

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO
A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Ing. Milan Špičák

POKROČILÉ ALGORITMY ŘÍZENÍ POHONNÝCH JEDNOTEK
ADVANCED CONTROL ALGORITHMS OF POWERTRAIN UNITS

Zkrácená verze Ph.D. Thesis

Obor:	Konstrukční a procesní inženýrství
Školitel:	prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.
Oponenti:	doc. Ing. Michal Puškár, Ph.D. Ing. Dušan Slimařík, Ph.D. Ing. Pavel Kučera, Ph.D.
Datum obhajoby:	31. 10. 2019

Klíčová slova

točivý moment, počítačové řízení, pohonná jednotka, výpočtový model, regulátor, měření momentu, spalovací motor

Keywords

engine torque, control systems, vehicle powertrain, computational model, regulator, torque measurement, combustion engine

Disertační práce je uložena v Areálové knihovně fakulty strojního inženýrství v Brně.

© Milan Špičák, 2019
ISBN 80-214-
ISSN 1223-4198

Obsah

1 ÚVOD.....	5
2 VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE.....	5
3 SHRUTÍ SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ.....	6
3.1 Strategie řízení pohonných jednotek.....	6
4 ODHAD HODNOTY TOČIVÉHO MOMENTU.....	7
4.1 Přehled metod používaných pro odhad točivého momentu	7
4.2 Odhad točivého momentu v reálném čase	8
5 ŘÍZENÍ MOTORU V ZÁVISLOSTI NA TOČIVÉM MOMENTU.....	10
5.1 Koordinátor točivého momentu	11
5.2 Vývojové prostředí a kalibrace systému	12
5.3 Aplikace na vozidle.....	13
6 EXPERIMENTÁLNÍ OPTIMALIZACE ZRYCHLENÍ VOZIDLA.....	15
6.1 Trakční točivý moment	15
6.2 Strategie řízení	17
7 ZÁVĚR.....	19
8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	21
9 CURRICULUM VITAE	23
10 ABSTRACT.....	24

1 ÚVOD

Konstruktéři pohonných jednotek vysokovýkonných sportovních vozidel jsou vystaveni tlaku nejen na maximální výkon vozidla, ale i na jeho spolehlivost a ovladatelnost během náročných situací. Sportovní vozidla či přímo závodní prototypy byly historicky vždy velmi účinným marketingovým nástrojem výrobců automobilů nebo jejich dodavatelů. Zároveň ty nejprestižnější kategorie jako jsou Formule 1 či prototypy LeMans pro vytrvalostní závody jsou i vzácným vývojovým prostředím v oblasti nových technologií a jejich uplatnění v náročných podmínkách. Bývalo kupříkladu zvykem vyrovnávat výkon mezi závodníky omezením maximálního průtoku vzduchu, například restriktorem v sání či stanovením limitu maximální hodnoty tlaku v sání. Moderní trend snižování emisí a zvyšování účinnosti strojů přivedl výzvu i do oblastí soutěžních automobilů, a to stanovením maximální meze průtoku paliva čili množstvím aktuálně dostupné energie. V takové situaci jsou konstruktéři motivováni vytvářet účinné agregáty a objevovat technologie, které mohou najít uplatnění i v běžném silničním provozu.

Samostatnou kapitolou jsou systémy rekuperace energie, které společně se spalovacím motorem vytváří tzv. hybridní pohonné jednotky. Jedná se hlavně o rekuperaci energie kinetické, zejména při brždění vozu, nebo energie tepelné, která je za normálních okolností ztrátová od spalovacího motoru. V každém případě tyto přídatné systémy poskytují nové výzvy nejen pro jejich konstruktéry, ale pro celou řadu dalších odvětví jako například inženýři řídicích strategií. Pokročilé nástroje v oblasti výpočetní techniky umožňují nejen návrh komplexních řídicích systémů, ale i jejich simulaci a testování.

2 VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE

Cíle disertační práce je možno shrnout do následujících bodů:

- Sestavit algoritmus pro odhad točivého momentu v reálném čase
- Definovat koordinátor točivého momentu mezi jednotlivými strategiemi
- Kalibrace systému
- Experimentálně ověřit dílčí parametry

Disertační práce je vypracovávána ve spolupráci s technickými partnery, v návaznosti na současný vývoj nové generace řídicích systémů pro hlavní odvětví světového automobilového sportu. Spolupráce je zaměřena na návrh a optimalizaci vybraných algoritmů řízení vysokovýkonných pohonných jednotek. Měření jsou prováděna na vozidlových či motorových prototypech, kde jsou vyhodnocovány následující parametry:

- Validace algoritmu pro odhad točivého momentu
- Kalibrace a validace koordinátoru točivého momentu

3 SHRNUÍ SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

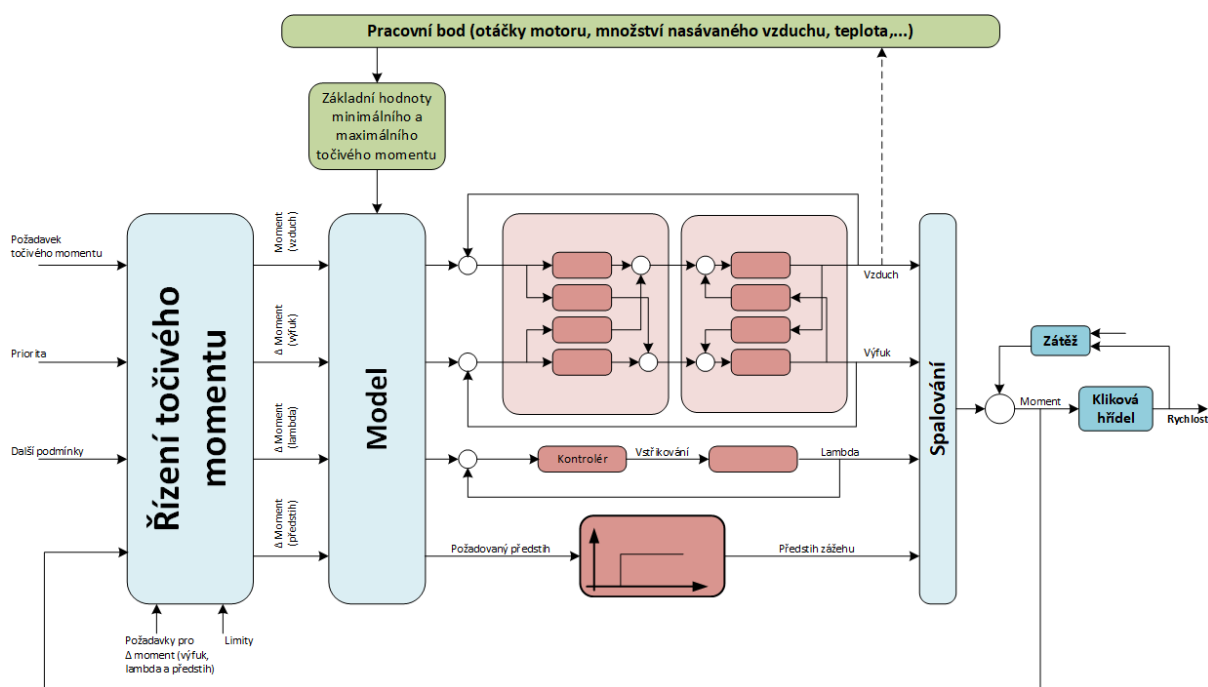
3.1 STRATEGIE ŘÍZENÍ POHONNÝCH JEDNOTEK

Strategie řízení lze rozdělit do několika kategorií zejména dle úrovně jejich použití. Lze říci, že dílčí úrovně jsou řízeny hierarchicky, kdy strategie vyšší úrovně se stará o správný chod strategie úrovně nižší.

Poptávka po pokročilejších algoritmech řízení vyžaduje nalezení společného jmenovatele z hlediska komunikace. A to nejen v rámci jednotlivých pokročilých strategií, ale například i s dalšími systémy vozidla.

Řidič je takovým kontrolérem nejvyšší úrovně. Jeho pokyny vozidlu, potažmo dalším systémům, jsou komunikovány přes daná rozhraní. Zjednodušeně řečeno, směr vozidla udává úhel natočení volantu, brzdou sílu pak míra stlačení brzdového pedálu a důležitý vstup pro pohonnou jednotku je poloha plynového pedálu, která vyjadřuje poptávku po trakční síle čili zrychlení vozidla. Jinými slovy lze říci, že se jedná o řízení požadovaného točivého momentu dodávaného pohonnou jednotkou.

