

HIL TESTOVÁNÍ MECHATRONICKÉHO SYSTÉMU V LABORATORNÍCH PODMÍNKÁCH

HIL TESTING OF THE MECHATRONIC SYSTEM IN LABORATORY CONDITIONS

Pavel Kučera¹, Václav Pištěk²

Anotace: Tento článek se zabývá laboratorním testováním snímačů a akčních členů u mechatronického systému určeného pro automatické uzavírání diferenciálu. Jeho řídicí algoritmus je implementován na hardware pro HIL testování. Je sledována reakce sestaveného mechatronického systému na reálné snímače a v závěru jsou zobrazeny výsledky z real-time testování k ověření správné reakce akčního členů.

Klíčová slova: řídicí algoritmus, diferenciál, (MIL) Model in the Loop, (HIL) Hardware in the Loop, NI VeriStand

Summary: This article deals with laboratory testing of sensors and actuators in a mechatronic system designed for automatic differential lock. Its control algorithm is implemented on hardware for HIL testing. The response of the mechatronic system to the real sensors is monitored and in the end the results from the real-time testing are displayed to verify the correct response of the actuators.

Key words: Control Algorithm, Differential, (MIL) Model in the Loop, (HIL) Hardware in the Loop, NI VeriStand

ÚVOD

Mechatronické systémy jsou nedílnou součástí každého vozidla. Jejich vývoj je neustále zrychlován a k tomu účelu je zapotřebí použití různých nástrojů pro vývoj a testování. Aby bylo možné mechatronické systémy ověřit ještě ve fázi před výrobou prvního prototypu ECU – Electronic Control Unit, užívá se tzv. HIL – Hardware-in-the-Loop testování. Jedná se o použití speciálního hardwaru jako náhrady ECU. V hardwaru je umístěn procesor, kam se implementuje řídicí algoritmus a hardware disponuje vstupy a výstupy pro připojení snímačů a akčních členů. Potom může probíhat paralelně vývoj řídicího algoritmu a prototypu ECU.

Tento článek se zabývá užitím takového hardwaru pro testování navrhovaného mechatronického systému. Důležitým faktorem je zpracování vstupních veličin a řízení akčních členů. Proto se zde budeme zabývat laboratorním testováním snímačů a akčních členů, koncepcí vyvíjeného řídicího algoritmu, možnostmi jeho MIL – Model-in-the-Loop a HIL testováním.

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.: +420 541 142 274, 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

Vyvíjený řídicí algoritmus je určen pro automatické uzavírání diferenciálu u nákladního vozidla. Základní koncepce vychází ze systému ZF ADM (6), kde jsou sledovány především signály ze snímačů otáček a vyhodnocován skluz mezi jednotlivými koly vozidla. Dle jeho hodnot algoritmus určí, zda má zaslat akčnímu členu signál pro uzavření příslušného diferenciálu. Aby bylo možné řídicí algoritmus testovat na vozidle, je právě užíváno speciálního hardwaru pro HIL testování. Výhodou zařízení je možnost využití pro různé aplikace a jeho flexibilita. V článku je popsán základní princip funkce vyvíjeného řídicího algoritmu, který je zapotřebí v první fázi otestovat pomocí MIL testování. K tomuto účelu je použita vlastní knihovna s bloky pro sestavení výpočtového modelu vozidla a spojením s ním může být řídicí algoritmus testován. Tím se odhalí největší část chyb vzniklých při vývoji.

Následně je popsáno užití HIL testování, kdy řídicí algoritmus je umístěn do speciálního hardwaru. Ten slouží jako náhrada ECU a můžeme algoritmus testovat na vozidle při paralelním vývoji prototypu řídicí jednotky. Důležité je správné zpracovávání a vyhodnocení vstupních veličin ze snímačů, aby řídicí algoritmus správně fungoval. Proto jsou v následujících kapitolách popsány kroky vývoje řídicího algoritmu pro uzavírání diferenciálu a rovněž laboratorní testování a zpracování signálů ze snímačů.

