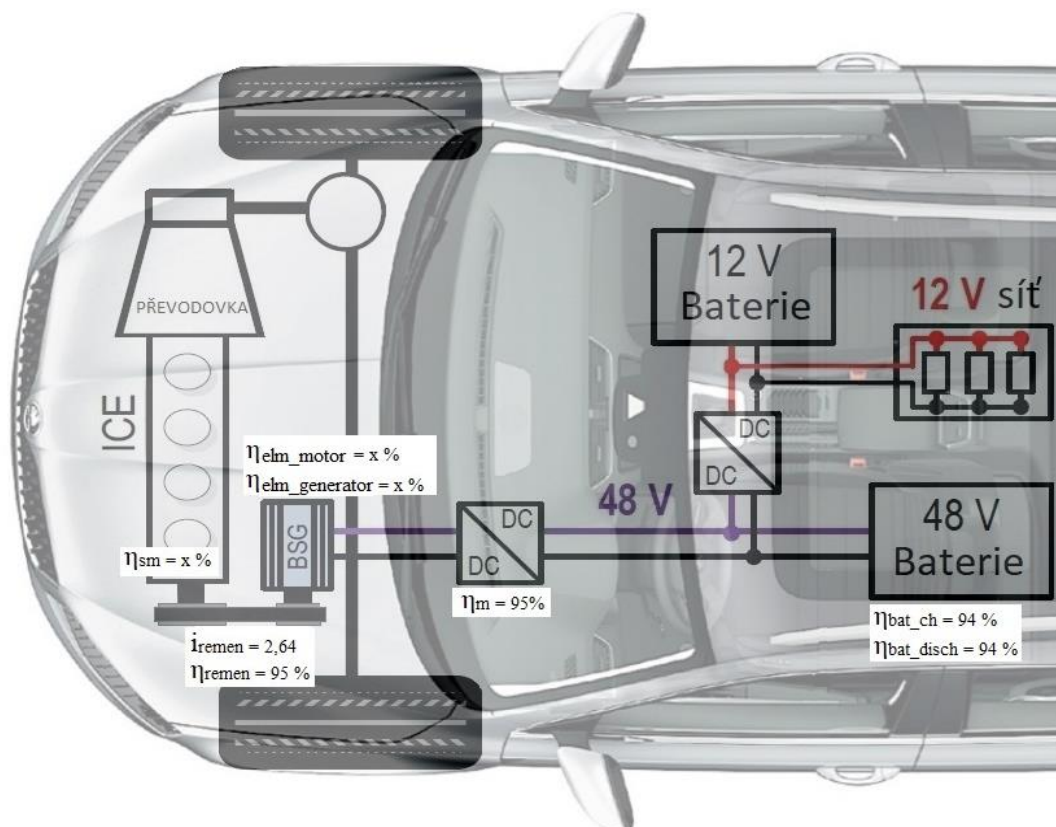
$$n_{elm} = n_{SM} \cdot i_{\dot{\gamma}_{remen}} \quad (39)$$

Na Obr. 34 je dále názorně představen vybraný bod momentu spalovacího motoru, který byl ve vertikálním (momentovém) směru posunut do oblasti, ve které dosahuje vyšší účinnosti. Energie, kterou motor vytvoří navíc, je ukládána do 48 V Baterie. Postup výpočtu byl popsán pomocí rovnice (37) v předchozí kapitole 9.2.2.

### 9.3. Výpočet stavu nabití baterie v průběhu trati

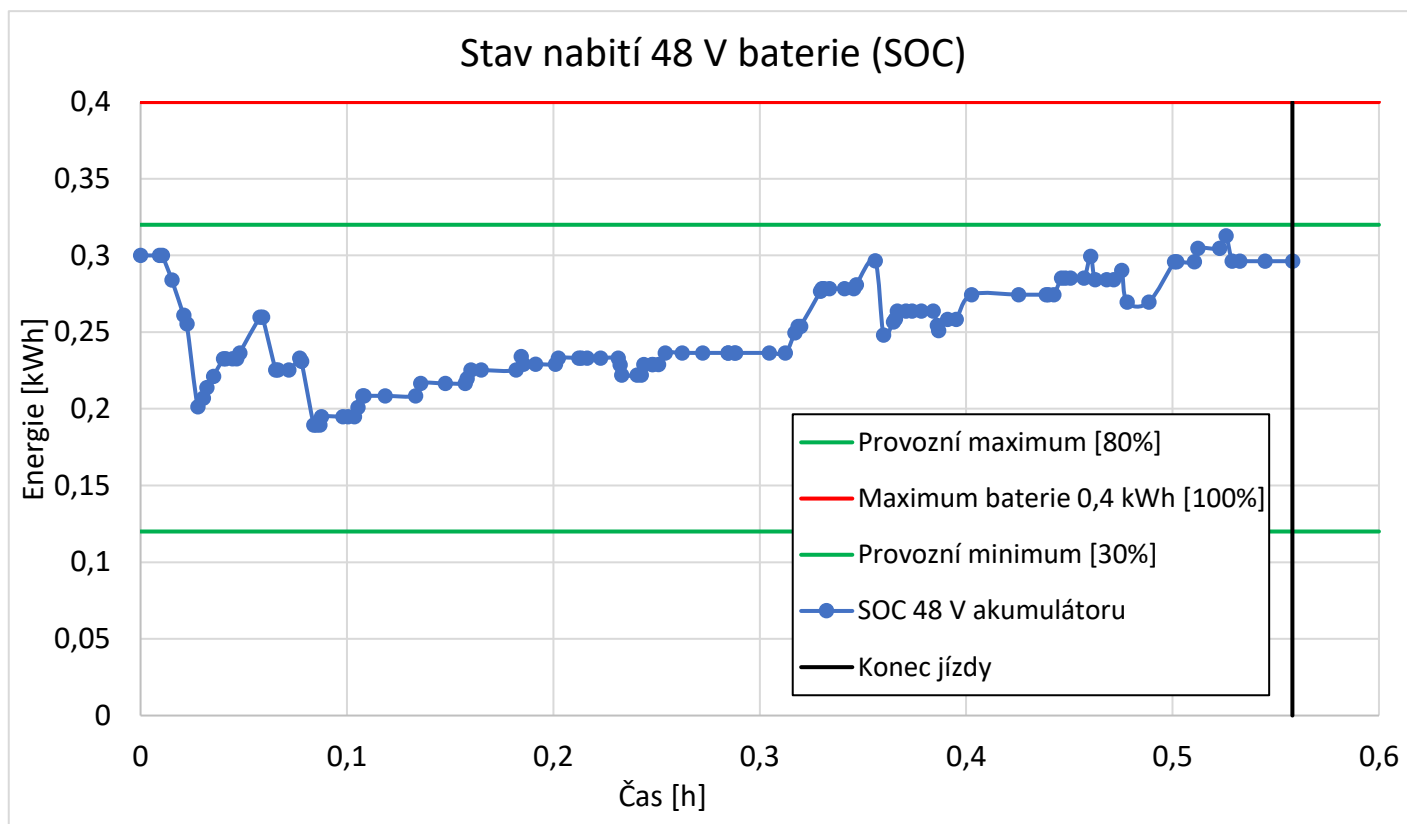
Nyní se dostáváme do bodu, kdy již známe všechny výpočetní účinnosti systému během jízdy vozidla porovnávací trati a můžeme tak vypočítat energetickou bilanci 48 V baterie.