Točivý moment je tedy hlavním tzv. požadavkem (set-pointem) z pohledu řídicího algoritmu pohonné jednotky. U moderních sportovních vozů, kde je cílem dosažení co největší výkonosti není zdaleka jediným. Důležité parametry jsou požadovány od dílčích systémů, například sledování trakčního limitu pneumatik, řazení převodovky, dodávaného točivého momentu hybridními součástmi vozidla apod. [1] [2]



Obr. 1 Příklad dvouvrstvého řídicího systému

4 ODHAD HODNOTY TOČIVÉHO MOMENTU

Kliková hřídel spalovacího motoru je vystavena komplexnímu zatížení od různých sil během spalovacích procesů jednotlivých válců. Tyto jednotlivé síly způsobují, že se kliková hřídel otáčí danou úhlovou rychlostí. Zároveň lze říci, že tato rychlost otáčení se skládá ze dvou složek, a to střední, pomalu se měnící rychlosti otáčení, a kmitavé, rychle se měnící složky, okolo právě té střední hodnoty, způsobené pracovními cykly jednotlivých válců. Výsledek odhadu točivého momentu je silně závislý na korelaci těchto charakteristik klikové hřídele (poloha, rychlost, kmitání) k vytvářenému točivému momentu od jednotlivých válců.

V této části práce je kladen důraz na aplikovatelnost metody odhadu točivého momentu v reálném čase s cílem dalšího použití odhadnutých hodnot točivého momentu pro řízení procesů spalovacího motoru. Následující odstavce rozebírají dvě odlišné metody odhadu točivého momentu. „Statistická metoda odhadu točivého momentu“ a „Frekvenční analýza“ odhadu točivého momentu. [3] [4] [5]

4.1 PŘEHLED METOD POUŽÍVANÝCH PRO ODHAD TOČIVÉHO MOMENTU

Statistická metoda odhadu točivého momentu

Tato metoda vychází z teorie zpracování signálu, proto je nazývána „Statistická metoda odhadu“, která umožňuje získat spolehlivý odhad na základě předpovědi vývoje několika proměnných metodou nejmenších čtverců. Tato procedura byla původně uplatňována ve zpracování měřených signálů a v minulosti rozšířena zejména v oblasti studie turbulencí. Byla primárně používána k odhadu vázaných průměrů z náhodných statistik, tzv. vzájemné korelace. Hlavní výhodou této metody v porovnání s dalšími je, že veškerá komplexita daného fyzikálního systému je oddělena z dat ve formě lineárních, kvadratických či vyšších korelačních funkcí. Jakmile jsou sestaveny korelační modely, tak odhadování spočívá v prostém vyhodnocování polynomiálních funkcí na základě měřených dat. Tudíž lze požadovaný odhad získat v reálném čase s nízkou náročností na výpočetní výkon. V tomto případě je Statistická metoda používána k odhadu spalovacího tlaku a tím indikovaného momentu na základě měření rychlosti (zrychlení) klikové hřídele. [6] [7]

Frekvenční analýza pro odhad točivého momentu

Jedna z hlavních výhod použití frekvenční analýzy je, že přesnost odhadu lze zvýšit výpočtem ve frekvenční doméně v porovnání s časovou doménou či doménou úhlu natočení klikové hřídele, při uvažování pouze několika frekvenčních složek měřené rychlosti otáčení. Tato technika je zejména vhodná vzhledem k recipročnosti spalovacího cyklu motoru, čímž je možné uplatnění Fourierovy transformace jako nástroje pro rozbor otáček motoru v dynamice klikové hřídele. Zpracování ve frekvenční doméně užitím Diskrétní Fourierovy transformace, v podstatě jako

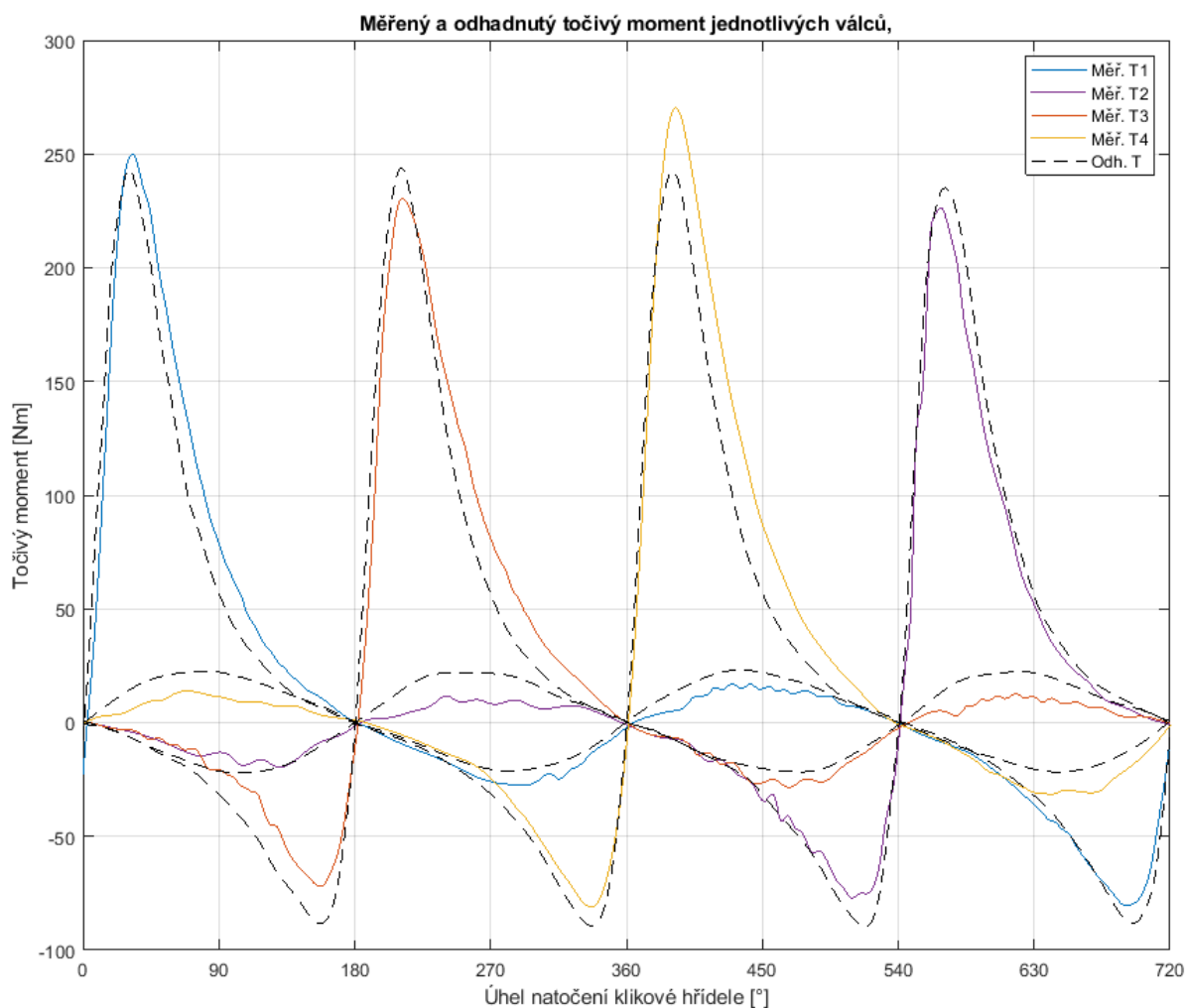
hřebenového filtru rychlosti otáček motoru, které nesou veškeré požadované informace a zároveň jsou vždy přesně synchronní s periodou zapalování. Takový rozbor ve frekvenční doméně je efektivním nástrojem zejména proto, že celý proces zjednoduší na algebraickou operaci a dynamický model, který reprezentuje rotační hmoty, kde musí být známý pouze pro jmenovité a následné harmonické frekvence k periodě zapalování. [8] [9]

4.2 ODHAD TOČIVÉHO MOMENTU V REÁLNÉM ČASE

V této části jsou prezentovány výsledky odhadu točivého momentu motoru v reálném čase společně s metodikou, která to umožňuje.

Simulace v reálném čase

Bylo použito několik softwarových nástrojů, které umožnily odhad točivého momentu v reálném čase na experimentálně získaných datech měření motoru. Obr. 2 znázorňuje vybrané výsledky ze simulovaného odhadu točivého momentu.

