

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

---

# Návrh řídicích systémů v prostředí LabVIEW a jejich HIL testování v prostředí Veristand

Učební texty k semináři

---

Autoři:

Ing. Roman Vala (National Instruments)

Ing. Jiří Kepřt, Ph.D. (National Instruments)

Datum:

8. 4. 2011

Centrum pro rozvoj výzkumu pokročilých řídicích a senzorických technologií CZ.1.07/2.3.00/09.0031

TENTO STUDIJNÍ MATERIÁL JE SPOLUFINANCOVÁN EVROPSKÝM SOCIÁLNÍM  
FONDEM A STÁTNÍM ROZPOČTEM ČESKÉ REPUBLIKY



## OBSAH

Obsah.....	1
1. Úvod.....	4
2. Modul Control Design and Simulation pro LabVIEW.....	5
3. Technologie NI RIO.....	7
3.1. Hardwarová platforma NI RIO.....	8
3.2. Softwarová platforma NI RIO.....	8
3.3. Aplikace a budoucnost architektury NI RIO.....	9
4. CompactRIO.....	10
4.1. Základní architektura kontroléru.....	10
4.2. Inicializační rutina.....	10
4.3. Řídicí rutina.....	11
4.3.1. I/O, komunikace a tabulka hodnot v paměti.....	11
4.4. Řídicí a měřicí úlohy.....	12
4.5. Ukončovací rutina.....	13
5. Vývoj testovacího HIL systému pro řídicí jednotky motorů.....	14
5.1. Popis cíle.....	14
5.2. Řešení.....	14
5.3. Krátké shrnutí.....	15
5.4. Článek.....	15
6. Systémy pro testy automobilů BMW na vodíkový pohon.....	18
<b>6.1. Zadání.....</b>	<b>18</b>
<b>6.2. Řešení.....</b>	<b>18</b>
6.3. BMW Hydrogen 7 – První sériově vyráběný sedan na vodíkový pohon na světě.....	18
6.4. Vodíkový pohon pro udržitelnost individuální dopravy.....	19

6.5.	BMW Hydorgen 7.....	19
6.6.	HIL test - standardní nástroj ve vývojovém oddělení BMW.....	20
6.7.	Aplikace HIL .....	21
6.8.	Inkrementální modelování.....	22
6.9.	Efektivní práce s variantami .....	22
6.10.	Sériový vývoj HIL.....	23
6.11.	HIL testovací systém pro kontrolér CleanEnergy .....	24
6.12.	HIL testovací systém pro kontrolér motoru.....	25
6.13.	Požadavky na HIL testovací systémy pro Hydrogen 7 .....	26
6.14.	Požadavky HIL plynoucí z reintegrace do projektového prostředí.....	28
6.15.	Realizace HIL testovacích systémů pomocí simulátorů NovaSim.....	30
6.16.	Struktura systému.....	32
6.17.	Shrnutí a perspektivy .....	33
7.	Řízení největší hybridní lokomotivy s palivovým článkem na světě pomocí programu NI LabVIEW a zařízení CompactRIO.....	35
7.1.	Popis cíle.....	35
7.2.	Řešení .....	35
7.3.	Pohonné jednotky s palivovými články a hybridní jednotky .....	36
7.4.	Navrhování řídicího systému pomocí zařízení CompactRIO .....	36
7.5.	Softwarová architektura na bázi programu LabVIEW .....	37
7.6.	Vývoj dokonalé řídicí platformy pomocí programu LabVIEW a zařízení CompactRIO .....	37
8.	NI CompactRIO a LabVIEW v moderním řídicím systému vysoké úrovně..	38
8.1.	Popis cíle.....	38
8.2.	Řešení .....	38
8.3.	Inovativní řešení technických výzev .....	40
8.4.	Rychlá reakční doba .....	40
8.5.	Revoluční přístup k měření .....	40

8.6.	Distribuovaný software.....	41
8.7.	Ověření parametrů simulace.....	41
8.8.	Závěr.....	42
9.	Snížení nákladů na testování telematické řídicí jednotky pomocí hardwaru NI PXI a prostředí LabVIEW .....	44
9.1.	Popis cíle.....	44
9.2.	Motivace.....	44
9.3.	Řízení a monitorování více subsystémů pomocí VDS .....	45
9.4.	Vývoj VDS na platformě National Instruments.....	46
9.5.	Změna testování telematického systému s VDS.....	46
10.	Použití zařízení NI CompactRIO pro návrh řídicího systému sledujícího bod maximálního výkonu v aplikacích se solární energií .....	48
10.1.	Popis cíle.....	48
10.2.	Řešení .....	48
10.3.	Aplikace .....	48
10.4.	Architektura systému.....	49
10.5.	Úspěch s produkty společnosti NI .....	49
	Seznam použité literatury .....	51
	Přílohy.....	52

## 1. ÚVOD

Cílem semináře je seznámit účastníky s možnostmi návrhu řídicích systémů v grafickém vývojovém prostředí LabVIEW. Popsána bude celá cesta od modelování, simulace, návrhu modelu regulátoru, možností spouštění v HW s Real-Time operačním systémem a následně i testování systému pomocí HIL (Hardware In the Loop).

- SW pro simulace a modelování
- Operační systém Real-Time a jeho programování
- Využití obvodů FPGA pro připojení signálů a simulaci snímačů
- HW platformy pro spouštění řídicích modelů pod operačním systémem Real-Time
- HIL (Hardware In the Loop) testování

## 2. MODUL CONTROL DESIGN AND SIMULATION PRO LABVIEW

Modul představuje rozšíření grafické platformy pro návrh systémů LabVIEW, které pomáhá uživatelům analyzovat chování modelu v otevřené smyčce, navrhovat zpětnovazební regulátory, simulovat systémy a vytvářet implementace v reálném čase. Nejnovější verze tohoto modulu obsahuje nové funkce, jako je analytický PID regulátor pro vylepšení stability systému ve zpětné vazbě a modelové prediktivní řízení pro systémy s více proměnnými. Modul LabVIEW Control Design and Simulation také nabízí rozšířenou podporu pro LabVIEW MathScript s novými funkcemi pro podporu .m souborů pro zjednodušení úloh, jako je vytváření modelů, definování propojení modelů a analýza stability systému.

Nová funkce šetřící čas v modulu LabVIEW Control Design and Simulation je funkce analytického PID regulátoru. Už od dřívějších dob zjišťovali technici správnou hodnotu zesílení pro své PID regulátory pomocí experimentálního ladění regulátorů. Funkce analytického PID regulátoru slouží k automatickému nalezení sad hodnot zesílení pro daný model PID systému. Uživatelé se tak mohou snadnou vyhnout nežádoucímu chování systému v době návrhu a dosáhnout lepší stability systému.

Nejnovější verze modulu také zvládne prediktivní řízení na základě vnějšího popisu (MPC), což je oblíbený algoritmus používaný v průmyslu pro řízení systémů s více vstupy a více výstupy (MIMO) v aplikacích řídicích složitých procesy. Uživatelé mohou použít funkci MPC k vývoji regulátorů, které upravují řídicí zásah ještě předtím, než dojde ke změně žádané výstupní hodnoty. Tato schopnost předvídat chování modelu ve spojení s tradiční zpětnou vazbou pomáhá regulátoru provádět plynulejší regulační zásahy, které jsou blíže optimálním hodnotám.

„Prediktivní řízení založené na vnějším popisu je pro průmysl cennou technologií, která nemusí být dostupná inženýrům neovládajícím dobře textově orientované programování,“ řekl Michael Grimble, technický ředitel společnosti ISC Ltd. a profesor průmyslových systémů v centru Industrial Control Centre na University of Strathclyde v Glasgow ve Skotsku. „Tím, že firma National Instruments přidala do modulu LabVIEW Control Design and Simulation funkce MPC, poskytla velice intuitivní nástroj s jednoduchým rozhraním pro

implementaci v reálném čase. To by mělo přinést obrovské výhody pro uživatele implementující aplikace pro řízení procesů nebo řízení strojů v odvětvích, jako je automobilový či letecký průmysl, a dokonce i v akademickém prostředí, kde je předvídání chování modelu často zásadním krokem při vývoji pokročilých metod řízení.“

Modul LabVIEW Control Design and Simulation se snadno integruje se softwarovými nástroji společnosti NI, jako je modul LabVIEW Statechart pro návrh či simulaci řízení založeného na událostech a modul LabVIEW Real-Time pro rychlý vývoj prototypů řídicích systémů a aplikace typu HIL (hardware-in-the-loop), stejně jako pro uvádění systémů do provozu. Uživatelé mohou také tento modul použít ve spojení se sadou nástrojů LabVIEW System Identification Toolkit a I/O zařízeními od NI a vytvářet tak spolehlivé regulátory založené na měření.



### 3. TECHNOLOGIE NI RIO

Před sedmi lety uvedla společnost National Instruments na trh svou první PXI zásuvnou kartu s rekonfigurovatelnými vstupy a výstupy (RIO), ale nezůstalo jen u ní.

Tato první karta, NI PXI-7831R, obsahovala programovatelné hradlové pole (FPGA) s 1M hradel a vestavěné analogové i digitální vstupy a výstupy (I/O). Písmeno „R“ v označení NI PXI-7831R znamenalo „rekonfigurovatelné I/O“. Technici mohli programovat či rekonfigurovat FPGA čip na kartě a dosáhnout tak vlastního časování, zpracování a řízení vstupů a výstupů na kartě a vytvořit tak pokročilá řešení pro sběr dat, řízení a testování. Uživatelé mohli navíc programovat FPGA přímo v grafickém vývojovém prostředí NI LabVIEW. Výsledkem byla kombinace hardwaru a softwaru, která umožnila každému použít ve svém návrhu technologii FPGA.