Na Obr. 35 je názorně představeno schéma systému s vyznačenými účinnostmi pro jednotlivé komponenty. Účinnosti spalovacího motoru a elektromotoru jsou pro jednotlivé úseky trati vypočítány dle regresní funkce.



Obr. 35: Schéma vozidla s jednotlivými účinnostmi 48 V systému

Výpočet energie dodávané a odebírané z 48 V akumulátoru se řídí pro rozličné strategie dle vztahů (35) a (37). Výsledky energetického toku baterie byly chronologicky seřazeny do řady, na sebe navazujících úseků a vyneseny do grafu v závislosti na době jízdy vozidla, viz Obr. 36.



Obr. 36: Průběh stavu nabití 48 V baterie během simulace

Na obrázku je vidět, že systém byl pro elektrický pohon využíván nejvíce na začátku trati, než vozidlo opustilo město a pohybovalo se tak malými rychlostmi. Poté byl systém převážně využíván k plynulému dobíjení 48 V baterie.

#### 9.4. Porovnání spotřebovaného paliva

Výsledná spotřeba paliva konvenčního vozidla byla stanovena z vypočtených hodnot měrné specifické spotřeby paliva, odpovídající bodům, ve kterých se vozidlo pohybovalo během trati. Hodnota BSFC byla následně vynásobena výkonem spalovacího motoru v daném bodě a dobou, kterou v daném úseku vozidlo strávilo. Výsledkem zmíněného vztahu (40) je již spotřeba paliva v jednotlivých úsecích trati. Prostým součtem jednotlivých úseků byla dále získána hodnota spotřebovaného paliva za celou trať v gramech. Ze známosti hustoty benzínu  $\rho_{N95} = 740 \left[ \frac{Kg}{m^3} \right]$  jsme schopni přepočítat výslednou hodnotu na litry paliva, viz vztah (41). [54]

$$S_{12V\_g} = BSFC \cdot P_{SM} \cdot t \quad [\text{g}] \quad (40)$$

$$S_{12V\_l} = \frac{S_{12V\_g}}{\rho_{N95}} \cdot 1000 \quad [\text{l}] \quad (41)$$

Pro simulované vozidlo obsahující 48 V systém byl obdobný postup výpočtu, s rozdílem úseků, ve kterých bylo využito hybridní technologie. Tyto úseky se vyznačují především nižší měrnou specifickou spotřebou, ale oproti tomu vyšším výkonem spalovacího motoru.

V úsecích, ve kterých probíhalo brzdění motorem, byla v obou případech uvažována nulová spotřeba paliva. Navíc u hybridního vozidla docházelo k vypínání spalovacího motoru při jízdě čistě na elektrinu.

Nyní se dostáváme již k samotnému porovnání z hlediska spotřebovaného paliva na měřené trati. V Tabulka 4 lze vidět spotřebu paliva spotřebovanou na trati konvenčním vozidlem a simulovaným vozidlem. Spotřeba je uvedena i v klasickém zobrazení vztaženém na vzdálenost 100 Km a také v podobě procentuálního rozdílu. Pro výrobcem udávanou kombinovanou spotřebu paliva na 100 Km je uvedena i odpovídající hodnota emisí CO<sub>2</sub>, která byla přepočtena k vypočtené spotřebě paliva na trati.

Vozidlo	ŠKODA Octavia III.	ŠKODA Octavia III. s 48 V MHEV syst.
Spotřeba na trati (24,6 km)	1.35 l	1.35 l
Spotřeba na 100 Km	5.54 l	5.49 l
Spotřeba na 100 Km (udávaná výrobcem-kombinovaná), [55]	5,3 l	
Procentuální rozdíl spotřeby	-0,58 %	
Emise CO <sub>2</sub> na trati	126,5 g/km	125,3 g/km
Emise CO <sub>2</sub> (udávaná výrobcem pro 5,3l/100 km), [55]	121 g/km	

Tabulka 4: Porovnání spotřeby paliva a emisí CO<sub>2</sub>

Z tabulky je patrné, že úspory paliva nejsou v porovnání s původním vozidlem nijak markantní. Tato skutečnost je dána pouze částečným využitím mild hybridní technologie, což má své opodstatnění. Dalším důvodem nízké úspory paliva je bezesporu profil trati, který je v oblasti Polabí velice rovinný, čímž přicházíme o možnost využití režimu plachtění.

V neposlední řadě zde promlouvá jízdní styl řidiče a počáteční podmínka stejného stavu nabití akumulátoru na začátku a na konci trati. Další potenciál k širšímu využití systému je popsán v následující kapitole (9.5.), kde jsou uvedeny i situace, ve kterých by na měřené trati mohly být ony systémy využity.



System kromě úspory paliva samozřejmě přináší i jiné výhody, které nejsou zjišťovány v rámci této práce, a jejich význam je tedy shrnut v závěru diplomové práce.

## 9.5. Optimalizace 48 V systému

Tato kapitola se zaměřuje na možnou optimalizaci zabudovaného 48 V systému. Charakter trati a styl řidiče v případě této práce neumožnil širší využití systému, a proto jsou další systémy zmíněny v této kapitole, kde je vysvětlena jejich funkce v případě daného simulačního vozidla.

### 9.5.1. Režim plachtění

Plachtění (Coasting) má zásadní vliv na snižování emisí CO<sub>2</sub>. Řídicí strategie pro tyto stavy se soustředí na ztráty spalovacího motoru v rozličných jízdních situacích. Běžné spalovací motory odpojí vstřík paliva od spalovacího prostoru v okamžiku, kdy řidič uvolní akcelerační pedál. V případě mild hybridního vozidla se nepřerušuje vstřík paliva, ale odpojí se spalovací motor od pohonného ústrojí, aby byla zachována kinetická energie vozidla. Motor může zůstat ve volnoběžných otáčkách, vypnout se nebo pracovat v oblasti ideální měrné specifické spotřeby a dobíjet baterii přes BSG elektromotor. V tomto případě je rychlost vozidla měněna pouze v závislosti na jeho podélné dynamice, momentech setrvačnosti a hmotnosti. Elektrický stroj je se spalovacím motorem spojen bez možnosti odpojení (konfigurace P0 a P1, viz Obr. 1).

Architektura uspořádání pohonného ústrojí v poloze P0 při vypnutém motoru během plachtění přímo ovlivňuje bilanci elektrické energie, jelikož snižuje počet stavů rekuperace a dobíjení. Mezi důležité faktory chování tohoto systému patří startování motoru, kde 48 V BSG přináší vyšší startovací výkony a komfort v podobě rychlosti a ustálenosti chodu.

