

AUTOMATICKÉ ŘÍZENÍ UZAVÍRÁNÍ DIFERENCIÁLU NÁKLADNÍHO VOZIDLA PŘI JÍZDĚ PŘÍMÝM SMĚREM

AUTOMATIC DIFFERENTIAL LOCK CONTROL OF A TRUCK WHEN DRIVING STRAIGHT

Pavel Kučera¹, Václav Pištěk², Petr Porteš³

Anotace: Článek se zabývá tvorbou řídicího algoritmu pro uzavírání diferenciálu nákladního vozidla. Algoritmus vychází z předpokladů systému ZF ADM a je tvořen v softwaru Simulink-Stateflow. Článek především popisuje funkci algoritmu a jeho aplikaci na výpočtový model vozidla s pohonem 4x4. V závěru je provedena simulace jízdního manévru k ověření funkčnosti sestaveného řídicího algoritmu uzavírání diferenciálu.

Klíčová slova: řídicí algoritmus, Simulink, Stateflow, výpočtový model vozidla, diferenciál

Summary: The paper deals with the creation of control algorithm for locking differential of a truck. This algorithm is based on assumptions of ZF ADM system and it is created using software Simulink-Stateflow. The article mainly describes the function of algorithm and its application to a computational model of a truck with 4x4 drive. In conclusion, a simulation of driving manoeuvres was done to verify the functionality of the assembled differential control algorithm.

Key words: Control Algorithm, Simulink, Stateflow, Computational Model of Vehicle, Differential

ÚVOD

Pro plynulejší a efektivnější využití hnacího momentu vozidla mohou být využity některé komerční mechatronické systémy pro řízení uzavírání diferenciálu vozidel. Nabízeny jsou systémy, které pracují velice sofistikovaně, např. Torque vectoring s plynulou změnou řízení toku hnacího momentu. V případě nákladních vozidel je používán jednodušší systém se skokovou změnou toku hnacího momentu.

Tento systém užívá především společnost ZF, která vyvinula algoritmus pro řízení jejich navržených zubových spojek se speciálním ozubením pro uzavírání diferenciálu. Tento systém je označován jako ZF ADM systém. Dle literatury (1) je systém určen pro vozidla s pohonem až 6x6. Základní filozofií řízení je sledování otáček jednotlivých kol a vyhodnocení skluzu. Z těchto a dalších snímačů algoritmus určuje, zda má být diferenciál uzavřen nebo

¹ Ing. Pavel Kučera, Ph. D, Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Automotive Engineering, Technická 2896/2 , 616 69 Brno, Tel.: +420 541 142 252, Fax: +420 541 143 354, E-mail: kucera@iae.fme.vutbr.cz

² Prof. Ing. Václav Pištěk, DrSc., Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Automotive Engineering, Technická 2896/2 , 616 69 Brno, Tel.: +420 541 142 271, Fax: +420 541 143 354, E-mail: pistek.v@fme.vutbr.cz

³ Doc. Ing. Petr Porteš, Ph.D., Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Automotive Engineering, Technická 2896/2 , 616 69 Brno, Tel.: +420 541 142 268, Fax: +420 541 143 354, E-mail: portes@fme.vutbr.cz

otevřen. Princip uzavírání diferenciálu systém ZF ADM realizuje postupným zapnutím pohonu všech kol, následně uzavřením zadního osového diferenciálu a nakonec předního osového diferenciálu v případě vozidla s pohonem 4x4.

Tento článek se zabývá tvorbou řídicího algoritmu částečně nezávislého uzavírání diferenciálu. To znamená, že nedochází ve všech případech k postupnému uzavírání diferenciálu jako v případě systému ZF ADM. Algoritmus je také rozšířen pro vozidla s pohonem až 8x8. Algoritmus byl vytvořen v softwaru Simulink-Stateflow. Pro ověření funkce algoritmu byl sestaven výpočtový model vozidla s pohonem 4x4. Tento model je sestaven pomocí vlastní knihovny s bloky obsahujícími výpočtové modely základních prvků hnacího traktu vozidla. Podrobnější popis je v (2), (3), (4) a (5). Pro tento případ musely být některé bloky rozšířeny o další funkce.

