

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní – Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

ROZŠÍŘENÝ ADAPTIVNÍ TEMPOMAT

Studijní obor: Obor mechaniky a mechatroniky

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Pavel Steinbauer, Ph.D.

Marek Nedoma

2017

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně s použitím literárních zdrojů a informací, které cituji a uvádím v seznamu použité literatury a zdrojů.

Datum:

Podpis

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Nedoma** Jméno: **Marek** Osobní číslo: **406318**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky**
Studijní program: **Teoretický základ strojího inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Rozšířený adaptivní tempomat

Název bakalářské práce anglicky:

Extended adaptive cruise control

Pokyny pro vypracování:

Proveďte rešerši stávajících variant adaptivních tempomatů a jejich rozšíření (Ecorouting, ecodriving apod.)
Otestujte a upravte simulační model e-vozidla Fiat Doblo
Na základě simulačního modelu Fiat Doblo proveďte v prostředí Matlab-Simulink experimenty s různými variantami regulátorů a tras pro úsporu energie.
Zhodnoťte potenciál využití rekuperované brzdě energie pro přímé vytápění/chlazení vozidla na základě znalosti trasy vozidla.

Seznam doporučené literatury:

FP 7 IMPROVE project reports
Valášek, M.: Mechatronika, 1994, ČVUT v Praze

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

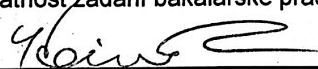
Ing. Pavel Steinbauer Ph.D., ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky FS

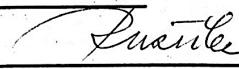
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:


Datum zadání bakalářské práce: **19.04.2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **18.08.2017**

Platnost zadání bakalářské práce:


Podpis vedoucí(ho) práce


Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

25. 4. 2017

Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Pavlu Steinbauerovi, Ph.D. za jeho cenné rady a připomínky při řešení dané problematiky. Děkuji také své rodině a přátelům za jejich podporu v průběhu mého studia.

Anotace

Bakalářská práce se zabývá problematikou snížení spotřeby elektromobilu Fiat Dobló, predikováním optimálního rychlostního profilu na základě znalosti trasy a dopravních předpisů.

Teoretický úvod práce popisuje současné možnosti adaptivního tempomatu a některé trendy moderního automobilismu, týkající se především environmentální šetrnosti provozu vozidla.

Následuje praktická část, která je věnována optimalizaci a regulaci jízdy na modelu elektromobilu Fiat Dobló, a to s využitím několika různých typů regulátorů.

Klíčová slova: elektromobil, prediktivní plánování trasy, rekuperace, adaptivní tempomat, plachtění.

Abstract

The bachelor thesis investigates problem of energy consumption of e-vehicle Fiat Dobló by generating optimal velocity profile by knowledge based on route and traffic regulations.

The theoretical part describes the possibilities of present adaptive cruise control systems and some of the modern motoring trends, which are concerned about environmental friendly driving.

The following practical part is devoted to the optimization and regulation of driving simulation, using model of e-vehicle Fiat Dobló, with different types of controllers.

Keywords: e-vehicle, predictive route planning, recuperation, adaptive cruise control, coasting.

Obsah

1 Úvod	7
2 Teoretická část	8
2.1 Adaptivní tempomat	8
2.1.1 Princip ACC	8
2.1.2 Radar	9
2.1.3 Výhody a nevýhody adaptivního tempomatu	10
2.2 Prediktivní tempomat	11
2.2.1 Prediktivní řazení	13
2.3 V2X technologie	14
2.3.1 Spojení V2X s ACC	15
2.4 Eco-driving a eco-routing	16
2.4.1 Eco-routing	16
2.4.2 Eco-driving	17
3 Praktická část	18
3.1 Optimalizace rychlostního profilu	18
3.1.1 Model Fiat Dobló	18
3.1.2 Popis algoritmu optimalizace spotřeby v rámci projektu IMPROVE	22
3.1.3 Zkušební trasa	23
3.1.4 Regulace spotřeby s využitím různých typů regulátorů	24
3.1.5 P regulátor	25
3.1.6 PI regulátor	28
3.1.7 Regulování spotřeby rychlostního profilu z projektu IMPROVE	32
3.1.8 Optimalizace spotřeby regulací na rychlostní profil s prediktivní informací	33
3.2 Rekuperovaná energie jako přímý zdroj topení	37
3.2.1 Experimentální měření teploty v kabině automobilu	38
3.2.2 Stanovení energie potřebné k vytopení kabiny elektromobilu o 1 °C	41
3.2.3 Množství energie získané rekuperací elektromobilu Fiat Dobló	42
3.2.4 Potenciál využití rekuperované energie jako přímého zdroje topení	42
4 Závěr	44
Seznam použitých značek a symbolů	45
Seznam použité literatury a zdrojů	46
Seznam příloh	50

1. Úvod

Téma práce nepřímo navazuje na předchozí pokusy s matematickým modelem elektromobilu Fiat Dobló a spolupráci v rámci evropského projektu IMPROVE, který měl vlastnosti tohoto elektromobilu zlepšit a zautomatizovat.

Cílem bakalářské práce je otestovat a rozšířit v prostředí MATLAB-Simulink model elektromobilu Fiat Dobló tak, aby bylo možné nasimulovat průjezd trasy (se zanedbáním okolní dopravy) vykazující vlastnosti reálného automobilu. Při simulování bude využito několik různých tras, u kterých bude na základě GPS souřadnic předem známa poloha a profil a k nim příslušející dopravní omezení. Rychlost a akcelerace elektromobilu bude přitom postupně regulována různými typy regulátorů (PI, PID) z důvodu dosažení úspory energie. Dalším způsobem, který bude na základě znalosti trasy vyhodnocen, je využití rekuperace, jako přímého zdroje pro podporu regulace teploty v autě (vytápění / chlazení).

Práce je strukturována do dvou hlavních částí a závěru - první část je teoretická, na ni navazuje praktická část, která se dále dělí na optimalizaci spotřeby energie dodržením správného rychlostního profilu a využití energie vzniklé rekuperací jako přímého zdroje topení.

Teoretická část je zpracována formou rešerše, která vymezuje základní technické a užitkové vlastnosti (ale i nedostatky) dnešních adaptivních tempomatů. Jsou zde zmíněny soudobé automobilové trendy eco-routing a eco-driving, které přímo souvisí s náplní bakalářské práce.

Praktická část se věnuje výše zmíněným bodům testování modelu Fiat Dobló a zpracování získaných dat, a to jak matematickou tak i grafickou formou. Všechny důležité poznatky jsou shrnuty v závěrečné třetí části.

2. Teoretická část

Neustálý rozvoj vědy a techniky způsobil to, že většina elektronických zařízení je v dnešní době stále více "inteligentních", což usnadňuje uživatelům jejich obsluhu. V oblasti automobilového průmyslu se to při jízdě týká především aktivní interakce vozidla s řidičem, vyhodnocování dopravního nebezpečí, plánování tras nebo lepšího hospodaření s energií. Každý řidič má k dispozici řadu funkcí, kterými může ovlivnit způsob jízdy. V následující části se proto krátce zmíním o adaptivním tempomatu, jeho rozšíření o predikci jízdy, komunikační technologii a ekologickém způsobu řízení automobilu eco-driving a eco-routing. Celosvětovým trendem je nasazování FAS (asistenční systémy) pro podporu řidiče při řízení vozidla, hlavně v oblastech bezpečné a ekologické jízdy.

2.1. Adaptivní tempomat

Adaptivní tempomat (ACC¹) patří v dnešní době mezi základní asistenční prvky všech vozů střední třídy, setkat se s ním můžeme ale i u třídy nižší. Jedná se o nadstavbu klasického tempomatu (Cruise Control).

Tempomat reguluje rychlost podle požadavku řidiče, adaptivní tempomat je pak rozšířený o radar (nacházející se v přední části vozidla, nejčastěji na úrovni přední mřížky), který měří vzdálenost a rychlost od následovaného vozidla, což umožňuje udržovat stálý a bezpečný odstup od tohoto vozidla.

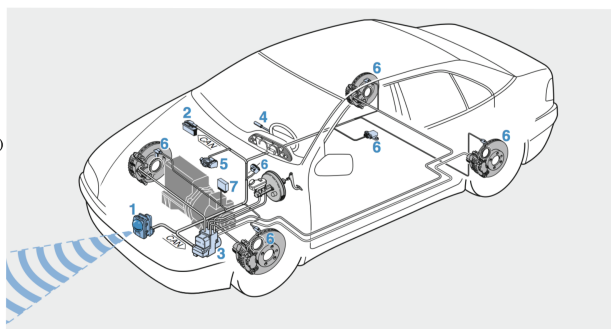
ACC se řadí mezi asistenční prvky zvyšující komfort jízdy. Řidič nemusí neustále stlačovat plynový pedál a dobrzd'ovat pro udržování bezpečné vzdálenosti od jiného vozidla. Řidič má možnost ACC kdykoliv deaktivovat, a to buď pomocí ovládacího prvku nebo stlačením brzdového pedálu [1] [2].

2.1.1. Princip ACC

Adaptivní tempomat pracuje na principu snímání vzdálenosti před vozidlem (radarový senzor, laserový snímač vzdálenosti), díky kterému je schopen adaptivně měnit rychlost vozidla pro dodržení bezpečné vzdálenosti od vpředu jedoucího vozidla [1].

¹ Adaptive Cruise Control

1. ACC senzor a kontrolní jednotka
2. Engine control unit (ECU)
3. Elektronický stabilizační program (ESP)
4. Ovládací panel ACC
5. Elektronický ovladač motoru
6. Sensory
7. Transmission control unit



Obr. 1: Adaptivní tempomat [1]

2.1.2. Radar

Hlavním úkolem radaru je detekce objektů a určení jejich polohy (jízdní pruh). Pro zpřesnění poloh detekovaných vozidel se využívají data FAS (např. kamery "Line Assist"). Radar pracuje na frekvenci 76 nebo 77 GHz, přičemž emituje 4 radiové paprsky. Při monitorování dopravní situace je schopen měřit na vzdálenost až 200 m od vozidla. U odražených vln analyzuje jejich periodu odrazu, Dopplerův jev² a změnu po sobě následujících amplitud signálu. Na základě těchto parametrů je vypočtena vzdálenost, relativní rychlost a pozice (úhel vychýlení od osy auta).

Poloha radaru

Radar je umístěn v oblasti předního nárazníku, rovnoběžně s podélnou osou vozidla. Software radaru je schopen kompenzovat drobné vychýlení z této polohy. V případě že je jeho přesnost měření omezena (např. vrstva sněhu), řidič je upozorněn signálem na přístrojové desce.

Algoristmus

Kontrolní systém radaru se skládá ze tří kontrolních modulů:

- **Cruise control:** Pokud radar nezaznamená žádné vozidlo vpředu, udržuje stálou rychlost.
- **Follow-up control:** Radar zaznamenal vozidlo, systém umožní přiblížení na nastavenou bezpečnou vzdálenost, kterou udržuje.
- **Cornering control:** Při jízdě do zatáčky se zmenší zorné pole radaru. Systém se přepne na alternativní algoritmus, případně ACC deaktivuje.

² jev popisující změnu frekvence a vlnové délky přijímaného a vysílanému signálu

Příjem a vysílání signálu

Radarový vysílač vysílá elektromagnetické vlny pomocí antény. Anténa se skládá ze 4 kombinovaných vysílačů a přijímačů signálu. Radiové vlny jsou zpracovány najednou na čtyřech nezávislých kanálech. Pro výpočet doby odezvy vstupu na výstup je frekvence digitalizována a pomocí FFT³ převedena na frekvenční spektrum. Pro určení úhlu, pod kterým signál zaznamenal objekt, jsou zapotřebí dvě překrývající se elektromagnetické vlny, které mají vlastnost reflektovat objekt z elektricky vodivého materiálu (karoserie automobilu). Přijímaný signál je vždy porovnáván s vysílaným, přičemž se uvažuje odezva vstupu na výstup. Odezva vstupu na výstup je dána vzorcem

$$\tau = \frac{2d}{c}, \quad (1)$$

kde d [m] je vzdálenost radaru od vozidla a $c = 299\,792\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ rychlost světla.

2.1.3. Výhody a nevýhody adaptivního tempomatu

1. Výhody

Snížení zatížení řidiče (komfortní jízda), regulace rychlosti

Adaptivní tempomat udržuje stálou rychlost a bezpečnou vzdálenost od vpředu jedoucího vozidla, čímž usnadňuje řidiči práci, a to zejména v hustém provozu nebo dopravních kolonách. Na komunikacích s omezenou rychlostí (obec, obytná zóna, . . .), se řidič se zapnutým systémem ACC nemusí starat o překročení povolené rychlosti. Adaptivní tempomat zvyšuje bezpečnost a komfort jízdy [3].

2. Nevýhody

Systém ACC je omezený v následujících případech:

- nevhodný profil vozovky (ostré zatáčky, prudké stoupání / klesání),
- detekce stojících překážek na vozovce, malé dopravní prostředky (motocykl),
- specifická místa, kdy je použití nevhodné: křižovatka, parkoviště,
- některé systémy ACC pracují pouze v určitém rychlostním rozmezí [3].

³ Fast Fourier Transformation - Rychlá Fourierova transformace

Vlastní dodatek

Z vlastních zkušeností, kdy jsem měl možnost vyzkoušet dvě rozdílné kombinace použití adaptivního tempomatu - s manuální a automatickou převodovkou, mohu konstatovat, že v kombinaci s automatickou převodovkou má ACC mnohem lepší využití. Jedná se především o schopnost řazení, které s manuální převodovkou musí řidič provádět sám. Nevýhoda řadit mě nejvíce limitovala na dálnici, kdy i za normálního provozu nastala situace, při které adaptivní tempomat musel náhle zpomalit na takovou rychlost, že zařazený rychlostní stupeň již nevyhovoval. Pokud bych jako řidič nereagoval a nechal dále pracovat systém ACC, motor by při nízkých otáčkách zhasnul, což je uživatelsky nepřijemné. Obdobná situace, která vede ke zvýšené spotřebě paliva, nastane při potřebě přeřadit na vyšší rychlostní stupeň. Zvýšenou spotřebu jsem při jízdě s ACC zaznamenal ve většině případů. Důvodem může být snaha ACC udržet stálou rychlost na úkor profilu trasy (stoupání, sjíždění prudkých kopců). Lepší ekonomické vlastnosti vykazuje nadstavba systému ACC - prediktivní tempomat (PCC).

2.2. Prediktivní tempomat

Prediktivní tempomat (PCC - Predictive Cruise Control) je rozšířením ACC, které významným způsobem snižuje spotřebu automobilu. PCC aktivně využívá GPS senzory pro určení polohy vozidla a předvídá podmínky jízdy pro následující 1 až 2 kilometry [4]. K datům o poloze pak z mapových podkladů přiřazuje profil trasy (poloměry zatáček, výškový profil, . . .) a příslušná dopravní omezení (maximální povolená rychlost, rizikové místo - nebezpečí smyku, nebezpečné stoupání nebo klesání, nerovnost vozovky, . . .). Na základě těchto informací o trase je pak PCC schopen predikovat vhodný rychlostní profil s ohledem na celkovou spotřebu.