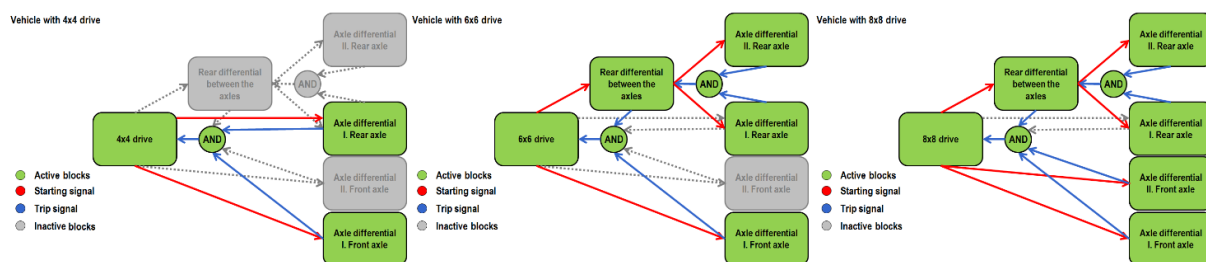
1. ŘÍDIDÍ ALGORITMUS

Vývoj řídicího algoritmu probíhá v několika krocích. V první fázi byla sestavena koncepce toho, co by měl řídicí algoritmus dělat. V tomto případě se jedná o automatické řízení uzavírání diferenciálu u nákladního vozidla. Základní koncepce vychází ze systému ZF ADM (6). Ze snímačů otáček kol je vyhodnocován prokluz mezi jednotlivými koly a určuje se uzavření příslušného diferenciálu. Dále jsou použity senzory pro sledování polohy jednotlivých pedálů, natočení volantu, snímač tlaku pneumatického okruhu, spínače v pneumatických válcích a komunikace CAN. Získané signály jsou vyhodnocovány řídicím algoritmem a nastavenými limity. Základní schéma řídicího algoritmu je zobrazeno na obr. 1, kde se jedná v tomto případě o částečně nezávislé uzavírání diferenciálů. To znamená, že zde není preferovaná posloupnost zapnutí pohonu všech kol, následně uzavření zádních osových diferenciálů a uzavření předních osových diferenciálů. Na schématech je zobrazen postup aktivování pohonu všech kol, následně nezávislé uzavírání mezinápravového diferenciálu a osových diferenciálů.

V rámci vývoje jsou testovány různé koncepce, zde je např. ukázána tato. Dále se schéma liší dle uspořádání hnacího traktu vozidla, jak je zobrazeno také na obr. 1. Po vyhodnocení polohy ve schématu odešle řídicí algoritmus signály pro akční členy. Jedná se o elektroventily, které ovládají přísun vzduchu do pneumatického válce. Každý diferenciál má speciálně navržené zubové spojky, které jsou ovládány konzolou z pneumatického válce. Pokud se elektroventil otevře, vzduch postupuje do pneumatického válce a působí na píst. Tento píst s konzolou se začne pohybovat a vyvodí sílu pro spojení zubových spojek v diferenciálu. Po zapadnutí zubových spojek do sebe je příslušný diferenciál uzavřen a nedochází k prokluzu mezi jednotlivými koly nápravy. V tuto chvíli je sepnut spínač v pneumatickém válci a signalizuje úspěšné uzavření diferenciálu. To slouží pro řízení a diagnostiku správné funkce senzorů a akčních členů. Pokud podmínky pro uzavření již nepřetrvávají, algoritmus pošle

signál pro otevření příslušného diferenciálu. V případě, že jsou všechny diferenciály uzavřeny, nejsou dostupné signály pro určení, zda v tomto stavu zůstat nebo začít otevírat diferenciály. Proto je v algoritmu zakomponována testovací časová smyčka, která po stanovené době nastaví stav ve schématu algoritmu o stupeň niž a zkontroluje, zda má znovu uzavřít nebo postupně otevírat i další diferenciály. Vše se opakuje do té doby, dokud vozidlo nevyjede např. z bláta.

Pro ověření základních funkcí tohoto mechatronického systému bylo zapotřebí otestovat správnou funkci snímačů a akčních členů. Proto byl řídicí algoritmus zjednodušen pro uzavírání jednoho diferenciálu, aby bylo možné sledovat signály z reálných snímačů v laboratoři. K tomu je využíván hardware pro HIL testování. Proto řídicí algoritmus musel být kompilován do souboru, který je podporován v softwaru NI VeriStand. Řídicí algoritmus je vytvořen pomocí jazyka C.