V článku je popsána aplikace řídicího algoritmu na výpočtový model vozidla a provedena simulace rozjezdu v blátivém terénu. Dalším cílem bylo vytvořit řídicí algoritmus tak, aby mohl být jednoduše kompilován do příslušného formátu a použit v softwaru a hardwaru od společnosti National Instruments. To umožní prvotní testování řídicího algoritmu na reálném vozidle.

1. ŘÍDICÍ ALGORITMUS PRO UZAVÍRÁNÍ DIFERENCIÁLU

Základem vytvořeného algoritmu jsou poznatky ze systému ZF ADM (1). Vytvořený řídicí algoritmus pro řízení potřebuje snímat otáčky jednotlivých kol, k tomuto účelu mohou být použity snímače otáček ze systému ABS. Z těchto otáček je počítán skluz mezi pravým a levým kolem jednotlivých náprav a také skluz mezi hnacími hřídelemi příslušných náprav. Při jízdě zatáčkou může však nastat problém, jelikož se jednotlivá kola otáčejí různými úhlovými rychlostmi. Potom by řídicí systém vyhodnocoval stav, že se jedná o prokluz. Z tohoto důvodu je použit snímač úhlu natočení volantu, kdy při těchto stavech je prováděna korekce skluzu. Korekci je možno vyhodnotit pomocí Ackermannovy teorie a z ní vypočítat skluz dle natočení kol a rozměru rozchodu a rozvoru vozidla. Avšak v tomto případě se zde dopouštíme zanedbání vlivu směrové úchylny kola. Korekční skluz například pro přední nápravu vozidla 4x4 lze vypočítat podle následujících rovnic (zatačení doprava), které užívá navržený řídicí algoritmus.

$$x = \frac{L}{\tan(\delta_R)} + \frac{t_f}{2} \quad (1)$$

$$R_{FL} = \sqrt{\left(x + \frac{t_f}{2}\right)^2 + L^2}, \quad (2)$$

$$R_{FR} = \sqrt{\left(x - \frac{t_f}{2}\right)^2 + L^2}, \quad (3)$$

$$s_{COR} = \frac{\max(R_{FL}, R_{FR}) - \min(R_{FL}, R_{FR})}{\max(R_{FL}, R_{FR})}, \text{ jestli } \max(R_{FL}, R_{FR}) = 0, s_{COR} = 0, \quad (4)$$

kde x je vzdálenost mezi středem otáčení a středem zadní nápravy, L – rozvor náprav, t_f – rozchod kol přední nápravy, R_{FL} – poloměr otáčení levého předního kola okolo středu otáčení vozidla, R_{FR} – poloměr otáčení pravého levého kola okolo středu otáčení vozidla,

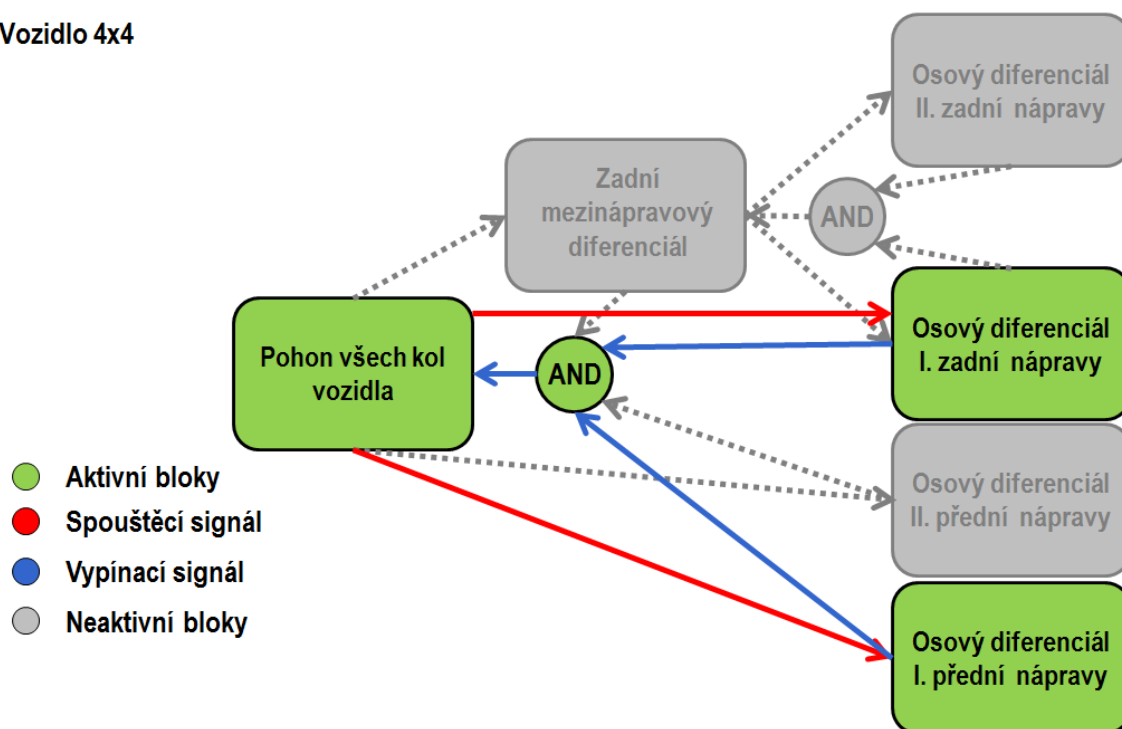
s_{cor} - korekční skluz vlivem zatáčení vozidla a δ_R úhel natočení předního pravého kola. Výpočet skluzu ve vytvořeném algoritmu je popsán rovnicí