Nyní se rychle přenesme z roku 2003 do roku 2010. Používání technologie RIO se dramaticky rozšířilo a stalo se jednou z hlavních oblastí investic ze strany National Instruments. V průběhu posledních sedmi let uvedla společnost NI na trh stovky produktů z rodiny RIO pro širokou škálu embedded, průmyslových a testovacích aplikací; v současnosti používají technologii RIO ve svých návrzích a řešeních tisíce uživatelů po celém světě.

Jádro technologické platformy NI RIO stále zahrnuje nástroje pro grafický návrh ve vývojovém prostředí LabVIEW, které mohou uživatelé použít k programování různých hardwarových zařízení RIO, sdílejících shodnou hardwarovou architekturu. Tato vysoce výkonná RIO architektura zahrnuje procesor, připojený k rekonfigurovatelnému FPGA, pro výpočty s plovoucí desetinnou čárkou a komunikaci. Nabízí výkon hardwaru na míru spolu s modulárními vstupy a výstupy. V této architektuře přímého připojení FPGA ke vstupům a výstupům (ať už jde o analogové, digitální či komunikační vstupy a výstupy) je uživateli umožněno přímo přizpůsobit časování a zpracování každého vstupu či výstupu v FPGA. Mezi výhody platformy NI RIO patří standardní architektura, kterou mohou uživatelé použít v jakékoliv aplikační oblasti od návrhu, přes řízení po testování, a také standardní sada nástrojů LabVIEW, kterou mohou vývojové týmy použít v průběhu celého návrhového procesu.

### 3.1. Hardwarová platforma NI RIO

Společnost NI vytvořila celou řadu hardwarových systémů v podobě karet i kompletních zařízení sdílejících architekturu RIO. Uživatelé mohou opakovaně používat hardware i software ve fázi návrhu a tvorbě prototypů ve svých projektech z oblasti embedded a průmyslových systémů i automatizovaného testování. Zařízení ve formě desky NI Single-Board RIO obsahují procesor reálného času, FPGA, analogové i digitální vstupy a výstupy. Platforma NI CompactRIO je k dispozici ve dvou konfiguracích. Jedna z nich představuje integrovaný systém s procesorem reálného času i FPGA v jediném šasi, ta druhá má podobu modulárního systému s vyměnitelnými procesorovými a FPGA částmi. Se systémy CompactRIO a rozšiřujícími šasi EtherCAT lze používat více než 100 vstupně výstupních modulů NI řady C a modulů jiných výrobců a připojit se tak k široké škále senzorů a akčních členů.

NI také nabízí zásuvné FPGA karty řady R pro sběrnice PCI a PCI Express, které se používají s průmyslovými kontroléry NI a jinými osobními či průmyslovými počítači a lze s nimi vytvářet robustní RIO řešení s vysoce výkonnými vícejádrovými procesory. Pro vysoce výkonné testovací aplikace zahrnuje platforma PXI kontroléry s více procesorovými jádry, PXI FPGA moduly řady R a PXI/PXI Express NI FlexRIO FPGA a adaptérové moduly NI FlexRIO pro komunikační a testovací aplikace na míru.

### 3.2. Softwarová platforma NI RIO

Nástroje pro grafický návrh ve vývojovém prostředí LabVIEW představují klíč k technologii NI RIO. S technologiemi LabVIEW, LabVIEW Real-Time a LabVIEW FPGA mohou uživatelé programovat procesory s více jádry a konfigurovat FPGA v hardwaru NI RIO bez potřeby podrobné znalosti návrhu softwaru nebo hardwaru. Výsledkem je možnost tvorby přizpůsobených embedded a testovacích řešení bez nákladů a složitostí spojených s vývojem řešení na míru.

Ve vývojovém prostředí LabVIEW s modulem LabVIEW Real-Time mohou uživatelé programovat procesory s více jádry a procesory reálného času se stovkami funkcí pro výpočty s plovoucí desetinnou čárkou pro zpracování signálu, řízení, komunikaci a logování. S nástroji LabVIEW mohou rychle vytvářet profesionální uživatelská rozhraní a integrovat stávající kód v jazyce C

a matematické funkce v textovém zápise. Modul LabVIEW FPGA nabízí grafický způsob programování FPGA, což zjednodušuje návrh a umožňuje jakémukoli uživateli používat technologii FPGA. Obsaženy jsou také funkce pro výpočty s pevnou desetinnou čárkou, zpracování signálu a řízení spolu s možností integrovat stávající kód v HDL či Xilinx COREGen.

Ve srovnání s tradičními nástroji usnadňují ovladače NI-RIO a LabVIEW integraci vstupů a výstupů a komunikaci mezi různými hardwarovými komponenty RIO. LabVIEW obsahuje ovladače I/O, DMA a rozhraní pro komunikaci bod po bodu, díky kterým je snadné připojit se ke vstupům a výstupům a k rozhraní mezi procesorem a FPGA.

### 3.3. Aplikace a budoucnost architektury NI RIO

Architekturu NI RIO dnes používají pro své aplikace již tisíce uživatelů. Například tvůrci embedded systémů v oblastech medicíny, robotiky a obnovitelných zdrojů energie používají produkty RIO pro rychlý návrh a nasazení aplikací do provozu. Produkty RIO jsou také ideální pro průmyslové aplikace a stroje, které mají specifické požadavky na řízení a vyžadují vysokorychlostní měření. Inženýři v oblasti testování používají vysoce výkonná řešení RIO pro splnění požadavků pokročilých aplikací pro testování a validaci, včetně měření v oblasti VF a testování typu hardware ve smyčce (hardware-in-the-loop). National Instruments bude i nadále významně investovat do technologie RIO a poskytovat stále širší komunitě uživatelů ideální řešení pro pokročilé embedded a testovací aplikace.

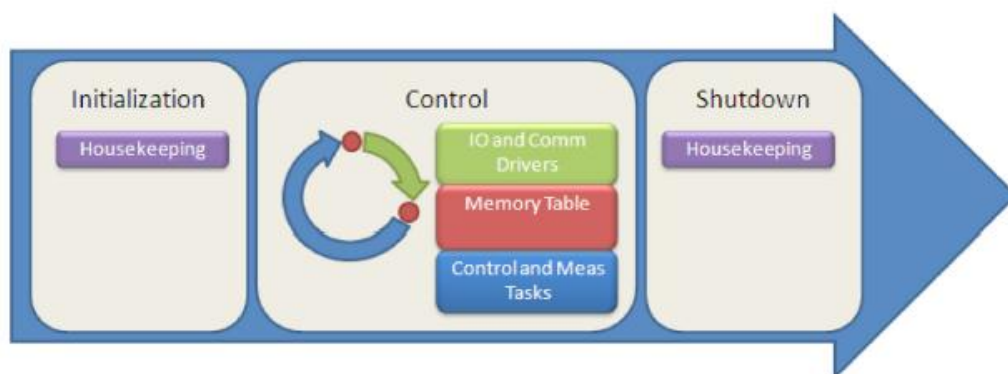
## 4. COMPACTRIO

### 4.1. Základní architektura kontroléru

Vytváření komplexních systémů vyžaduje architekturu, která umožňuje použití již vytvořeného kódu, škálovatelnost a možnost správy běhu kódu. Následující dvě části popisují, jak sestavit základní architekturu pro řídicí aplikace, a jak s pomocí této architektury spustit jednoduchou PID smyčku.

Základní architektura kontroléru má tři hlavní stavy:

1. Inicializace (pomocné úlohy)
2. Řízení (obsluha IO a komunikace, tabulka hodnot v paměti, řídicí a měřicí úlohy)
3. Ukončení (pomocné úlohy)



Obrázek 4.1. Tři hlavní stavy základní architektury kontroléru

### 4.2. Inicializační rutina

Předtím, než se začne provádět hlavní řídicí smyčka, musí program provést inicializační rutinu. Inicializační rutina připraví kontrolér na běh aplikace a není vhodné do ní umísťovat logiku související se řízením stroje, jako je spuštění či inicializace stroje. Tato logika by měla přijít do hlavní řídicí smyčky. Inicializační rutina má za úkol:

1. Nastavit všechny interní proměnné do výchozích stavů.
2. Vytvořit v paměti veškeré programové struktury potřebné pro běh. To mohou být fronty, paměťové zásobníky reálného času typu FIFO (first-in-first-out), reference na volaná VI a nahrání bitfile do FPGA.

3. Provést jakékoliv další funkce definované uživatelem pro přípravu kontroléru na provoz, jako je například příprava log souborů.