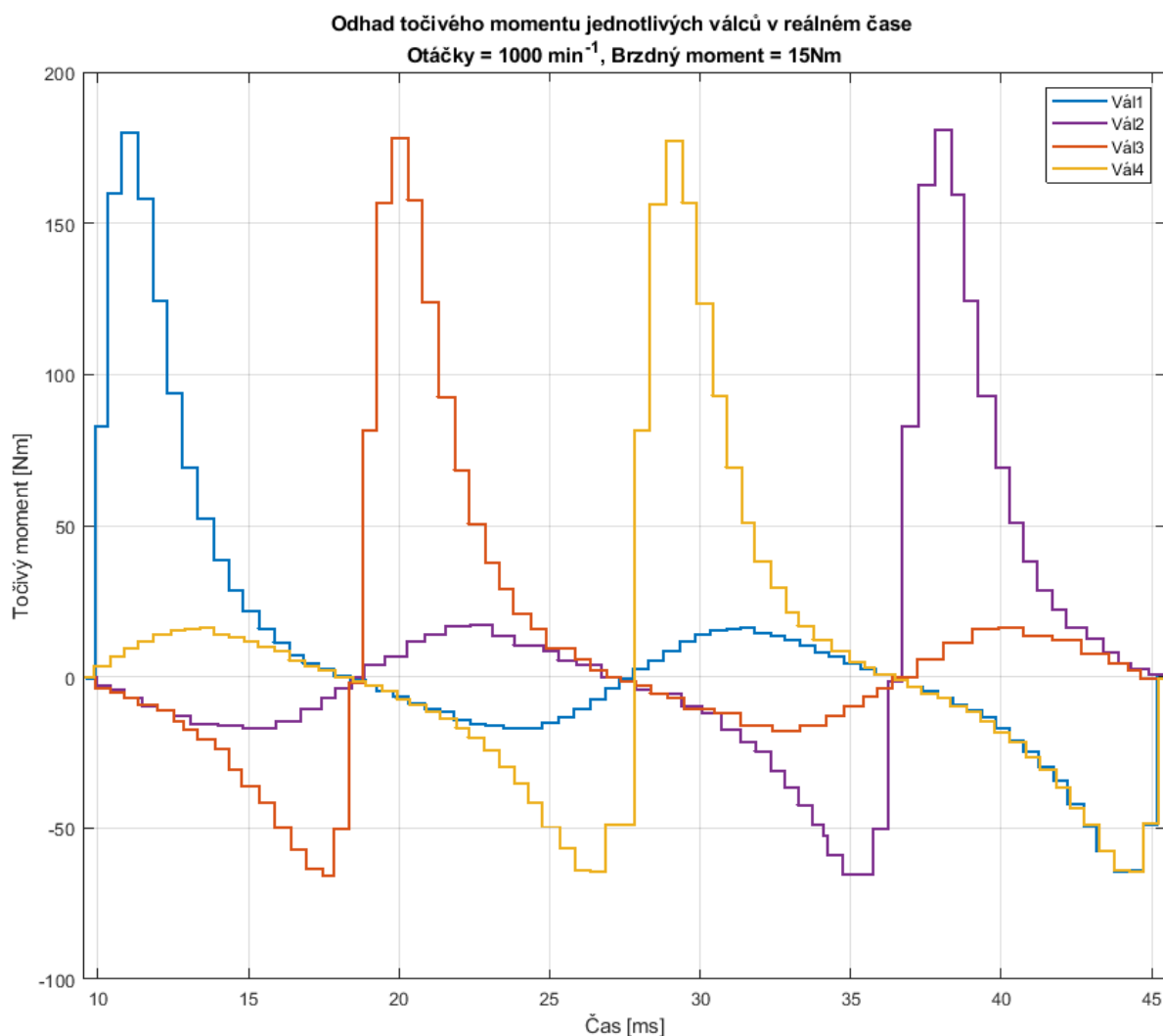


Obr. 2 Odhad indikovaného točivého momentu pro jednotlivé válce

Odhad v reálném čase na motoru

Pro výpočetní operace v reálném čase na skutečném motoru byly využity volné kapacity zařízení primárně sloužícího pro vysokorychlostní záznam dat, nicméně které umožňuje doprogramování dalších operací přímo na platformě procesoru ARM Cortex-A9. Takto bylo dosaženo zpracování jednotlivých signálů i výpočetních operací v reálném čase na běžícím motoru.

Odhad indikovaného točivého momentu pro jednotlivé válce je proveden použitím statistické metody. Obr. 3 znázorňuje příklad odhadnutého indikovaného točivého momentu v reálném čase, 1000 min^{-1} a 15 Nm zátěže.

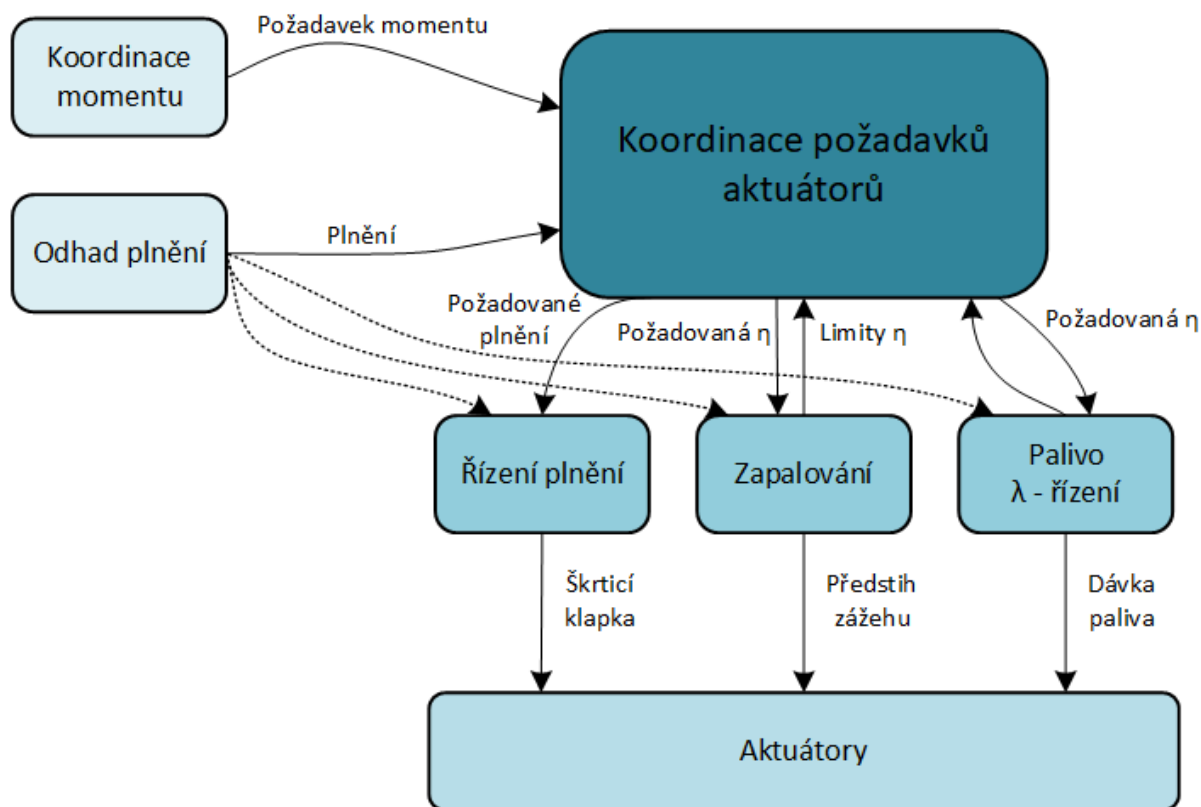


Obr. 3 Odhad točivého momentu v reálném čase pro jednotlivé válce

Je zřejmé, že indikovaný točivý moment lze úspěšně odhadovat i v reálném čase bez použití specifických snímačů použitím „Statistické metody odhadu“.

5 ŘÍZENÍ MOTORU V ZÁVISLOSTI NA TOČIVÉM MOMENTU

Řízení motoru v závislosti na točivém momentu znamená, že točivý moment je hlavní společnou veličinou mezi řídicí jednotkou motoru a dalšími dílčími soustavami řízení pohonné jednotky.