Zdroj: Autoři

Obr. 1 – Schéma řídicího algoritmu pro vozidla s pohonem 4x4 až 8x8

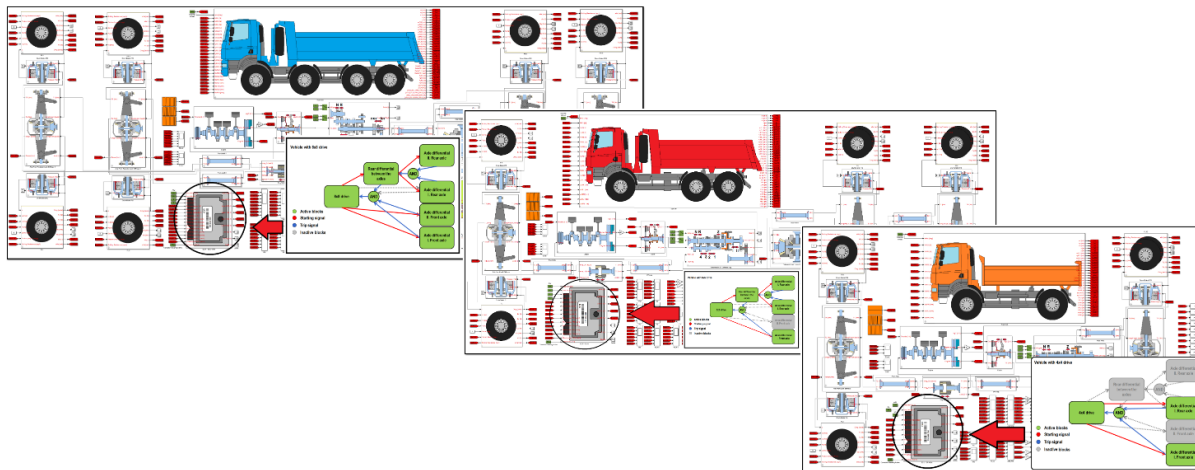
2. MIL TESTOVÁNÍ

Při vývoji řídicího algoritmu je důležité ověřovat jeho funkci. Proto je vhodné využít tzv. MIL testování. Jedná se o testování modelů ve smyčce. To znamená, že v případě tohoto mechatronického systému byl navržen řídicí algoritmus a pro jeho otestování byly sestaveny výpočtové modely vozidel. Výpočtový model vozidla napodobuje signály ze snímačů a odesílá je řídicímu algoritmu. Ten situaci vyhodnotí a odešle řídicí signál pro ovládání části výpočtového modelu diferenciálu.

Pro sestavení výpočtového modelu vozidla bylo užito vlastní knihovny s bloky (3, 4, 5), které popisují chování jednotlivých částí vozidla. Jedná se o bloky popisující chování motorů, spojky, převodovky, náprav, diferenciálů, dynamiky vozidla, brzd, modely pneumatik atd. Bloky jsou tvořeny v softwaru Simulink za použití literatury (1, 2). Z těchto bloků je uživatel schopen sestavit vozidlo až s pohonem 8x8 a simulovat různé jízdní manévry, analyzovat vibrace, nebo právě testovat mechatronické systémy.

V tomto případě je řídicí algoritmus testován na třech výpočtových modelech pro vozidla s pohonem 4x4, 6x6 a 8x8. Ty jsou zobrazeny na obr. 2. Výpočtové modely jsou složeny z bloků motoru, spojky, převodovky, náprav, diferenciálů, bubnových brzd modelu pneumatik, modelu vozidla, modelu vozovky a ECU s řídicím algoritmem. Při simulaci je důležité vytvářet podmínky pro vznik prokluzu jednotlivých kol vozidla a na tyto situace musí řídicí algoritmus reagovat. Proto je zde použito bloku s popisem vozovky a její adhezních vlastností. Dle polohy jednotlivých kol vozidla jsou tyto adhezní vlastnosti předávány modelu pneumatiky. V případě adhezních vlastností odpovídajících např. blátu je možno simulovat prokluz kol a uvíznutí vozidla. Při simulacích se ověřuje, zda vozidlo vyjelo z oblasti s nepříznivými adhezními

vlastnostmi, a tím je kontrolována správná reakce řídicího algoritmu. Různé simulace jsou popsány v (4). Při těchto simulacích je nejenom kontrolována hlavní část řídicího algoritmu, ale také části, které např. kontrolují poruchy jednotlivých snímačů nebo akčních členů. V této fázi vývoje a testování je odhaleno nejvíce chyb a tím se předchází vzniku poruch nebo nečekaným situacím při HIL testování nebo při testování s prototypem ECU na vozidle.