## 4.3. Řídicí rutina

### 4.3.1. *I/O, komunikace a tabulka hodnot v paměti*

Mnoho programátorů má zkušenosti s přímým přístupem ke vstupům a výstupům, při kterém funkce přímo posílají a přijímají informace z hardwarových vstupů a výstupů. Tato metoda je ideální pro vzorkování časového průběhu, zpracování signálu a pro menší aplikace s měřením bod po bodu. Nicméně řídicí aplikace obvykle používají čtení a zápis bod po bodu, mohou být velice rozsáhlé a mohou mít mnoho stavů – z nichž všechny potřebují přístup ke vstupům a výstupům. Přístup ke vstupům a výstupům spotřebovává výkon systému a může jej zpomalit. V případě, že je potřeba změnit vstupy a výstupy nebo implementovat funkce, jako je simulace, stává se správa vícenásobných přístupů ke vstupům a výstupům napříč všemi vrstvami programu komplikovaná. Aby se těmto problémům předcházelo, používá řídicí rutina architekturu se skenováním vstupů a výstupů. V tomto typu architektury přistupujete k fyzickému hardwaru pouze jednou v každém průběhu smyčky prostřednictvím I/O a ovladačů komunikace (v obrázku 2.1 označené jako obsluha IO a komunikace). Hodnoty vstupů a výstupů jsou ukládány do tabulky hodnot v paměti, a řídicí a měřicí úlohy pracují s pamětí, namísto přímého přístupu k hardwaru. Tato architektura nabízí mnohé výhody:

- Abstrakce vstupů a výstupů, možnost vícenásobného použití již naprogramovaných subVI a funkcí (vstupy a výstupy nejsou programovány přímo)
- Malá spotřeba systémových zdrojů
- Deterministický provoz
- Podpora simulace
- Možnost „vnucení“ určité hodnoty určitému vstupu nebo výstupu

- Eliminace rizika změny hodnot vstupů a výstupů v průběhu provádění logických funkcí

#### 4.4. Řídicí a měřicí úlohy

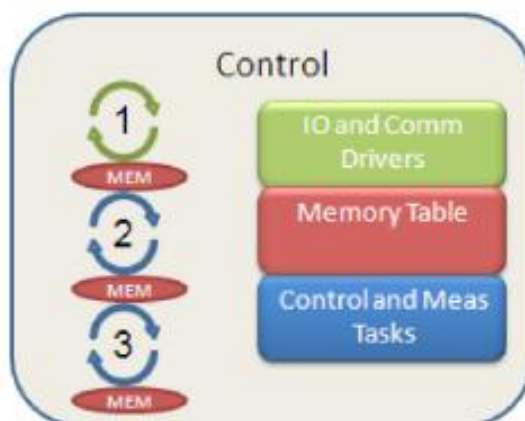
Řídicí a měřicí úlohy obsahují funkce specifické pro dané zařízení, které definují řídicí aplikaci. Může jít o řízení procesu, nebo o složitější řízení stroje. V mnoha případech je základem stavový automat, který zpracovává komplexní logiku s mnoha stavy. Jedna z následujících částí ukazuje, jak používat stavové automaty k návrhu logiky. Při provádění řídicí architektury má hlavní řídicí úloha na starosti zejména:

- Proběhnout v čase kratším, než je skenovací frekvence vstupů a výstupů
- Přistupovat ke vstupům a výstupům prostřednictvím tabulky hodnot v paměti, namísto přímého čtení a zápisu
- Nepoužívat řídicí smyčky „while“, kromě uchování stavových informací v posuvných registrech
- Nepoužívat smyčky „for“, kromě použití v algoritmech
- Nepoužívat funkci „wait“ a místo ní používat časovací funkce nebo počítání taktů
- Neprovádět v hlavní smyčce operace nad časovým průběhem, logování nebo nedeterministické operace (pro tyto operace použijte paralelní smyčky s nižší prioritou)

Uživatelské funkce mohou

- Obsahovat operace bod po bodu, jako je PID nebo postupná analýza
- Použít stavový automat pro strukturování kódu

Řídicí rutinu můžete znázornit jako jednu smyčku, kde se čte a zapisuje více vstupů a výstupů a řídicí úloha komunikuje prostřednictvím tabulky hodnot v paměti; ale ve skutečnosti jde o několik synchronizovaných smyček, kde může být více měřicích či řídicích úloh.



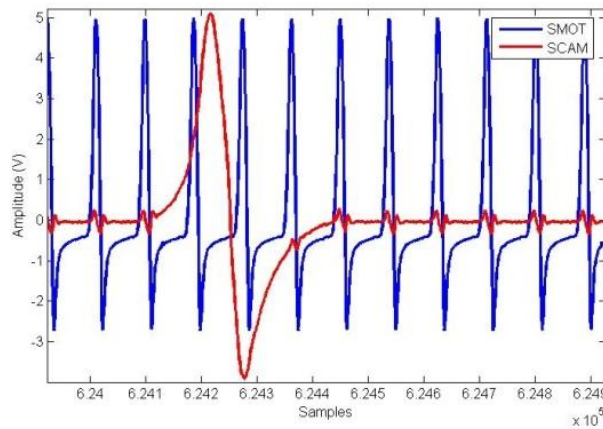
Obrázek 4.2. Tři hlavní stavy základní architektury kontroléru

#### 4.5. Ukončovací rutina

Když musí být běh kontroléru ukončen na příkaz nebo kvůli výskytu chyby, zastaví se vykonávání řídicí smyčky a je spuštěna ukončovací rutina. Ukončovací rutina ukončí kontrolér a uvede jej do bezpečného stavu. Používejte ji pouze k vypnutí kontroléru - není to vhodné místo pro vypínací rutiny řízení stroje, které by měly být obsaženy v hlavní řídicí smyčce. Ukončovací rutina:

1. Nastaví všechny výstupy do bezpečného stavu
2. Ukončí všechny spuštěné paralelní smyčky
3. Provádí všechny dodatečné funkce, jako je upozornění operátora na jakoukoliv chybu v kontroléru nebo záznam stavových informací

## 5. VÝVOJ TESTOVACÍHO HIL SYSTÉMU PRO ŘÍDICÍ JEDNOTKY MOTORŮ



Obrázek 5.1. Vzorky a amplituda

### 5.1. Popis cíle

Vývoj testovacího systému typu HIL (Hardware In The Loop) pro řídicí jednotky automobilových motorů. Systém musí být dostupný ve dvou různých konfiguracích: cenově úsporná verze, která dokáže generovat signály z telemetrických údajů, a vysoce výkonná verze, která obsahuje model motoru/vozidla a je schopna simulovat podmínky za jízdy. Oba systémy musí umět měřit pozici motoru s vysokou úhlovou přesností bez zákmitů, a to jak pomocí senzorů typu VRS, tak přes senzory na bázi Hallova efektu.

### 5.2. Řešení

Nejnáročnějším úkolem je generování signálů úhlové polohy, které lze provádět pomocí FPGA karet s hradlovými poli. Pro generování signálu VRS se používají analogové výstupní linky 7833R, zatímco pro Hallovy senzory vystačíme s digitální kartou 7813R (není potřebný žádný analogový vstup/výstup). Ostatní signály jsou generovány kartou 6723. Pro verzi s vysokým výkonem byl použit kontrolér PXI-8196 RT, který v reálném čase pracuje s modelem motoru/vozidla v rychlých smyčkách.

„Systém HIL je schopen vypořádat se s přechodovými jevy, aniž by generovaný průběh obsahoval rušivé pulzy. Tento požadavek byl úspěšně splněn s využitím FPGA karty, která má na starosti všechny úkoly spojené s generováním vysokorychlostních signálů.“



### 5.3. Krátké shrnutí

Systémy HIL jsou často využívány pro rychlé operace spojené s testováním řídicích jednotek motorů. Pomocí testeru HIL je možné reprodukovat v laboratoři podmínky vyjadřující vazbu mezi motorem a vozidlem, a tím pádem umožňuje snadné a málo nákladné ladění hardwaru/software. Aby bylo možné testovat řídicí jednotky v reálných provozních podmínkách, musejí být vstupní signály těchto jednotek srovnatelné se signály, které přicházejí ze senzorů v motoru/vozidle. Cílem projektu je vyvinout systém HIL ve dvou možných konfiguracích. První z nich spočívá v reprodukci naměřených dat (například: telemetrie) na analogových výstupních linkách a také v rekonstrukci koherentních signálů pro řízení pozice motoru. Druhým krokem je simulace signálů z motorových senzorů prostřednictvím modelu motoru/vozidla, který je počítán v reálném čase.

### 5.4. Článek

Testování a diagnostika automobilových řídicích jednotek pro motory (ECU) může být časově a finančně velice náročná úloha, a to především pro vysoce výkonné motory, které mají při testování omezenou životnost. Pokud by bylo možné provádět reálné testovací procedury bez nutnosti spouštět motor, došlo by ke znatelnému snížení časové i finanční náročnosti. Jedním z možných řešení je flexibilní HIL platforma, která dokáže reprodukovat veškeré signály ze senzorů v motoru, přičemž je pro jednotku ECU zcela transparentní.

K úloze lze přistupovat dvěma různými způsoby: prvním je reprodukce všech motorových signálů ze sady telemetrických údajů, zatímco druhý přístup používá jakožto zdroj generovaných signálů fyzikální model motoru/hnací soustavy/vozidla. Obě metody mají společné generování signálů pozice motoru (úhlové reference klikové hřídele a vačkové hřídele), což obstarává deska s hradlovým polem FPGA.

Celý systém je postaven na hardwaru a softwaru společnosti NI. Základ pro generování signálů tvoří deska s FPGA PXI-7833R (nebo 7813R) společně s PXI-6723. Pro aplikaci využívající model je nezbytný vestavný kontrolér se systémem LabVIEW RT; pro tento účel byl použit kontrolér PXI-8196. Generování pozice klikové a vačkové hřídele bylo navrženo flexibilně tak, aby byla možná simulace široké škály konfigurací motorových senzorů. Toto řešení úspěšně simuluje jak senzory a převodníky VRS, tak senzory na bázi Hallova jevu, a to s různými geometrickými charakteristikami (počet a tvar zubů). Toho bylo možné dosáhnout, neboť průběh generovaných signálů lze uživatelsky nastavit a měnit za běhu. Stejný funkční blok lze použít i pro generování signálů

z jiných než motorových senzorů, jako jsou například signály přicházející ze systému ABS či z kol. Jednou z pokročilých možností je schopnost simulovat systematické kolísání signálů ze senzorů způsobené výrobními vadami. Ty obvykle způsobují jak frekvenční posun, tak změny amplitudy, podobně jako tomu je u modulovaného signálu.