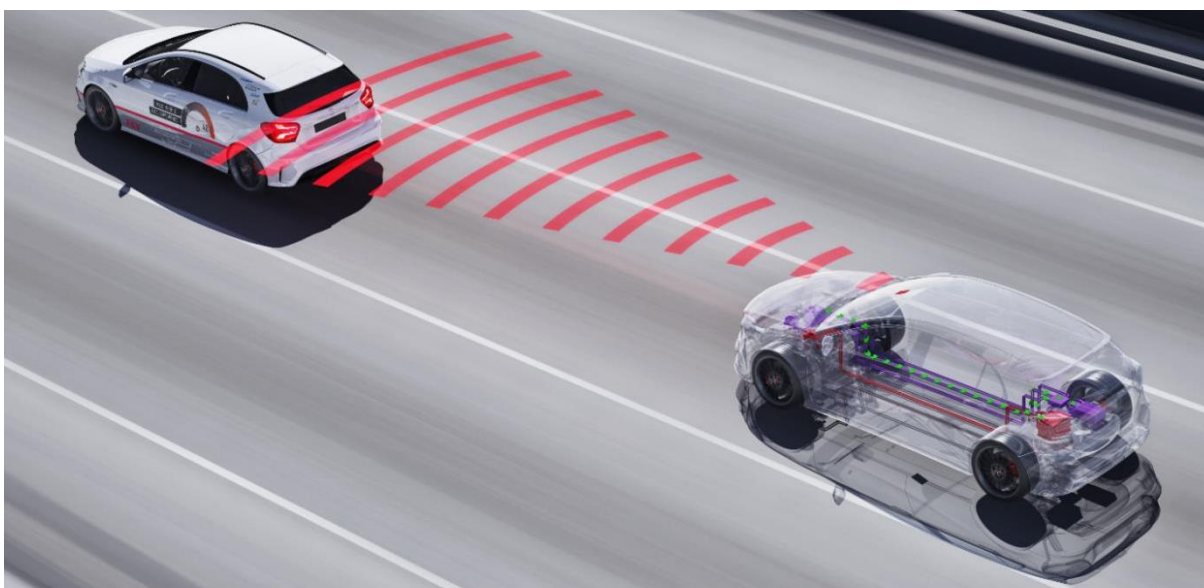
*Strategie řízení režimu plachtění:*

#### 1) Strategie založená na pravidlech

Vozidlo není schopno snímat dopravní situaci, a proto může tato strategie vést k dopravním zácpám, či z energetického a komfortního hlediska k neefektivním stavovým přechodům. Řidič musí stále aktivně používat třetí brzdu, čímž je značná část energie disipována.

## 2) Prediktivní a adaptivní strategie

Na druhou stranu PCS (Predictive Coasting Strategy) musí být dovybaven kamerovým systémem, který aktivně snímá dopravní situaci probíhající před vozidlem. Řídící algoritmus rozpoznává relevantní objekty, jako vozidla, jízdní pruhy, živé bytosti, dopravní značení, ... Systém na základě získaných dat o vzdálenosti k objektu a rychlosti vozidla rozhoduje, zda je v okamžiku, kdy řidič uvolní akcelerátor výhodné decelerovat s přerušeným tokem paliva pomocí odporu spalovacího motoru, či přejít do režimu plachtění. Z energetického hlediska je výhodnější využít kinetickou energii vozidla v režimu plachtění s vypnutým motorem a v okamžiku blížící se překážky přejít do režimu klasické decelerace pomocí odporu spalovacího motoru. V režimu klasické decelerace je možné pomocí BSG elektromotoru zvyšovat odpor spalovacího motoru a tím rekuperovat energii. Po celou dobu je v možnostech obsluhy vozidla, zapojit do funkce v případě potřeby i třetí brzdy, avšak prediktivní strategie zajišťuje automatické, plynulé a pohodlné zpomalení. [46]



Obr. 37: Prediktivní strategie plachtění s kamerovým systémem [46]

V jiném případě by mohlo být využito prediktivní strategie spolu s adaptivním řízením, které umožňuje odezvu vozidla na základě aktuální dopravní situace. Tato metoda umožňuje další rozšíření využití systému.

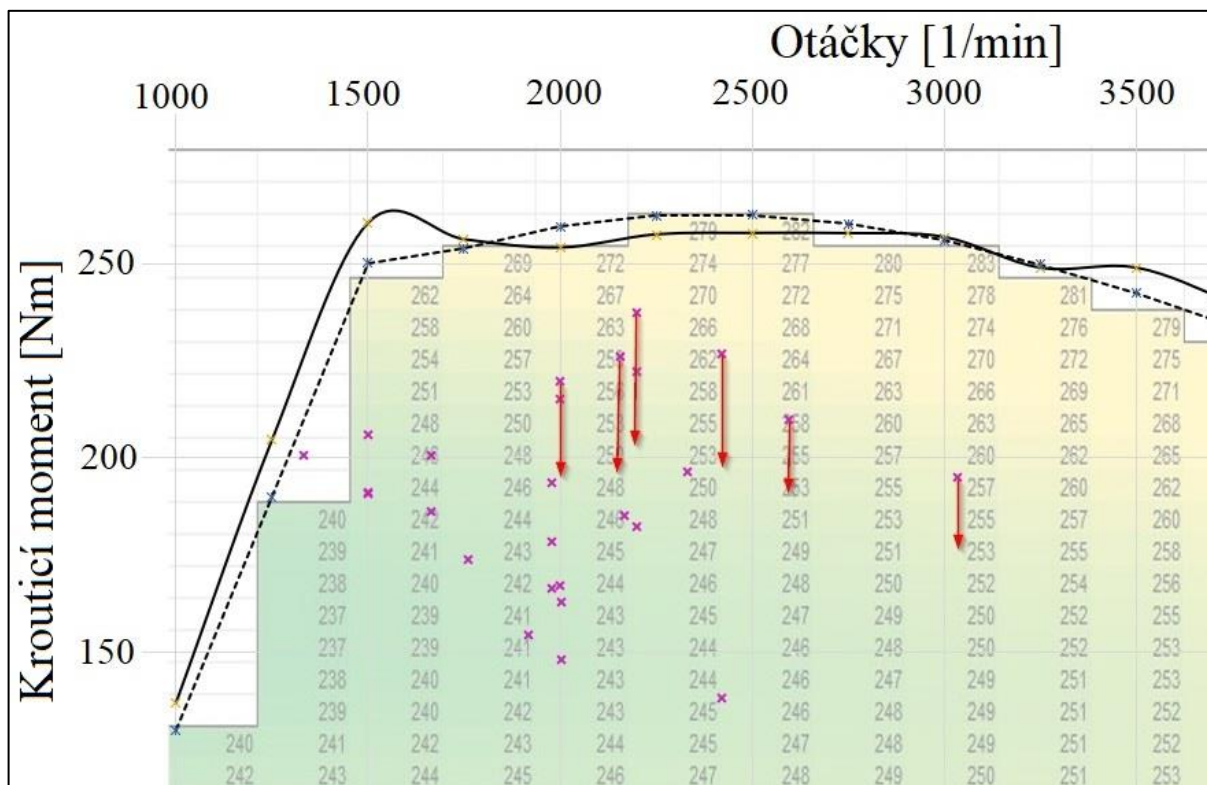


### 9.5.2. Režim E-Boosting

Přestože na simulační trati není požadavek pro podporu spalovacího motoru od BSG elektromotoru, je tento režim v možnostech systému. Pro demonstraci tohoto režimu byly vytvořeny potenciální body momentu spalovacího motoru ve vysokém zatížení. Tyto body, které reprezentují úseky trati, lze pomocí BSG elektromotoru posunout níže, k nižší specifické spotřebě paliva. Tento „odlehčující“ moment, o který posuneme zatížení spalovacího motoru níže, musí nahradit elektromotor, protože výsledný moment, který vstupuje do převodového ústrojí musí zůstat v daném úseku zachovaný, viz rovnice (42).