$$s = \frac{\max(\omega_L, \omega_R) - \min(\omega_L, \omega_R)}{\max(\omega_L, \omega_R)} - s_{cor}, \text{ jestli } \max(\omega_L, \omega_R) = 0, s = 0, \quad (5)$$

kde s je skluz mezi pravým a levým kolem, ω_L – úhlová rychlost levého kola, ω_R – úhlová rychlost pravého kola a s_{cor} – korekční skluz vlivem zatáčení.

V rovnici není ošetřen stav, kdy se jedno kolo neotáčí a druhé se otáčí určitou úhlovou rychlostí. V tomto případě má skluz hodnotu jedna, potom je nutné použít další řídicí funkci, která kontroluje rozdíl otáček, aby nedošlo k destrukci částí hnacího traktu. Dalším řídicím prvkem je brzdový pedál. V případě brzdění nesmí být osově diferenciály uzavřeny, a to především z důvodu stability vozidla. Podobným případem je stav brzdění motorem. Tento stav také neumožňuje uzavření osových diferenciálů, aby nevznikaly nebezpečné situace vlivem špatného vedení kol. Řídicím prvkem pro rozpoznání stavu brzdění motorem je plynový pedál. Z hlediska rychlosti vozidla je uzavírání zadního osového diferenciálu realizováno do rychlosti 40 km/h, přestože to má vliv na trakci, nemá to vliv na stabilitu. U předního osového diferenciálu je limitní rychlost 15 km/h vzhledem k malému účinku dle studie (1) a především vlivem omezení zatáčení vozidla při uzavřených osových diferenciálech. Posledním z hlavních řídicích prvků je spojka. Řídicí algoritmus byl navržen tak, že je signál spojky užit pro případ při rozjezdu a řazení. Řídicí algoritmus kontroluje skutečné zapadnutí zubu zubové spojky a otevření diferenciálu je realizováno až po signálu z řídicího algoritmu na rozdíl od systému ZF ADM.