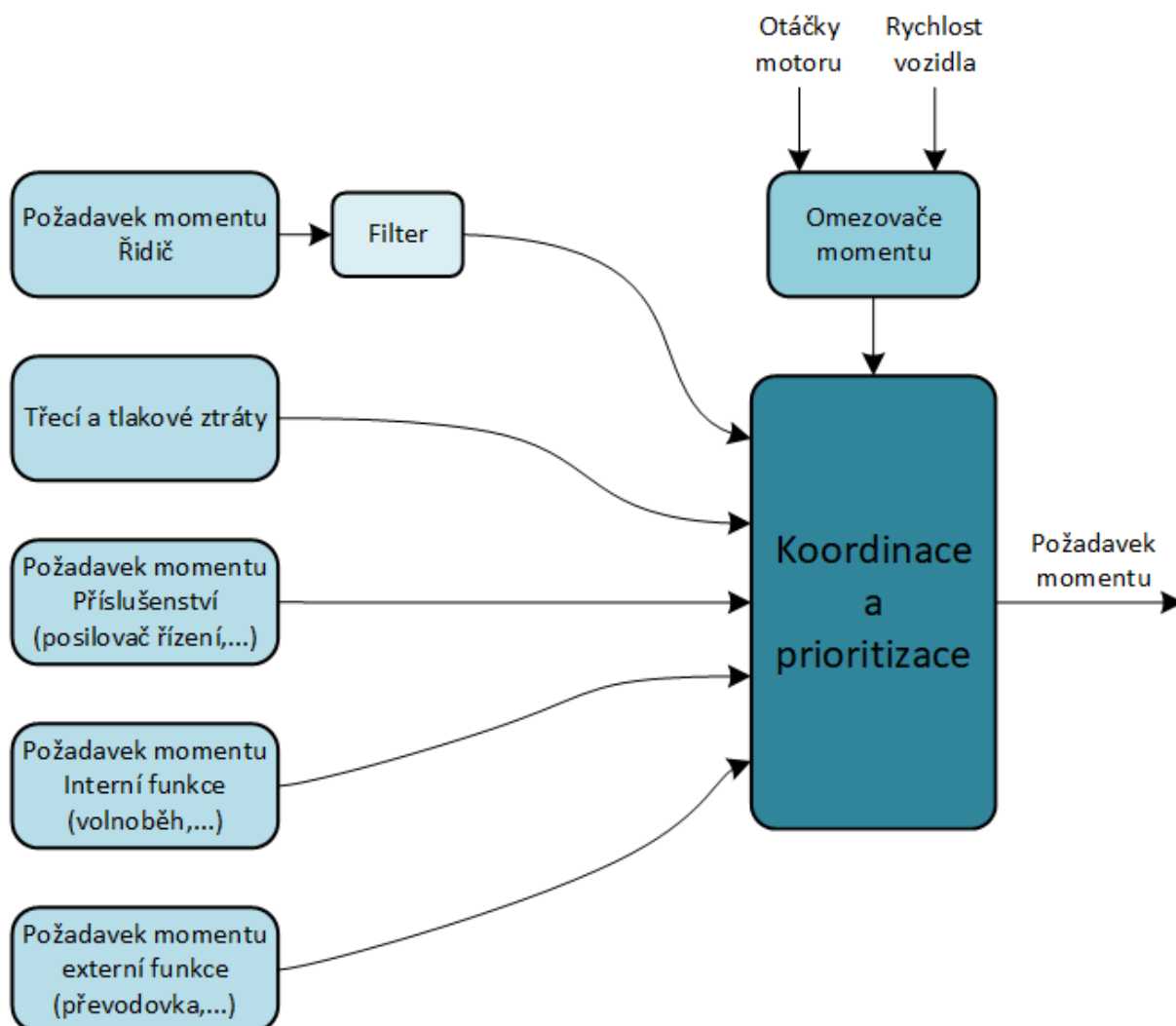
Obr. 4 Struktura momentového řízení zážehového motoru

Na Obr. 4 je znázorněna základní struktura momentového řízení zážehového motoru. Hlavní proměnná „požadavek momentu“ je výchozí veličinou pro výpočet požadovaných cílových hodnot koncových „aktuátorů“ majících vliv na vznik točivého momentu. Například se jedná o polohu škrticí klapky, předstih zážehu či dávku paliva. Požadované hodnoty předstihu zážehu a směšovacího poměru jsou vyjádřeny jako jednotlivé součinitele účinnosti η , kde mají význam jako podíl aktuálního točivého momentu při současném nastavení akčních členů, ku dosažitelnému točivému momentu při optimálním nastavení akčních členů za daných podmínek. Nedílnou součástí je také stanovení horních a dolních mezí těchto součinitelů účinností pro předstih zážehu a dávku paliva, v rámci řídicích smyček. Koordinační modul řídicího systému vyhodnotí požadavek na součinitele účinnosti η_{zapal} a η_{λ} a v rámci jednotlivých dílčích řídicích modulů je pak tento požadavek převeden na požadované hodnoty předstihu zážehu a dávky paliva. [10]

5.1 KOORDINÁTOR TOČIVÉHO MOMENTU

Zásadní vliv na dobrou odezvu motoru vozidla má vztah mezi požadavkem točivého momentu od řidiče vozidla (polohy akceleračního pedálu) a reálné reakce motoru vozidla. Kvůli vlivům třecích ztrát motoru, či momentu spotřebovaném dalšími systémy vozidla, jako jsou například posilovač řízení, dobíjení, či klimatizace není dodáváný moment motorem ekvivalentní momentu požadovaným řidičem, proto je nutné tuto rovnici doplnit o další komponenty mající vliv na odběr točivého momentu. Jednotlivé podsystémy mohou také vyžadovat specifické vyjádření točivého momentu. Například řízení volnoběhu vyžaduje rychlou změnu točivého momentu k řízení otáček motoru.

Všechny tyto požadavky jsou koordinovány a seřazeny dle priorit právě v koordinátoru točivého momentu. Výsledný požadavek točivého momentu je omezen fyzikálními limity a požadavky dalších podsystémů jako třeba řízení otáček motoru. (Obr. 5)



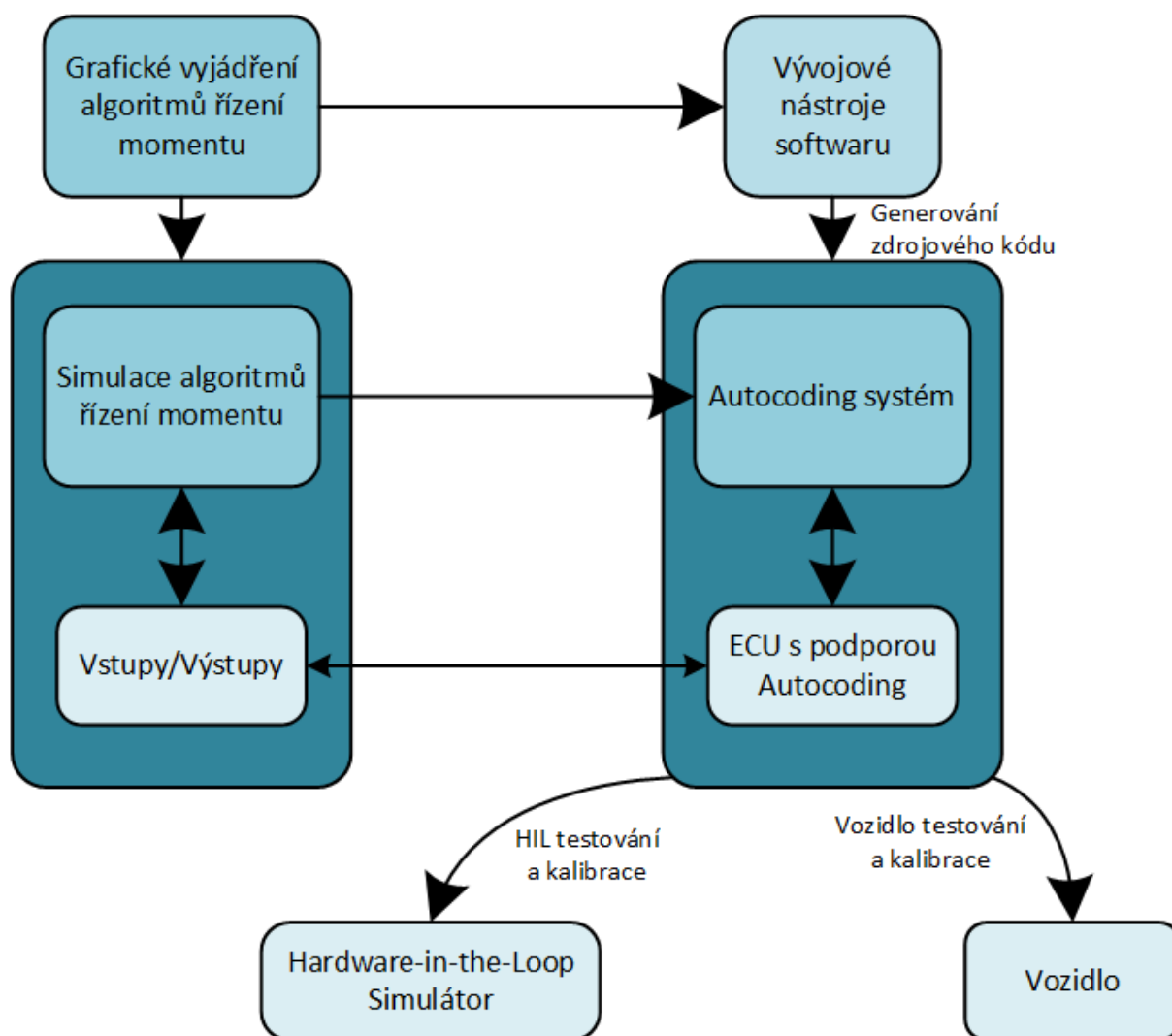
Obr. 5 Tok požadavku točivého momentu

5.2 VÝVOJOVÉ PROSTŘEDÍ A KALIBRACE SYSTÉMU

Algoritmy řízení jsou definovány graficky vývojovými diagramy, které jsou pomocí vývojového SW kompilovány přímo do mikro-kontroléru. Je zvolena modulární architektura systému včetně stavového řadiče, který přepíná mezi jednotlivými módy motoru, například řízení předstihu, jízda, omezovač rychlosti.

Řídicí systém je validován a testován pomocí hardware-in-the-loop (HIL) simulátoru. Model je parametrizován pro dané vozidlo, které je použito pro vývoj této strategie. Základní nastavení je také realizováno za použití HIL technologie.