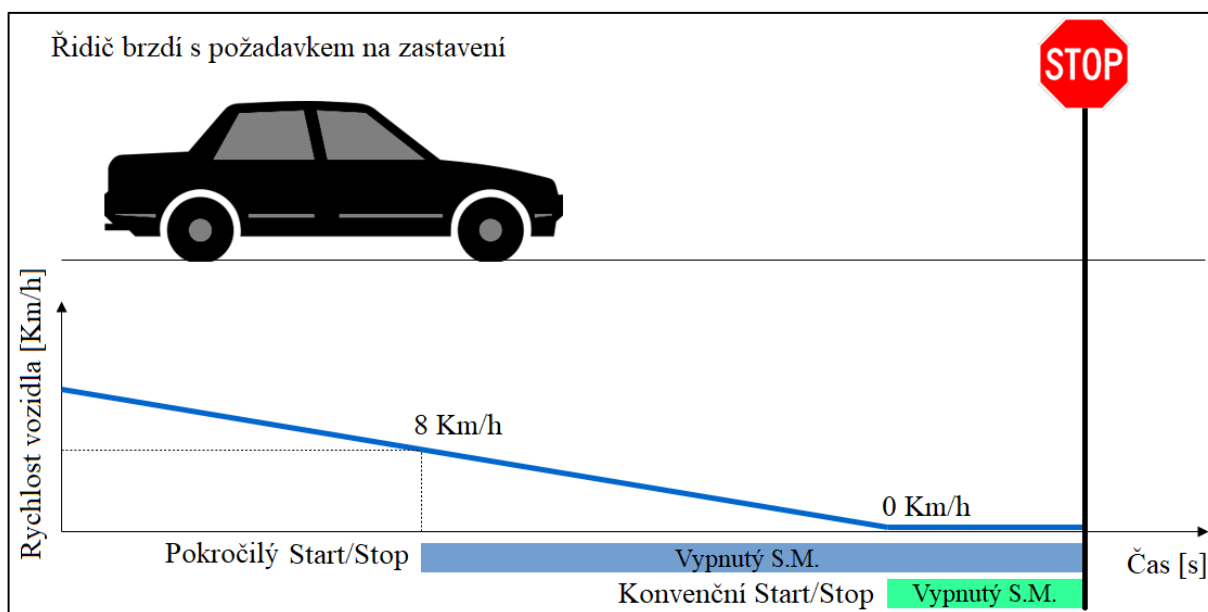
$$M_{elm} = \frac{M_{odlehčující}}{i_{řemen}} \tag{42}$$

Na Obr. 38 jsou znázorněny potenciální body momentu a směr jejich posunutí do oblasti s nižší specifickou spotřebou, která je zobrazena v podobě barevného spektra na pozadí grafu.



### 9.5.3. Pokročilý Start/Stop systém

Dalším potenciálním rozšířením zabudovaného systému je Start/Stop. U jízdního cyklu WLTP stráví vozidlo stáním 13 % celkového času, ve kterém motor ve volnoběžných otáčkách vytváří vedle spalování paliva i výfukové plyny. Většina automobilů je v dnešní době vybavena konvenčním Start/Stop systémem, který vypíná motor, když je vozidlo v klidu. Pokročilý Start/Stop systém, využívající 48 V BSG elektromotor k opětovnému nastartování, je schopen motor vypínat již při rychlosti vozidla menší než 8 Km/h. Před vypnutím motoru musí být motor ve volnoběžných otáčkách při vyřazeném rychlostním stupni. Toho v případě simulačního vozidla docílíme rozpojením spojky, či vyřazení rychlostního stupně na manuální převodovce. Motor je možné znovu nastartovat po uvolnění pedálu brzdy a zařazení rychlostního stupně.



Obr. 39: Pokročilý Start/Stop systém [56]

Opětovné nastartování vozidla je díky BSG elektromotoru možné i v případě, že vozidlo zcela nezastaví. Tato situace nastává v případě, když je rychlost vozidla nižší než zmíněných 8 Km/h, systém vypne spalovací motor a řidič se náhle rozhodne pro pokračování v jízdě. S běžným startérem by muselo pro opětovné nastartování vozidlo zastavit, jinak by pastorek spouštěče způsoboval nepříjemný hluk a byl zbytečně opotřebováván. Řemenem poháněný elektromotor je schopen uvést motor zpět do chodu během kratší doby, navíc pro řidiče téměř neslyšně. [56], [57]

## 10) Závěr

Úvodní část práce byla věnována rešerši řešení pohonných ústrojí hybridních vozidel, jejich rozdělení a detailnímu rozboru jednotlivých komponent 48 V, mild hybridního systému. Z technického hlediska přináší 48 V technologie řadu výhod, zejména pak možnosti větší optimalizace spalovacího motoru. S vyšším napětím jsme schopni nepřetržitě napájet pomocná zařízení, což vede ke snížení velikosti zástavbového prostoru, snížení mechanických ztrát a ke snížení váhy kabelových svazků. Mezi největší výhody patří ovšem cena a možnost implementace do stávajících vozidel, na čemž se zakládá pokračování této diplomové práce.

Dalším krokem bylo specifikováno dané vozidlo Škoda Octavia combi III. a měřená trať, po které se vozidlo pohybovalo. Pro měřenou reálnou jízdu mezi Neratovicemi a Čelákovicemi byla vypočtena energetická náročnost vozidla, ze které byly následně stanoveny momenty a výkony na kolech vozidla v průběhu trati. V následujícím kroku byly tyto hodnoty přepočteny na výkony a momenty spalovacího motoru, ve kterých se během jízdy agregát pohyboval.

Pro zjištění účinnosti a spotřeby paliva v každém výpočetním kroku trati, bylo nutné využít metody regresní analýzy změřených dat daného vozidla na válcové brzdě. Data z válcové brzdy byla do funkce zadána jako známá a data vypočtená z průběhu trati byla vložena jako náhodné veličiny. Takto byla získána data účinnosti a spotřeby paliva spalovacího motoru v průběhu trati a bylo možné stanovit celkovou spotřebu paliva daného konvenčního vozidla.

Po určení veškerých potřebných parametrů jízdy klasického konvenčního vozidla byly vybrány a navrženy nejdůležitější komponenty 48 V systému a následně navržena jejich zástavba do daného vozu. 48 V akumulátor a DC/DC měnič byly vybrány od renomovaných výrobců, zatímco BSG elektromotor byl navržen jako synchronní 10 kW elektrický stroj s permanentními magnety. Pro navržený elektromotor bylo vypočteno pole účinností v celém rozsahu jeho charakteristiky. Pro vypočtená data byla opět využita metoda regresní analýzy, pomocí které jsem byl schopen určit účinnosti elektromotoru v obou jeho režimech, v daných bodech, které reprezentují jeho funkci v průběhu trati.