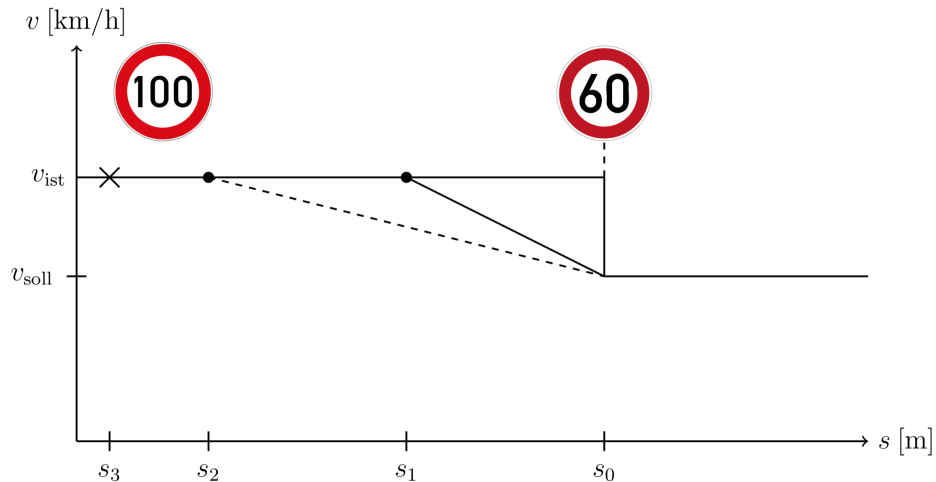
V dnešní době se s PCC můžeme setkat u různých druhů dopravních prostředků - u osobního automobilu nebo nákladního auta. Pro každého výrobce je přitom charakteristická individuální implementace systému PCC. Někteří výrobci pro PCC volí specifické označení, které je většinou spojeno s rozšířenými uživatelskými možnostmi. Jako příklad mohu uvést:

- *Predictive efficiency assistant* : Audi
- *Predictive powertrain control (PPC)* : Mercedes-Benz

Pokud neuvažuji hlídání bezpečného odstupu od vpředu jedoucího auta a detekci překážek na vozovce, kdy PCC funguje na stejném principu jako ACC, lze problematiku PCC zjednodušit na řešení dvou základních problémů - včasné zpomalení při změně maximální povolené rychlosti nebo blížící se zatáčky a vhodnou strategii jízdy při stoupání, resp. klesání.

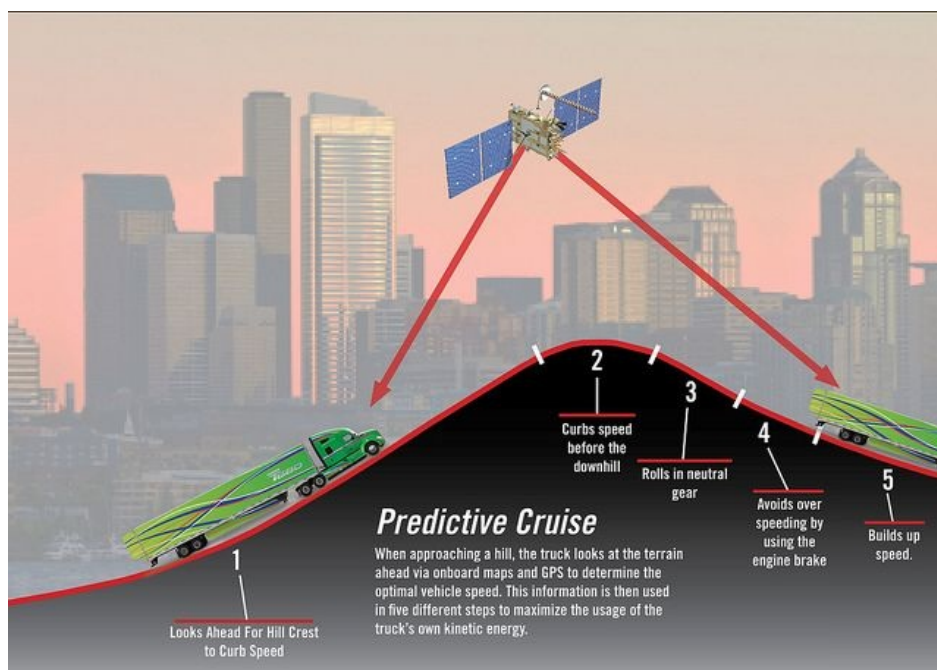
2. TEORETICKÁ ČÁST

Včasné zpomalení se týká především správného odhadnutí bodu, ve kterém vozidlo po se zařazenou neutrální rychlostí dojedete do místa s požadovanou nižší rychlostí. Příklad rychlostního profilu v takovém případě je znázorněn na obrázku č. 2, kdy PCC reaguje na blížící se skokovou změnu rychlosti ze 100 km/h na 60 km/h.



Obr. 2: Rychlostní profil při změně rychlosti ze 100 km/h na 60 km/h [5]

Vhodná strategie překonávání převýšení se skládá z několika fází. Pokud se jedná o případ, kdy po výjezdu stoupání profil vozovky následně klesá, tak před dosažením vrcholu kopce vozidlo zpomalí a požadovanou rychlost při vyřazení rychlostního stupně dosáhne při jízdě z kopce. Během jízdy z kopce PCC kontroluje maximální povolenou rychlost, aby nedošlo k jejímu překročení [6].



Obr. 3: Prediktivní tempomat (Kenworth) [6]

2.2.1. Prediktivní řazení

Prediktivní řazení je systém podporující prediktivní tempomat. Jeho nasazení do sériové výroby je spojeno především s nákladními vozidly, které mají zpravidla vyšší počet rychlostních stupňů než osobní automobily. V případě osobních automobilů je průkopníkem bavorská značka BMW, která prediktivní řazení představila v roce 2015 s modelem 1. řady.

Systém používá data z navigačního systému, které slouží jako zdroj informací o nadcházejícím profilu trasy (blížící se změna sklonu vozovky, zatáčka a její poloměr, ...). Data jsou nejprve odeslána k analýze do řídicí jednotky automobilu (ECU⁴), která je dále předává převodovce. Převodovka připraví pro danou situaci optimální rychlostní stupeň. Tento způsob řazení vede ke snížení spotřeby paliva a redukuje emise CO₂ [7].

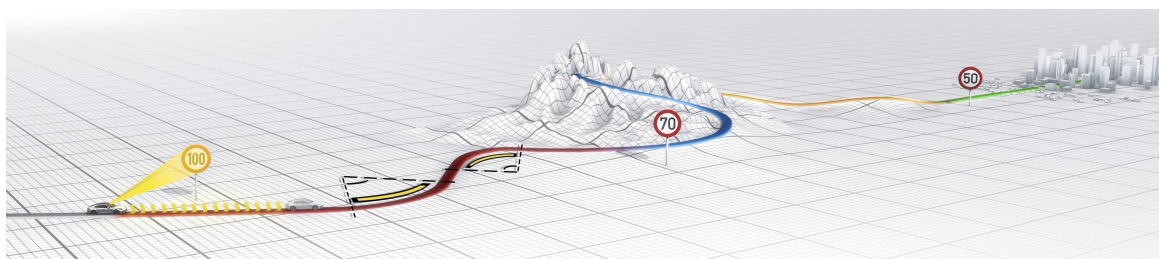
Podobný systém, využívající mimo jiné prediktivní řazení, nedávno představila další německá automobilka Porsche.

Porsche InnoDrive

Porsche InnoDrive je prediktivní rozšíření adaptivního tempomatu, které je nově integrováno v modelech Porsche Panamera 2017.

InnoDrive predikuje rychlost, optimální čas akcelerace/decelerace a strategii řazení na základě dat z navigace a informací z palubních senzorů - radar, video senzory - které monitorují okolní provoz a dopravní značení. Jízda automobilu vybaveného systémem InnoDrive je znázorněna na obr. 4.

Systém pracuje ve dvou režimech jízdy - normal mode, sport mode. Základním rozdílem mezi režimy je míra akcelerace a decelerace, přičemž sportovní režim při brždění nevyužívá plachtění.



Obr. 4: Porsche InnoDrive [8]

Součástí InnoDrive je Traffic Jam Assist, který je schopen zastoupit řidiče v dopravní koloně. Systém pracuje při rychlosti do 60 km/h, při které udržuje vozidlo na středu jízdního pruhu a současně udržuje konstantní vzdálenost od vpředu jedoucího vozidla. Řidič tak bez potřeby odbočit do vedlejšího jízdního pruhu nemusí do řízení zasahovat [8].

2.3. V2X technologie

Komunikace V2X je označení pro mobilní komunikaci, která spojuje vzájemnou komunikaci vozidel mezi sebou (V2V - Vehicle-to-vehicle) a komunikaci vozidla s okolím (V2I - Vehicle-to-infrastructure). Technologie s výhodou využívá zvyšující se digitalizace a inovaci palubních přístrojů s cílem zvýšit efektivitu a bezpečnost dopravy.

V2V komunikace reprezentuje komunikaci mezi dopravními prostředky, které se účastní dopravního provozu (osobní automobil, nákladní vozidlo, motocykl, . . .). Jejím principem je využití bezdrátové sítě (WLAN⁵) jako prostředku pro přenos informací. Požadavkem vzájemného přenosu dat je komunikace s nízkou latencí, která zajistí rychlé a stabilní spojení.

Komunikace V2I je označení pro komunikaci mezi účastníky dopravního provozu s jeho blízkým okolím, které má vliv na dopravu a ve většině případů se i s časem mění. Typicky se jedná o zařízení, která nejsou obsahem mapových podkladů. Vozidlo tak o nich při kontrole bezpečnosti jízdy nebo plánování trasy neuvažuje. Příkladem může být dálniční tabule nebo světelný ukazatel. [9].

V souvislosti s optimalizací spotřeby můžu uvést algoritmus, plánující rychlostní profil při znalosti informace o světelných signálech, získaných prostřednictvím komunikace V2I. Hlavní idea je minimalizovat prudkou akceleraci/deceleraci a přitom zajistit, aby vozidlo projelo křižovatkou bez zastavení [2].

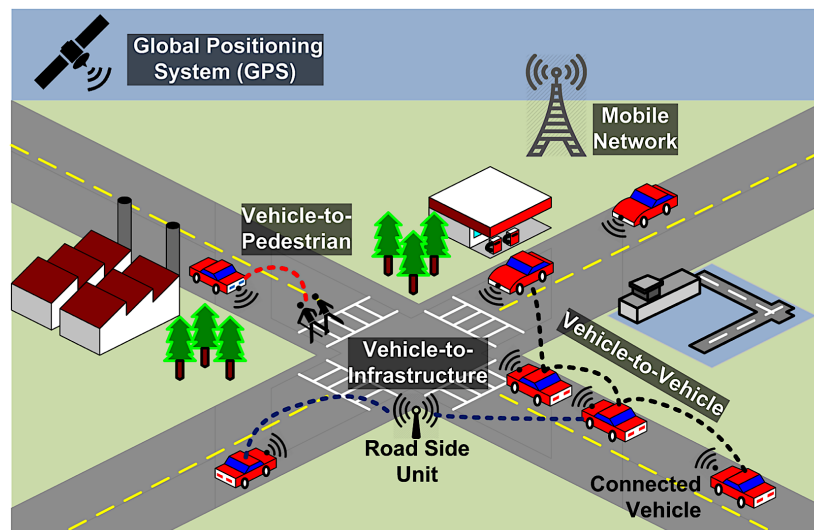
⁴ ECU - Electronic Control Unit

⁵ WLAN - Wireless local area network

2.3.1. Spojení V2X s ACC

Mezi nevýhody současných systémů ACC patří řešení méně přehledných dopravních situací a omezená schopnost předvídat nečekané (rychlé) změny v jízdě vpředu jedoucího vozidla. Lze říci, že jednou z největších slabín ACC zamezit kolizi je reakce na rychlý sled událostí, jejichž vznik lze obtížně odhadnout (tzv. shockwave effect)[2].

Technologie V2X komunikace rozšiřuje ACC, se kterým se poté můžeme obvykle setkat pod názvem CACC⁶. CACC přispívá k udržování plynulejší dopravy a snižuje počet dopravních kolon. Vozidlo schopné mobilní komunikace V2X může ve stejném čase sdílet informace s více vozidly najednou. Ilustrativním příkladem může být situace na obr. 4, kdy vozidla stojící na křižovatce vpředu, sdílejí informace mezi sebou a blízkým okolím (V2I, V2V, V2P⁷), a ty pak posílají ostatním vozidlům stojícím za nimi [10].



Obr. 5: V2X komunikace [10]

Výzkumy ukazují, že v porovnání s ACC, vozidla s CACC mezi sebou udržují menší rozestupy a minimalizují nebezpečí vzniku tzv. shockwave effect [2].

Integrace komunikačních technologií, případně i cloud aplikací do dopravy se ukazuje jako úspěšný krok směrem kupředu. Lze očekávat, že v blízké budoucnosti bude řada světových automobilek podobné služby ve svém portfoliu nabízet.

⁶ CACC - Cooperative adaptive cruise control

⁷ V2P - Vehicle-to-Pedestrian

2.4. Eco-driving a eco-routing

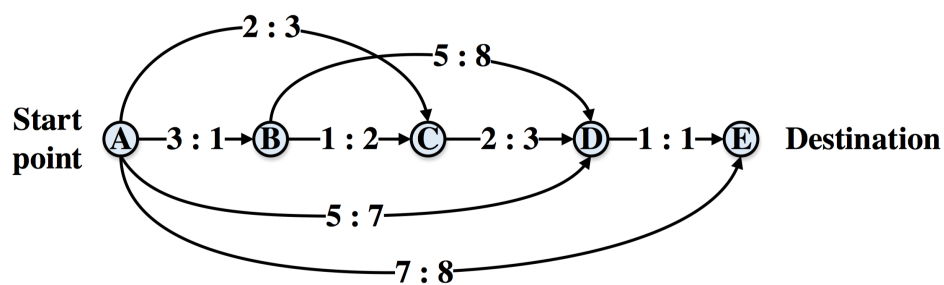
Další možnosti optimalizace řízení vyplývající ze snahy snížit spotřebu a aktivně využívat dostupné navigační systémy jsou: eco-routing, analyzující ekonomicky výhodnou trasu s využitím mapových podkladů a eco-driving, definující ekologický způsob jízdy.

2.4.1. Eco-routing

Eco-routing je způsob navigování vozidla s prioritou nízké spotřeby paliva a energie. Základem je experimentálně ověřená hypotéza, která prokázala, že zvýšení celkového času jízdy lze kompenzovat snížením spotřeby.

Principem eco-routing je snížit spotřebu volbou vhodné trasy, pro kterou plánovací algoritmus určí nejmenší možné množství paliva, potřebného k dosažení jejího cíle. Hledání takové trasy vychází z teorie grafů a spočívá v převedení trasy na graf (skládající se z uzlů a hran), kde každý uzel reprezentuje křižovatku a hrana cestu, která je mezi nimi. Vzhledem k tomu, že určit optimální trasu nemusí být vždy triviální úkol (s přibývajícím počtem křižovatek, roste počet možností), používají se různé metody korekce výsledné trasy, jakou je např. porovnání s nejkratší možnou trasou [11].

Na obr. 5 je ukázka algoritmu, který upřednostňuje nejkratší dobu jízdy s ohledem na celkovou spotřebu.



$x : y$ x denotes the total travel time, y denotes the total fuel consumption

Obr. 6: Graf kandidátů na optimální trasu [13]

Dalším možným klíčovým parametrem algoritmu může být, stejně tak jako je tomu v případě eco-driving, trasa s nejmenší emisí CO₂. Výběr trasy se tak ale stává o to náročnější [12].

2.4.2. Eco-driving

Eco-driving je, zjednodušeně řečeno označení pro šetrný způsob řízení, které snižuje spotřebu paliva a míru emisí CO₂ vypouštěných do ovzduší. Eco-driving přináší spoustu výhod, a to nejen ekologických, ale také ekonomických, kdy se sníží běžné náklady na provoz vozidla. Na druhou stranu, takto specifický způsob řízení zpravidla neodpovídá způsobu řízení v běžné praxi. Jeho prosazování se proto může setkat s nelibostí řady řidičů.

Zásady eco-driving jsou poměrně přesně definovány a popsány. Pro příklad uvedu některé z nich:

- rovnoměrná akcelerace (odpovídá přibližně 2000 až 2500 ot/min pro vozidla s manuální převodovkou),
- předvídání provozu a dopravních značení,
- omezení jízdy stylem start-stop,
- pokud je to možné, tak vozidlu umožnit plné využívání systémů ADAS⁸ (např. použití ACC při jízdě v koloně nebo na dálnici)
- bezpečná jízda pod hranicí maximální povolené rychlosti,
- udržování doporučeného tlaku v pneumatikách, včasná výměna kapalin (brzdná, chladicí kapalina, . . .).