Zvláštní pozornost byla věnována zákmitové charakteristice. Cílová maximální změna rychlosti až o 100 000 otáček za sekundu je považována za dostatečnou i pro závodní motory. Systém musí takové přechody zvládnout, aniž by generovaný průběh obsahoval rušivé signály. Tento požadavek byl úspěšně splněn díky využití desky s hradlovým polem FPGA, která má na starosti veškeré úkoly spojené s vysokorychlostním generováním signálů. Vnitřní rychlostní reference FPGA, která určuje přesnost generování signálů, je aktualizována každých 16 us, což způsobí maximální odchylku o 1,6 otáčky při změně rychlosti o 100 000 otáček za sekundu.

V ustáleném stavu dokáže systém generovat signály úhlové polohy s přesností  $\pm 0,1$  otáčky při rychlosti 20 000 otáček za minutu (přičemž jeden cyklus motoru se považuje za referenci periody). To je díky tomu, že FPGA hardware má rozlišení časování na 25 ns a maximální rychlost DAC (převod z digitální na analogovou hodnotu) je 1MSps (vzorků za sekundu).

Pro realističtější určení chyby byl simulován závodní okruh. Do systému byly vkládány nevzorkované hodnoty a byla počítána RMS chyba rychlosti, přičemž byly porovnávány telemetrické hodnoty s hodnotami čtenými z jednotky ECU. V této konfiguraci byl implementován jednoduchý sledovací regulátor, aby udržoval ve fázi signály úhlové pozice a hodnoty otáček z telemetrie. RMS chyba se pohybovala pod úrovní 10 otáček za minutu na celém závodním okruhu.

Plnohodnotný systém HIL, který obsahuje model motoru-vozidla, musí vnímat akční zásahy jednotky ECU. K výpočtu kroutícího momentu je potřeba číst časování vstřikování a předstih zapalování. Čtení akčních zásahů z ECU je opět realizováno pomocí desky s FPGA, s využitím jejích časovačů s vysokým rozlišením a digitálních vstupů/výstupů. Systém je schopen číst délku vstřiku s rozlišením 1 us a určit pozici SA s přesností na  $0,1^\circ$ .

Generování signálů ze všech zbývajících motorových senzorů probíhá prostřednictvím 32 kanálové desky analogových výstupů PXI-6723. Pro každý generovaný signál je možné nastavit jeho charakteristiku, ve smyslu převodu fyzikální jednotky na napětí. S pomocí vyhledávacích tabulek lze realizovat jak lineární, tak i nelineární vztahy. Tímto způsobem lze úspěšně reprodukovat signály ze široké škály senzorů (termočlánky, kyslíkové senzory, převodníky tlaku, atd.).

Pár slov týkajících se pokročilého přístupu k celkové simulaci motoru, hnací soustavy a vozidla. Výstupem modelu, který je počítán na vestavném kontroléru PXI-8196 s LabVIEW RT, je kroutící moment, a tento model dokáže simulovat průběh tlaku ve válci v rámci cyklu motoru, a tím pádem i kroutící moment vyvíjený motorem. S pomocí stejného modelu lze navíc s vysokou přesností simulovat i dynamiku hnací soustavy a vozidla. Perioda jednoho průběhu modelu je 1 ms, což určuje i frekvenci aktualizace počtu otáček za minutu předávaného do desky s FPGA.

## 6. SYSTÉMY PRO TESTY AUTOMOBILŮ BMW NA VODÍKOVÝ POHON

### 6.1. Zadání

Vývoj simulátoru motoru BMW Hydrogen 7. Jde o nový hybridní automobil spojující potěšení z řízení BMW a výhody pohonu téměř bez emisí.

### 6.2. Řešení

Vývoj kompletního HIL (hardware-in-the-loop) testovacího prostředí pro hybridní motory pomocí softwaru a hardwaru od společnosti National Instruments.

BMW Hydrogen 7 je celosvětově prvním nadstandardním osobním automobilem s pohonem na benzín i vodík, na kterém právě pracuje vývoj automobilky, aby i s pohonem budoucnosti mohla nabídnout typické potěšení z řízení BMW. BMW Hydrogen 7 otevírá novou éru cestování prakticky bez emisí spojenou se zážitkem z řízení nadstandardního automobilu. Pro úkoly spojené s vývojem softwaru, nastavení a zabezpečení řídicích jednotek motoru byla modelová platforma BMW přizpůsobena nárokům plynoucích z použití vodíku a vývoj HIL byl vylepšen tak, aby odpovídal průmyslovým procesům. Systémová řešení HIL, která byla poprvé použita pro projekt Hydrogen 7, byla následně využita pro vylepšení HIL i v jiných projektech řídicích jednotek motorů BMW.

### 6.3. BMW Hydrogen 7 – První sériově vyráběný sedan na vodíkový pohon na světě

Iniciativa CleanEnergy společnosti BMW usiluje o odstranění emisí oxidu uhličitého pomocí přechodu od pohonu uhlovodíkových paliv, jako je benzín či nafta, k pohonu na bázi vodíku. Víze výroby obnovitelného vodíku je příspěvkem k udržitelnosti individuální dopravy osob v budoucnosti. Kombinace spalovacího motoru a kapalného vodíku převažuje nad ostatními koncepty nejen pro nižší výrobní náklady, ale také kvůli hodnotám důležitým pro zákazníka, jako je jízdní dynamika, spolehlivost a dojezd. Nyní je BMW Hydrogen 7 prvním sériově vyráběným osobním vozem s vodíkovým pohonem v segmentu nadstandardních automobilů.

## 6.4. Vodíkový pohon pro udržitelnost individuální dopravy

Skupina BMW dlouhodobě pracuje na konceptu účinné dynamiky pro všechny své motory. Řeší základní rozpor mezi vyšším jízdním výkonem a současně nižší spotřebou paliva. Iniciativa BMW CleanEnergy představuje další rozvoj této myšlenky. Na rozdíl od omezených zásob fosilních paliv, lze vodík vyrábět v neomezeném množství z obnovitelných zdrojů energie, jako je energie solární, vodní, větrná či biomasa. BMW se soustředí na spalovací motor poháněný vodíkem. Rychlostní rekord 300 km/h dosažený vozidlem BMW H2R s vodíkovým pohonem úspěšně demonstroval technický potenciál tohoto konceptu. Spalovací motor dokáže zužitkovat energii z vodíku i benzínu a slouží tedy jako společná technologie.

BMW Hydrogen 7 má 12 válcový motor s dvojitým palivovým systémem, který může dodávat jak vodík, tak benzín. Přes zatím ještě nedostatečně rozvinutou infrastrukturu pro vodík, jde o automobil s jízdními vlastnostmi typickými pro BMW, vhodný pro každodenní použití.

Omezený počet sériově vyráběných vozidel souvisí mimo jiné i s momentálně omezeným počtem čerpacích stanic pro vodík. Z důvodu malé poptávky po vodíku je vodík v současné době získáván z konvenčních energetických zdrojů. Postupné rozšiřování vodíkových motorů do sériově vyráběných vozů vytváří poptávku po infrastruktuře spojené s vodíkem, která zase naopak vytváří poptávku po automobilech poháněných vodíkem. V tomto případě je tedy iniciativa BMW CleanEnergy hnací silou k využívání nových energetických zdrojů.

## 6.5. BMW Hydrogen 7

BMW Hydrogen 7 odpovídá současnému vozu BMW řady 7. Dvanáctiválcový motor s dvojitým palivovým systémem může být poháněn buď vodíkem, nebo benzínem. Tento koncept je založen na otestované a prověřené technologii. Základem je 12 válcový čtyřdobý spalovací motor do V s objemem 6 litrů. Proměnné sání a nastavitelné vačkové hřídele pro sání i výfuk na obou blocích motoru umožňují využít bezklapkové plnění válců valvetronic. Při chodu na benzínové palivo dochází k přímému vstřikování benzínu do válce, zatímco při chodu na vodík je směs připravena mimo válec. Při chodu na vodíkové palivo má motor výkon 191 kW a maximální kroutící moment 390 Nm. Motor může

pracovat ve dvou režimech – s chudou směsí při omezeném výkonu a ve stoichiometrickém režimu na plný výkon. Výhodou provedení s dvojitým palivovým systémem je nezávislost na omezené síti vodíkových čerpacích stanic. Vodíkové palivo ve spojení se dvěma režimy chodu zajišťuje vysoký výkon při současném dodržení mezinárodních předpisů stanovujících emisní limity.

Plynný vodík je při teplotě  $-20^{\circ}\text{C}$  až  $40^{\circ}\text{C}$  vysoce těkavý. Proto je skladován v tekuté podobě v nádrži o teplotě  $-250^{\circ}\text{C}$ , aby bylo dosaženo dostatečné hustoty energie a tím i dojezdu automobilu. Vodíková nádrž je zkonstruována jako kryo kontejner a její speciální tepelná izolace odpovídá 17 metrům pěnového polystyrenu. Během cesty ke vstřikovacím ventilům se vodík zahřívá a přechází do plynného skupenství. Nádrž o objemu 168 litrů dokáže pojmout 8 kg tekutého vodíku, který má energetickou kapacitu shodnou s 30 l benzínu. Vozidlo má dojezd 200 kilometrů na vodík a dalších 500 kilometrů lze dosáhnout, když je automobil poháněn benzínem.

Nádrž je chlazená odděleným chladičem. Teplo z okolí má přesto vliv na provozní tlak v nádrži během jízdy, proto je stálý tlak udržován odpařováním vodíku. Celý proces je řízen kontrolérem nádrže CleanEnergy. Centrální kontrolér bezpečnostních funkcí monitoruje i proceduru doplňování paliva a koncentraci plynu. Při dosažení kritických hodnot kontrolér zareaguje. Mezi další funkce kontroléru patří správa palubního rozvodného systému, informování řidiče o stavu systému a komunikace se servisním střediskem. Kontrolér je redundantní a proto splňuje bezpečnostní úroveň SIL3 (Software Integrity Level, obdoba normy IEC 61508), která stanovuje nejnáročnější požadavky v automobilovém průmyslu.