Teoreticky zastavěný 48 V systém ve vozidle byl na trati využit pro pohon čistě na elektřinu při vypnutém spalovacím motoru, rekuperaci brzděné energie a pro chod spalovacího motoru v oblasti vyšší účinnosti, načež jeho přebytečný výkon byl ukládán do baterie. Pro každou tuto strategii využití systému byly vybrány vhodné body v charakteristice spalovacího motoru, které byly následně nahrazeny, či upraveny pomocí chodu elektromotoru. Výsledkem je jízda vozidla po stejné trati, stejné energetické náročnosti, ovšem nyní s využitím 48 V mild

hybridního systému. Pro nahrazené body v charakteristice spalovacího motoru byla za pomoci regresní analýzy určena nová účinnost a měrná specifická spotřeba paliva, ze které jsme byli schopni určit spotřebu paliva na celé trati s využitím 48 V systému.

Procentuální úspora paliva oproti konvenčnímu vozidlu je na této konkrétní trati při tomto stylu jízdy 0,58 %. Záměrně zmiňuji, že se jedná o konkrétní trať a styl jízdy, protože tato skutečnost velice promlouvá do finální úspory paliva. Styl jízdy řidiče byl velice úsporný v průběhu celé trati, a navíc celá jízda probíhala v oblasti s rovinným profilem. Kombinace těchto dvou scénářů dále zapříčinila to, že na trati není možnost využití dalších strategií systému. Dalším aspektem, který výslednou spotřebu paliva ovlivnil, je požadavek na stejný stav nabití baterie na začátku i na konci trati.

Tok energie z a do baterie byl počítán vždy při využití BSG elektromotoru, který pracoval s rozdílnými účinnostmi a v rozdílných režimech. Účinnost nabíjení a vybíjení baterie, spolu s DC/DC měničem je známá od výrobce. Výsledná závislost stavu nabití baterie byla vynesena do grafu v závislosti na době jízdy simulačního vozidla a splňuje požadavek na stejný stav nabití baterie na začátku a na konci trati.

Jak již bylo zmíněno a odůvodněno, nebylo možné plně využít potenciál systému na trati, čemuž byla věnována zvláštní kapitola, která tyto další stavy popisuje, jak z hlediska obecné funkce, tak z hlediska reálného působení v simulačním vozidle. Dá se předpokládat, že tyto a další rozšíření funkce systému povedou k vyšší úspoře paliva, společně se snížením emisí výfukových plynů, kterým se věnuje nově příchozí emisní norma. S touto normou jsou výrobci stále více nuceni do vývoje a zavádění elektrifikovaných vozidel na trh.

V současnosti ovšem není, vzhledem k vysokým pořizovacím nákladům, dostatečná kupní síla pro tato vozidla, a tak jsou výrobci motivováni k výrobě alternativ v podobě mild-hybridních vozidel s 48 V systémy, které si může dovolit vyšší procento populace, a zároveň dosahují nižších hodnot emisí CO<sub>2</sub>.

## Seznam použitých zkratek a symbolů

Zkratka/Symbol	Jednotka	Význam
$A_i$	[-]	Regresní koeficient
$a$	$[m/s^2]$	Zrychlení (zpomalení) vozidla
$C_x$	[-]	Součinitel odporu vzduchu
$E_{bat\_disch}$	$[kW\cdot h]$	Vybíjecí energie z baterie
$E_{bat\_ch}$	$[kW\cdot h]$	Nabíjecí energie do baterie
$F_{wheel}$	$[N]$	Síla na kolech vozidla
$f_k$	[-]	Součinitel valivého odporu
$g$	$[m/s^2]$	Gravitační zrychlení
$H_u$	$MJ/Kg$	Výhřevnost paliva
$i_{sp}$	[-]	Převod stálého převodu
$i_i$	[-]	Převod řaditelného i-tého převodu
$i_c$	[-]	Celkový převod
$i_{řemen}$	[-]	Převod řemenového převodu
$J_{mot.}$	[-]	Regresní funkce pro motorický režim
$J_{gen.}$	[-]	Regresní funkce pro generátorický režim
$J_{Ki}$	$[Kg\cdot m^2]$	Hmotnostní moment setrvačnosti rotujících kol vozidla
$J_p$	$[Kg\cdot m^2]$	Hmotnostní moment setrvačnosti rotujících částí převodového ústrojí
$J_m$	$[Kg\cdot m^2]$	Hmotnostní moment setrvačnosti rotujících částí motoru
$M$	$[N\cdot m]$	Krouticí moment
$M_{wheel}$	$[N\cdot m]$	Krouticí moment na kolech vozidla
$M_{SM}$	$[N\cdot m]$	Krouticí moment spalovacího motoru
$M_{elm}$	$[N\cdot m]$	Krouticí moment elektromotoru
$M_{prot}$	$[N\cdot m]$	Krouticí moment protáček spalovacího motoru
$M_{poz}$	$[N\cdot m]$	Požadovaný krouticí moment spalovacího mot.
$M_{přidavny}$	$[N\cdot m]$	Přídavný, zátěžný krouticí moment
$M_{odlehčující}$	$[N\cdot m]$	Odlehčující krouticí moment
$m_p$	$[Kg]$	Pohotovostní hmotnost
$m_c$	$[Kg]$	Celková hmotnost vozidla a posádky
$m_n$	$[Kg]$	Hmotnost posádky
$n_{SM}$	$[1/min]$	Otáčky spalovacího motoru
$n_{elm}$	$[1/min]$	Otáčky elektromotoru
$P$	$[kW]$	Výkon
$P_{wheel}$	$[kW]$	Výkon na kolech vozidla
$P_{b,rel}$	$[kW]$	Relativní brzdny výkon
$P_{b,nom}$	$[kW]$	Nominální brzdny výkon
$P_{bat\_disch}$	$[kW]$	Vybíjecí výkon baterie
$P_{bat\_ch}$	$[kW]$	Nabíjecí výkon baterie
$P_{SM}$	$[kW]$	Výkon spalovacího motoru
$P_{elm}$	$[kW]$	Výkon elektromotoru
$p_{b,rel}$	$[MPa]$	Relativní brzdny tlak