Zásad eco-driving je daleko větší množství, přičemž všechny z nich mají v důsledku podobný význam. Dnešní automobily se trendu eco-driving stále více přibližují, v některých případech si ale odporují s požadavkem řidičů na vysoký výkon motoru [14].

⁸ ADAS - Advanced driver-assistance systems

3. Praktická část

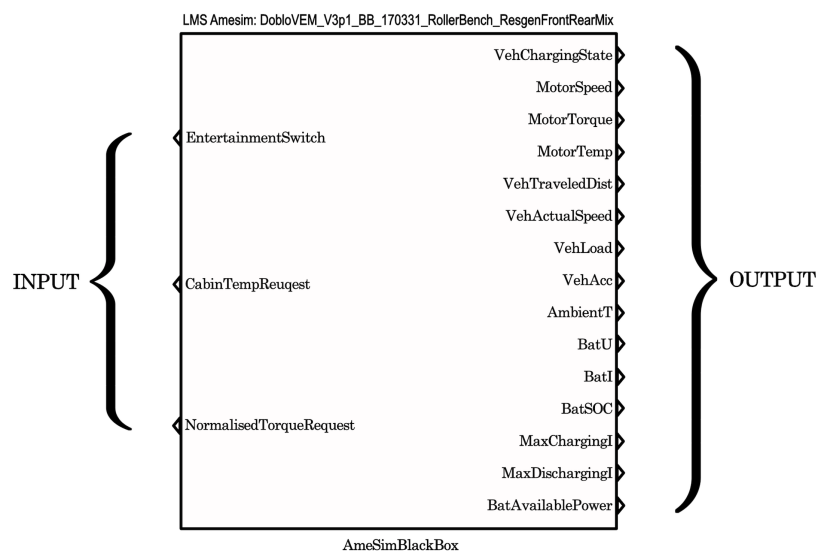
Následující kapitola se dělí na dvě části: optimalizaci rychlostního profilu trasy s cílem dosáhnout nižší spotřeby energie a zhodnocení možnosti využít rekuperovanou energii jako přímého zdroje vytápění kabiny automobilu.

3.1. Optimalizace rychlostního profilu

V této části se zabývám predikováním rychlostního profilu trasy, jejíž výškový profil i dopravní omezení jsou známy ještě před započítáním jízdy. Pro tento účel jsem dostal k dispozici nelineární model elektromobilu Fiat Dobló v Simulinku, který vznikl v rámci projektu IMPROVE za vzájemné spolupráce s firmou Siemens.

3.1.1. Model Fiat Dobló

Model Fiat Dobló je výstupem z projektu IMPROVE a je obsažen v nelineárním bloku v Simulinku (Blackbox). Blackbox se v projektu IMPROVE používal jako referenční model elektromobilu Fiat Dobló pro vytvoření a testování Vehicle energy manageru (VEM)⁹. Jedná se o model reprezentující elektromobil, který je určen pro testování v prostředí MATLAB Simulink. Model má celkem 3 vstupy a 15 výstupů, ze kterých lze odečíst příslušné hodnoty (viz. tab. 1 a 2) [15].



Obr. 7: Nelineární model Fiat Dobló v Simulinku (Blackbox)

⁹ VEM - 1D virtuální model elektromobilu Fiat Dobló vytvořený v simulační platformě LMS Imagine.Lab Amesim od společnosti Siemens

3. PRAKTICKÁ ČÁST

Seznam vstupů a výstupů

Následující tabulky obsahují seznam vstupů a výstupů z modelu Fiat Dobló.

VSTUPY BLOKU		
Název vstupu	Popis	Výchozí hodnota
<i>EntertainmentSwitch</i>	Vypínač doplňkových spotřebičů	0 (Vypnuto)
<i>CabinTempRequest</i>	Teplota v kabině	20 °C
<i>NormalisedTorqueRequest</i> ¹⁰	Požadavek na krouticí moment	$\langle -1, 1 \rangle$

Tab. 1: Vstupy modelu Fiat Dobló

VÝSTUPY BLOKU		
Název výstupu	Popis	Výchozí hodnota
<i>VehChargingState</i>	Stav nabíjení baterie	-
<i>MotorSpeed</i>	Otáčky motoru	-
<i>MotorTorque</i>	Krouticí moment motoru	-
<i>MotorTemp</i>	Teplota motoru	-
<i>VehTraveledDist</i>	Ujetá vzdálenost	-
<i>VehActualSpeed</i>	Aktuální rychlost	-
<i>VehLoad</i>	Náklad vozidla	-
<i>VehAcc</i>	Zrychlení vozidla	-
<i>AmbientT</i>	Venkovní teplota	-
<i>BatU</i>	Napětí na baterii	-
<i>BatI</i>	Proud na baterii	-
<i>BatSOC</i>	Stav nabití baterie	-
<i>MaxChargingI</i>	Maximální proud při nabíjení	-
<i>MaxChargingU</i>	Maximální proud při vybíjení	-
<i>BatAvailablePower</i>	Dostupná energie baterie	-

Tab. 2: Výstupy modelu Fiat Dobló

¹⁰ Požadavek na krouticí moment v intervalu $\langle -1, 1 \rangle$, hodnota 1 značí maximální akceleraci, hodnota -1 maximální deceleraci.

3. PRAKTICKÁ ČÁST

Parametry bloku jsou zachovány z projektu IMPROVE [15]:

- Hmotnost vozidla, motoru, pasažéra.
- Nastavení baterie: výchozí stav SOC, počet baterií, atd..
- Jízdní vlastnosti vozidla: tření, viskózní síla, převodový poměr, atd..
- Venkovní teplota.

Seznam parametrů bloku

PARAMETRY BLOKU AmeSimBlackBox		
Název parametru	Popis	Výchozí hodnota
<i>em_mass</i>	Hmotnost elektromotoru	77 kg
<i>inv_mass</i>	Hmotnost invertoru (frekvenční měnič)	11 kg
<i>emv_mass</i>	Hmotnost elektromobilu	1380 kg
<i>charge_mass</i>	Hmotnost akumulátoru	290 kg
<i>vpass_numb</i>	Počet pasažérů	2
<i>pass_mass</i>	Hmotnost pasažéra	70 kg
<i>ambient temperature</i>	Okolní teplota	20 °C
<i>entertainment power</i>	Infotainment	500 W
<i>battery pack branch number</i>	Počet akumulátorů	4
<i>battery pack branch series cell number</i>	Počet článků akumulátoru	96
<i>battery cell rated capacity</i>	Kapacita článku	21
<i>battery initial SOC</i>	Výchozí stav nabití baterie	100 %
<i>transmission gear ratio</i>	Převodový poměr	9,3

Tab. 3: Výchozí parametry modelu Fiat Dobló

Model je koncipován tak, aby bylo možné simulovat jízdu reálného vozidla, které nemusí být fyzicky k dispozici.

Vehicle Energy Management simulátor je 1D virtuální model elektromobilu Fiat Dobló, sestavený v LMS.IMAGINE.Lab Amesim. Simulační platforma je přizpůsobena globálně vyhodnocovat spotřebu automobilu. Jedná se o prediktivní model, který se skládá z několika subsystémů: vehicle dynamics 1D model, e-motor, battery pack, air-conditioning / heating a control unit.

Subsystémy VEM modelu a jejich vlastnosti

1. **1D vehicle model:** Součástí modelu je přední a zadní náprava, přičemž jsou uvažovány parametry: rychlost větru, sklon vozovky, náklad, brzdění a krouticí moment.
2. **Mission profile:** Definuje podélnou rychlost vozidla jako funkci času. Obsahuje parametry: rychlost větru a sklon vozovky.
3. **Driver model:** Základem je PID regulátor, který respektuje rychlostní profil dané trasy (vehicle velocity mission profile).
4. **Electric powertrain:** Model elektrického motoru a DC konvertoru, který využívá data obsahující ztráty, minimální a maximální krouticí moment reálného motoru. Obsahuje parametry: otáčky motoru a maximální napětí na baterii.
5. **High voltage battery:** Kvazistatická náhrada elektrického obvodu. Parametry jsou popsány tabulkou, která obsahuje naměřené hodnoty. Uvažuje se OCV a odporová závislost jako funkce SOC (State of Charge = stav nabití) a teploty. Vzhledem ke ztrátě výkonosti baterie s přibývajícím nabíjecími cykly je zahrnuto její stárnutí.
6. **Vehicle Control Unit (VCU):** Vypočítává požadavek krouticího momentu vzhledem k míře stlačení pedálů, stavu nabití baterie a omezení výkonu invertoru.
7. **HVAC system:** Zjednodušený model, který obsahuje výkon vytápění. Data vycházejí z výsledků měření parametrů modelu.
8. **Vehicle auxiliary consumer:** Zahrnuje veškeré elektrické vybavení, které je součástí nízko napěťové palubní sítě (12V).

Princip simulace je následující: Model řidiče vypočítá stlačení plynového a brzdového pedálu, které odpovídá rychlostnímu profilu. VCU tyto údaje převede na krouticí moment a mechanické brzdění. Model na základě předpokladu malé akcelerace uvažuje plné regenerativní brzdění, až po dosažení maximálního limitu. Vysokonapěťová baterie napájí elektrický motor a ostatní příslušenství. Vzhledem k dosažení korektního požadavku na krouticí moment, elektrický motor na základě tabulky se ztrátovými hodnotami (funkce krouticího momentu, otáček motoru a napětí baterie), vypočítá proud. Model přitom předpokládá kvazistatické střídání požadavku na krouticí moment v porovnání s časovou konstantou motoru (platí pro standardní dopravní situace).

Koncept modelu byl porovnán s vlastnostmi reálného automobilu. Rozdíl mezi simulací a měřením byl vzhledem k chybějícím datům (proudění větru, nepřesnosti sklonu vozovky, . . .) akceptovatelný [16].

3.1.2. Popis algoritmu optimalizace spotřeby v rámci projektu IMPROVE

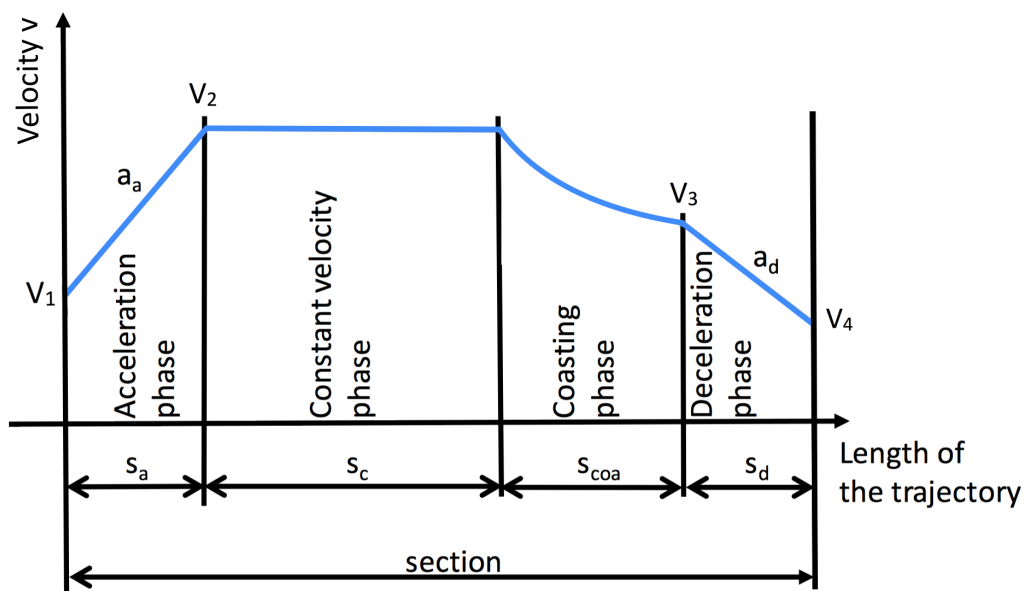
Problematika predikce optimálního rychlostního profilu byla jedním z výstupů projektu IMPROVE, který svůj algoritmus testoval na modelu elektromobilu Fiat Dobló. Regulaci tohoto rychlostního profilu se věnuji v sekci 3.1.7.

Plánovací algoritmus pracoval následujícím způsobem - nejprve načtl informace o trase a její GPS souřadnice. Poté algoritmus trasu rozdělil do několika sekcí s podobnými vlastnostmi, které vyplývaly z popisu trasy (nadmořská výška, maximální povolená rychlost). Každá sekce byla popsána pěti parametry:

- v_1 : počáteční rychlost,
- a_a : zrychlení při akceleraci,
- s_a : dráha akcelerace,
- a_d : zrychlení při deceleraci,
- s_d : dráha decelerace.

Sekce se dále dělila na čtyři fáze, které tyto parametry definovaly:

- **1. fáze:** akcelerace,
- **2. fáze:** udržování konstantní rychlosti,
- **3. fáze:** plachtění,
- **4. fáze:** decelerace.



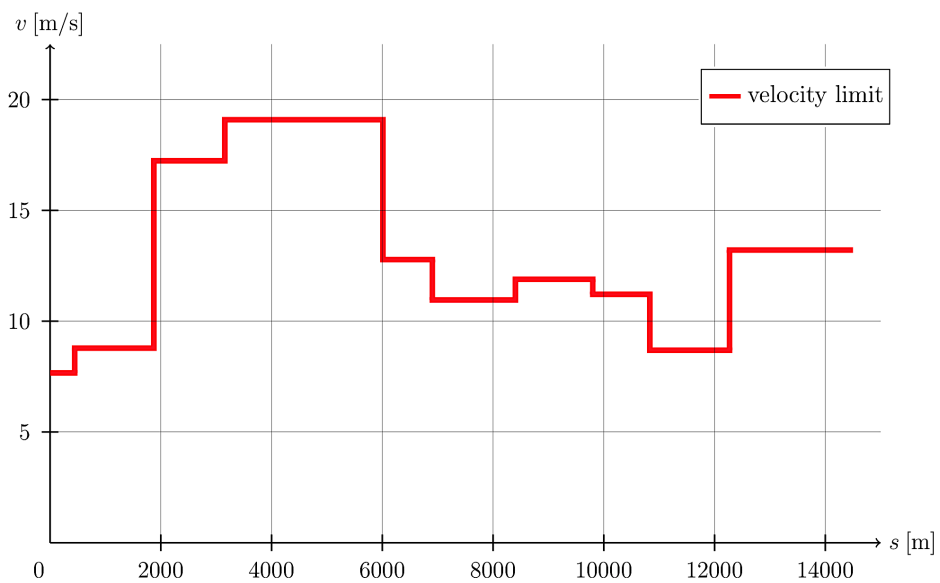
Graf 1: Rozdělení fáze na čtyři sekce [17]

Pořadí těchto fází bylo neměnné, v případě potřeby bylo možné danou fází vynechat.

Jestliže nastala na trase situace, kdy se vozidlo blížilo do zatáčky, byla rychlost snížena na takovou hodnotu, při které boční zrychlení v zatáčce nepřesahovalo koeficient komfortní jízdy [17].