## 6.6. HIL test - standardní nástroj ve vývojovém oddělení BMW

Vývoj kontroléru, funkcí a aplikace pro vůz BMW Hydrogen 7 prošly prověřeným a vyzkoušeným vývojovým procesem BMW. Od počátečního návrhu až po dynamický testovací provoz probíhají všechny fáze podle vývojových metodik s použitím modelů. HIL testy zaručují shodu skutečných zařízení s modely a naopak. Inkrementální modelování různých variant ve více než 60 HIL testovacích systémech dosahuje nezbytnou přesnost systému vyžadovanou pro automobilové aplikace. Po úspěšném prvotním spuštění HIL

testů a zavedení postupu do vývojového oddělení je dalším cílem zjednodušení HIL systémů kvůli snížení nákladů a získání nezávislosti na jednom dodavateli.

## 6.7. Aplikace HIL

Hlavním cílem využití HIL je zatím spouštění a test kontrolérů, programových a datových stavů. Většina aplikací testuje na HIL testu jednu konkrétní komponentu se zaměřením na příslušný kontrolér. Testy kontroléru (hardwaru) se soustřeďují na záznam chyb a chování v různých režimech. Vývoj softwaru vyžaduje „jednoduché“ vývojové prostředí, ve kterém lze nový software pro kontrolér rychle a bezpečně otestovat ve všech provozních stavech. Základní aplikací na systémové úrovni je testování vzájemné komunikace ve skupině kontrolérů. Nejprve se komunikace zkouší na neúplném systému a následně v laboratorním vozidle se všemi kontroléry. I když jsou pomocí těchto HIL aplikací testovány pouze základní funkce kontrolérů, rostoucí složitost kontrolérů v automobilech klade na tyto HIL aplikace vysoké nároky z hlediska přesnosti systému a druhů simulací. Používání HIL má smysl pouze tehdy, když simulační modely odpovídají komplexním procesním modelům kontrolérů. Funkce, při kterých spolupracuje více kontrolérů, dále vyžadují kombinované testovací stanoviště nebo komplexní simulace chování dalších funkcí souvisejících s vozy.

Kromě základních aplikací HIL, které jsou používány především díky cenové výhodnosti HIL systémů, spočívá těžiště využití HIL především v aplikacích používaných při vývoji funkcí a spouštění kontrolérů. Vývojář nových funkcí kontroléru, nového hardwaru kontroléru, komunikačních technologií, sensorových technologií a technologií pro akční členy používá nástroj HIL na začátku vývoje.

Poté, co vývojář uvede technologii do provozu, slouží testovací stanoviště HIL k provádění automatických bezpečnostních testů. Výsledky těchto testů jsou využity v dalších krocích vývojového procesu. V základních aplikacích je použití HIL do jisté míry nutností. V oblasti nových funkcí a uvádění novinek do provozu je použití HIL motivováno především zkrácením doby potřebné k vývoji a menším počtem testů prováděných v motoru a ve vozidle. Současná vývojová oblast aplikací HIL je monitorování aplikačních dat a zkoušení funkcí, při současném zvyšování přesnosti modelu.

## 6.8. Inkrementální modelování

Požadavek na přesnost HIL systémů je v rozporu s cílem vytvořit efektivní a rychlé vývojové prostředí pro HIL. Při periodickém vývoji řídicích systémů je postup při vývoji hardwaru a softwaru kontrolérů následující: integrace, spuštění a kalibrace funkcí a dále doladění parametrů. Již v této první fázi musí již být dostupné robustní prostředí pro spuštění. Pokud jsou k dispozici všechny údaje o nastavení, mohou HIL systémy pracovat bez problémů s vysokou přesností. Nicméně v počátečních fázích představuje získání přesných konfiguračních parametrů pro nastavení modelu poměrně náročný úkol. S prvními dostupnými výsledky měření se přesnost modelu rychle zvyšuje. Naměřené hodnoty se pak použijí pro další ladění parametrů k dosažení požadovaných výsledků. Konfigurace modelu založená na výsledcích offline CAE simulace v podstatě vede k vyšší přesnosti podřízených modelů. Důsledkem toho je, že modely používané v systémech HIL lze využít i pro aplikační úlohy. Kompromis mezi přesností v počátečních fázích a vyhrazenými zdroji je stále zřejmý. Proto tkví základní přístup zvolený při inkrementálním modelování v tom, že je použita pouze taková přesnost systému, jaká je vyžadována pro aktuální aplikaci. V důsledku toho je použita jednotná struktura modelu pro neustále vylepšování konfigurace modelu v krokové funkci, jakmile jsou k dispozici nové údaje, aby byly splněny požadavky dané aplikace na přesnost.

## 6.9. Efektivní práce s variantami

Jedním z požadavků na inkrementální modelování je efektivní práce s jednotlivými variantami konfigurace. Ta musí umožňovat rychlou aktualizaci simulačních modelů na mnoha různých testovacích systémech HIL. Práce s variantami spolu s konfigurovatelnou strukturou modelu jsou nutným předpokladem pro použití jednotné modelové platformy ve veškerých projektech motorů. To je jeden z hlavních důvodů, proč byl pro modelovou platformu BMW používán Simulink.

Snadná integrace nové technologie pro vodíkový pohon potvrzuje správnost volby původního konceptu. Nyní jej lze použít i k propojení různých projektů motorů. I když jsou v několika různých projektech použity stejné vývojové metody, řídicí modely a simulační modely, je nezbytné vynaložit při realizaci jednotlivých projektů určitou práci navíc. Rozhodnutí, zda má být nový projekt



integrován na jednotné platformě, závisí na množství práce eventuálně potřebné pro oddělený vývoj. Vynaložená práce pro oddělený vývoj se pak porovná s prací nutnou na integraci společné platformy a vyhodnotí se možný synergický efekt. Z těchto důvodů byly HIL systémy pro kontrolér CleanEnergy vyvíjeny odděleně, zatímco ostatní systémy pro kontrolér motoru byly integrovány do společné platformy. I oddělený vývoj systému pro tento konkrétní projekt však vycházel z poslední verze společné platformy. Tento postup, který nemá žádný dopad na prostředí projektu, nevyžaduje žádné dodatečné úpravy a může být implementován bez koordinace s konkrétními metodami. Vývoj, který byl dosažen v ostatních projektech po započítání vývojového procesu, musí pokračovat odděleně. Naproti tomu opravdová synergie neexistuje, dokud není integrace dokončena.

## 6.10. Sériový vývoj HIL

Ačkoliv byly HIL systémy nedílnou součástí vývojových procesů v BMW již po mnoho let, bylo vždy velice náročné udržovat v souladu výhody z aplikace pro sériovou výrobu a potenciál nových metod. V pilotních projektech v různých fázích vývoje a různých oborech jsou aplikace HIL dále rozvíjeny. Použití těchto postupů směřuje k vytvoření metod pro využití vývoje učiněného v těchto centrálních projektech napříč projekty v celém vývojovém procesu.

Další krok představuje určení procedur, které zahrnují jednotící specifikaci použití metod a podrobnosti o předchozích požadavcích na systém včetně potřebných příprav. V této fázi je nejdůležitější zvládnutí celé problematiky a základní strategie pro management kvality, zatímco následující industrializace se soustředí především na snižování nákladů a zbavení se závislosti na jednotlivých dodavatelích.

Pod industrializací BMW rozumí řízení metod a procesů vývoje HIL tak, aby aplikace HIL mohly být nasazeny všeobecně a nebyly přitom závislé na dodavatelích jednotlivých systémů. Řízení systému také zahrnuje možnost integrace celého systému a možnost přiřadit jednotlivé projekty různým dodavatelům v závislosti na projektu. To je možné pouze za předpokladu, že jsou postupy a rozhraní určeny takovým způsobem, že mohou být různé projekty zpracovávány různými dodavateli. K tomu může dojít samozřejmě pouze tehdy, když nemusí být přerušena synergie napříč projekty a když nemusí

být stráveno příliš mnoho času při používání společných sekcí projektů. Toto nepředstavuje zásadní protimluv proti výběru vývojových partnerů, kteří v určité oblasti nabízejí ucelené HIL systémy a v případě potřeby jsou schopni spolupracovat a poskytnout je koncovému uživateli. Takové přiřazení není zásadně ovlivněno vysokými náklady na změnu dodavatele. Ve skutečnosti k takovému přiřazení dochází s ohledem na technické výhody týkající se konkrétního projektu spojené s různými systémovými řešeními a především s ohledem na náklady v konkurenčním tržním prostředí. Trvalé využívání vývojového procesu vyžaduje neustálé přizpůsobování HIL testovacích systémů novým projektům a zabezpečení kontinuity stávajícího portfolia systémů pro nové systémy.

### 6.11. HIL testovací systém pro kontrolér CleanEnergy

Specifickými kontroléry pro Hydrogen 7 jsou kontrolér motoru a kontrolér CleanEnergy . Kontrolér motoru je modifikovaný sériový kontrolér pro 12 válcový čtyřtákní spalovací motor. Kontrolér CleanEnergy je naopak založen na architektuře kontroléru motoru převzatého z letecké konstrukce. Software, klasifikovaný jako SIL 3 v souladu s normou IEC 61508, byl navržen v programech MATLAB/Simulink. Kód byl vygenerován automaticky v prostředí pro vývoj softwaru Atena, které pro generování kódu používá TargetLink. Interně kontrolér funguje na zcela stejném principu. Aplikační software neobsahuje moduly řízené přerušením, na rozdíl od kontrolérů motoru, které provádějí rozsáhlé výpočetní úkony synchronně s pozicí klikové hřídele. Tím pádem mohou být testy Software-in-the-Loop (SIL) prováděny pro všechny funkce přímo na úrovni modulů. Vzhledem ke svému specifickému určení neodpovídá kontrolér CleanEnergy jiným komponentám BMW z hlediska hardwaru a s ním spojeného simulačního modelu, nelze použít ani již hotové testovací skripty. Výhody integrace uzavřené do vývojového projektu jasně odsunují možnost synergie s jinými projekty. Kvůli tomu byly související HIL testovací systémy vytvořeny podle příkladu projektu z oblasti letecké techniky od partnera při vývoji kontrolérů.