Vozidlo 4x4



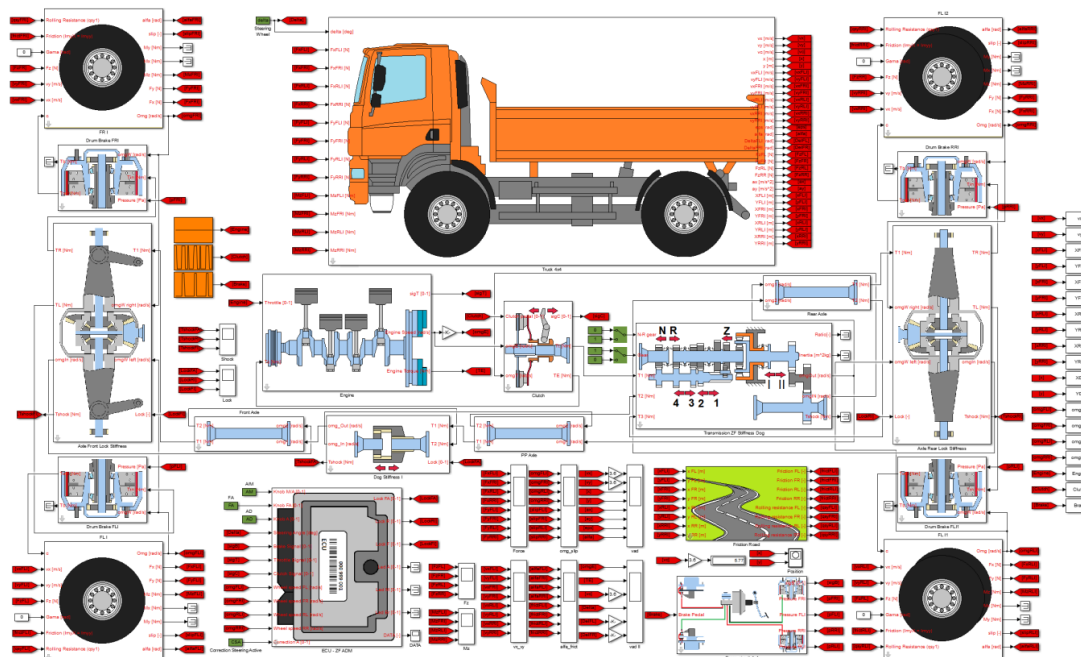
Zdroj: Autoři

Obr. 1 – Schéma řídicího algoritmu pro vozidla s pohonem 4x4, 6x6 a 8x8

Řídicí algoritmus je realizován v softwaru Simulink užitím knihovny Stateflow, která je určena především na tvorbu logických algoritmů pro různá řízení. Algoritmus je rozdělen na dvě hlavní části, kde uživatel má k dispozici čtyři tlačítka pro ovládání. První tlačítko určuje manuální nebo automatické řízení uzavírání diferenciálů. Schéma algoritmu pro automatické řízení je zobrazeno na obr. 1. V případě manuálního řízení jsou užitá další tři tlačítka. První aktivuje pohon všech kol a zadní mezinápravový diferenciál, druhé uzavírá zadní osově diferenciály a třetí tlačítko uzavírá přední osově diferenciály. Pro zamezení nevhodného užití manuálního uzavření diferenciálu je zde prováděna kontrola k zamezení destrukce hnacího traktu.

2. VÝPOČTOVÝ MODEL VOZIDLA

Pro tvorbu výpočtových modelů byla užitá dostupná literatura (6) a (7). Výpočtový model vozidla s pohonem 4x4 byl použit pro simulaci uzavírání diferenciálů nákladního vozidla. Základními parametry vozidla jsou hmotnost 20000 kg, rozchod přední nápravy 1,994 m, rozchod zadní nápravy 1,774 m, rozvor 3,7 m, výkon motoru 265 kW při otáčkách 1500–1900 min^{-1} a točivý moment motoru 1775 Nm při otáčkách 1000-1410 min^{-1} . K sestavení výpočtového modelu jsou užitý bloky z vlastní knihovny, kde hnací trakt je složen z bloku motoru (Paccar MX Euro 5), spojky, šestnáctistupňové převodovky (ZF 16S 2530), přídatné převodovky s možností zapnutí a vypnutí pohonu přední nápravy, dvou náprav s osovými diferenciály, bubnové brzdy, výpočtových modelů pneumatik (315/80 R22.5) a bloku dynamiky vozidla.



Zdroj: Autoři

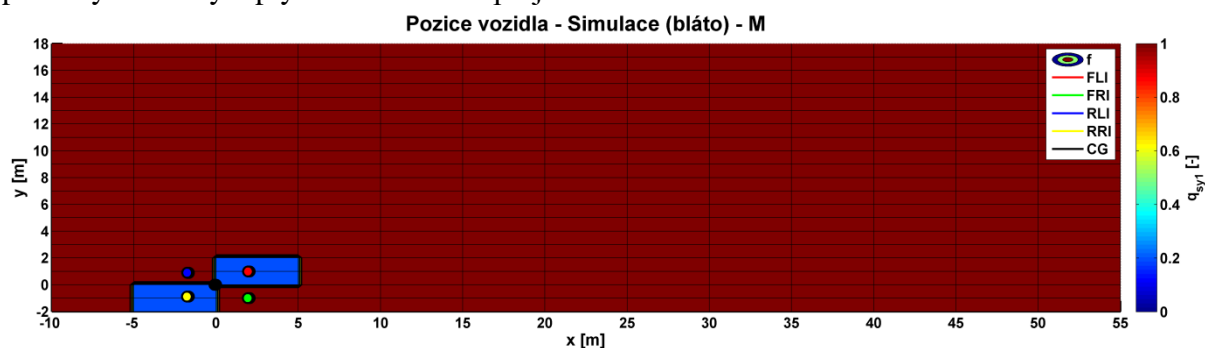
Obr. 2 – Výpočtový model vozidla s řídicím algoritmem uzavírání diferenciálu