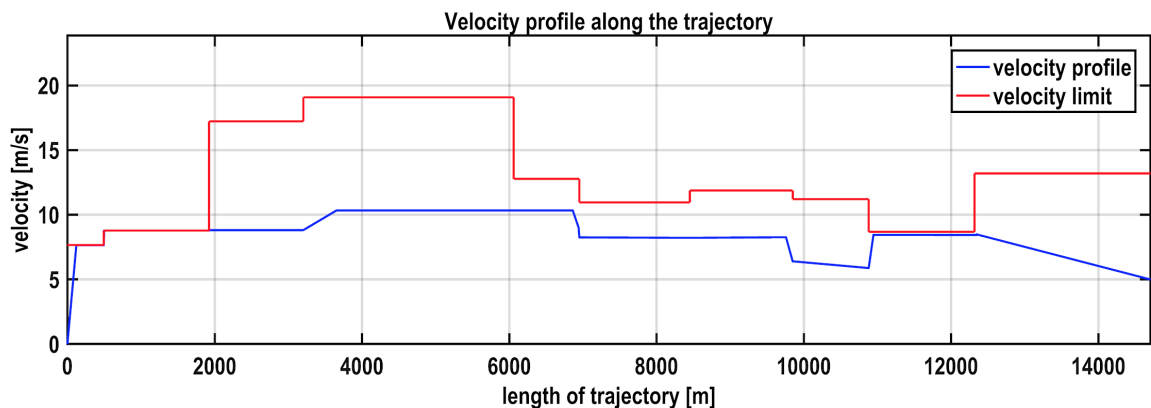
3.1.3. Zkušební trasa

Pro účel regulace spotřeby elektromobilu Fiat Dobló mi byla vybrána trasa z projektu IMPROVE, ke které byl v rámci projektu sestaven rychlostní profil. Rychlostní profil je sestaven tak, aby vozidlo dosáhlo co nejmenší spotřeby a neporušilo dopravní předpisy, přičemž neuvažuje plynulost dopravy (především limit pro minimální průměrnou rychlost odpovídající běžnému provozu, aby nedošlo k jeho narušení). Trasa je dlouhá 14,5 km. Vzhledem k tomu, že model v Simulinku neuvažuje nadmořskou výšku, výchozí veličinou definující trasu je maximální povolená rychlost. Na trase se nachází celkem 10 takových úseků, pro které se rychlost (velocity limit) liší (viz. Graf 2).



Graf 2: Rychlostní limit trasy

Pro optimalizaci spotřeby sestavil algoritmus z projektu IMPROVE následující rychlostní profil:



Graf 3: Rychlostní profil trasy

3.1.4. Regulace spotřeby s využitím různých typů regulátorů

Pro danou regulační soustavu s malým dopravním zpožděním v řádu milisekund jsem postupně simuloval průjezd zkušební trasy se třemi typy regulátorů - pro režim jízdy s rekuperací a bez rekuperace (akční veličina v intervalu $\langle -1, 1 \rangle$).

Jako první jsem použil proporcionální regulátor (P regulátor), kde jsem ověřoval kmitavost soustavy postupným zvyšováním zesílení parametru regulátoru (0,1 až 100). Vzhledem k tomu, že P regulátor vykazuje trvalou regulační odchylku, slouží simulace jízdy spíše jako představa o chování modelu elektromobilu Fiat Dobló.

Pro PI regulátor jsem pomocí přechodové charakteristiky metodou Zieger-Nichols nastavil hodnotu proporcionální a integrační složky tak, aby nedocházelo k překmitům regulované veličiny. Nastaveným PI regulátorem jsem simuloval průjezd zkušební trasou v obou režimech jízdy.

Oba regulátory při jízdě bez rekuperace způsobily ve fázi decelerace překročení rychlostního limitu. K odstranění tohoto nedostatku jsem aplikoval prediktivní regulaci. Prediktivní regulace rozšířila rychlostní profil o predikci blížícího se omezení rychlosti tak, že elektromobil několik desítek metrů před snížením rychlosti začne decelerovat. Do místa s dopravním omezením tak doplachtí s požadovanou rychlostí.

3. PRAKTICKÁ ČÁST

3.1.5. P regulátor

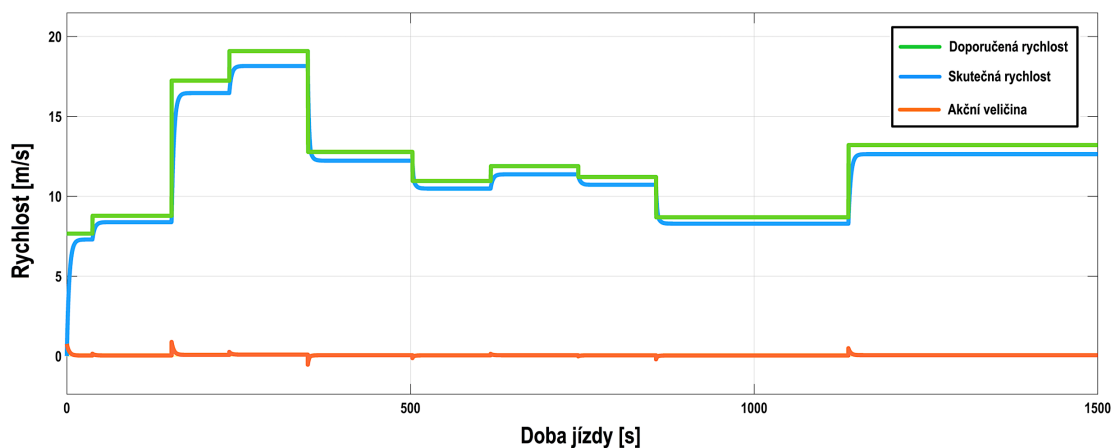
Průjezd zkušební trasy byl simulován celkem osmkrát při zvyšování zesílení r_0 . Stejně hodnoty zesílení r_0 byly použity pro oba režimy jízdy - s rekuperací a bez rekuperace.

1. Jízda s rekuperací

Následující tabulka obsahuje naměřené hodnoty pro jednotlivé průjezdy trasou (zrekuperovaná energie je započtena ve spotřebované energii):

Proporcionální složka r_0	Spotřebovaná energie [kW.hod]	Průměrná rychlost [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
0,1	2,1656	11,508
0,25	2,2943	11,875
0,5	2,3400	11,998
1	2,3636	12,059
2	2,3756	12,090
5	2,3827	12,109
10	2,3852	12,115
100	2,3879	12,120

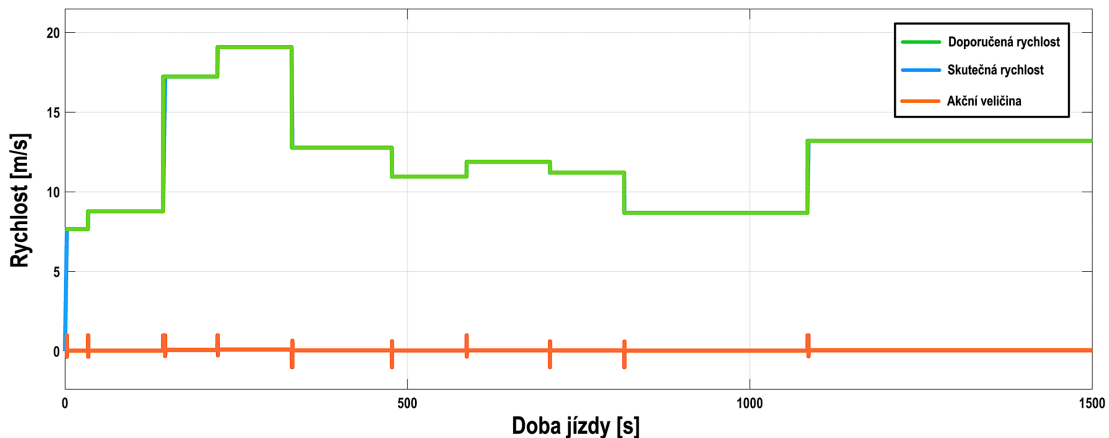
Tab. 4: Naměřené hodnoty - jízda s rekuperací



Graf 4: Rychlostní profil trasy ($r_0 = 0,1$)

Při hodnotě zesílení r_0 vyšší než 5 již nedocházelo k významné změně spotřebované energie a průměrné rychlosti.

3. PRAKTICKÁ ČÁST



Graf 5: Rychlostní profil trasy ($r_0 = 100$)

Při simulaci průjezdů trasou se soustava nerozkmitala ani pro nejvyšší zvolenou hodnotu zesílení P regulátoru $r_0 = 100$. Pokud se křivka aktuální rychlosti přiblíží do řádu desetin m/s, je po dosažení požadované rychlosti možné pozorovat lehký překmit, způsobený akční veličinou, který se následně rychle ustálí. Soustavu lze proto považovat za asymptoticky stabilní.

Regulační odchylka P regulátoru se při zvyšování zesílení r_0 postupně zmenšovala. Při zesílení $r_0 = 0,1$ má trvalá regulační odchylka při nejvyšší rychlosti elektromobilu hodnotu $0,95 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, pro $r_0 = 100$ pak hodnotu $0,011 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Trvalá regulační odchylka nemá při uvažování reálné jízdy zásadní význam.

2. Jízda bez rekuperace

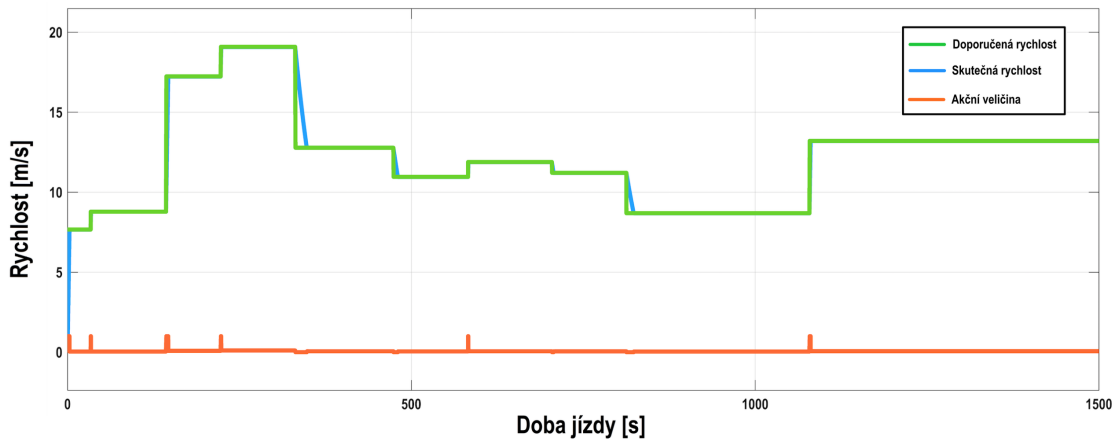
Následující tabulka obsahuje naměřené hodnoty pro průjezdy trasou:

Proporcionální složka r_0	Spotřebovaná energie [kW.hod]	Průměrná rychlost [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
0,1	2,1459	11,543
0,25	2,2647	11,918
0,5	2,3057	12,045
1	2,3270	12,108
2	2,3370	12,139
5	2,3432	12,158
10	2,3454	12,164
100	2,3473	12,169

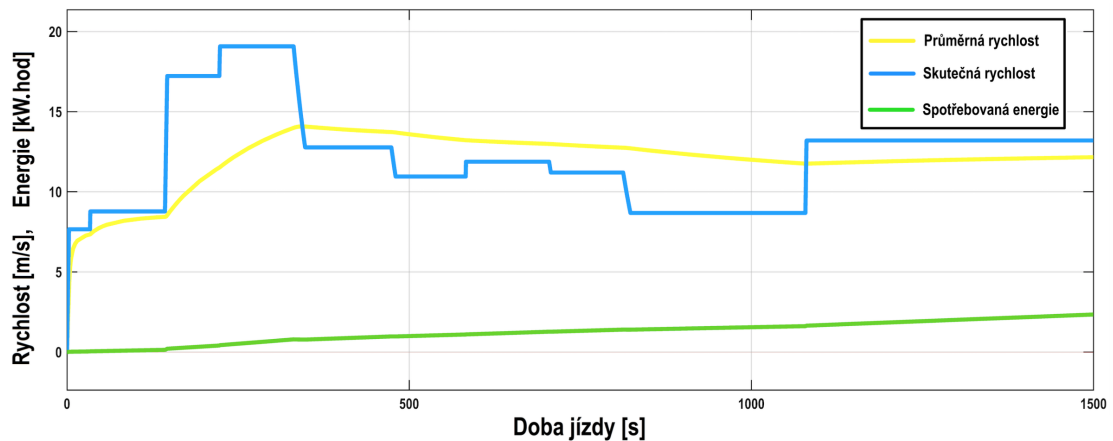
Tab. 5: Naměřené hodnoty - jízda bez rekuperace

Stejně tak jako při jízdě s rekuperací se celková spotřeba a průměrná rychlost pro zesílení r_0 vyšší než 5 měnila minimálně.

3. PRAKTICKÁ ČÁST



Graf 6: Rychlostní profil trasy ($r_0 = 10$)



Graf 7: Vývoj spotřeby energie a průměrné rychlosti ($r_0 = 10$)

Jízda bez rekuperace vykazuje oproti jízdě s rekuperací menší spotřebu elektromobilu. Důvodem je ztráta energie při deceleraci v režimu rekuperace proti přímému využití kinetické energie vozidla v režimu plachtění. Při rekuperaci se transformuje kinetická energie vozidla na energii elektrickou, při pohonu se pak elektrická energie mění opět na mechanickou. Obě transformace probíhají s určitou účinností (např. při účinnosti 0,9 dochází pro obě transformace k energetické ztrátě 18 %¹¹). Je proto výhodné nahradit deceleraci plachtěním, pokud to dopravní situace umožňuje.

Nedostatek plachtění je patrný z grafu 6. Pro podélné řízení vozidla není možné tuto variantu použít, protože dochází k porušování dopravních předpisů jízdou vozidla vyšší rychlostí, než je na daném úseku povoleno. Tímto problémem se zabývám v kapitole 3.1.8.

¹¹ Celková ztráta transformace je rovna: $(1 - 0,9 \cdot 0,9) \cdot 100\% = 18\%$. Jedná se o odhad průměrné účinnosti pro obě transformace.

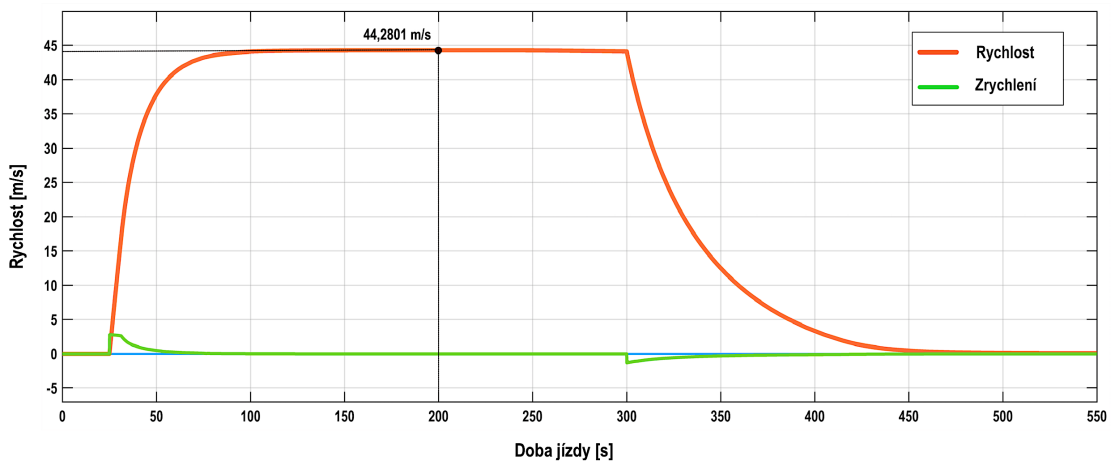
3.1.6. PI regulátor

Zkušební trasa byla po nastavení parametrů PI regulátoru projeta jednou pro oba režimy jízdy. Pro správné nastavení PI regulátoru bylo nutné odečíst proporcionální a integrační konstantu z přechodové charakteristiky systému. Pro tento účel jsem zvolil metodu Zieger-Nichols s nastavením Open-loop.

Vzhledem k malému dopravnímu zpoždění nebyla konstanta samotného P regulátoru určena analytickým výpočtem. Cílem jejího zesilování bylo získat přehled o chování dané soustavy.