$r_v$	[m]	Valivý poloměr kol
$r_d$	[m]	Dynamický poloměr kol
$S_{12V\_g}$	[g]	Spotřeba paliva 12 V vozidla
$S_{12V\_l}$	[l]	Spotřeba paliva 12 V vozidla
$s$	[Km]	Ujetá dráha vozidla
$S_x$	[m <sup>2</sup> ]	Čelní plocha vozidla
$t$	[s]	Doba daného úseku
$U$	[V]	Elektrické napětí
$U_{CELLch}$	[V]	Nabíjecí napětí článku
$U_{CELLdisch}$	[V]	Vybíjecí napětí článku
$v$	[Km/h]	Rychlost jízdy vozidla
$V_Z$	[cm <sup>3</sup> ]	Zdvihový objem
$W$	[J]	Mechanická práce
$\alpha$	[°]	Úhel sklonu trati
$\delta$	[-]	Součinitel rotačních hmot
$\rho_{vzd}$	[Kg/m <sup>3</sup> ]	Hustota vzduchu
$\rho_{N95}$	[Kg/m <sup>3</sup> ]	Hustota benzínu N95
$\omega_{wheel}$	[rad/s]	Úhlová rychlost kola
$\omega_{rel}$	[rad/s]	Úhlová rychlost relativní
$\omega_{nom}$	[rad/s]	Úhlová rychlost nominální
$\eta$	[%]	Účinnost
$\eta_{rozv}$	[%]	Účinnost stálého převodu s diferenciálem
$\eta_p$	[%]	Účinnost převodového ústrojí
$\eta_s$	[%]	Účinnost spojky
$\eta_{SM}, \eta_e$	[%]	Účinnost spalovacího motoru
$\eta_{e\_reg}$	[%]	Vypočtená účinnost spalovacího motoru
$\eta_m$	[%]	Účinnost DC/DC měniče
$\eta_{elm\_motor}$	[%]	Účinnost elektromotoru v motorickém režimu
$\eta_{elm\_generator}$	[%]	Účinnost elektromotoru v generátorickém režimu
$CO_2$	Oxid Uhličitý	
WLTP	Worldwide harmonized Light vehicle Test Procedure).	
BSG	Belt Startér Generátor	
ICE	Internal Combustion Engine (Spalovací motor)	
AC	Alternating Current (Střídavé napětí)	
DC	Direct Current (Stejnoseměrné napětí)	
BEV	Battery Electric Vehicle (Elektromobil)	
OBD-II	On-Board Diagnostics (Diagnostika vozidla)	
BSFC	Brake Specific Fuel Consumption (měrná specifická spotřeba paliva)	
WOT	Wide Open Throttle (plně otevřená škrtkovací klapka)	
SOC	State Of Charge (stav nabití baterie)	
MHEV	Mild Hybrid Electric Vehicle (mild hybridní automobil)	
PCS	Predictive Coasting Strategy (prediktivní strategie plachtění)	
E-Boosting	Režim podpory spalovacího motoru BSG elektromotorem	
E-Charging	Režim využití elektrického turbokompresoru	

## Seznam použité literatury

- [1] Josef, Morkus. Přednášky z předmětu Hybridní pohony. Praha: ČVUT, Fakulta Strojní, 2017.
- [2] Wagenknecht, Martin. fdrive.cz. Micro-hybrid, mild-hybrid, full-hybrid, plug-in hybrid. Jaký je mezi nimi rozdíl? [Online] 02. 02 2018. <https://fdrive.cz/clanky/micro-hybrid-mild-hybrid-full-hybrid-plug-in-hybrid-jaky-je-mezi-nimi-rozdil-1857>.
- [3] Kohel, Petr. Pohonná jednotka hybridního vozidla. Praha: Bakalářská práce, 2016.
- [4] x-engineer.org. Mild Hybrid Electric Vehicle (MHEV) – architectures. [Online] <https://x-engineer.org/automotive-engineering/vehicle/hybrid/mild-hybrid-electric-vehicle-mhev-architectures/>.
- [5] Demir, Abdullah. abduallahdemir.net. Mild hybrid 48 V. [Online] 03 2018. <http://www.abduallahdemir.net/wp-content/uploads/2018/03/MILD-HIBRID-48V-2018.pdf>.
- [6] clepa.eu. 48 VOLT: A proven technology to reduce CO2 and NOx emissions. [Online] 01 2018. <https://clepa.eu/wp-content/uploads/2018/01/CLEPA-48v-technology.pdf>.
- [7] Kumawat, Aditya Kumar a Amrit , Kumar Thakur. internationaljournals.org. A Comprehensive Study of Automotive 48-Volt Technology. [Online] 05. 05 2017. <http://www.internationaljournals.org/IJME/2017/Volume4-Issue5/IJME-V4I5P103.pdf>. 2348-8360.
- [8] Mayersohn, Norman. NYTimes.com. To Power the Future, Carmakers Flip on 48-Volt Systems. [Online] 08. 02 2018. <https://www.nytimes.com/2018/02/08/business/electric-cars-48-volts.html>.
- [9] Howard, Bill. ExtremeTech.com. Why Cars Are Moving to 48-Volt Electrical Systems. [Online] 26. 04 2017. <https://www.extremetech.com/extreme/247889-cars-moving-48-volt-electrical-systems>.
- [10] Dusil, Tomáš. auto.cz. Palubní napětí 48 voltů. [Online] 01. 05 2017. <https://www.auto.cz/palubni-napeti-48-voltu-kdy-se-opravdu-rozsiri-a-co-prinese-106084>.
- [11] GreenCarCongress. Valeo 48V hybrid. [Online] 21. 09 2018. <https://www.greencarcongress.com/2018/09/20180921-valeo.html>.
- [12] BusinessCar.cz. Valeo - technologie pro autonomní vozy. [Online] 01. 11 2016. <http://www.business-car.cz/testy/valeo-predstavuje-prevratne-technologie-pro-autonomni-vozy>.
- [13] Aschenbroich, Jacques. Valeo.com. Valeo investor meeting. [Online] 2016. <http://www.valeo.com/wp-content/uploads/2017/02/presentation-investisseurs-en-anglais.pdf>.
- [14] Valeo.com. 48V affordable hybrid. [Online] 2017. <https://www.valeo.com/en/48v-affordable-hybrid/>.
- [15] Valeo.cz. VALEO, Technologická společnost v epicentru mnoha revolucí v automobilovém průmyslu. [Online] 08. 01 2018. <https://valeo.cz/wp-content/uploads/2018/01/Valeo-press-kit-CES-2018-CZ.pdf>.
- [16] Morris, Charles. chargedevs.com. Bosch introduces new 48 V Li-ion battery for mild hybrids. [Online] 06. 10 2017. <https://chargedevs.com/newswire/bosch-introduces-new-48-v-li-ion-battery-for-mild-hybrids/>.