V tomto případě z hlediska testování algoritmu pro mechatronický systém automatického uzavírání diferenciálu jsou nejdůležitějšími prvky blok zastupující řídicí jednotku a bloky s výpočtovým modelem diferenciálu, pneumatiky a vozovky. Výpočtový

model diferenciálu umožňuje simulovat stav, kdy je diferenciál uzavřen, což je důležitým aspektem pro testování řídicího algoritmu. V tomto případě se jedná o řízení diferenciálu způsobem, že je uzavřen nebo otevřen. Model pneumatiky byl rozšířen o možnost změny hodnoty součinitele měřítka přilnavosti $\lambda_{\mu x}$, $\lambda_{\mu y}$ a součinitele valivého odporu q_{syr1} v závislosti na poloze pneumatiky.

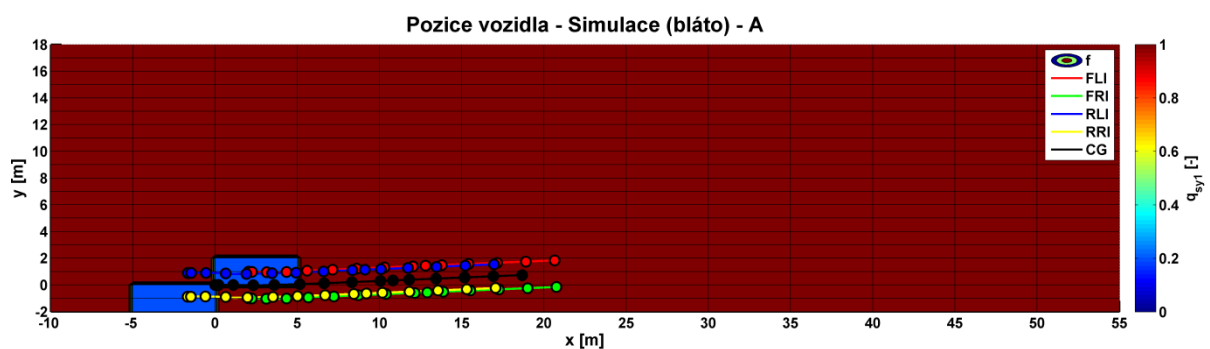
3. SIMULACE AUTOMATICKÉHO ŘÍZENÍ

Simulace byla provedena na výpočtovém modelu vozidla s pohonem 4x4. Aby bylo možno provést test uzavírání diferenciálu, bylo nutné simulovat prokluz jednotlivých kol vozidla. K tomuto účelu byl vytvořen blok vozovky s maticí popisující adhezi mezi vozovkou a pneumatikou a součinitel valivého odporu. Tyto hodnoty jsou předávány příslušným blokům pneumatik v závislosti na jejich poloze k vozovce. Tímto principem lze simulovat různé povrchy vozovky a plynule simulovat přejezd mezi nimi.