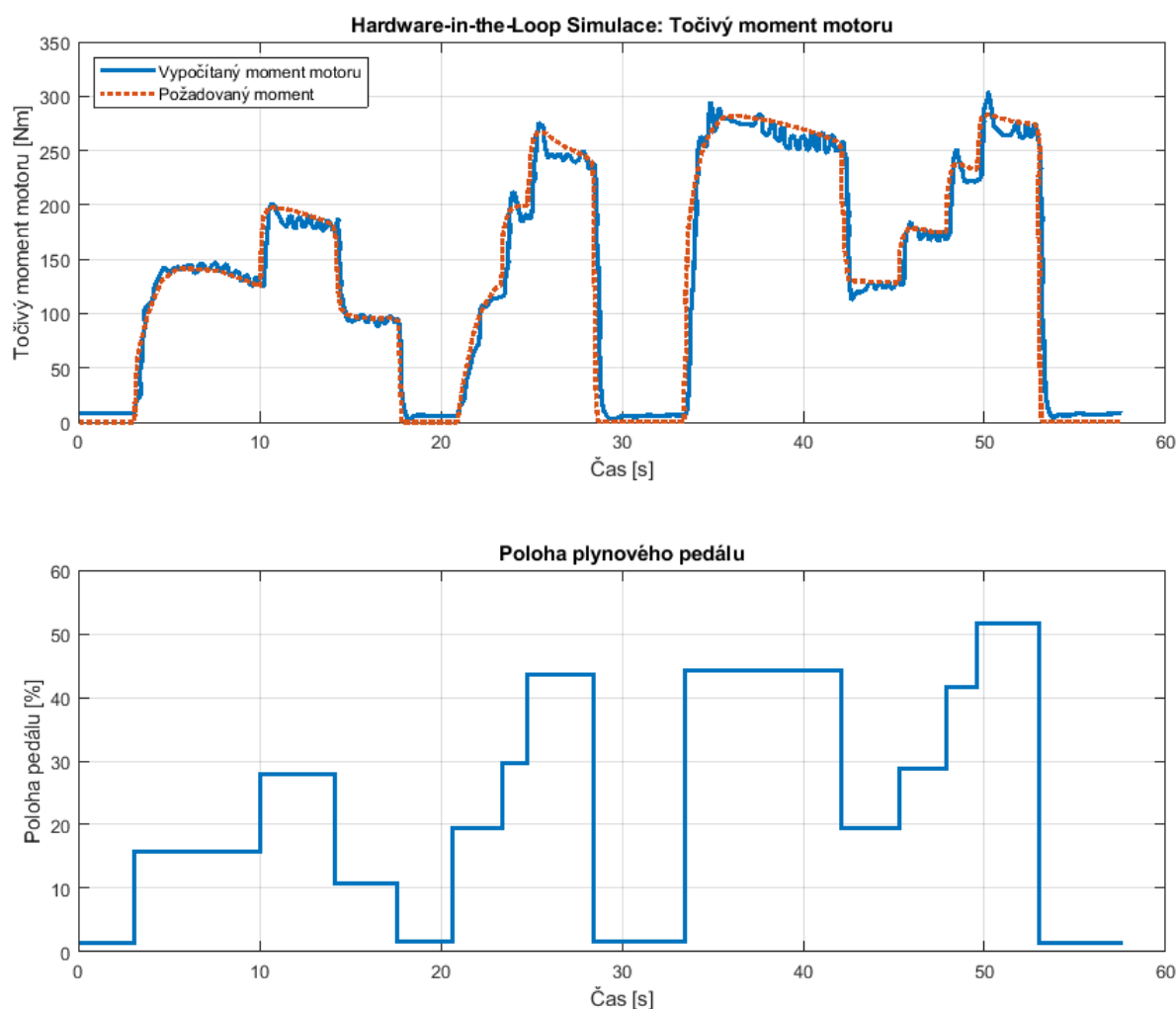
Schématické znázornění vývojového prostředí a systémové architektury je znázorněno na Obr. 6. [11] [12]



Obr. 6 Vývojové prostředí

Výsledky simulace

Na Obr. 7 je možné vidět bližší korelaci mezi požadavkem točivého momentu a aktuálním točivým momentem motoru.



Obr. 7 HIL Simulace: Požadavek na točivý moment a simulovaný moment

5.3 APLIKACE NA VOZIDLE

Tato strategie je zkoušena na vozidle s atmosféricky plněným čtyřválcovým motorem o objemu 1999cm³. Pro tyto zkoušky je vozidlo navíc vybaveno následovně:

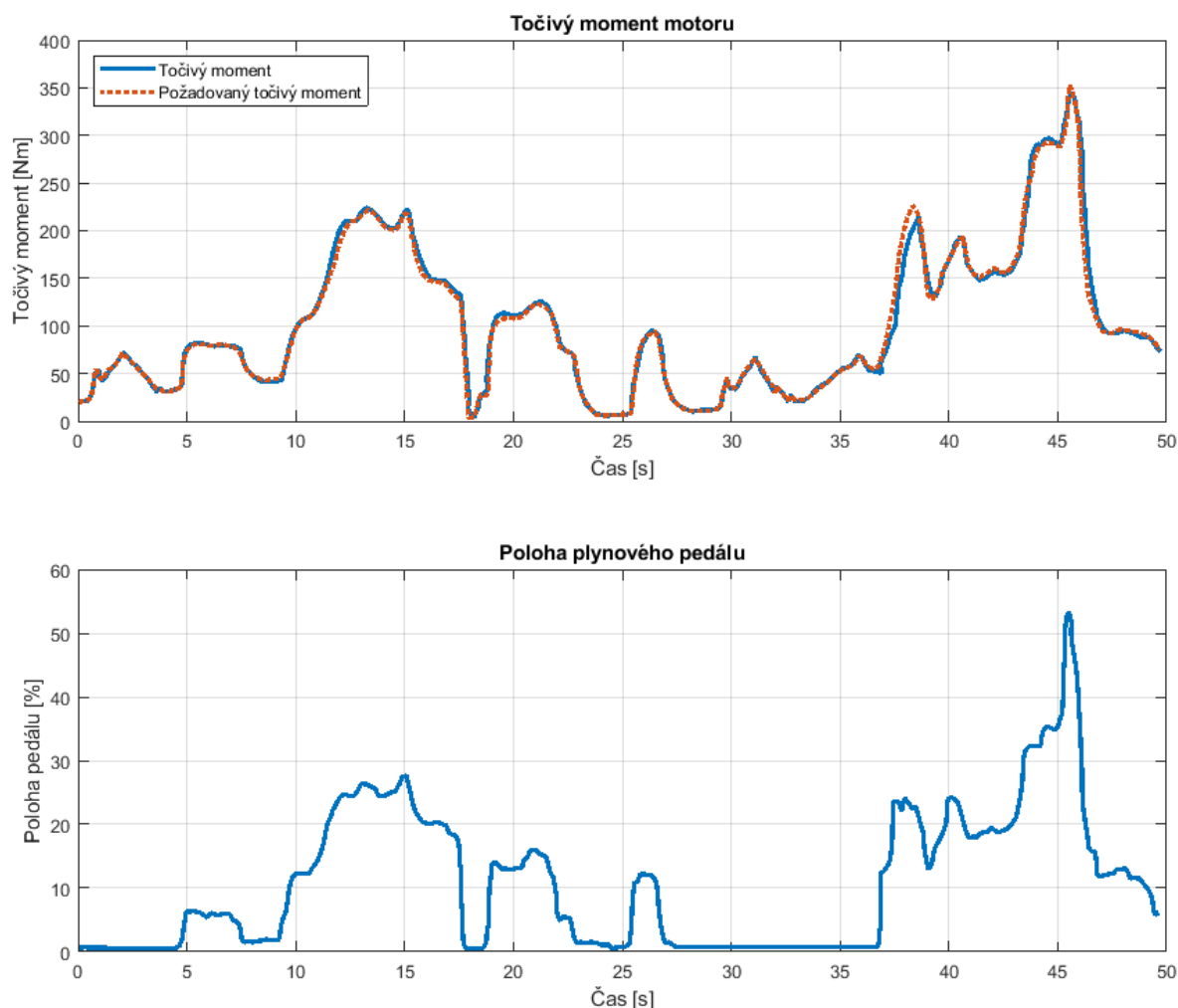
- Univerzální propojka, která umožňuje rychlou výměnu mezi standardní řídicí jednotkou a vývojem
- Další baterií pro napájení vývojových systémů
- Snímačem točivého momentu na výstupu z motoru
- Snímači průtoku paliva

Snímače točivého momentu a průtoku paliva jsou použity k vývojovým účelům. Tyto signály jsou použity ke kalibraci systému, nicméně nejsou uvažovány v rámci řídicích algoritmů.