Nastavení PI regulátoru metodou Zieger-Nichols pomocí přechodové charakteristiky (Open-loop nastavení)

Na následujícím grafu je vykreslena přechodová charakteristika elektromobilu. Moment na vstupu do soustavy je nastaven na maximální hodnotu po takovou dobu, aby se rychlost elektromobilu ustálila na maximální hodnotě. Ustálený stav nastal po 200 s jízdy při rychlosti 44,2801 m.s⁻¹. Na grafu je současně znázorněna první derivace rychlosti podle času (zrychlení), která slouží k analytickému výpočtu doby průtahu T_u (dopravní zpoždění) a dobu náběhu T_n (časová konstanta regulované soustavy) - grafické řešení by pro stanovení hodnoty dopravního zpoždění v řádu milisekund vykazovalo velkou nepřesnost.

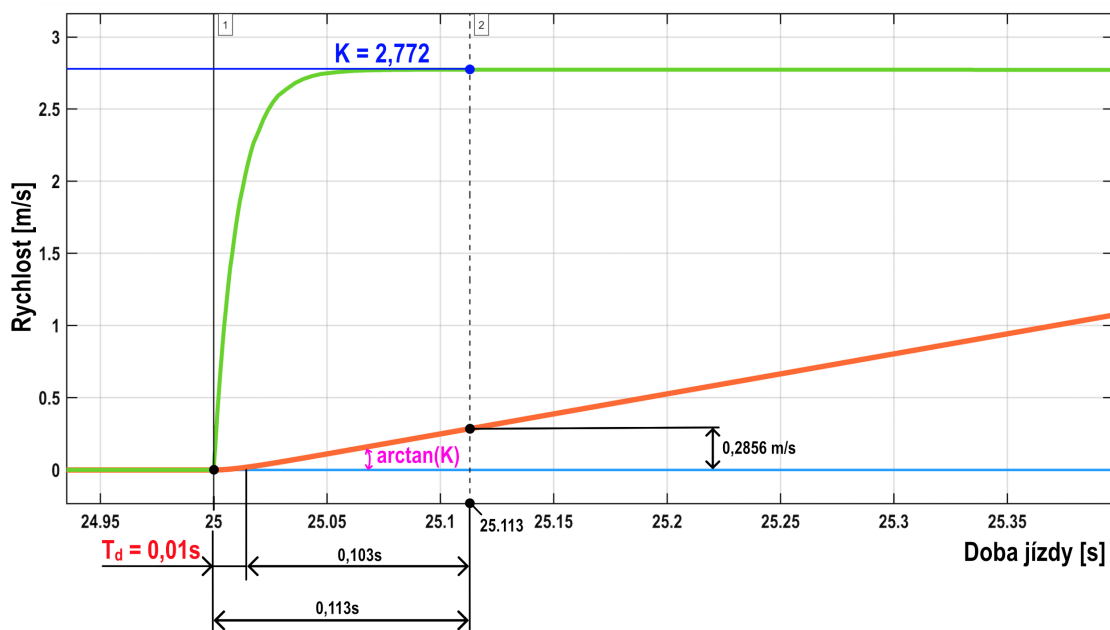


Graf 8: Přechodová charakteristika

Na grafu 9 je naznačen analytický výpočet konstant T_u a T_n (vzhledem k lepší přehlednosti není graf proporcionální). Směrnice subtangenty je dána statickou citlivostí: $K = 2,772$. Výpočet doby průtahu je znázorněn v grafu, po zaokrouhlení má hodnotu $T_u = 0,01$ s. Doba náběhu T_n se stanovila podobným způsobem:

$$T_u = 0,01 \text{ s}, \quad T_n = 15,99 \text{ s}.$$

3. PRAKTICKÁ ČÁST



Graf 9: Výpočet doby průtahu T_u

Parametry PI regulátoru jsou nastaveny na základě následující tabulky [18]:

Regulátor	r_0	$T_I = \frac{r_0}{r_I}$	$T_D = \frac{r_D}{r_0}$
P	$\frac{T_n}{K_u T_u}$	—	—
PI	$\frac{0,9 T_n}{K_u T_u}$	$3,33 T_u$	—
PID	$\frac{1,2 T_n}{K_u T_u}$	$2 T_u$	$0,5 T_u$

Tab. 6: Určení stavitelných parametrů dle metody Zieglera a Nicholse

Po dosazení:

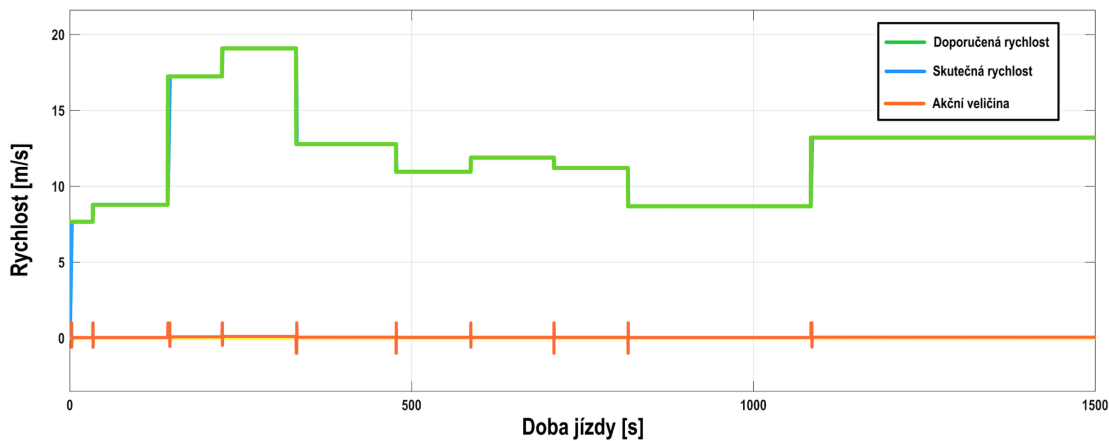
$$r_0 = \frac{0,9 T_n}{K_u T_u} = \frac{0,9 \cdot 15,99}{2,772 \cdot 0,01} = 519,2, \quad (2)$$

$$T_I = 3,33 T_u = 3,33 \cdot 0,01 = 0,0333 \text{ s}. \quad (3)$$

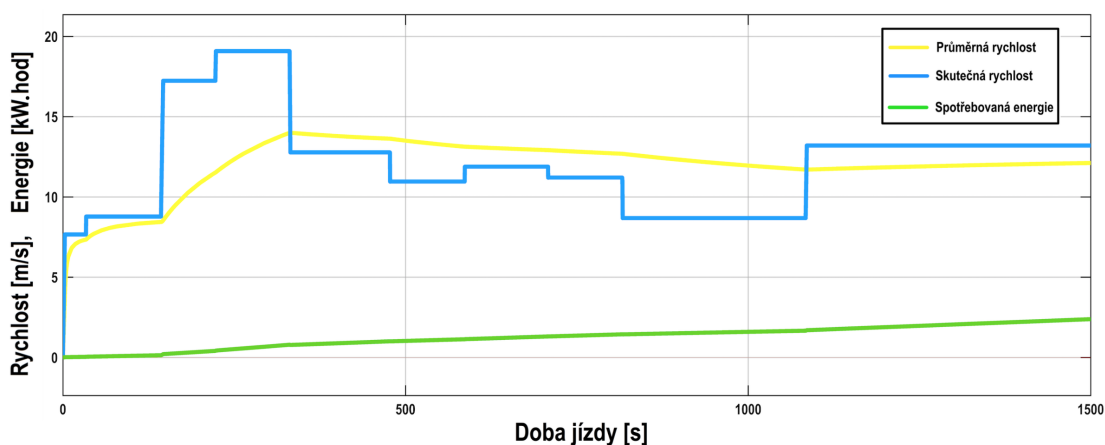
3. PRAKTICKÁ ČÁST

Rychlostní profil regulovaný PI regulátorem s nastavenými parametry má následující průběh:

1. Jízda s rekuperací



Graf 10: Rychlostní profil trasy s rekuperací - PI regulátor



Graf 11: Vývoj spotřeby energie a průměrné rychlosti trasy s rekuperací - PI regulátor

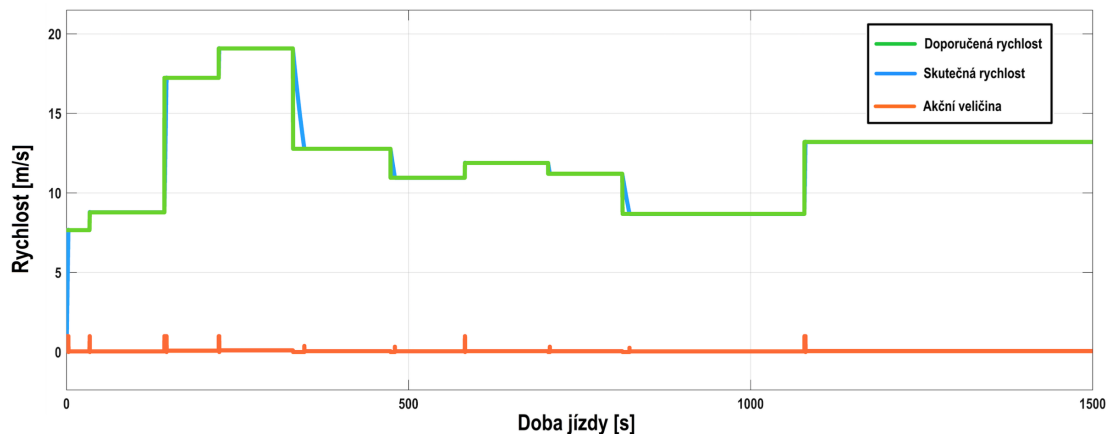
Naměřené hodnoty:

r_0	T_I	Spotřebovaná energie [kW.hod]	Průměrná rychlost [$m \cdot s^{-1}$]
519,2	0,0333	2,3887	12,122

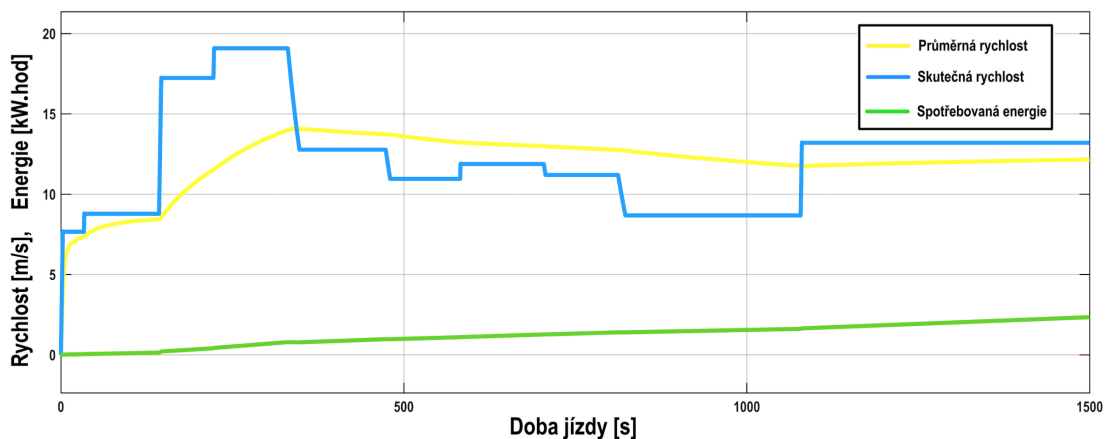
Tab. 7: Naměřené hodnoty - jízda s rekuperací

3. PRAKTICKÁ ČÁST

2. Jízda bez rekuperace



Graf 12: Rychlostní profil trasy bez rekuperace - PI regulátor



Graf 13: Vývoj spotřeby energie a průměrné rychlosti trasy bez rekuperace - PI regulátor

Naměřené hodnoty:

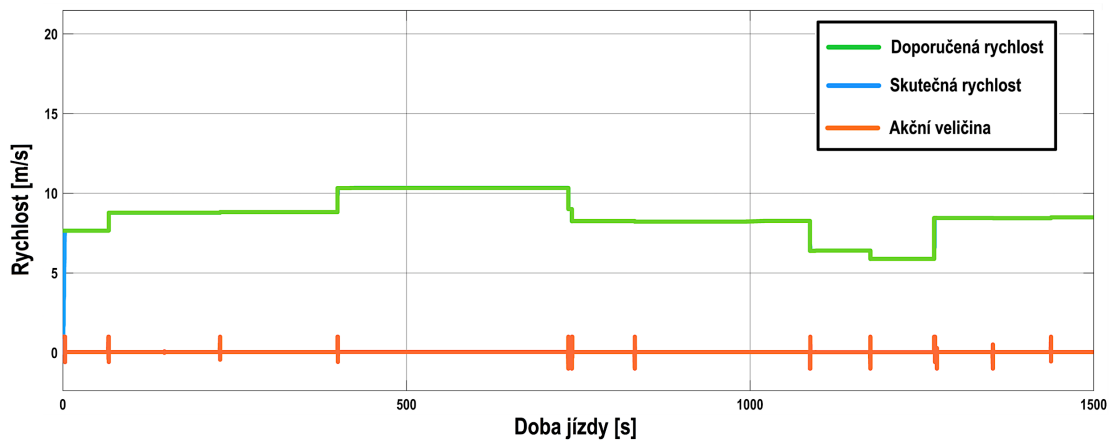
r_0	T_I	Spotřebovaná energie [kW.hod]	Průměrná rychlost [$m \cdot s^{-1}$]
519,2	0,0333	2,3470	12,168

Tab. 8: Naměřené hodnoty - jízda bez rekuperace

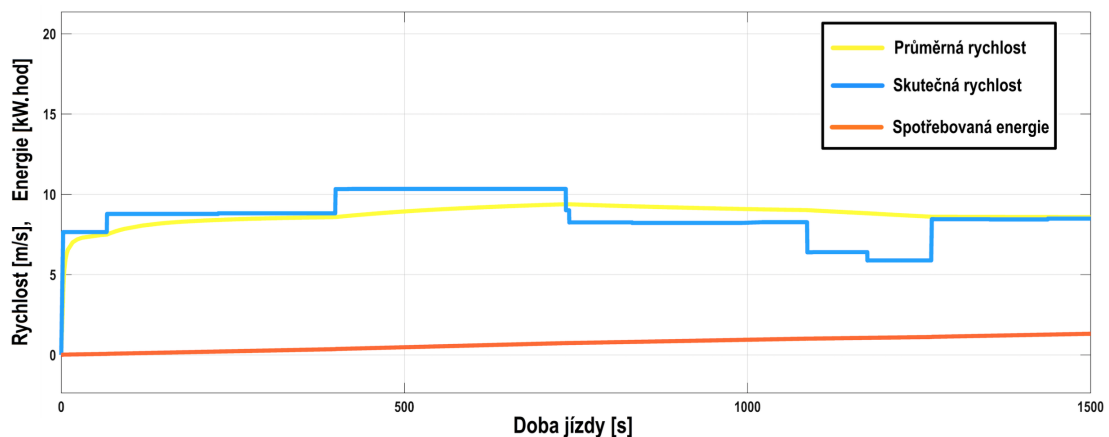
Regulátor PI vykazuje oproti P regulátoru menší spotřebu při jízdě bez rekuperace. Z tohoto důvodu použijí pro regulaci podle prediktivní vodící rychlosti právě PI regulátor. Opět platí, že snižování spotřeby tímto způsobem regulace je nepřijatelné z důvodu porušování dopravních předpisů.

3.1.7. Regulování spotřeby rychlostního profilu z projektu IMPROVE

Rychlostní profil, který byl výstupem projektu IMPROVE, je výhradně orientován na dosažení nejnižší spotřeby. Důsledkem je nižší průměrná rychlost. Snížená průměrná rychlost je způsobena snahou zamezit prudkým změnám rychlosti, které zvyšují okamžitou spotřebu elektromobilu. Následkem toho je atypický způsob jízdy, který neodpovídá jízdě v běžném provozu. Příkladem je např. situace, kdy se maximální povolená rychlost téměř zdvojnásobí, ale regulátor ji udržuje téměř konstantní. V případě hustého provozu by takový způsob jízdy mohl vést k omezení dopravy. V mé práci proto rychlost přesně reguluji vzhledem k maximální povolené rychlosti. Následující naměřené hodnoty slouží k porovnání, do jaké míry je spotřeba rozdílná. Při projíždění trasy je v obou režimech použit PI regulátor se stejně nastavenými parametry.