- [17] Bosch-presse.de. Bosch BRS system. [Online] 10. 10 2017. [https://www.bosch-presse.de/pressportal/de/media/migrated\\_download/de/BRS\\_Broschuere\\_RZ\\_en.pdf](https://www.bosch-presse.de/pressportal/de/media/migrated_download/de/BRS_Broschuere_RZ_en.pdf).
- [18] continental-automotive.com. 48 Volt Mild Hybrid. [Online] <https://www.continental-automotive.com/en-gl/Passenger-Cars/Powertrain/Electrification/48-Volt-Mild-Hybrid/48-Volt-belt-driven-starter-generator>.
- [19] continental-corporation.com. Continental Supplies the Heart of the 48 Volt Electrical System in the New Audi A8. [Online] 15. 01 2018. <https://www.continental-corporation.com/en/press/press-releases/2018-01-15-audi-48-volt-119096>.
- [20] Delphi.com. 48-Volt, Mild Hybrid: Four-times the voltage and power. [Online] <https://www.delphi.com/innovations/48-volt-mild-hybrid>.
- [21] Harrop, Dr. Peter. IDTechEx.com. 48V Mild Hybrid Vehicles 2018-2028. [Online] 03 2019. <https://www.idtechex.com/en/research-report/48v-mild-hybrid-vehicles-2018-2028/600>.
- [22] Vokáč, Luděk. idnes.cz. Vyzkoušeli jsme hybrid, který nechává řidiče řadit a couvá na jedničku. [Online] 09. 06 2015. [https://www.idnes.cz/auto/zpravodajstvi/hybrid-bosch-boost-recuparation-system.A150606\\_142304\\_automoto\\_vok](https://www.idnes.cz/auto/zpravodajstvi/hybrid-bosch-boost-recuparation-system.A150606_142304_automoto_vok).
- [23] greencarcongress.com. Buick adding new eAssist mild hybrid to 2018 Buick LaCrosse as standard powertrain. greencarcongress.com. [Online] 06. 06 2017. <https://www.greencarcongress.com/2017/06/20170606-buick.html>.
- [24] Pecák, Radek. Autorevue.cz. Audi A8 48 Volt. [Online] 25. 06 2017. <https://www.autorevue.cz/audi-se-nova-48voltova-palubni-sit-hodi-i-pro-fungovani-podvozku-v-a8>.
- [25] <https://www.car.info/en-se/hyundai/i40/vf-17-cr-di-48v-6621072>. Hyundai i40 1.7 CRDi 48V VF 156ps, (2012 - 2015). [Online] <https://www.car.info/en-se/hyundai/i40/vf-17-cr-di-48v-6621072>.
- [26] Clarke, Paul. greencarguide.co.uk. RENAULT SCENIC DCI 110 HYBRID ASSIST REVIEW. [Online] <https://www.greencarguide.co.uk/car-reviews-and-road-tests/renault-scenic-dci-110-hybrid-assist-review/>.
- [27] volkswagen-newsroom.com. The new Golf: with 48V technology. [Online] 16. 05 2019. [Citace: 01. 06 2019.] <https://www.volkswagen-newsroom.com/en/stories/the-new-golf-with-48v-technology-5004>.
- [28] Rugheimer, Udo. audi-mediacycenter.com. The Audi RS 5 TDI concept. [Online] 14. 06 2014. <https://www.audi-mediacycenter.com/en/press-releases/groundbreaking-the-audi-rs-5-tdi-concept-549>.
- [29] FEV and SEG develop 48V mild hybrid Mercedes AMG A45 demonstrator. [Online] greencarcongress.com, 13. 12 2018. <https://www.greencarcongress.com/2018/12/20181213-fevseg.html>.
- [30] Falson, Alexi. performancedrive.com.au. Mercedes-Benz E-Class updates debut 'EQ Boost' 48V technology. [Online] 24. 08 2018. <https://performancedrive.com.au/mercedes-benz-e-class-updates-debut-eq-boost-48v-technology-2409/>.
- [31] skoda-storyboard.com. ŠKODA VISION X je tady. [Online] 05. 03 2018. <https://www.skoda-storyboard.com/cs/modely/koncepty/skoda-vision-x-je-tady/>.



- [32] hybrid.cz. Kia Sportage už letos jako naftový mild-hybrid s 48V elektromotorem. [Online] 15. 05 2018. <http://www.hybrid.cz/kia-sportage-uz-letos-jako-naftovy-mild-hybrid-s-48v-elektromotorem>.
- [33] landrover.com. HYBRID EVOQUE – SO WHAT IS MHEV? [Online] 17. 12 2018. <https://www.landrover.com/liveforthecity/en/hybrid-evoque-so-what-mhev>.
- [34] Žák, Dalibor. autorevue.cz. Audi SQ7. [Online] 03. 03 2016. <https://www.autorevue.cz/audi-sq7-je-monstrum-s-motorem-40-tdi-v8-a-elektricky-turbem>.
- [35] gmauthority.com. 2018 Cadillac XT5 Hybrid. [Online] 2018. <http://gmauthority.com/blog/gm/cadillac/xt5/2018-cadillac-xt5/2018-cadillac-xt5-lineup/2018-cadillac-xt5-hybrid/>.
- [36] greencarcongress.com. Bentley introduces its first diesel: Bentayga Diesel with 48V system & electric supercharger. [Online] 22. 09 2016. <https://www.greencarcongress.com/2016/09/20160922-bentayga.html>.
- [37] hyundai.cz. Hyundai Tucson. [Online] 2019. <https://www.hyundai.cz/modely/tucson-2019?ordering=added&reviewPage=56>.
- [38] Phelan, Mark. eu.freep.com. Ram 1500 eTorque MHEV. [Online] 25. 08 2018. <https://eu.freep.com/story/money/cars/mark-phelan/2018/08/24/2019-ram-mild-hybrid-first-drive-mark-phelan/1069729002/>.
- [39] greencarcongress.com. Continental supplying 48V Eco-Drive for Jeep Wrangler eTorque mild-hybrid system. [Online] 17. 01 2019. <https://www.greencarcongress.com/2019/01/20190117-ecodrive.html>.
- [40] continental-automotive.com. 48 Volt DC/DC Converter. [Online] <https://www.continental-automotive.com/en-gl/Passenger-Cars/Powertrain/Electrification/48-Volt-Mild-Hybrid/48-Volt-DC-DC-Converter>.
- [41] Glucker, Jeff. motorauthority.com. Here's how Audi uses electric compressors to eliminate turbo lag. [Online] 1. 05 2018. [https://www.motorauthority.com/news/1116219\\_heres-how-audi-uses-electric-compressors-to-eliminate-turbo-lag](https://www.motorauthority.com/news/1116219_heres-how-audi-uses-electric-compressors-to-eliminate-turbo-lag).
- [42] emitec.com. The electrically heated catalyst EMICAT®. [Online] <https://www.emitec.com/en/technology/catalyst-substrates/emicat/>.
- [43] battex.info. NiCd akumulátory. [Online] <http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/nicd-akumulatory>.
- [44] battex.info. NiMH Akumulátory. [Online] <http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/nimh-akumulatory>.
- [45] battex.info. Li - akumulátory. [Online] <http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/li-akumulatory>.
- [46] Griefnow, Philip, a další. Advanced Powertrain Functions and Predictive Operating Strategies for 48V Mild Hybrid Vehicles. Aachen : autor neznámý, 2018.
- [47] Vlček, František. Dynamika motorových vozidel. 2003. ISBN 8023900242.
- [48] Prachař, Roman. Jízdní odpory vozidel. Brno: Diplomová práce, 2010.
- [49] converter.cz. Hustota vzduchu. [Online] <http://www.converter.cz/tabulky/vzduch.htm>.