Zdroj: Autoři

Obr. 2 – Výpočtové modely vozidel

3. HIL TESTOVÁNÍ V LABORATOŘI

Pro aplikaci řídicího algoritmu na vozidle je používán hardware pro HIL testování. V tomto případě je užíván hardware od společnosti National Instruments NI 3110 RT, kde je umístěn procesor s implementovaným řídicím algoritmem. K hlavní části jsou připojeny sloty pro zásuvné moduly se vstupy a výstupy. Zde byl využit slot NI 9159 a moduly NI 9229, NI 9477 a NI 9425. Slot obsahuje FPGA - programovatelné hradlové pole, které komunikuje s moduly a předává data mezi senzory a procesorem.

V laboratoři byly testovány dva snímače otáček, snímač polohy brzdového pedálu, snímač plynového pedálu, elektroventil a pneumatický válec se spínačem polohy. Testovací okruh je zobrazen na obr. 3. Pomocí zdroje elektrického napětí byly jednotlivé prvky napájeny 24 V.

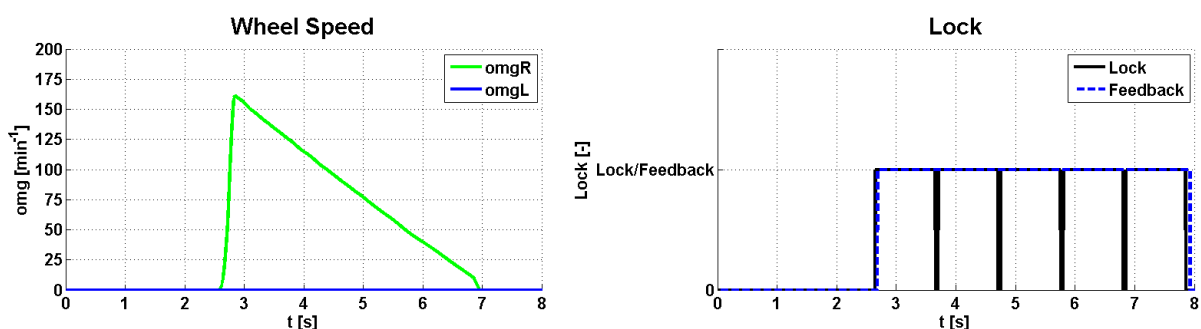


Zdroj: Autoři

Obr. 3 – Laboratorní testování senzorů a akčních členů

Z hlediska užitých snímačů se jedná o indukční snímače otáček, které generují sinusový průběh. Proto bylo nutné naprogramovat funkci pro zpracování tohoto signálu a vyhodnotit

příslušné otáčky. To bylo naprogramováno pro FPGA ve slotu NI 9159. V podstatě byla sledována perioda mezi úseky, když signál překročil nastavenou napěťovou hranici. Dále byly doprogramovány kontrolní mechanismy, aby nedocházelo ke špatnému vyhodnocení periody. Z její hodnoty byly vypočítány otáčky a předány do procesoru řídicímu algoritmu. Jelikož byly užity dva snímače otáček, bylo možné simulovat skluz roztáčením ozubeného kola u jednoho ze snímačů. Tím byly generovány otáčky jen z jednoho snímače a vyhodnocením těchto hodnot algoritmus určil, že dochází k prokluzu. Byla to simulace jednoho stojícího a jednoho prokluzujícího kola na jedné nápravě. Tyto snímače byly připojeny k modulu NI 9229, který snímá analogový signál a v FPGA byl tento signál vyhodnocen a přepočítán na otáčky. Snímače pedálů a spínač v pneumatickém válci byly připojeny k modulu NI 9425. Jedná se o modul pro digitální vstupy.



Zdroj: Autoři

Obr. 4 – Výsledky testování

Do modulu byl přiváděn signál 0-24V a při překročení určité hladiny napětí byl poslán signál procesoru 0 nebo 1. To znamená, že je např. daný pedál sešlápnut. V případě snímače plynového pedálu je spínaná zem proto bylo zapojení doplněno o pull-up rezistor. Po vyhodnocení vstupních veličin algoritmus odešle signál na modul NI 9477, který spíná zem elektroventilu. Ventil pustí vzduch z pneumatického okruhu do pneumatického válce a ten přesune píst. U diferenciálu by to znamenalo uzavření diferenciálu. Zároveň je sepnut spínač v pneumatickém válci a tím je signalizováno uzavření diferenciálu. Tímto zjednodušeným mechatronickým systémem byla testována funkčnost senzorů, algoritmu a kontrola poruch prvků systému v laboratorních podmínkách. Na obr. 4 je zobrazen jeden z testů, kde jsou zobrazeny grafy. První graf zobrazuje na svislé ose otáčky z obou snímačů otáček a na podélné ose je čas.