Graf 14: Rychlostní profil trasy bez rekuperace- PI regulátor



Graf 15: Vývoj spotřeby energie a průměrné rychlosti trasy bez rekuperace - PI regulátor

3. PRAKTICKÁ ČÁST

Naměřené hodnoty pro oba režimy jízdy¹²:

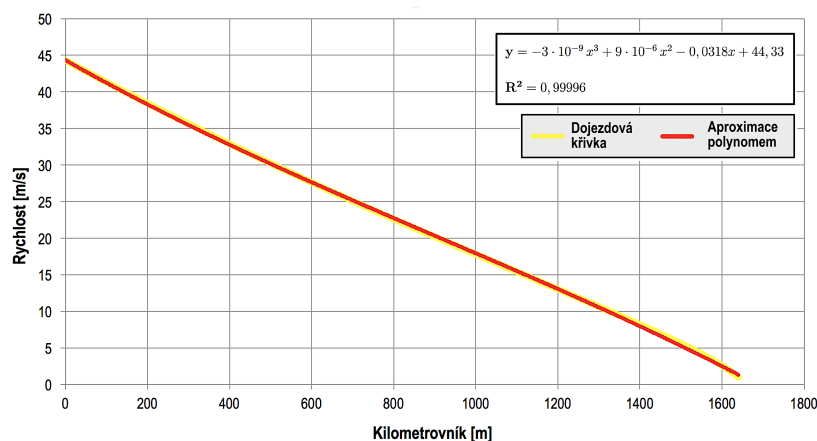
Režim jízdy	r_0	T_I	Spotřebovaná energie [kW.hod]	Průměrná rychlost [$m.s^{-1}$]
Rekuperace	519,2	0,0333	1,3188	8,585
Plachtění	519,2	0,0333	1,3055	8,598

Tab. 9: Naměřené hodnoty - oba režimy jízdy

3.1.8. Optimalizace spotřeby regulací na rychlostní profil s prediktivní informací

Při optimalizaci rychlostního profilu vycházím z poznatku, že při plachtění dosahuje elektromobil menší spotřeby v porovnání s režimem rekuperace. Nedostatkem takové jízdy je překročení maximální povolené rychlosti na úsecích trasy, kdy se rychlost snižuje. Cílem mé optimalizace je proto pokusit se najít bod, ve kterém elektromobil po započítání plachtění dojezdí do místa se sníženou rychlostí, aniž by ji v průběhu této fáze překročil.

K určení bodu jsem opět použil přechodovou charakteristiku, respektive její část s dojezdovou křivkou. Dojezdovou křivku jsem v programu MS Excel aproximoval polynomem. Kilometrovník trasy jsem pak rozdělil do úseků po 10 metrech, aby bylo možné lépe rozpoznat, za jakou vzdálenost se blíží omezení rychlosti. Z dojezdové křivky jsem určil polohu hledaného bodu. Dráhu plachtění jsem pak odečetl z druhého grafu, jehož vodorovnou osu reprezentuje rychlost a svislou kilometrovník, odpovídající celkové dráze plachtění až do úplného zastavení elektromobilu.

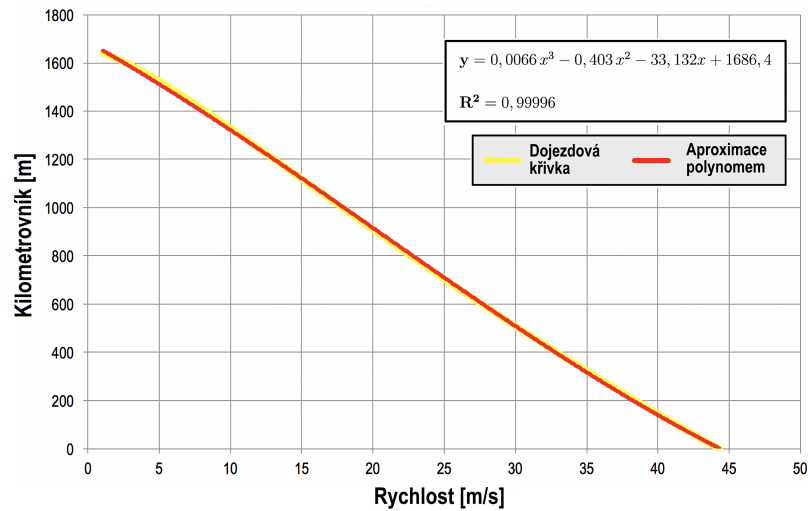


Graf 16: Aproximace dojezdové křivky I.

¹² Naměřené hodnoty nemají význam z důvodu nepoužitelnosti v reálném dopravním provozu.

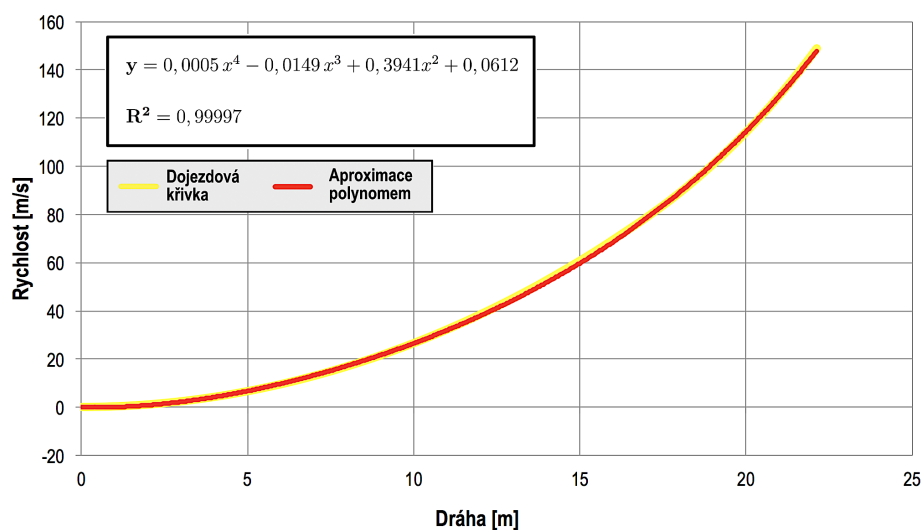
3. PRAKTICKÁ ČÁST

Druhý graf aproximace dojezdové křivky:



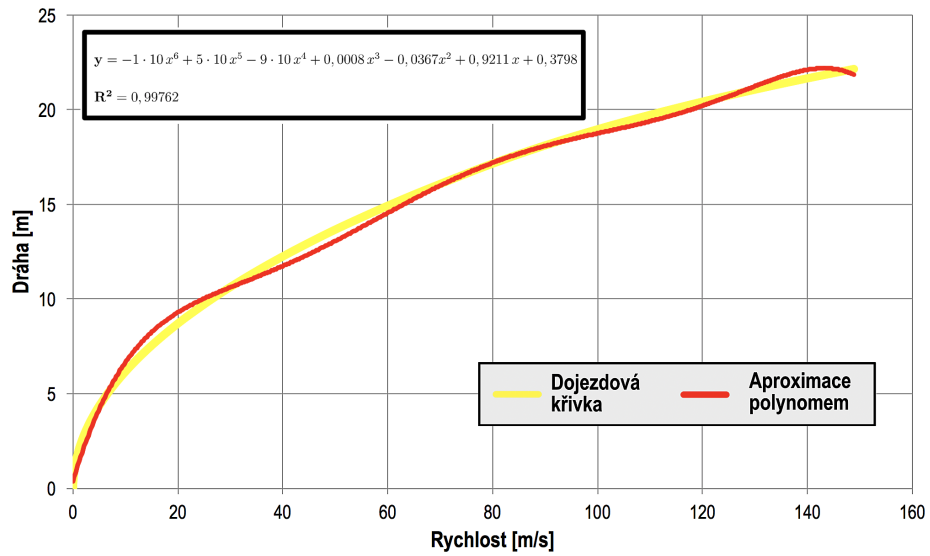
Graf 17: Aproximace dojezdové křivky II.

Snížení spotřeby se podařilo dosáhnout také zmírněním náběhu rozjezdové křivky, kdy jsem se inspiroval rychlostním profilem z projektu IMPROVE, při kterém elektromobil zrychloval s malou agresivitou. Rozjezdovou křivku jsem určil z přechodové charakteristiky rozjezdu elektromobilu. Akční veličina byla nastavena na 70 % maximální možné hodnoty. Vzhledem ke tvaru rozjezdové křivky, který pro závislost rychlosti na kilometrovníku neumožňoval aproximaci polynomem, bylo nutné manuálně zjistit souřadnice křivky, které jsem pak na základě podobnosti přiřadil výchozímu rychlostnímu profilu s maximální povolenou rychlostí. Rozjezdovou křivku jsem stejně tak jako v předchozím případě určoval ze závislostí rychlosti na kilometrovníku a kilometrovníku na rychlosti.



Graf 18: Aproximace rozjezdové křivky I.

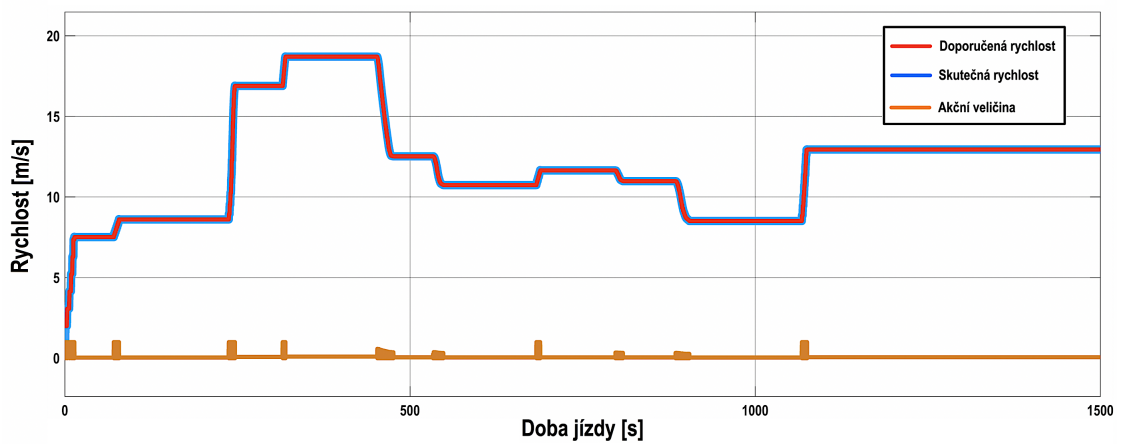
3. PRAKTICKÁ ČÁST



Graf 19: Rozjezdová křivka II.

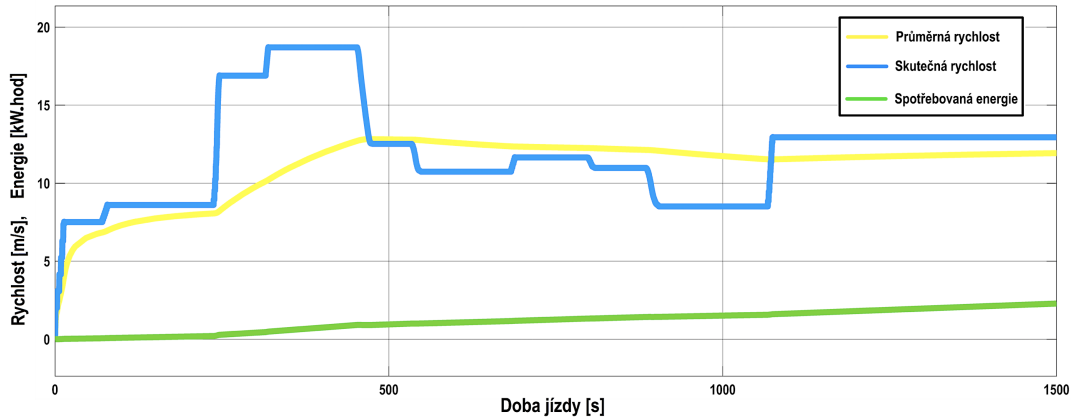
Výstupem optimalizace je následující rychlostní profil a průběh spotřeby společně s průměrnou rychlostí:

Jízda bez rekuperace



Graf 20: Optimalizovaný rychlostní profil trasy bez rekuperace - PI regulátor

3. PRAKTICKÁ ČÁST



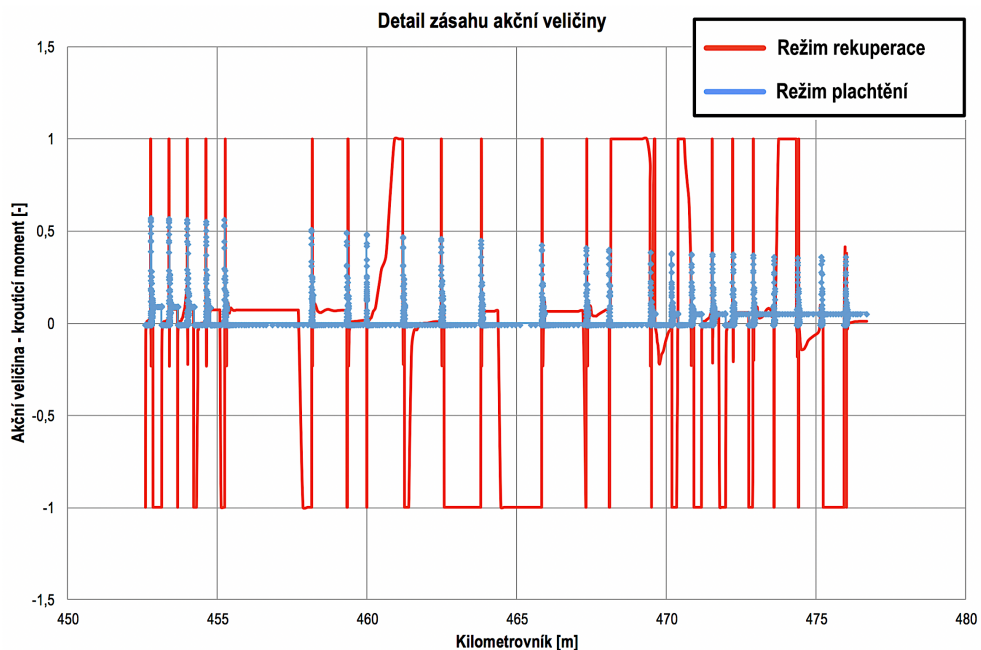
Graf 21: Optimalizovaný rychlostní profil trasy bez rekuperace - PI regulátor

Následující tabulka pro úplnost shrnuje naměřené hodnoty pro oba režimy jízdy:

Režim jízdy	r_0	T_I	Spotřebovaná energie [kW.hod]	Průměrná rychlost [$m \cdot s^{-1}$]
Rekuperace	519,2	0,0333	2,3540	11,929
Plachtění	519,2	0,0333	2,2890	11,931

Tab. 10: Naměřené hodnoty - oba režimy jízdy

Rozdíl ve spotřebě dobře dokumentuje rozdíl intenzity zásahu akční veličiny při regulování soustavy (viz. graf 24) pro oba režimy jízdy.



Graf 22: Zásah akční veličiny

Výsledkem optimalizace je úspora energie o 4,2% při snížení průměrné rychlosti o 1,6% oproti regulaci původní trasy PI regulátorem. Porovnání je vztaženo k simulaci jízdy v režimu s rekuperací, jelikož v režimu plachtění jízda porušuje dopravní předpisy.