- [50] Alexandr, Balashov. Energetická náročnost jízdy elektrobuse. Praha: Diplomová práce, 2017.
- [51] Macek, Jan, a další. Optimization Tool For Hybrid Vehicles. Praha: XLIX. International scientific conference, 2018.
- [52] a123systems.com. 48 V Battery. [Online]  
<http://www.a123systems.com/automotive/products/systems/48v-battery/>.
- [53] Soduk, Lee, a další. Modeling and Validation of 48 V Mild Hybrid Lithium-Ion battery pack. místo neznámé: SAE International Journal of Alternative Powertrains, 2018. 7. 10.4271/2018-01-0433.
- [54] Matějovský, Vladimír. Automobilová paliva. Praha: Grada, 2004. 80-247-0350-5.
- [55] Dragoun, Aleš. auto.cz. Škoda Octavia III nabídne celkem pět motorů v osmi výkonových verzích. [Online] 28. 12 2012. [Citace: 04. 05 2019.] <https://www.auto.cz/skoda-octavia-iii-nabidne-celkem-pet-motoru-v-osmi-vykonovych-verzich-72053>.
- [56] x-engineer.org. Mild Hybrid Electric Vehicle (MHEV) – control functions. [Online] <https://x-engineer.org/automotive-engineering/vehicle/hybrid/mild-hybrid-electric-vehicle-mhev-control-function/>.
- [57] Sorger, Dr. Helfried. futurepowertrains.co.uk. The Tailored Engine & Powertrain for 48V. [Online] 28. 02 2018. <https://futurepowertrains.co.uk/wp-content/uploads/2017/12/Helfried-Sorger.pdf>.
- [58] motorreviewer.com. Volkswagen Audi 1.4 TSI EA211 Engine Review. [Online]  
[http://www.motorreviewer.com/engine.php?engine\\_id=116](http://www.motorreviewer.com/engine.php?engine_id=116).
- [59] autoevolution.com. SKODA Octavia Combi 2013 - 2017. [Online] 04. 05 2018.  
[https://www.autoevolution.com/cars/skoda-octavia-combi-2013.html#agal\\_28](https://www.autoevolution.com/cars/skoda-octavia-combi-2013.html#agal_28).
- [60] VASILASH, GARY S. www.adandp.media. Advances from Valeo. [Online] 25. 09 2014.  
<https://www.adandp.media/articles/advances-from-valeo>.
- [61] Edelstein, Stephen. greencarreports.com. New Mercedes engines get more complicated to meet emission rules. [Online] 01. 11 2016. [https://www.greencarreports.com/news/1106993\\_new-mercedes-engines-get-more-complicated-to-meet-emission-rules](https://www.greencarreports.com/news/1106993_new-mercedes-engines-get-more-complicated-to-meet-emission-rules).
- [62] x-engineer.org. Mild Hybrid Electric Vehicle (MHEV) – components (Continental). [Online]  
<https://x-engineer.org/automotive-engineering/vehicle/hybrid/mild-hybrid-electric-vehicle-mhev-components-continental/>.
- [63] Stehlík, Jakub. autobible.euro.cz. Baterie zůstávají limitujícím faktorem elektromobilů. Průlom se čeká za sedm let. [Online] 27. 11 2018. <https://autobible.euro.cz/baterie-zustavaji-limitujicim-faktorem-elektromobilu-prulom-se-ceka-za-sedm-let/>.
- [64] mapy.cz. [Online] <https://mapy.cz/s/3uggX>.
- [65] Vybrané problémy implementace simulačních modelů akumulátorových vozidel. Novák, Jaroslav, Mlynařík, Ladislav a Lelek, Tomáš. Pardubice: Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě, DFJP, 2015.

## Seznam obrázků

Obr. 1: Architektura Mild hybridního pohonného ústrojí.....	10
Obr. 2: 48 V Mild hybrid v konfiguraci P0.....	11
Obr. 3: Full hybrid architektura .....	11
Obr. 4: Valeo 48 V Mild hybrid systém [60] .....	14
Obr. 5: Valeo - možnosti systému [13].....	15
Obr. 6: Bosch BRS systém [17] .....	16
Obr. 7: Delphi - mild hybridní systém [20] .....	18
Obr. 8: Belt Startér Generátor (BSG), [61].....	20
Obr. 9: Elektrický kompresor (Electric supercharger) - Audi SQ7 [41] .....	21
Obr. 10: Elektricky vyhřívaný katalyzátor - Continental EMICAT [62].....	22
Obr. 11: Bosch - princip funkce Lithium-iontového akumulátoru [63] .....	23
Obr. 12: Srovnání spotřebičů v závislosti na jejich výkonu a době provozu [46].....	25
Obr. 13: Trasa Neratovice – Čelákovice [64] .....	26
Obr. 14: Výškový profil trati Neratovice-Čelákovice .....	27
Obr. 15: Technická data Octavia III. generace 1.4 TSI [59], [58] .....	27
Obr. 16: 2 Měřené jízdy Neratovice-Čelákovice.....	28
Obr. 17: Modelový rychlostní profil .....	28
Obr. 18: Průnik rychlostního a výškového profilu .....	29
Obr. 19: Průměrné hodnoty součinitele rotačních částí [48].....	31
Obr. 20: Účinnosti a převody hnacího ústrojí.....	35
Obr. 21: Regresní analýza S. M. pomocí dat z válcové brzdy .....	38
Obr. 22: Regresní analýza pro určení účinností S. M. na měřené trati .....	39
Obr. 23: ŠKODA Octavia MHEV – model [59] .....	40
Obr. 24: Mapa účinností v motorickém režimu BSG elektromotoru .....	42
Obr. 25: Mapa účinností v generátorickém režimu BSG elektromotoru.....	42
Obr. 26: Regresní analýza motorického režimu navrženého BSG elektromotoru .....	43
Obr. 27: Regresní analýza generátorického režimu navrženého BSG elektromotoru .....	44
Obr. 28: Využití elektromotoru v motorickém režimu během jízdy .....	45
Obr. 29: Využití elektromotoru v generátorickém režimu během jízdy.....	45
Obr. 30: Závislost stavu nabití článku akumulátoru na jmenovitém napětí článku [53].....	47
Obr. 31: Závislost výkonu akumulátoru na jeho teplotě [53].....	47
Obr. 32: Pracovní oblast spalovacího motoru pro pohon elektromotorem .....	49
Obr. 33: Pracovní oblast spalovacího motoru pro rekuperační brzdění .....	50
Obr. 34: Pracovní oblast spalovacího motoru s přidávným momentem .....	51
Obr. 35: Schéma vozidla s jednotlivými účinnostmi 48 V systému .....	52
Obr. 36: Průběh stavu nabití 48 V baterie během simulace .....	53
Obr. 37: Prediktivní strategie plachtění s kamerovým systémem [46].....	56
Obr. 38: Pracovní oblast spalovacího motoru v režimu boostu .....	57
Obr. 39: Pokročilý Start/Stop systém [56].....	58
Tabulka 1: Tabulka účinností hnacího ústrojí a stálého převodu .....	35
Tabulka 2: Specifikace 48 V BSG elektromotoru .....	41
Tabulka 3: Specifikace 48 V akumulátoru [52] .....	46
Tabulka 4: Porovnání spotřeby paliva a emisí CO <sub>2</sub> .....	54

## Seznam příloh

- a) Výsledky výpočtu energetické náročnosti konvenčního vozidla
- b) Výsledky regresní analýzy pro spalovací motor
- c) Výsledky výpočtu energetické bilance 48 V baterie
- d) CD s výpočetními programy a práce ve formě PDF