Validace funkčnosti systému byla provedena v rámci HIL simulátoru, tudíž náročnost převedení tohoto systému na vozidlo je závislá na kvalitě použitého modelu vozidla a citlivosti algoritmů na změny v systému. Řídicí strategie jsou jen minimálně pozměněny k oživení vozidla, které je dále kalibrováno na zkušební stoličce. Nutné změny jsou nejprve ověřeny na simulátoru před jejich použitím na vozidle.

Výsledky měření na vozidle

Obr. 8 zobrazuje požadovaný točivý moment a vypočtený aktuální točivý moment odpovídající poloze akceleračního pedálu. Je možné vidět že korelace těchto parametrů je vyhodnocena jako velmi dobrá s přihlédnutím k možnostem kalibrace celého systému.



Obr. 8 Požadavek točivého momentu a vypočtený moment

6 EXPERIMENTÁLNÍ OPTIMALIZACE ZRYCHLENÍ VOZIDLA

Řízení točivého momentu vozidla, jak již bylo zmíněno, je účinným nástrojem ke sjednocení řízení dějů v pohonné jednotce jako celku. Jednotlivé podsystémy řídicí jednotky, stejně tak jako externí systémy, pracují s jednotným požadavkem točivého momentu, který je dále zpracováván a převáděn do ovládání jednotlivých prvků ovlivňujících vznik točivého momentu.

Tato kapitola je zaměřena na sestavení výpočetního algoritmu pro odhad maximálního točivého momentu pro dosažení maximálního zrychlení vozidla s pohonem zadní nápravy při provozu na trakčním limitu pneumatiky. Vzhledem k tomu, že požadavek na zrychlení vozidla je ve většině případů kombinován s bočním přetížením při výjezdu ze zatáčky, tak je tato situace uvažována jako kombinované zatížení v příčném i podélném směru.

6.1 TRAKČNÍ TOČIVÝ MOMENT

Kontakt s vozovkou

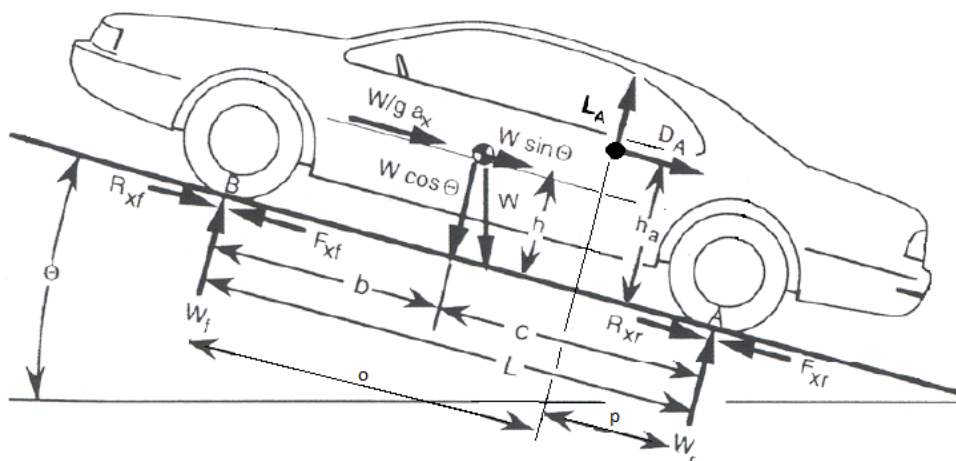
Vozidlo přenáší hnací sílu k dosažení vlastního zrychlení na vozovku prostřednictvím pneumatik. Jedná se o tření mezi dvěma či více různými materiály, jež vzniká reakcí třecích sil v bodě kontaktu hnaných pneumatik s vozovkou. Ze základních fyzikálních vztahů lze tuto situaci popsat pomocí třecích vlastností daných materiálů, zejména tedy pneumatiky a dané vozovky, a normálovým zatížením v místě kontaktu. Tudiž maximální hnací síla lze vyjádřit jako: [13]

$$F_x = \mu_{max} \cdot W \quad (1)$$

Zatížení pneumatiky

Normálová síla zatěžující pneumatiku je definována jako součet všech kolmých komponent sil působících na pneumatiku ve vztahu ke styčné plošce s vozovkou. [14]

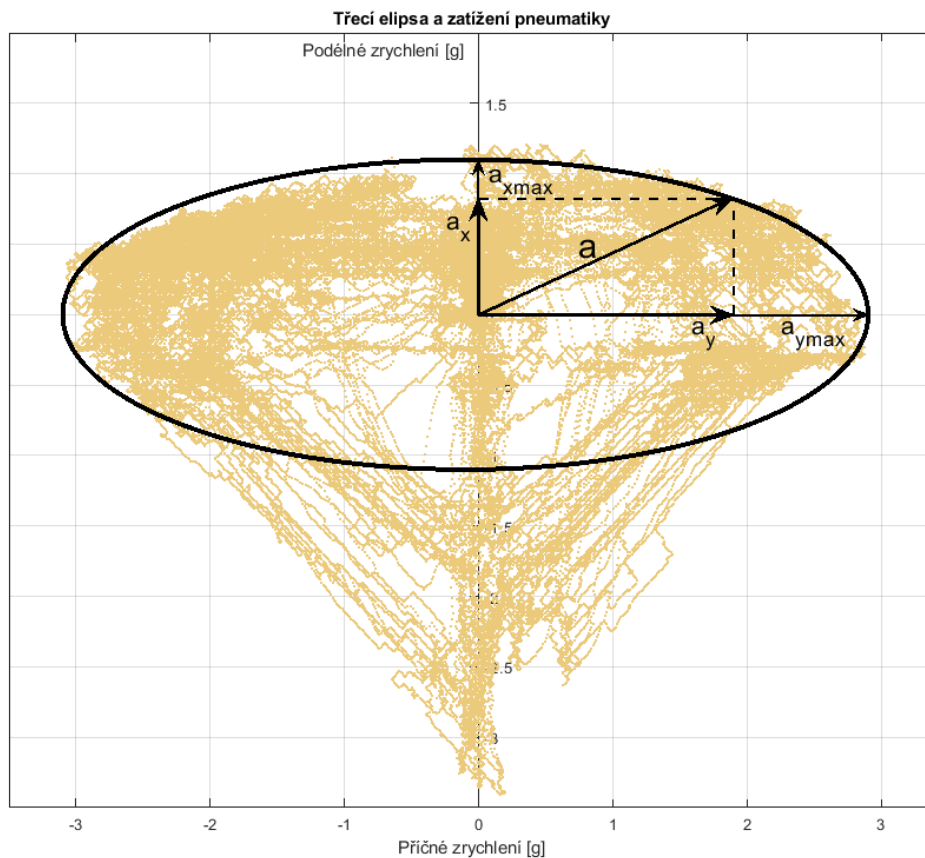
- Statická síla
- d'Alembertova setrvačná síla
- Aerodynamická síla
- Vliv úhlu stoupání
- Podélný přesun hmotnosti
- Příčný přesun hmotnosti
- Valivý odpor



Obr. 9 Síly působící na vozidlo

Třecí vlastnosti

Třecí vlastnosti pneumatiky lze znázornit jako třecí elipsu s rozdílnými koeficienty tření pro přenos síly v příčném a podélném směru. Aktuální polohu přenosu sil na vozovku v této třecí elipse lze měřit pomocí akcelerometrů, a tím získat podélná a příčná zrychlení vozidla (Obr. 10). Velikost této elipsy definuje i maximální možné přenosy sil za daných podmínek pro danou pneumatiku. [15]