Kontrolér CleanEnergy je navržen jako 2 kanálový systém - pro řízení procesorů a akčních členů. Systém je redundantní. V případě poruchy prvního okruhu, je vodíkový pohon řízen druhým. Pokud selžou oba systémy, dojde

k automatickému vypnutí vodíkového pohonu a uvedení do bezpečného stavu. Komunikace s ostatními systémy probíhá přes pět CAN linek a další sériové sběrnice. Výkonové zesilovače různých ventilů a dalších akčních členů mají vlastní diagnostiku. Pro vývojové a zabezpečovací úlohy bylo pro tento kontrolér vytvořeno několik HIL testovacích systémů: Hlavním úkolem bylo zvládnutí měnící se zátěže při současném příchodu chybových signálů na všechny kanály. Aby bylo možné testovat funkce kontroléru s takto extrémními hodnotami elektrických parametrů akčních členů, byla vytvořena testovací zátěž s různými variantami odporového a indukčního zatížení. Pro aplikaci chybových signálů částečně i s vysokými proudy byla vytvořena řešení na bázi Atena a systému reálného času dSPACE, která sloužila zároveň jako testovací zátěž. Systém Atena byl používán k vývoji a úpravám modelu, stejně jako k tvorbě a provozu HIL systémů.

## 6.12. HIL testovací systém pro kontrolér motoru

Od počátku byl HIL systém pro testování řízení motoru integrální součástí HIL testovacího vybavení BMW. Úkoly specifické pro vodík vztahující se k motoru vozu Hydrogen 7 byly integrovány do modelové platformy BMW, což umožnilo použít pro Hydrogen 7 včetně hardwarových rozhraní společnou vývojovou základnu pro HIL, vyzkoušenou a otestovanou v sériovém vývoji. Aby byly splněny dodatečné požadavky, které Hydrogen 7 kladl na HIL testovací systém, musel proběhnout i určitý specifický vývoje pouze pro tento projekt. Některé nově vyvinuté součásti pak byly použity pro optimalizaci využití HIL ve všech projektech týkajících se motorů v BMW.

Systém řízení motoru Hydrogen 7 se skládá z dvou kontrolérů (master-slave), který každý kontroluje jeden blok 12 válcového motoru. Kontrolér je propojen s ostatními ve vozidle, aby byla zajištěno např. správná funkce imobilizéru. Společnost BMW nově vyvinula funkce pro řízení vodíkového motoru. Při vývoji a zkouškách funkcí kontroléru v BMW je HIL proces integrován do standardních postupů tak, že dokonce i při testování vozidla v zahraničí mohou vývojáři upravovat parametry funkcí na testovacích systémech HIL a mohou přímo na místě analyzovat pomocí HIL důsledky změn. Tyto systémy se obvykle nepoužívají v mobilních aplikacích. Aby bylo možné přemísťovat simulátor v kufru běžného osobního automobilu, je nezbytné, aby se celý systém vešel do

19 palcové skříně s maximálně 8 – 9 jednotkami. Jedním z hlavních požadavků na HIL testovací systém byla tedy kompaktní velikost. V minulosti vyvíjela společnost BMW přenosné systémy založené na kompaktním simulátoru dSPACE a středně velkém HIL simulátoru pro konvenční motory s 8 válci a jedním kontrolérem [5]. Větší 12 válcový motor a úprava na spalování vodíku způsobily, že se tato konfigurace dostala ke svému limitu. Procesorové a I/O desky, které jsou vyvíjeny výhradně pro HIL aplikace, vyžadují hodně místa. Použití několika kontrolérů vede k velice složité kabeláži pro propojení kontrolérů, neboť signály procházejí přes externí svorky. To přinutilo BMW vyhlásit výběrové řízení na nový koncept kompaktních HIL testovacích systémů, při současném snížení nákladů na pořízení a provoz těchto systémů.

### 6.13. Požadavky na HIL testovací systémy pro Hydrogen 7

Testovací systém HIL musí snímat všechna rozhraní příslušných kontrolérů prostřednictvím vstupních a výstupních kanálů. Jelikož jde o test funkcí kontroléru a ne o hardwarový test, nejsou nainstalovány žádné reálné zátěže, jako jsou vstřikovací trysky nebo zapalovací svíčky. Namísto toho je na vstupy kontroléru přiváděn testovací elektrický signál. Pouze dvě škrtkové klapky lze provozovat s alternativním testem pomocí reálné zátěže nebo analogického modelu. Každý ze dvou kontrolérů motoru pro Hydrogen 7 sdružuje všechny signály typické pro moderní 6 válcový motor s přímým vstřikováním. Signály však byly rozšířeny o několik dalších specifických jen pro vodíkový pohon. Šlo o 4 nastavitelné vačkové hřídele a 6 senzorů klepání a dále o požadavek přesně a spojitě zobrazovat stav lambda sondy v celém teplotním rozsahu. Kromě kompaktní struktury se to také nyní stalo u BMW standardem v HIL testovacích systémech. To se vztahuje také na komunikaci prostřednictvím dvou rozhraní CAN a jednoho rozhraní BSD, stejně jako na integraci modelové platformy BMW založené na Simulinku.

Struktura HIL na nové platformě za použití standardních softwarových a hardwarových komponent byla alternativou k realizaci založené na hardwaru dSPACE a ETAS a systémovém softwaru, který byl v BMW používán při vývoji motorů již mnoho let. Aplikace pro měření a automatizaci používají komponenty s mezinárodně standardizovanými rozhraními. Jde o integrované zásuvné karty pro rychlé zpracování signálů, generování signálů a snímání

signálů používané v mnoha průmyslových odvětvích. Hustota signálů a frekvence signálů testovaných v letectví a telekomunikačních technologiích, umožňují zachování kompaktních rozměrů HIL systémů. Rozhraní pro elektrické komponenty, která jsou dostupná z řízení procesu, zajišťují, že tato technologie bude moci být implementována také pro řízení vozidel s motory a hybridními pohony v budoucnosti. Na rozdíl od analogových vstupů a vstupů pro inkrementální čidla, umožňuje technologie FPGA (Field Programmable Gate Array) volitelnou konfiguraci požadovaných rozhraní. Nejen z hlediska nákladů je mnohem efektivnější řešení HIL systémů pomocí standardních komponent z oboru měření a automatizace. Funkce karet odpovídají nejnovějším technologiím.

Použití nové hardwarové platformy a softwarové platformy pro HIL systémy vyžaduje ze softwarového hlediska integraci modelové platformy BMW a také rozhraní pro připojení softwaru pro automatizované testování. Jelikož byla modelová platforma BMW a automatizační software již implementovány na mnoha testovacích systémech, odráží struktura konfiguraci jednotlivých testovacích systémů. Modelová platforma, která je kompletně implementována v Simulinku, zahrnuje modely komponent a modely řízení, stejně jako vztahy mezi fyzikálními a elektrickými hodnotami na rozhraní. Tyto signály mohou být beze změny převedeny na signál elektricky přenášený do testovacích systémů různých výrobců, zatímco konverze protokolu používaného pro komunikaci na sběrnici je specificky integrována do systémového software HIL. Tyto části musí být vytvořeny paralelně. To samé se vztahuje na rozhraní uživatelského softwaru pro systémy HIL. Jelikož ta určují, jak uživatelsky přívětivý daný HIL systém je, je důležitý jednotný "vzhled a zacházení". Při vývoji motorů je v BMW pro automatizaci testování používán výhradně software ECU-Test od společnosti TraceTronic. Vývoj nové HIL platformy vyžaduje jedinečné nastavení integračního rozhraní. Jelikož všechny testovací systémy HIL používají modelovou platformu BMW a jelikož při automatizovaném testování je přístupováno pouze k těmto hodnotám, mohou být zaměňovány testovací skripty mezi testovacími systémy různých dodavatelů systémů HIL, a to bez jakýchkoliv omezení. Tento přístup není závislý na žádných snahách o standardizaci.

## 6.14. Požadavky HIL plynoucí z reintegrace do projektového prostředí

Přestože dodatečný čas a práce spojené s tvorbou pilotního systému leží na dodavateli a cena dodávky odpovídá jedinečnosti řešení vytvářeného na míru, implementace nové systémové platformy má z ekonomického hlediska smysl pouze tehdy, pokud může být v krátkém čase použita pro všechny projekty motorů bez dodatečných úprav. Dodatečné požadavky pramenící z prostředí, ve kterém probíhá práce na více projektech, nemusí být přímo implementovány v jediném simulátoru. Nicméně prvky pro konverzi musí být na systémové platformě plně přístupné. Tím pádem musí příslušný dodavatel systému HIL připravit řešení testovacího systému, které je nezávislé na současném projektu, kvůli případnému rozvoji v oblasti aplikací. Jakožto technický partner pro daný projekt používá dodavatel systému HIL dostupné standardní komponenty. Kromě toho musí započít vývoj chybějících komponent, aby předešel přílišným nárokům na vývoj pro pozdější specifická řešení.