Zdroj: Autoři

Obr. 3 – Poloha vozidla při manuálním řízení



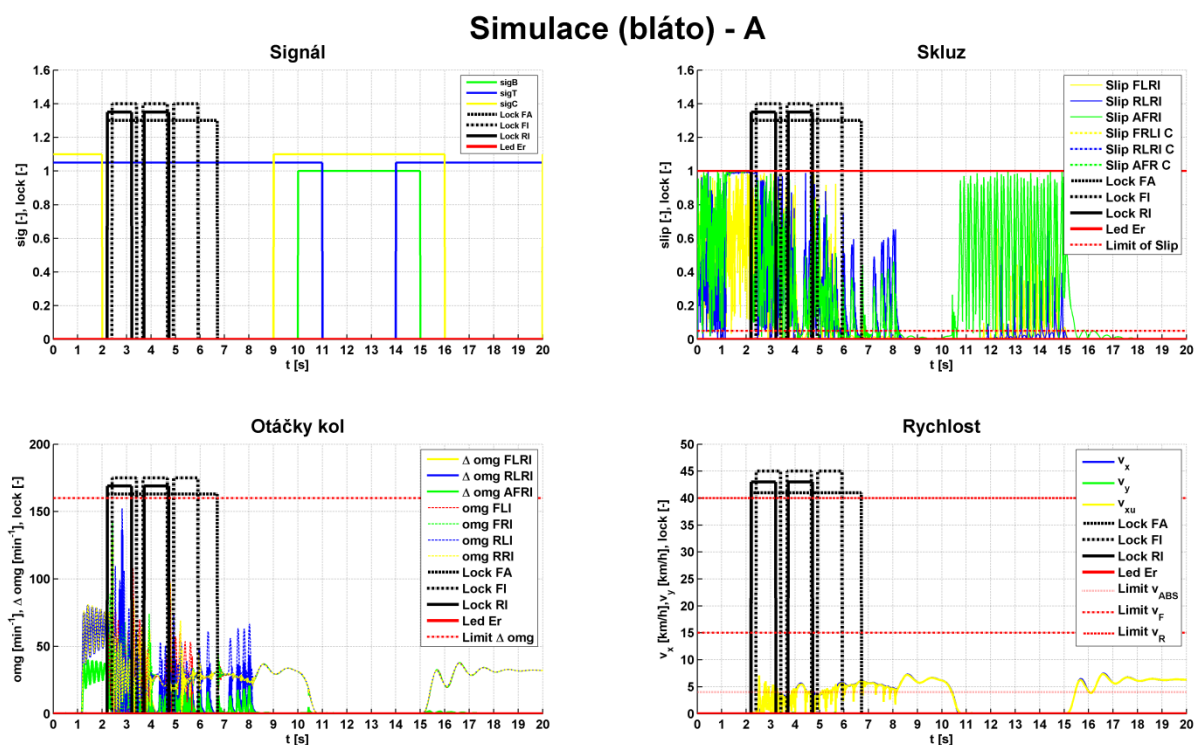
Zdroj: Autoři

Obr. 4 – Poloha vozidla při automatickém řízení

Simulace popisuje rozjezd vozidla z nulové rychlosti na rovné vozovce a je rozdělena na automatické a manuální řízení pro jízdu bez natočení volantu. Obě kombinace mají tři vstupní signály plynového, spojkového a brzdového pedálu, ovládající rozjezd a zastavení vozidla.

Podrobnější popis první simulace je takový, že vozidlo se začalo rozjíždět bez natočení volantu. Bylo nastaveno manuální řízení diferenciálu a žádný z příslušných diferenciálů nebo pohonu předních náprav nebyl aktivován. Na obr. 3 je zobrazena závislost měřítka součinitele přilnavosti na poloze vozidla, kde modré oblasti odpovídají hodnotě 0,3. Ostatní oblasti mají

měřitko součinitele přilnavosti 1. Z hlediska součinitele valivého odporu tyto oblasti mají hodnotu 0,4, která odpovídá jízdě bahnitou půdou. Tam jsou zobrazeny také polohy jednotlivých kol (FLI – levé přední kolo, FRI – pravé přední kolo, RLI – levé zadní kolo, RRI – pravé zadní kolo) a poloha těžiště vozidla při simulaci jízdy. Při simulaci rozjezdu vozidla, které pohánělo jenom zadní nápravu, došlo rozdílnými podmínkami pod zadními koly k prokluzu pravého kola a vozidlo zůstalo stát na jednom místě. V tom případě by řidič musel užít tlačítka pro ovládání uzavírání diferenciálu. U druhé simulace na obr. 4 je přepnut řídicí systém na automatické řízení. Vozidlo se začalo rozjíždět a jako v přechozím případě vznikl prokluz pravého zadního kola. V tu chvíli řídicí algoritmus začal vyhodnocovat skluz dle rovnice (5) a další zmíněné řídicí parametry, které jsou zobrazeny na obr. 5. Zde jsou čtyři grafy, kde na prvním jsou signály aktivace plynového, brzdového a spojkového pedálu. Na druhém grafu jsou signály skluzu a jeho korekce během zatáčení (není případ této simulace). Třetí graf znázorňuje rozdíly otáček např. mezi pravým a levým kolem. Dále jsou zde zobrazeny limity, které hlídají rozdíl těchto otáček, aby nedošlo k destrukci částí hnacího traktu při nevhodném uzavření příslušného diferenciálu. Čtvrtý graf zobrazuje rychlost vozidla a limity rychlostí pro řízení. Z průběhu simulace je vidět v každém z těchto grafů, kdy byl aktivován pohon přední nápravy. V případě uzavření všech diferenciálů algoritmus nemá žádné hodnoty skluzu pro vyhodnocení. Z toho důvodu je zde prováděn test v tomto případě po 1 s, kdy je osový diferenciál přední nápravy otevřen a kontroluje se, zda ho znovu uzavřít nebo otevřít i další diferenciál. Stav testování je viditelný i na výsledcích druhé simulace, kdy algoritmus třikrát testoval, než se vozidlo dostalo z blátivého terénu a pohybovalo se již po asfaltové silnici.