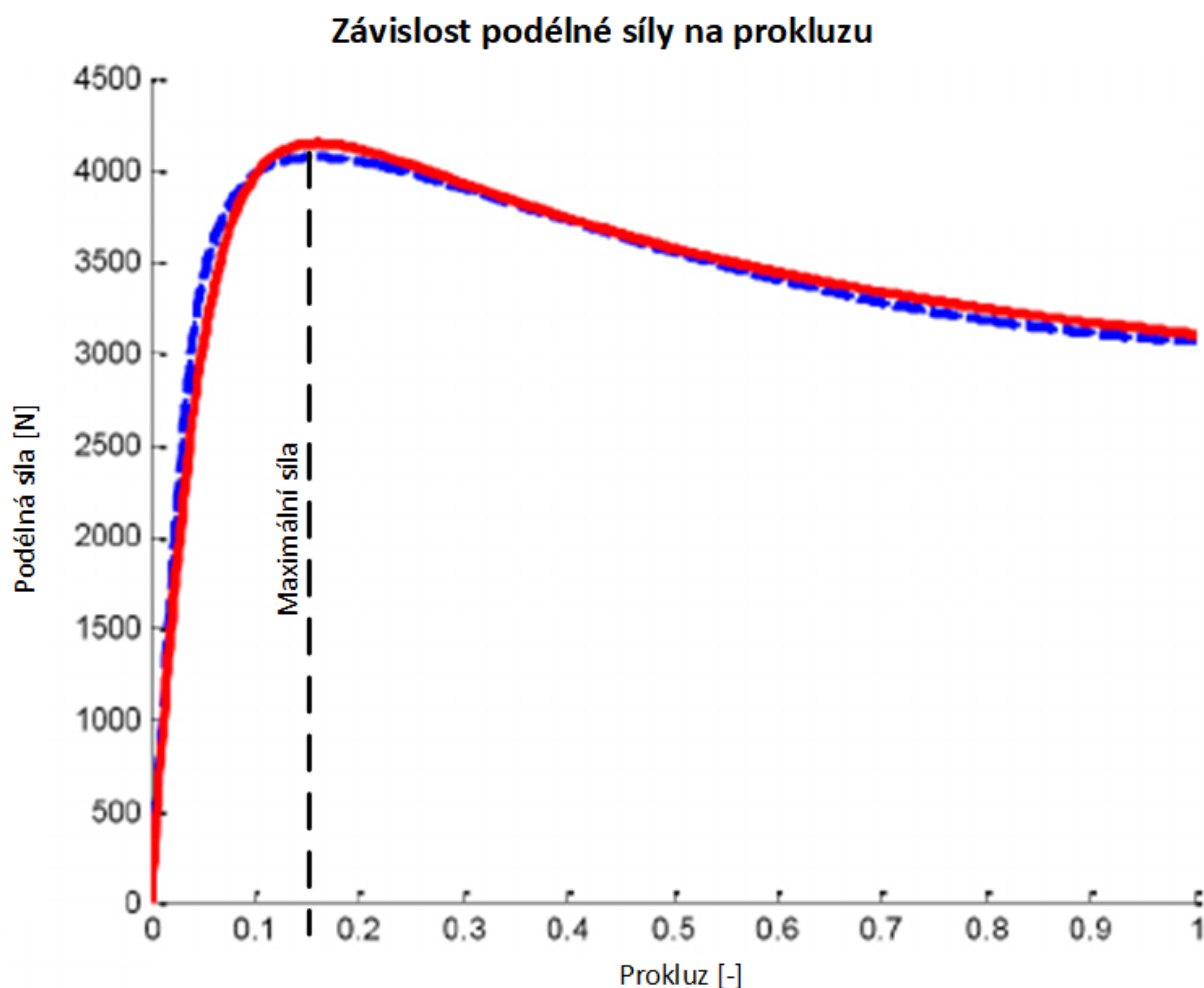
Obr. 10 Třecí elipsa a zatížení pneumatiky vozidla

6.2 STRATEGIE ŘÍZENÍ

Vyjádřením maximální dostupné hnací síly, respektive hnacího momentu je možné tento výpočet převést do zpracování v reálném čase řídicí jednotkou motoru. Aktuální stav pneumatik ve vztahu k jejich vlastnostem je zpracován právě měřením zrychlení vozidla ve dvou osách (x,y) a tím i stanovení aktuálně působících sil na vozidlo. Jako neznámou v tomto systému je právě tření mezi pneumatikou a vozovkou. Maximální dostupné třecí síly se mění zejména v důsledku proměnlivých vlastností vozovky, a tudíž jsou součinitelé maximálního tření v tomto vztahu předmětem kalibrace v tabulce závislé na poloze vozidla. [16]

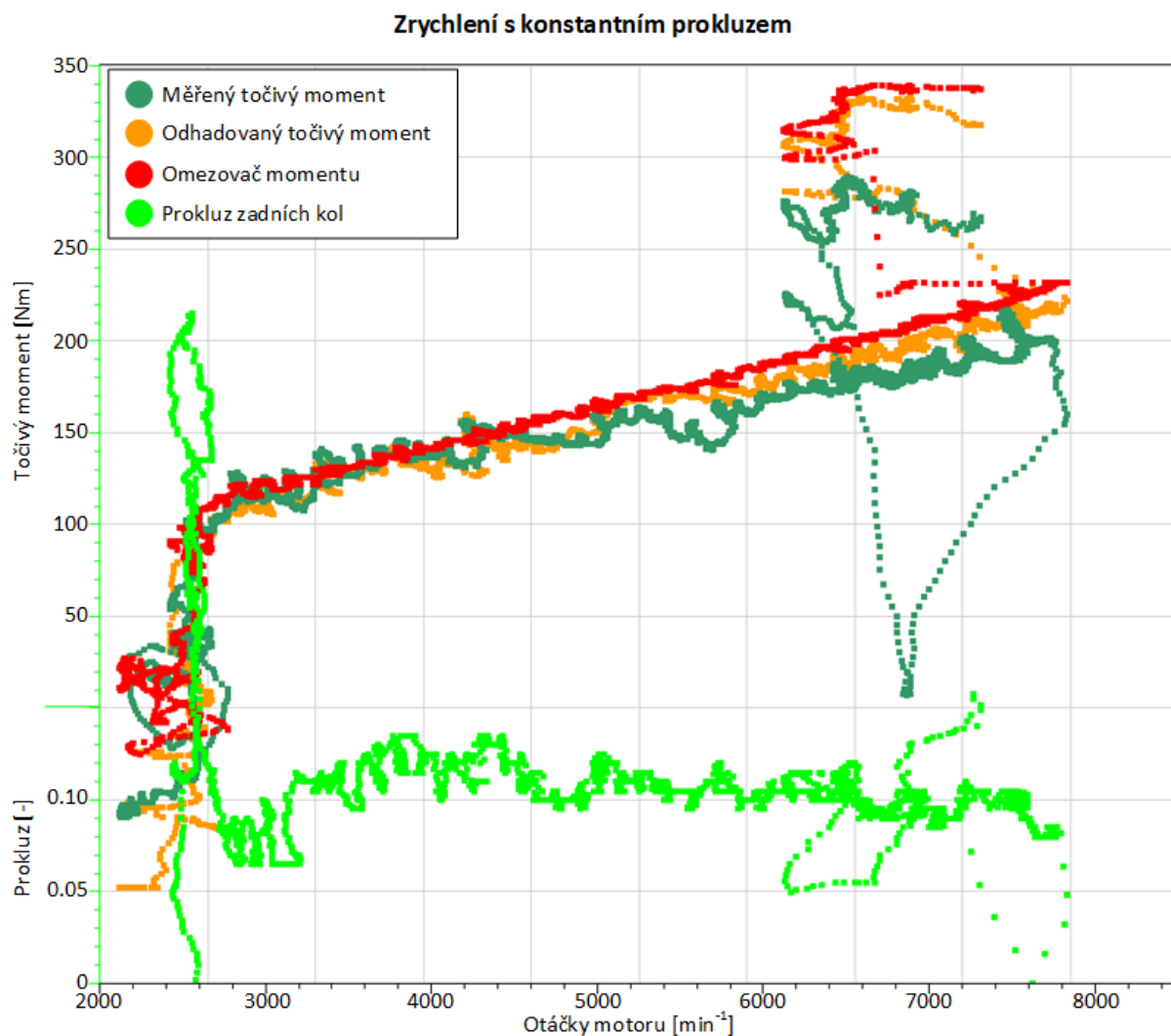
Zrychlení s konstantním prokluzem

Jak je znázorněno na Obr. 11, tak pneumatika dosahuje maximálního přenosu síly při určitém prokluzu. Proto i k dosažení co největšího zrychlení vozidla se předpokládá provoz právě s nenulovým prokluzem. Prokluz lze jednoduše stanovit jako poměr rychlostí mezi hnányými a hnacími koly vozidla. Tato hodnota je dále použita jako řízená veličina PID regulátoru, který má za cíl udržet nastavený prokluz během zrychlení vozidla, a to pomocí vlastního požadavku na točivý moment. [14]



Obr. 11 Podélné třecí vlastnosti pneumatiky

Výsledná funkce strategie kontroly trakce řízením točivého momentu pro dosažení konstantního prokluzu při kombinovaném zatížení pneumatiky boční i podélnou silou při výjezdu a zrychlování ze zatáčky je znázorněna na Obr. 12. Řízení točivého momentu je aktivní a umožňuje dodávat pouze omezené množství točivého momentu, což v důsledku generuje konstantní prokluz zadních pneumatik. [17]



Obr. 12 Omezovač točivého momentu

7 ZÁVĚR

V této práci bylo prokázáno, že točivý moment motoru, respektive točivý moment od jednotlivých válců spalovacího motoru, lze úspěšně odhadovat na základě měření úhlu natočení klikové hřídele a jejích rychlostí. Byly zkoumány dvě metody „Statistická metoda“ a „Frekvenční analýza“, které zahrnují široké spektrum pracovních bodů motoru. Prakticky jsou tyto metody nezávislé na vstupních veličinách motoru (množství nasávaného vzduchu, dávka paliva, předstih zážehu). Tato metoda umožňuje odhad točivého momentu nejen jako průměrné hodnoty za spalovací cyklus motoru, ale i odhad indikovaného točivého momentu v závislosti na úhlu natočení klikové hřídele. Navíc bylo prokázáno, že točivý moment lze odhadovat i s nižším rozlišením vstupních veličin dynamiky klikové hřídele, důsledkem čehož byla snižená výpočetní náročnost tohoto algoritmu a jeho uplatnění v aplikacích pro řízení v reálném čase. Takto definovaného algoritmu bylo využito v další části práce, která se zabývala samotným řízením motoru požadavkem na točivý moment motoru.