Aby bylo možné rychle použít novou generaci HIL simulátorů na všechny modely čtyřtákních spalovacích motorů a dieselových motorů v BMW, jsou zcela zásadní testovací zátěže a řešení pro sběr signálů pro řízení vstřikovacích ventilů různých Piezo a magnetických vstřikovacích systémů. Simulace motorů se systémem vysoce přesného vstřikování od společnosti BMW vyžaduje, nejen pro motory spalující chudou směs, synchronizaci odměru času vstřikování a měření aktivačních napětí pro různé vstřikovací impulzy v celém spalovacím cyklu s polohou klikové hřídele. V takovém případě je nejdůležitější rychlý sběr signálů a jejich předzpracování. Pokud lze sběr signálů a jejich předzpracování nastavit, lze je použít například pro získávání signálů ve sběrníkovém systému prostřednictvím osciloskopického zařízení v závislosti na stavu modelu.

Motor Hydrogen 7 byl vyvinut pro jedinou konfiguraci vozu, zatímco všechny ostatní motory BMW jsou implementovány v až 7 modelech. Velká část testovacího systému HIL je daná kontroléry motorů s jejich velkým počtem rozhraní pro senzory a akční členy a s nezbytnou testovací zátěží. Aby bylo možné testovat kontroléry motorů na systému HIL v prostředí různých vozidel, jsou k systému HIL prostřednictvím standardizovaného rozhraní připojeny související kontroléry, jako je imobilizér, gateway a kombinované nástroje. Sady kontrolérů vozidla jsou namontovány do 19" skříně a lze je snadno měnit.

Stejný koncept určuje implementaci jednotek zátěže na převodovku a kombinaci systémů HIL pro kontroléry převodovek. Po použití jednotné modelové platformy BMW pro všechny HIL aplikace tento koncept ještě dále posiluje industrializaci dodávek a provozu HIL. Přístup ke specifickým funkcím BMW prostřednictvím jednotného rozhraní je nezávislý na dodavateli testovacího systému HIL. Moduly se specifickými BMW komponentami mohou být vytvářeny a konfigurovány centrálně a cenově efektivně, a lze je otestovat na referenčních systémech před jejich implementací do různých systémů HIL.

S různorodostí modelů automobilů roste také různorodost simulací komunikace na sběrnici. Kvůli síťovým funkcím a rostoucímu počtu kontrolérů připojených k testovacím systémům HIL nabývají simulace chování zbytku sběrnice na důležitosti. Do jisté míry se stávají nejsložitější úlohou při návrhu HIL systémů. Efektivní a robustní aplikace systémů HIL vyžaduje podporu generování a obnovy simulace zbytku sběrnice na základě souborů s popisem komunikace (například formát dbc- pro CAN). V průběhu celého vývoje se katalogy zpráv neustále mění. Tyto změny se vztahují k velkému počtu zpráv, které očekávají jednotlivé kontroléry v HIL systému, a které nejsou dynamicky připojeny k modelům zařízení. V takovém případě je důležité, aby v průběhu aktualizace simulace zbytku sběrnice nebyl vyžadován žádný složitý zásah do modelového prostředí HIL. Pokud základ komunikace a různorodost zpráv překročí obsah dynamických zpráv, BMW implementuje v některých systémech HIL simulační systémy komunikace na zbytku sběrnice od třetích stran. Konfigurační proces těchto systémů implementovaných částečně pro CAN a téměř výhradně pro FlexRay je přizpůsoben přímo síťové komunikaci datové báze. V těchto systémech přidává do simulačních modelů dynamické zprávy dodatečné CAN spojení. Jelikož outsourcing simulace zbytku CAN sběrnice nemá význam, pokud podíl zpráv, které jsou dynamicky přidávány do modelu, je vysoký, je efektivní řízení simulace zbytku sběrnice nutným požadavkem na všechny HIL platformy.

V lokálním prostředí kontrolérů akčních členů jsou používána specifická komunikační rozhraní, stejně jako sběrnice BSD a několik sběrnicí LIN, které jsou v automobilovém průmyslu zcela běžné. Příkladem může být SPI protokol, který je používán jako rychlá senzorická sběrnice z oblasti vestavných aplikací nebo speciální formáty v oblasti komunikace imobilizéru. Požadavky na možnosti konfigurace sběrnicí LIN a CAN jsou si navzájem podobné. Proprietární sběrnice také vyžadují mírné přizpůsobení novým komunikačním



protokolům. Pokud lze rozhraní plně namapovat prostřednictvím softwarové konfigurace, například technologie FPGA, bez potřeby specifických hardwarových změn, je efektivní mapování zjednodušeno.

Některé aplikace vyžadují strukturu testovacích systémů HIL obsahující více procesorů, z důvodů složitosti systému a vysoké komunikační rychlosti použitých komponent. Proto musí všechny platformy HIL umožňovat sdružování několika výpočetních uzlů standardizovaným a efektivním způsobem.

Kromě aplikací HIL, ve kterých jsou jako testovací jednotky k testovacímu systému HIL připojeny pouze kontroléry motoru, dochází nyní k nárůstu počtu implementací technologií HIL a modelů do testovacích stanovišť pro motory či komponenty, jež podporují modely. Podřízený úkol, celý spalovací motor nebo akční členy pro nastavení časování ventilů, jsou ovládány reálnými energetickými toky a příslušné chování vozidla je pro kontrolér realisticky simulováno. Mezi aplikace patří testy spolehlivosti s realistickými profily prostředí a podrobné testování funkcí kontrolérů, pro které je složité vytvořit model. Pro vývoj systémů spravujících tok elektrické energie v různých sítích desek ve vozidlech byl vytvořen testovací systém HIL, ve kterém byly jakožto reálné části integrovány kontroléry a baterie z vozidel, jež byly nabíjeny pomocí reálných proudových profilů. Tyto typy aplikací HIL často vyžadují paralelní implementaci HIL úloh a technologií pro rychlé měření a řízení.

## 6.15. Realizace HIL testovacích systémů pomocí simulátorů NovaSim

Systémy HIL pro řízení motoru Hydrogen 7 jsou založeny na HIL simulátorech NovaSim od společnosti MicroNova. MicroNova je výrobce a integrátor HIL testovacích systémů, který má zkušenosti jakožto technologický partner při vývoji funkcí kontroléru CleanEnergy a při vývoji softwaru.

Základní struktura těchto simulátorů je založena na hardwarové platformě od společnosti National Instruments, ve které je počítač pracující v reálném čase připojen k různým vstupně/výstupním deskám prostřednictvím sběrnice PXI. Simulační modely jsou s hardwarem spojeny pomocí softwaru National Instruments LabVIEW, který také umožňuje provoz simulátoru. Spojení prostřednictvím sítě Fast Ethernet umožňuje komunikaci s uživatelským



počítačem. Základní myšlenka, stojící za celou řadou těchto simulátorů, je použití co největšího možného počtu standardních komponent dostupných na trhu, a integrace těchto komponent v několika fázích. Hardwarová platforma je sběrnice PXI, která je kompatibilní se sběrnici compact PCI. Několik výrobců nabízí pro tuto sběrnici stovky komponent, které jsou neustále vylepšovány a celosvětově používány v měřicí a automatizační technice. Proto nepředstavovalo žádný problém použít pro druhou generaci systémů HIL pro vodíkové pohony výkonnější počítače reálného času, aniž by bylo nutné modifikovat stávající simulační software. Například desky Reflective-Memory, založené na sběrnici compact PCI, byly použity v projektech síťových systémů HIL pro spojování počítačů do víceprocesorových systémů. Nicméně novější simulátory používají cenově efektivnější spojení prostřednictvím Gigabitového Ethernetu.

Všechny standardní hardwarové komponenty jsou společností MicroNova kombinovány s dalšími komponentami specifickými pro automobilový průmysl do jednoho standardního HIL simulátoru. Úloha se nevztahuje pouze na technické řešení specifické pro určitý projekt. Ve skutečnosti je důležitější zahájit vývoj hardwarových komponent, které jsou zapotřebí jako základní standardní část v HIL aplikacích pro testování motorů a karosérií, ale které nelze použít v jiných oblastech. Příkladem jsou desky pro zpracování signálu z výstupu lambda sond nebo systémy pro simulaci elektrických chyb, které jsou přizpůsobeny požadavkům na testování motorů.

Software sleduje stejný integrační přístup: Základem je softwarový balík LabVIEW s moduly LabVIEW Realtime, LabVIEW-FPGA a Simulation Interface Toolkit. Tyto softwarové nástroje, běžně používané například v měřicí technice, umožňují vytvářet kód fungující v reálném čase a příslušné uživatelské rozhraní z modelů v Simulinku. Společnost MicroNova, jakožto systémový partner, rozšířila tyto komponenty o sady bloků sloužících jako rozhraní k signálům specifickým pro automobilový průmysl. Během komunikace standardních automobilových sběrnic, jako jsou CAN, LIN či FlexRay, spouštěné z HIL prostřednictvím specializovaných desek, obsahují tyto sady bloků integraci do Simulinku a automatické generování simulace zbytku sběrnice. Rozhraní Python pro automatizované testování umožňuje snadný přístup ke všem úlohám vztahujícím se k jednotlivým částem testovacího systému HIL.

Rekonfigurovatelnému FPGA hardwaru lze přiřadit funkcionalitu pomocí grafického programování. Na této technologii je založeno měření signálů specifických pro motory, jako je aktivace zážehu a vstřikování a s ní spojené generování signálů klikové hřídele, vačkové hřídele a signálů klepání. Tyto bloky mohou být integrovány přímo do modelů v Simulinku, přičemž nastavení specifické pro projekt lze nakonfigurovat například pomocí specifikace profilu detekčního kola. Proprietární sběrnice, jako je BSD či SPI, jsou také namapovány na FPGA pomocí sad bloků. Bez nutnosti modifikovat hardware můžou být do systému HIL přidány nové funkce, a ten tak může být přizpůsoben budoucím požadavkům. Tato flexibilita rekonfigurovatelného hardwaru je základem pro trvalý rozvoj testovacích systémů HIL. Nicméně efektivní použití je možné pouze se sadami bloků.