Jak bylo zmíněno dříve, u jednoho snímače otáček bylo roztočeno ozubené kolo pro simulaci otáček pneumatiky vozidla. Sinusový signál byl analyzován modulem NI 9229 a přepočítán na otáčky v FPGA. Tato hodnota byla zaslána řídicímu algoritmu a je zobrazena na grafu. Druhý snímač generoval po celou dobu nulové otáčky. Tím byl simulován rozjezd vozidla s prokluzem jednoho z kol. Ze vstupních dat algoritmus vyhodnotil, že má odeslat signál pro uzavření diferenciálu, to je zobrazeno v grafu vpravo s označením křivky Lock. Zde je názorně vidět i testovací časová smyčka pro případ, kdy není možné vyhodnotit, zda ještě dochází k prokluzu. V tomto případě se cyklus opakuje po 1s. Algoritmus pošle signál pro otevření diferenciálu a znovu kontroluje, zda dochází k prokluzu. Pokud podmínky již nepřetrvávají, jak je zobrazeno na konci grafů, diferenciál zůstane již otevřen. Tímto a různými

dalšími testy byly senzory, akční členy, naprogramované FPGA a řídicí algoritmus ověřeny. Vývoj bude dále pokračovat HIL testováním na vozidle. Celkový řídicí algoritmus bude umístěn na procesor a k hardwaru budou připojeni již všechny snímače a akční členy.

Obecně pro implementaci řídicího algoritmu je použit software NI VeriStand. V jeho jednotlivých částech jsou umístěny zkompileované soubory pro řídicí algoritmus a FPGA. Dále tam jsou nastavovány vstupy a výstupy hardwaru, ukládána data z testování a online zobrazována data. Pro zobrazování a řízení nastavení mechatronického systému, je možné naprogramovat Workspace, což je grafické rozhraní. V tomto případě byl naprogramován kontrolní panel pro zobrazování zpětné vazby uzavření diferenciálu (spínač v pneumatickém válci) a spínač pro nastavení automatického a manuálního řízení, které řídicí systém umožňuje.

ZÁVĚR

Pro urychlení vývoje mechatronických systémů je zapotřebí užívat různé nástroje. Mezi ně patří hardware pro HIL testování. Tím lze paralelně testovat a vyvíjet jednotlivé části mechatronických systémů jako je řídicí algoritmus, mechanické prvky, senzory, akční členy a prototyp ECU.

Tento článek se zabýval právě využitím hardwaru pro HIL testování a vlastními nástroji pro MIL testování. V rámci vývoje je programován řídicí algoritmus pro automatické uzavírání diferenciálu. Základním principem je sledování prokluzu mezi jednotlivými koly vozidla a vyhodnocení uzavírání příslušných diferenciálů. V první fázi je algoritmus spojen s výpočtovým modelem vozidla a testován v MIL smyčce. Při této simulaci bylo sledováno správné chování algoritmu a hledány programátorské chyby. Výpočtový model vozidla byl sestaven z vlastních bloků popisující jednotlivé části vozidel. Pomocí tohoto modelu pro jednotlivá uspořádání hnacího traktu jsou simulovány různé adhezní podmínky, a tím simulován prokluz jednotlivých kol. Z výsledků simulací jsou vyhodnocovány správné reakce řídicího algoritmu a vytvářeny jeho vhodné úpravy.

Paralelně probíhalo testování senzorů a akčních členů v laboratoři pomocí hardwaru pro HIL testování. Dále byly sledovány reakce řídicího algoritmu na reálné signály ze snímačů, řízen akční člen (elektroventil) a funkce naprogramované v FPGA. Postupnými úpravami a kombinací komerčních a vlastních nástrojů byl řídicí algoritmus připraven pro testování na vozidla, které bude další fází vývoje mechatronického systému pro automatické uzavírání diferenciálů nákladního vozidla.

PODĚKOVÁNÍ

Výsledky tohoto projektu LO1202 byly získány za finančního přispění Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy v rámci účelové podpory „Národní program udržitelnosti I“ a projektu specifického výzkumu FSI VUT v Brně č. FSI-S-17-4104.

POUŽITÁ LITERATURA

- (1) DABNEY, James B. a Thomas L. HARMAN. *Mastering Simulink*. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2004. 376 s. ISBN 0-13-142477-7.
- (2) GREPL, Robert. *Modelování mechatronických systémů v Matlab SimMechanics*. 1. vyd. Praha: BEN, 2007. 151 s. ISBN 978-80-7300-226-8.
- (3) 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.
- (4) 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
- (5) 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.
- (6) 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.