3.2. Rekuperovaná energie jako přímý zdroj topení

Rekuperace je proces využívaný při brzdění automobilu, při kterém se kinetická energie přeměňuje na energii elektrickou. Při deceleraci elektromotor pracuje v režimu generátor a transformuje kinetickou energii vozidla na elektrickou. Nabíjecí proudy do baterií jsou omezené, proto při velkých deceleracích musí být použito klasických třecích brzd. Při plně nabitých bateriích není možné rekuperaci při deceleraci používat. Každý alternativní zdroj energie má u elektromobilu daleko větší význam než u vozidel se spalovacími motory, které disponují až několikanásobně větším dojezdem na jednu plnou nádrž (plné nabití akumulátoru v případě elektromobilu).

Při rekuperaci energie do baterií dochází ke ztrátám v důsledku účinnosti. V této kapitole se proto na základě vlastních měření pokusím zhodnotit potenciál využití rekuperované energie jako přímého zdroje topení.

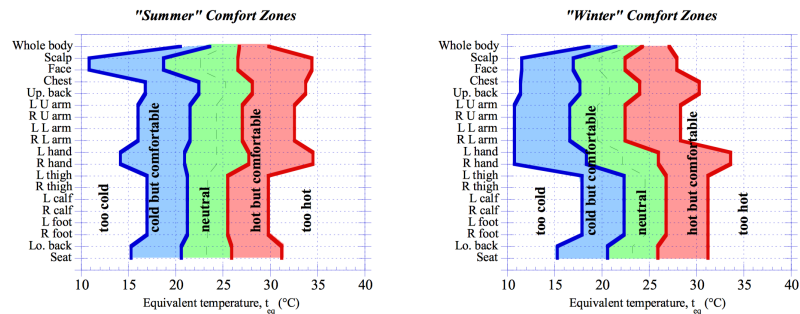
Hlavní myšlenkou je, že rekuperovaná energie se při běžné rekuperaci vrací zpět do akumulátoru a poté je využita motorem nebo některým z palubních spotřebičů. Typickým spotřebičem, který je aktivní po většinu jízdy, je topení. Pokud by se rekuperovaná energie přiváděla přímo do topení bez uložení do akumulátoru, snížily by se její celkové ztráty v důsledku ztrát transformace rekuperované energie do akumulátoru (tedy úspora cca. 9 %¹³ za transformaci kinetické energie za elektrickou). Nejvýhodnějším způsobem rekuperace je brzdění při jízdě z kopce. V případě, kdyby automobil znal výškový profil trasy, bylo by možné před blížícím se kopcem topení deaktivovat, a vzniklý rozdíl teploty v kabině kompenzovat rekuperovanou energií, získanou při jízdě z kopce.

Pro takový pokus je zapotřebí zjistit, v jakém intervalu teplot je schopné běžné topení teplotu v kabině udržovat, aby při jeho deaktivaci teplota nepřekročila komfortní zónu, kterou vnímá běžný pasažér.

Komfortní zóna představuje interval teplot v rozmezí řádově několika stupňů, při kterých se pasažér cítí "komfortně". Vnímání optimální teploty se však pro jednotlivé části těla liší. Důsledkem může být narušení pohodlí pasažéra při změně teploty překračující 0,5 °C [19]. Výsledky jednoho z takových měření pro 16 částí lidského těla, které navíc rozlišovalo vnímání teploty v letním a zimním období, jsou znázorněny na grafu 23.

¹³ viz. str. 27, odhad průměrné účinnosti transformace energie.

3. PRAKTICKÁ ČÁST



Graf 23: Komfortní zóny pro jednotlivé části těla[19]

3.2.1. Experimentální měření teploty v kabině automobilu

Pro účely experimentu jsem použil automobil Škoda Octavia. Výsledky se sestávají ze dvou nezávislých jízd, uskutečněných začátkem dubna. Seznam jednotlivých jízd:

- Mnichovo Hradiště - Liberec,
- Mnichovo Hradiště - Praha.

Pro všechny jízdy byla nastavena teplota topení na 21 °C, přičemž okolní teplota se pohybovala od 4,5 do 8,5 °C.

Způsob měření teploty

Pro měření teploty jsem využil počítačový program pro autodiagnostiku VCDS, který umožňuje propojit počítač přes HEX-CAN port s diagnostikou automobilu (kompatibilní s většinou vozů z koncernu Volkswagen).

Měřené veličiny

Teplota byla zaznamenávána ze všech teplotních senzorů v kabině Škoda Octavia, přičemž požadovanou teplotu v kabině (21 °C) jsem porovnával se senzorem teploty v kabině (cabin temperature sensor), který snímá teplotu v oblasti středního kokpitu. Autodiagnostika VCDS umožnila používat následující senzory:

- *Coolant temperature* - teplota chladicí kapaliny,
- *Outside air temperature* – teplota okolí,
- *Left front vent temperature* – teplota levé ventilace,
- *Right front vent temperature* – teplota pravé ventilace,
- *Footwell vent temperature* – teplota ventilace v oblasti pedálů řidiče,
- *Temperature after evaporation* – teplota po evaporaci (vypaření),
- *Interior temperature* – teplota interiéru auta.

3. PRAKTICKÁ ČÁST

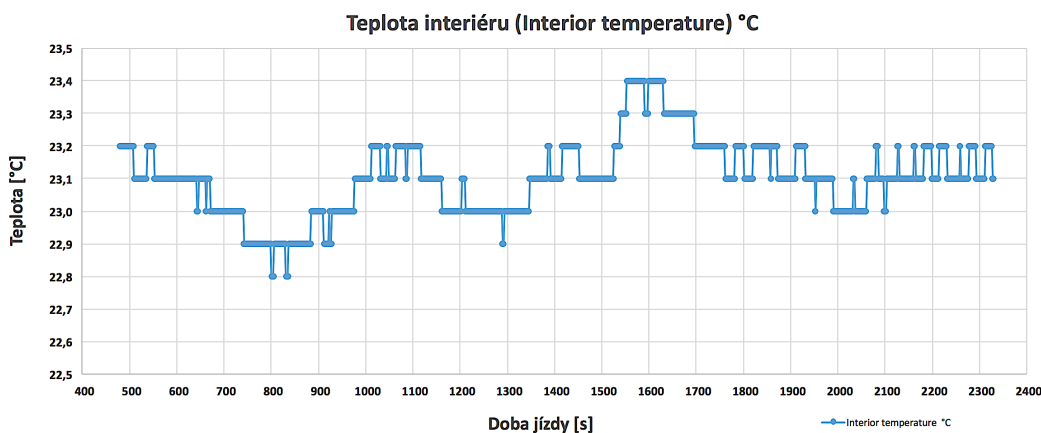
Jak již bylo zmíněno, pro vyhodnocení jsou použita data teploty interiéru, a to po určité době měření, kdy se teplota ustálila (všechny senzory vykazovaly určitou dobu ustálení). Na začátku vždy teplota prudce roste (vzhledem k poměrně nízké venkovní teplotě), ustáleným stavem se tedy rozumí stav, kdy teplota interiéru přestala růst a začala kolísat.

Za zmínku stojí, že teplota interiéru se vždy ustálila poté, co teplota chladicí kapaliny dosáhla standartních 90 °C. Takový průběh je pravděpodobně způsoben nastavením regulace teploty v automobilu, aby motor po zahájení jízdy co nejdříve dosáhl provozní teploty (z důvodu emisí, spotřeby a opotřebení mechanických částí motoru).

Senzor teploty interiéru měřil s rozlišením 0,1 °C a časovou frekvencí 2s.

Jízda Mnichovo Hradiště - Liberec (venkovní teplota: 4,5 - 6 °C)

Vykreslené hodnoty začínají na dálnici D10, kdy se poprvé teplota ustálila, poté navazuje rychlostní silnice I/35 (E442) a příměstská část v Liberci. Po celou dobu bylo oblačno – měření neovlivňovalo sluneční záření.



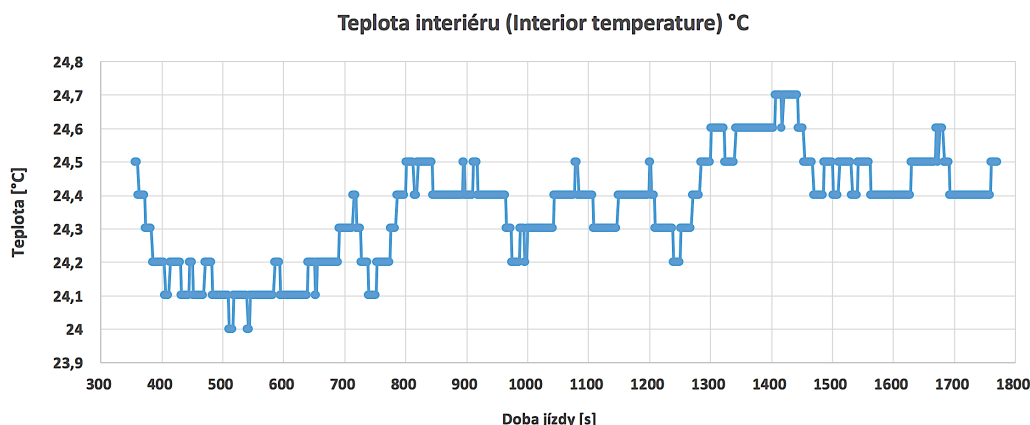
Graf 24: Průběh teploty v interiéru (1. jízda)

Naměřené hodnoty		
Doba ustálení teploty [s]	480	
Doba měření [s]	1842	
Maximální teplota [°C]	23,4	Odchylka 2,4 °C od nastavené teploty
Minimální teplota [°C]	22,8	Odchylka 1,8 °C od nastavené teploty
Maximální rozdíl teplot [°C]	0,6	
Směrodatná odchylka [°C]	0,116	
Průměrná teplota [°C]	23,103 (± 0,116)	

Tab. 11: Naměřené hodnoty (1. jízda)

Jízda Mnichovo Hradiště - Praha (venkovní teplota: 7 - 8,5 °C)

Vykreslené hodnoty začínají na dálnici D10 (směr Praha) a končí na Pražském okruhu. Po celou dobu byla jasná obloha.



Graf 25: Průběh teploty v interiéru (2. jízda)

Naměřené hodnoty		
Doba ustálení teploty [s]	356	
Doba měření [s]	1415	
Maximální teplota [°C]	24,7	<i>Odchylka 3,7 °C od nastavené teploty</i>
Minimální teplota [°C]	24,0	<i>Odchylka 3,0 °C od nastavené teploty</i>
Maximální rozdíl teplot [°C]	0,7	
Směrodatná odchylka [°C]	0,159	
Průměrná teplota [°C]	24,356 (± 0,159)	

Tab. 12: Naměřené hodnoty (2. jízda)

Shrnutí

Z naměřených hodnot vyplývá, že schopnost topení udržovat teplotu je v rozmezí 0,5 °C pro ustálený stav, kterého se běžně dosáhne v závislosti na dosažení provozní teploty motoru. Teplotní senzor snímal teplotu z jednoho místa, což může být do jisté míry nevýhodou, vzhledem k neustálé cirkulaci vzduchu v autě – podmínkou proto bylo provést měření pro delší časový úsek, aby se nepřesnosti minimalizovaly (směrodatnou odchylku 0,1 až 0,15 °C lze považovat za poměrně malou).

Teplota se po celou dobu pohybovala nad nastavenou teplotou topení, a to od 1,8 do 2,4 °C při oblačné obloze a od 3,0 do 3,7 °C při jasné obloze. Sluneční záření zvyšovalo teplotu o více jak 1 °C – topení není schopno při vypnuté klimatizaci kompenzovat přehřívání teploty kabiny slunečním zářením.

3. PRAKTICKÁ ČÁST

Ke konci jízdy městskou částí, kdy byla maximální rychlost 50 km/h, a hustota dopravy společně s dopravními předpisy neumožnily plynulou jízdu, teplota vždy mírně stoupla. Důsledkem mohla být rychlost větru při jízdě po dálnici.

3.2.2. Stanovení energie potřebné k vytopení kabiny elektromobilu o 1 °C

Výpočet množství energie potřebné k vytopení auta o 1 °C vztahuji ke kabině elektromobilu Fiat Dobló, pro který lze spotřebu energie při vytápění simulovat v programu MATLAB Simulink. Objem kabiny Fiatu Dobló byl odhadnut: $V_{\text{kab}} = 5 \text{ m}^3$ na základě informace výrobce o objemu úložného prostoru se sklopenými zadními sedačkami. Při analytickém výpočtu uvažuji teplotu vzduchu 20 °C.

Fyzikální parametry vzduchu při 20 °C [20]:

T [°C]	ρ [kg.m ⁻³]	c_p [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	ν [m ² .s ⁻¹]	β [K ⁻¹]
20	1,1887	1006	0,0256	$15,3 \cdot 10^{-6}$	$3,43 \cdot 10^{-3}$

Tab. 13: Fyzikální parametry vzduchu při 20 °C

Výpočet množství spotřebované energie

- **Hmotnost vzduchu (při 20 °C):**

$$m = V_{\text{kab}} \cdot \rho = 5 \cdot 1,1887 = 5,944 \text{ kg} \quad (4)$$

- **Celkové množství energie:**

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T = 5,944 \cdot 1006 \cdot 1 = 5979,66 \text{ J} = 1,661 \text{ W.hod} \quad (5)$$

K vytopení kabiny elektromobilu o 1 °C bez uvažování ztrát je potřeba energie o velikosti $Q = 1,661 \text{ W.hod}$.

3.2.3. Množství energie získané rekuperací elektromobilu Fiat Dobló

Množství zrekuperované energie definuji jako integrál součinu proudu na napětí z motoru pracujícího v generátorovém režimu:

$$Q_{\text{rek}} = 2,778 \cdot 10^{-7} \int_0^t \text{Bat}U(t) \cdot \text{Bat}I(t) dt, \quad (6)$$

kde zrekuperovaná energie Q [kW.hod], napětí na baterii $\text{Bat}U$ [V] a proud na baterii $\text{Bat}I$ [A]. Do vzorce dosazují pouze záporné hodnoty napětí, které odpovídají režimu rekuperování.

Při simulaci jízdy zkušební trasou zrekuperuje elektromobil Fiat Dobló 19,7 W.hod. Vzhledem k tomu, že model elektromobilu neumí pracovat s výškovým profilem trasy, zrekuperovaná energie je získána decelerací při snížení maximální povolené rychlosti. Jízda po rovině s různými rychlostními omezeními odpovídá lépe reálné jízdě než např. vycházet jen z jízdy z kopce.

3.2.4. Potenciál využití rekuperované energie jako přímého zdroje topení

V simulaci průjezdu zkušební trasou se ujede 14,5 km, přičemž se simulují tři decelerace. Získaná energie 19,7 W.hod by tedy mohla teoreticky zvýšit teplotu o více jak 10 °C, pokud by se neuvažovaly tepelné ztráty (velký podíl prosklených ploch karoserie snižuje její tepelnou izolaci), teplotní rozdíl exteriér/interiér, výměny a proudění vzduchu v interiéru ACH^{14} . Hodnota ACH je závislá na stupni ventilace, zapnuté vnitřní cirkulaci a stupni otevřených oken. Obecně se může pohybovat v rozmezí hodnot 2 až 40 h^{-1} . Pokud předpokládáme zavřená okna a vypnutou vnitřní cirkulaci (aby nedocházelo k opocení skel při vypnuté AC), můžeme odhadnout hodnotu ACH [21] na 20 h^{-1} .

Při uvažování tepelných ztrát interiéru 50 %, se celková zrekuperovaná energie sníží na hodnotu:

$$Q_{\text{rek ztr}} = Q_{\text{rek}} \cdot 0,5 = 9,85 \text{ W.hod} \quad (7)$$

¹⁴ ACH - air change per hour. Hodnota udávající počet výměn vzduchu o objemu kabiny vozidla za jednu hodinu.