Zdroj: Autoři

Obr. 5 – Sledované vstupní signály a řídicí signály pro diferenciály

ZÁVĚR

Cílem bylo vytvořit řídicí algoritmus pro uzavírání diferenciálu nákladního vozidla. Tento algoritmus byl vytvořen v softwaru Simulink-Stateflow a základem vytvořeného algoritmu jsou poznatky ze systému ZF ADM.

Jedná se o mechatronický systém, který vyhodnocuje vstupní signály otáček, natočení volantu, plynového pedálu, spojkového pedálu a brzdového pedálu. Vyhodnocení určuje, zda má být diferenciál uzavřen nebo otevřen. Pro ověření navrženého algoritmu byl vytvořen výpočtový model vozidla s pohonem 4x4, na kterém byl vytvořený algoritmus testován. Ze simulace podle teoretických předpokladů lze usuzovat na správnou funkčnost algoritmu. Současně tyto simulace umožňují najít případné chyby v řídicím algoritmu před prvotním testováním na reálném vozidle, což především ušetří náklady v případě aplikace chybného algoritmu do reálné řídicí jednotky.

Algoritmus vycházející ze základu systému ZF ADM bude dále rozšiřován a vylepšován pro vozidla s pohonem více náprav a uzpůsoben pro konkrétní typy vozidel. Následně bude tento algoritmus otestovat na reálném vozidle např. pomocí hardwaru NI 3110 RT od společnosti National Instruments, který bude sloužit jako řídicí jednotka. K tomu účelu bude také nutné vytvořit vhodné zubové spojky pro uzavírání diferenciálu, což již probíhá ve spolupráci s výrobcem nákladních vozidel.

PODĚKOVÁNÍ

Výsledky tohoto projektu LO1202 byly získány za finančního přispění Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy v rámci účelové podpory „Národní program udržitelnosti I“.

POUŽITÁ LITERATURA

- (1) STELZENEDER, Franz X. a H. AITZETMÜLLER. ADM Drive-Train Management. In: *FISITA 2000 World Automotive Congress*. Seoul: Korea Society of Automotive Engineers, 2000, IS003 s. 1-7. ISBN 89-85000-00-4.
- (2) KUČERA, P. Mechatronický přístup v dynamice vozidel. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 116 s. Vedoucí dizertační práce Prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.
- (3) KUČERA, Pavel a Václav PÍŠTĚK. Virtual prototype of a heavy duty off-road truck driveline in Simulink software. In: *Transport means 2014: Proceedings of 18th International Conference*. Kaunas: Technologija, 2014, s. 5-8. ISBN 9955-09-935-6.
- (4) KUČERA, Pavel a Václav PÍŠTĚK. Virtual Diesel Engine in Simulink. *Perner's Contacts* [online]. 2013, VIII, č. 2, s. 95-105 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: http://pernerscontacts.upce.cz/30_2013/Kucera.pdf
- (5) KUČERA, Pavel a Václav PÍŠTĚK. Transmission Computational Model in Simulink. *Perner's Contacts* [online]. 2013, VIII, č. 4, s. 37-48 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: http://pernerscontacts.upce.cz/33_2013/Kucera.pdf
- (6) DABNEY, James B. a Thomas L. HARMAN. *Mastering Simulink*. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2004. 376 s. ISBN 0-13-142477-7.
- (7) GREPL, Robert. *Modelování mechatronických systémů v Matlab SimMechanics*. 1. vyd. Praha: BEN, 2007. 151 s. ISBN 978-80-7300-226-8.