Řídicí systém motoru založený na požadavku točivého momentu byl následně vytvořen a implementován použitím otevřených prototypových vývojových systémů. Tato strategie byla úspěšně odzkoušena a zkalibrována nejprve pomocí simulačních nástrojů, a poté ve vozidle.

Tato technika zlepšuje řízení spalovacího motoru a přidává určité rozhraní pro koordinaci všech požadavků na točivý moment od jednotlivých systémů vozidla. Mezi něž patří poloha akceleračního pedálu, stabilizační systémy, klimatizace, dobíjení, řazení apod. Tudíž jednotlivé systémy vozidla jsou více nezávislé než u běžných konvenčních principů řízení vozidla. Tato skutečnost snížila náročnost kalibrace ve vozidle a v důsledku i vývojové náklady a časovou nákladnost. Momentově založená filosofie řízení motoru zjednodušila celkovou strukturu interakce jednotlivých řídicích systémů vozidla, a zároveň je vhodná pro další rozšíření díky stále rostoucí komplexitě vozidlových systémů. V případě přidávání nových modulů umožňuje progresivně rozšiřovat architekturu řízení. Navíc modularita řídicího systému vozidla vede ke zjednodušení, čímž lze zajistit i vyšší míru spolehlivosti a bezpečnosti celého provozu.

Použití momentově založené strategie řízení zvýrazňuje výhody použití tzv. DBW (drive-by-wire) systémů, které ještě více otevírají možnosti ovládání pomocí elektronických akčních členů. Tudíž přesunu odpovědnosti řízení do softwarově programovatelných algoritmů z původních omezených jednoúčelových vazeb. Tato situace vede k lepší říditelnosti vozidla, zvýšení výkonnosti či snížení spotřeby.

Strategie je uplatnitelná pro širokou škálu moderních pohonných jednotek, stejně jako ji lze implementovat na další vyspělé řídicí jednotky.

V poslední kapitole byly využity znalosti z předchozí části k praktické studii řízení zrychlení vozidla na hranici fyzikálních vlastností pneumatiky k dosažení co nejvyššího zrychlení při kombinované zátěži. Byly identifikovány jednotlivé síly působící na vozidla a mající vliv na přenos trakční síly mezi pneumatikou a vozovkou. Dále uplatněním znalostí třecích vlastností pneumatiky byl stanoven výpočetní algoritmus pro odhad dostupné trakční síly. Třecí vlastnosti jsou přímo závislé na

daných podmínkách, stavu pneumatiky a zejména povrchu vozovky, po kterém se vozidlo pohybuje. Byla zvolena metoda mapování maximálního třecího potenciálu styku pneumatiky s vozovkou jako tabulka v závislosti na poloze vozidla.

Pomocí momentově strukturovaného řízení pohonné jednotky byla strategie řízení trakce zkalibrována tak, aby točivý moment motoru byl při zrychlování omezen. Nejvyšších hodnot zrychlení bylo možné dosáhnout zapojením zpětnovazebního řízení prokluzu hnacích kol a zrychlování s konstantním prokluzem.

8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] *Comparison of engine simulation software for development of control system.* **Chan, Kinyip, a další.** London : Modelling and Simulation in Engineering, 2013, Sv. 2013. 401643.

[2] *Overview of Automotive Sensors.* **Fleming, William J.** 4, místo neznámé : IEEE Sensors Journal, 2001, Sv. 1, stránky 296-308. 7185910.

[3] **Rizzoni Giorgio.** *A dynamic model for the internal combustion engine.* místo neznámé : University of Michigan, 1986. 5042099.

[4] **Drakunov, Sergey, Rizzoni, Giorgio a Wang, Yue-Yun.** *On-Line Estimation of Indicated Torque in IC Engines Using Nonlinear Observers.* *SAE Transactions.* Ohio : SAE International, 1995. Sv. 104, stránky 1430-1438. 950840.

[5] *On-line Estimation of Net Engine Torque from Crankshaft Angular Velocity Measurement using Repetitive Estimators.* **Srinivasan, Krishnaswami, a další.** Chicago : IEEE, 1992. 1992 American Control Conference. stránky 516-520. 0-7803-0210-9.

[6] *Crankangle based torque estimation: Mechanistic /stochastic.* **Gyan, Philippe, a další.** místo neznámé : SAE Technical Paper, 2000. SAE Technical Papers. 2000-01-0559.

[7] **Hale, Jack K.** *Functional differential equations. Analytic Theory of Differential Equations.* Berlin : Springer, 1971, stránky 9-22.

[8] *A novel approach to real-time estimation of the individual cylinder combustion pressure for SI engine control.* **Guezennec, YG a Gyan, P.** místo neznámé : SAE Technical Paper, 1999. 1999-01-0209.

[9] *Design of Observers for Linear Systems with Unknown Inputs.* **Hou, M. a Muller, P. C.** 6, místo neznámé : IEEE Transactions on Automatic Control, 1992, Sv. 37, stránky 871-875. 4210845.

[10] *Non-linear model-based predictive control of gasoline engine air-fuel ratio.* **Lennox, B., a další.** 2, místo neznámé : SAGE journals, 1998, Transactions of the Institute of Measurement & Control, Sv. 20, stránky 103-112. 014233129802000208.

[11] **Shi, Yu, Ge, Hai-Wen a Reitz, Rolf Deneys.** *Computational optimization of internal combustion engines.* místo neznámé : Springer Science & Business Media, 2011. str. 309. 9780857296184.

[12] **Wang, L.** *Model predictive control system design and implementation using MATLAB®.* místo neznámé : Springer Science & Business Media, 2009. 9781848823303.

[13] **Pacejka, H.** *Tire and vehicle dynamics.* místo neznámé : Butterworth-Heinemann, 2012. 9780080970165.

[14] **Gillespie, TD.** *Fundamentals of vehicle dynamics.* místo neznámé : Society of Automotive Engineers, 1992. str. 495. 9781560911999.

[15] *Dynamic tire friction models for vehicle traction control.* **Canudas de Wit, C. a Tsiotras, P.** Phoenix : IEEE, 1999. Proceedings of the 38th IEEE Conference on Decision and Control (Cat. No.99CH36304). Sv. 4, stránky 3746-3751. 6566885.

[16] *Vehicle dynamics modelling for the National Advanced Driving Simulator*. **Heydinger, G. J., a další.** 4, místo neznámé : SAGE journals, 2002, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, Sv. 216, stránky 307-318. 0954407021529138.

[17] *A Novel Traction Control for EV Based on Maximum Transmissible Torque Estimation*. **Dejun Yin, Sehoon Oh a Hori, Y.** 6, místo neznámé : IEEE Transactions on Industrial Electronics, 6 2009, Sv. 56, stránky 2086-2094. 10713214.

9 CURRICULUM VITAE

Jméno a příjmení: Milan Špičák
Rok narození: 1990

Dosažené vzdělání:

- 2015-2019 FSI VUT v Brně, obor Konstrukční a procesní inženýrství, doktorský studijní program
- 2013-2015 FSI VUT v Brně, obor automobilní a dopravní inženýrství, magisterský studijní program
- 2010-2013 FSI VUT v Brně, obor Strojní inženýrství, bakalářský studijní program
- 2002-2010 Gymnázium Přelouč, osmileté Gymnázium

Vědeckovýzkumná činnost a účast na projektech:

- 2017-2019 Výzkum výpočtových a experimentálních metod v oblasti mobilních systémů, projekt specifického výzkumu FSI-S-17-4104

Zahraniční stáže:

- 2016-2018 Cosworth Electronics Ltd., Development Support Engineer, Pracovní stáž, Anglie
- 2013-2014 University of Hertfordshire, Automotive Engineering with Motorsport, magisterský studijní program, Anglie

Pedagogická činnost v rámci DS:

- Vedení bakalářských prací

Pracovní zkušenosti

- 2018-2019 Cosworth Electronics Ltd. – Senior Support Engineer
- 2015-2016 VUT Brno – výzkumný pracovník
- 2014 Honeywell Innovators Scholarship

Další dovednosti

- Jazykové znalosti angličtina – pokročilý; němčina – začátečník; francouzština – začátečník; čeština – rodilý mluvčí

10 ABSTRACT

This thesis describes computational control of vehicle powertrains using common variable, engine torque. The thesis is divided into three main parts. The first one shows design of methods for torque estimation using known or measured variables on the vehicle. The second part contains design of powertrain control algorithm utilizing the engine torque as a common variable among individual modules. The third part describes experimental optimization of the longitudinal acceleration of a vehicle using torque control.