3. PRAKTICKÁ ČÁST

Hodnotu energie potřebnou pro vytopení kabiny o $1\text{ }^\circ\text{C}$ je potřeba vynásobit hodnotou $\text{ACH} = 20\text{ h}^{-1}$, tzn. že za hodinu je potřeba ohřát množství vzduchu, které svým objemem odpovídá 20-ti násobku objemu kabiny, tedy $V_{\text{ACH}} = 20 V_{\text{kab}} = 100\text{ m}^3$. Pokud se předpokládá rozdíl teploty interiér/exteriér $10\text{ }^\circ\text{C}$, tak se pro ohřátí vzduchu v kabině o $1\text{ }^\circ\text{C}$ musí vzduch o objemu V_{ACH} ohřát o $11\text{ }^\circ\text{C}$, přičemž ohřátí o $10\text{ }^\circ\text{C}$ odpovídá vyrovnání teplot mezi okolím elektromobilu a jeho interiérem. Celková potřebná energie je pak rovna:

$$Q_{\text{int}} = Q \cdot 20 \cdot 11 = 1,661 \cdot 20 \cdot 11 = 365,4\text{ W.hod} \quad (8)$$

Celková zrekuperovaná energie je úměrná $\approx 2,7\%$ z celkové energie potřebné pro vytopení kabiny. Jedná se o velmi přibližnou energetickou bilanci, která vychází z odhadu hodnot, které vzhledem k chybějícím parametrům elektromobilu Fiat Dobló nemohly být ověřeny. Z bilanční rovnice vyplývá, že přímé využívání energie z motoru v generátorovém režimu může přinést zvýšení teploty vzduchu v interiéru v řádu desetin až setin stupně Celsia.

K vyhodnocení potenciálu zrekuperované energie je kromě toho, že se jednalo o čistě teoretický výpočet, zapotřebí zdůraznit formu, jakou se energie rekuperovala. Výsledná užitková hodnota energie odpovídá trase dlouhé $14,5\text{ km}$, přičemž samotná rekuperace nastala pouze v případě brzdění mezi úseky se sníženou rychlostí. Vzhledem k tomu, že model nepracoval s nadmořskou výškou, nemohla proběhnout simulace jízdy z kopce, kdy rekuperace dosahuje vyšších hodnot transformací potenciální energie na elektrickou.

Dále je důležité uvědomit si rozdílné hodnoty kinetické energie na začátku a konci jízdy. Na začátku byla nulová rychlost (tedy nulová kinetická energie) a na konci se elektromobil pohyboval rychlostí $13,21\text{ m.s}^{-1}$, což odpovídá hodnotě kinetické energie:

$$E_k = \frac{1}{2} m_e v_k^2 = \frac{1}{2} 1898 \cdot 13,21^2 = 165604,4\text{ J} = 46\text{ W.hod.} \quad (9)$$

Pokud by vozidlo decelerovalo na nulovou rychlost rekuperováním (ne plachtěním), pak by se zrekuperovaná energie zvýšila.

Výsledky naznačují slibný potenciál využití zrekuperované energie. Použité vztahy musely realitu velmi zjednodušit, pro exaktnější zhodnocení by bylo zapotřebí vytvořit přesnější model.

4. Závěr

Cílem této práce bylo seznámit se s prostředím MATLAB Simulink a nelineárním modelem elektromobilu Fiat Dobló, který reprezentuje chování reálného elektromobilu. S využitím modelu Fiat Dobló a trasovými podklady z projektu IMPROVE pak regulovat vstupní krouticí moment a tím optimalizovat celkovou spotřebu energie potřebnou pro projetí trasy. Dalším cílem bylo zhodnotit potenciál využití energie jako přímého zdroje topení.

Teoretická část seznamuje s problematikou adaptivního tempomatu a jeho nadstavbou, která zpracovává více různých dat, mezi které patří mapové podklady jako zdroj informace o profilu trasy a jejím dopravním omezení. Dále jsou zmíněny novodobé trendy snižování spotřeby a emisí CO₂, které doplňují téma práce.

V praktické části se nejprve zabývám problematikou optimalizace spotřeby. Pro tento účel jsem sestavil blokové schéma v Simulinku, které je schopno simulovat průjezd zkušební trasou a regulovat rychlost elektromobilu změnou krouticího momentu na vstupu. Simulace průjezdu trasou je realizována ve dvou režimech - s rekuperací a bez rekuperace (plachtění). Při regulování soustavy P a PI regulátorem bylo nejnižší spotřeby dosaženo v režimu s plachtěním, aniž by se výrazněji snížila průměrná rychlost. Problémem takové jízdy bylo porušení dopravních omezení. Z tohoto důvodu bylo nutné optimalizovat dojezdovou křivku, která zabezpečila dojezd do místa se sníženou rychlostí v souladu s dopravními předpisy. Optimalizací rozjezdové křivky se pak snížila míra akcelerace a současně celková spotřeba, jejíž konečnou hodnotu se podařilo snížit o 4,2 % při poklesu průměrné rychlosti o 1,6 %.

Druhá kapitola praktické části ověřuje potenciál přímého využití rekuperované energie pro topení elektromobilu. Měření prokázala, že i trase dlouhé 14,5 km, bez uvažování výškového profilu, lze zrekuperovat určitou energii. Problémem takového využití je však vysoká energetické náročnost topení elektromobilu a velké tepelné ztráty kabiny elektromobilu. Přímé využití rekuperované energie je z hlediska vyšší účinnosti výhodné, ale jako doplněk k hlavnímu systému topení. Tato teoretická úvaha byla nad rámec rozsahu bakalářské práce.

Zpracováním práce jsem splnil všechny vytyčené cíle. Jako přínos hodnotím seznámení s problematikou lepšího hospodaření s energií a ověření spoření energie použitím prediktivní regulace simulace jízdy elektrovozidla v různých režimech.

Seznam použitých značek a symbolů

β	teplotní součinitel objemové roztažnosti	$[\text{K}^{-1}]$
λ	tepelná vodivost	$[\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}]$
ν	kinematická viskozita	$[\text{m}^2.\text{s}^{-1}]$
ρ	hustota	$[\text{kg.m}^{-3}]$
τ	odezva vstupu na výstup zpracování signálu	$[\text{s}^{-1}]$
ρ	hustota	$[\text{kg.m}^{-3}]$
a_a	zrychlení při akceleraci	$[\text{m.s}^{-2}]$
a_d	zrychlení při deceleraci	$[\text{m.s}^{-2}]$
$BatI$	proud na baterii	$[\text{I}]$
$BatU$	napětí na baterii	$[\text{V}]$
c	rychlost světla	$[\text{m.s}^{-1}]$
c_p	měrná tepelná kapacita	$[\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}]$
d	vzdálenost radaru od vozidla	$[\text{m}]$
K	statická citlivost	$[-]$
m	hmotnost	$[\text{kg}]$
m_e	hmotnost elektromobilu	$[\text{kg}]$
Q	energie	$[\text{J}, \text{W.hod}]$
Q_{rek}	zrekuperovaná energie	$[\text{J}, \text{W.hod}]$
$Q_{\text{rek ztr}}$	zrekuperovaná energie se započtením ztrát	$[\text{J}, \text{W.hod}]$
Q_{int}	energie na ohřev interiéru	$[\text{J}, \text{W.hod}]$
r_0	zesílení	$[-]$
R^2	hodnota spolehlivosti	$[-]$
s	dráha	$[\text{m}]$
s_a	dráha při akceleraci	$[\text{m}]$
s_d	dráha při deceleraci	$[\text{m}]$
t	čas	$[\text{s}]$
T	teplota	$[\text{° C}]$
T_i	integrační časová konstanta	$[\text{s}]$
T_n	doba náběhu	$[\text{s}]$
T_u	doba průtahu	$[\text{s}]$
v	rychlost	$[\text{m.s}^{-1}]$
V_{kab}	objem kabiny elektromobilu	$[\text{m}^3]$
V_{ACH}	objem vzduchu, který se za 1 hodinu vymění v kabině elektromobilu	$[\text{m}^3]$
v_1	počáteční rychlost	$[\text{m.s}^{-1}]$
v_k	konečná rychlost	$[\text{m.s}^{-1}]$

Seznam použité literatury a zdrojů

- [1] REIF, Konrad. *Fundamentals of Automotive and Engine Technology: Standard Drives, Hybrid Drives, Brakes, Safety Systems*, pp. 202-209. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014. ISBN 978-3-658-03972-1.
- [2] B. Liu and A. El Kamel, *V2X-Based Decentralized Cooperative Adaptive Cruise Control in the Vicinity of Intersections*, vol. 17, no. 3, pp. 644-658, March 2016. doi: 10.1109/TITS.2015.2486140
- [3] VAVŘÍK, Jan. *Adaptive Cruise Control*, pp. 4-5, Projekt CZ.1.07/2.3.00/09.0086, 2010.
- [4] *Novinka - prediktivní tempomat*, 2015. [Online]. Available: <https://www.paccarparts.info>
- [5] Brunner, K.H. *Kraftfahrzeug umfassend ein Fahrerassistenzsystem mit einer Steuerungseinrichtung zur automatischen Längsführung*, Google Patents, 2015. EP Patent 2,529,993. Available: <http://www.google.com/patents/EP2529993B1?cl=de>
- [6] *Kenworth's Predictive Cruise Control Looks Ahead to Save Fuel*, 2015. [Online]. Available: <http://www.truckinginfo.com>
- [7] Nica, Gabriel. *BMW Showcases Predictive Gear Shift Technology on the New 1 Series*, 2015. [Online]. Available: <https://www.autoevolution.com>
- [8] *Porsche InnoDrive including adaptive cruise control*, 2017. [Online]. Available: <http://http://www.porsche.com>
- [9] Wiesbeck Werner and Reichardt Lars. *C2X communications overview*, pp. 868-871, 2010 URSI International Symposium on Electromagnetic Theory, 2010. ISBN: 978-1-4244-5155-50.
- [10] Hamida, E.B.; Noura, H.; Znaidi, W. *Security of Cooperative Intelligent Transport Systems: Standards, Threats Analysis and Cryptographic Countermeasures*. Electronics 2015, 4, pp. 380-423, 2015. doi:10.3390/electronics4030380
- [11] M. Kubička et al., *Performance of current eco-routing methods*, 2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), Gothenburg, 2016, pp. 472-477. doi: 10.1109/IVS.2016.7535428

- [12] K. Boriboonsomsin, M. J. Barth, W. Zhu and A. Vu, *Eco-Routing Navigation System Based on Multisource Historical and Real-Time Traffic Information*, in IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 13, no. 4, pp. 1694-1704, Dec. 2012. doi: 10.1109/TITS.2012.2204051
- [13] H. Chen, B. Guo, Z. Yu, A. Chin, J. Tian and C. Chen, *Which Is the Greenest Way Home? A Lightweight Eco-Route Recommendation Framework Based on Personal Driving Habits*, 2016 12th International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Networks (MSN), Hefei, China, 2016, pp. 187-194. doi: 10.1109/MSN.2016.038
- [14] Jack N. Barkenbus, *Eco-driving: An overlooked climate change initiative*, Energy Policy, Volume 38, Issue 2, 2010, pp. 762-769, ISSN 0301-4215, Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2009.10.021>.
- [15] Husák, J., *Prediktivní řízení komerčního elektromobilu pro zvýšení dojezdu*, Bakalářská práce, České vysoké učení technické, Strojní fakulta, Ústav mechaniky, 2016.
- [16] P. Steinbauer, J. Husák, F. Pasteur, P. Denk, J. Macek, and Z. Šika, *Predictive control of commercial e-vehicle using a priori route information*, pp. 1–10, 3rd Biennial International Conference on Powertrain Modelling and Control Testing, Mapping and Calibration, Loughborough, 2016.
- [17] Pavel Steinbauer, Jan Macek, Josef Morkus, Petr Denk, Zbyňek Šika and Florent Pasteur, *Aspects for velocity profile optimization for fleet operated vehicles*, pp. 1–18, Springer International Publishing, Cham, 2017.
- [18] Hofreiter M., *Základy automatického řízení*, České vysoké učení technické, Praha, 2014, ISBN 978-80-01-05007-1.
- [19] Hakan O. Nilson, *Comfort Climate Evaluation with Thermal Manikin Methods and Computer Simulation Models*, Department of Civil and Architectural Engineering Royal Institute of Technology, Sweden, 2004, pp. 48–53, ISBN 91-7045-703-4.
- [20] Šesták J., Bukovský J., Houška M., *Tepelné pochody - transportní a termodynamická data*, ČVUT Praha, 1986.
- [21] Ott W., Klepeis N. E., Switzer P., *Air change rates of motor vehicle and in-vehicle pollutant concentrations from secondhand smoke*, Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology, 2008, pp. 312-325, doi: 10.1038/sj.jes.7500601.

Seznam obrázků, grafů a tabulek

Seznam obrázků

Obrázek 1	Adaptivní tempomat [1]	9
Obrázek 2	Rychlostní profil při změně rychlosti ze 100 km/h na 60 km/h [5]	12
Obrázek 3	Prediktivní tempomat (Kenworth) [6]	12
Obrázek 4	Porsche InnoDrive [8]	13
Obrázek 5	V2X komunikace [10]	15
Obrázek 6	Graf kandidátů na optimální trasu [13]	16
Obrázek 7	Nelineární model Fiat Dobló v Simulinku (Blackbox)	18

Seznam grafů

Graf 1	Rozdělení fáze na čtyři sekce [17]	22
Graf 2	Rychlostní limit trasy	23
Graf 3	Rychlostní profil trasy	23
Graf 4	Rychlostní profil trasy ($r_0 = 0,1$)	25
Graf 5	Rychlostní profil trasy ($r_0 = 100$)	26
Graf 6	Rychlostní profil trasy ($r_0 = 10$)	27
Graf 7	Vývoj spotřeby energie a průměrné rychlost ($r_0 = 10$)	27
Graf 8	Přechodová charakteristika	28
Graf 9	Výpočet doby průtahu T_u	29
Graf 10	Rychlostní profil trasy s rekuperací - PI regulátor	30
Graf 11	Vývoj spotřeby energie a průměrné rychlosti trasy s rekuperací - PI regulátor	30
Graf 12	Rychlostní profil trasy bez rekuperace - PI regulátor	31
Graf 13	Vývoj spotřeby energie a průměrné rychlosti trasy bez rekuperace - PI regulátor	31
Graf 14	Rychlostní profil trasy bez rekuperace- PI regulátor	32
Graf 15	Vývoj spotřeby energie a průměrné rychlosti trasy bez rekuperace - PI regulátor	32
Graf 16	Aproximace dojezdové křivky I.	33
Graf 17	Aproximace dojezdové křivky II.	34
Graf 18	Aproximace rozjezdové křivky I.	34
Graf 19	Rozjezdová křivka II.	35
Graf 20	Optimalizovaný rychlostní profil trasy bez rekuperace - PI regulátor	35
Graf 21	Optimalizovaný rychlostní profil trasy bez rekuperace - PI regulátor	36
Graf 22	Zásah akční veličiny	36
Graf 23	Komfortní zóny pro jednotlivé části těla[19]	38
Graf 24	Průběh teploty v interiéru (1. jízda)	39

Graf 25	Průběh teploty v interiéru (2. jízda)	40
---------	---	----

Seznam tabulek

Tabulka 1	Vstupy modelu Fiat Dobló	19
Tabulka 2	Výstupy modelu Fiat Dobló	19
Tabulka 3	Výchozí parametry modelu Fiat Dobló	20
Tabulka 4	Naměřené hodnoty - jízda s rekuperací	25
Tabulka 5	Naměřené hodnoty - jízda bez rekuperace	26
Tabulka 6	Určení stavitelných parametrů dle metody Zieglera a Nicholse	29
Tabulka 7	Naměřené hodnoty - jízda s rekuperací	30
Tabulka 8	Naměřené hodnoty - jízda bez rekuperace	31
Tabulka 9	Naměřené hodnoty - oba režimy jízdy	33
Tabulka 10	Naměřené hodnoty - oba režimy jízdy	36
Tabulka 11	Naměřené hodnoty (1. jízda)	39
Tabulka 12	Naměřené hodnoty (2. jízda)	40
Tabulka 13	Fyzikální parametry vzduchu při 20 °C	41

Seznam příloh

- Blokové schéma simulace průjezdu trasou elektromobilu Fiat Dobló v Simulinku (CD)