Použití rekonfigurovatelného FPGA hardwaru ukazuje, že při vzájemné spolupráci hardwaru, systémového softwaru, blokových sad specifických pro HIL a systémové konfigurace specifické pro projekt musí být jednotlivá rozhraní provázána tak, aby byly požadavky aplikace splněny na nejlepší pozici v řetězci. Pouze tehdy jsou zřejmé výhody použití standardních komponent oproti proprietárním systémovým řešením od jednoho dodavatele. Jelikož standardní hardware a software hraje důležitou roli, je zřejmá důležitost podpory ze strany technického partnera – společnosti National Instruments. Nehledě na otevřené PXI architektury reálného času jsou tyto hardwarové komponenty upřednostňovány. Kontinuita a ucelenost hardwarových a softwarových komponent a rozvinutost úloh propojených s HIL na produktové úrovni byly pro BMW důvodem pro použití těchto systémů HIL při vývoji motorů.

## 6.16. Struktura systému

Pro vývoj řízení motoru Hydrogen 7 byly na počátku vytvořeny dva systémy HIL. Po úspěšném uvedení a intenzivním používání těchto systémů jak pro manuální, tak pro automatizované testování, byly vytvořeny dva další systémy pro použití ve vývojovém procesu motoru Hydrogen 7.

Nejvyšší vrstvu představuje panel se svorkovnicí pro kontrolér se zobrazovacími prvky a rozvodem signálů. Přívod napájení pro simulaci baterií je umístěn pod hlavní vrstvou spolu s počítačem reálného času a obvody pro zpracování signálů. Počítač reálného času je PXI systém s 2 GHz kontrolérem. Se dvěma HIL

motorovými deskami, jednou CAN deskou a deskou s analogovými výstupy jsou k dispozici následující signálová rozhraní:

3 x 96 = 288 digitálních vstupů či výstupů: Ty mohou být také použity ke generování a měření šířkově modulovaných (PWM) signálů a speciálních signálů s úhlovou synchronizací (například vačková hřídel, vstřikování). Specifická sériová rozhraní, jako jsou sběrnice BSD či SPI, jsou také integrovány do simulátoru bez dodatečných úprav hardwaru.

24 analogových vstupů. 56 analogových výstupů

4 rozhraní CAN

Přestože aplikace vyžaduje malé vnější rozměry, vysoká hustota centrálních komponent usnadňuje propojení mezi vstupně/výstupními kanály a různými kontroléry v simulátoru. Stejně jako u větších testovacích systémů HIL jsou externí propojení specifická pro daný projekt omezena na spojení 1:1 specifické pro kontrolér, které je způsobeno různým umístěním vývodů na konektorech kontrolérů. Aby bylo možné lépe identifikovat jednotlivé HIL komponenty, nejsou nainstalovány propojovací kabely pro vstupně výstupní desky a zpracování signálů. Tyto standardní spoje 1:1 jsou součástí interního zapojení simulátoru, které není závislé na konkrétním projektu. Interní rozvod signálů je umístěn na nejvyšší vrstvě simulátoru za konektorovým panelem a lze k němu přistupovat i v průběhu simulace, když je otevřen kryt.

## 6.17. Shrnutí a perspektivy

Použití HIL pro vývoj funkcí a zabezpečení řízení motoru Hydrogen 7 bylo zcela integrováno do stávajícího vývojového procesu prostřednictvím HIL modelové platformy společnosti BMW. Díky specifikaci procesu a možnosti integrace se společností BMW podařilo implementovat požadavky specifické pro projekt tak, aby bylo možné využít vyvinuté technologie pro další projekty motorů prostřednictvím industrializace vývoje HIL.

Byl vytvořen univerzální systém HIL pro všechny současné kontroléry motorů BMW, který je založen na simulátorech použitých pro Hydrogen 7. Spolu s 10 kompaktními systémy je používána kombinace testovacích systémů HIL pro návrh kontrolérů pro systém rozvodu elektrické energie na palubě: Možnost alternativního použití baterií a výkonové elektroniky s reálnými elektrickými proudy ukazuje propojení mezi HIL, technologií pro měření a technologií pro

testovací stanoviště založená na modelech, a to nejen v oblasti hybridních pohonů.

## 7. ŘÍZENÍ NEJVĚTŠÍ HYBRIDNÍ LOKOMOTIVY S PALIVOVÝM ČLÁNEK NA SVĚTĚ POMOCÍ PROGRAMU NI LABVIEW A ZAŘÍZENÍ COMPACTRIO

### 7.1. Popis cíle

Řízení provozu hybridní lokomotivy s palivovým článkem o výkonu 250 kW.

### 7.2. Řešení

Pro řešení úkolu byl použit řídicí prvek NI CompactRIO. Ten sloužil pro monitorování a řízení bezpečnosti a provozu lokomotivy s palivovým článkem. Sběrnice CAN (Controller Area Network) byla použita pro komunikaci údajů o stavu motoru operátorovi prostřednictvím dotykového panelu programovaného pomocí softwaru NI LabVIEW. Zvolené řešení umožňuje implementovat rychlé monitorování různých I/O bodů a zároveň připojení k široké paletě speciálních senzorů, jako jsou průtokoměry a tlakové snímače.

Hlavní pohonnou jednotkou tradiční lokomotivy typu „switch“ je diesellový motor o výkonu 1 až 2 MW, který pohání alternátor napájející trakční motory a pomocné systémy lokomotivy. Tyto tradiční lokomotivy vyžadují vysoce výkonný diesellový motor, který obvykle není příliš palivově úsporný a má omezené řízení emisí. Následné úpravy designu lokomotiv typu „switch“ se přesunuly směrem k hybridně-elektrickému provedení, které snižuje celkové emise a spotřebu pohonných hmot, protože motor může být zredukován a baterie ukládá energii pro vysoké výkonové transienty.

Nicméně významným zdrojem znečištění kouřovými částicemi diesellového motoru v příměstských oblastech jsou diesellovémi motory poháněné lokomotivy v kolejích. Za účelem zmírnění tohoto znečištění se severoamerická organizace – partnerství veřejného a soukromého sektoru, zabývá výrobou prototypu hybridní lokomotivy typu „switch“ s palivovými články určené pro příměstské železniční aplikace a nahrazující diesellový motor 250 kW generátorem s palivovým článkem. Vzniká tak největší hybridní lokomotiva s palivovým článkem na světě.

Společnost Vehicle Projects LLC z Denveru v Coloradu vypracovala řídicí systém pro palivový článek využívající vestavný řídicí prvek CompactRIO a grafický návrhářský program LabVIEW. Našimi cíli bylo snížit znečištění vzduchu v městských železničních aplikacích, včetně kolejí u námořních přístavů a sloužit jako mobilní záložní zdroj energie pro kritickou infrastrukturu během výpadků

sítě vojenských základen nebo u civilních operací odstraňování následků katastrof.

### 7.3. Pohonné jednotky s palivovými články a hybridní jednotky

Palivové články jsou elektrochemické zdroje napájení, které přímo převádějí chemickou energii paliva na elektrickou energii. Články produkují elektrickou energii a vodu z vodíkového paliva a kyslíku, což je obrácený proces vodní elektrolýzy. I když mají palivové články podobný princip fungování jako baterie, liší se v tom, že elektrochemicky aktivní materiály, vodík a kyslík, jsou skladovány nebo dostupné externě a jsou průběžně dodávány do zařízení, nejsou tedy uloženy v elektrodách. Pravidelně se doplňují, jako motor, a nejsou tedy elektricky dobíjeny. Podobně jako baterie jsou jednotlivé články seskupeny do sestav poskytujících požadované napětí nebo energii.

Hybridní pohonné ústrojí s palivovým článkem používá hnací motor s palivovým článkem společně s doplňkovým zařízením pro napájení/ukládání energie pomáhajícím vozidlu přenést se přes výkonové špičky jejího pracovního cyklu a obnovuje kinetickou nebo potenciální energii při brzdění. Pro provoz v ustáleném stavu se trvalý čistý výkon hnacího motoru musí rovnat nebo musí přesahovat střední výkon pracovního cyklu. Předběžný výzkum ukázal, že hybridní-switch lokomotiva dokáže snížit investiční a opakované provozní náklady.

### 7.4. Navrhování řídicího systému pomocí zařízení CompactRIO

Při vývoji velkého vozidla s vodíkovým palivovým článkem se narazilo na mnoho integračních problémů, včetně otázek hmotnosti, krytu a bezpečnostních hledisek. Náročné provozní podmínky, zejména rázové zatížení, k němuž dochází při spřáhování s vagony, vyžadovaly systémy s vysoce odolnými komponenty. Řídicí systém palivových článků navíc musel komunikovat se stávajícím komerčním řídicím prvkem vozidla a interpretovat požadavky operátora a upravovat parametry generátoru palivového článku s ohledem na požadovanou energii. Vestavný řídicí prvek CompactRIO by nabízel ideální formát pro splnění těchto specifikací se správnou kombinací I/O pro tuto aplikaci. Tento programovatelný automat PAC (Programmable Automation Controller) řídí a vykonává všechny funkce generátoru a průběžně monitoruje provoz a bezpečnost vodíkové nádrže a energetických systémů palivového článku.

## 7.5. Softwarová architektura na bázi programu LabVIEW

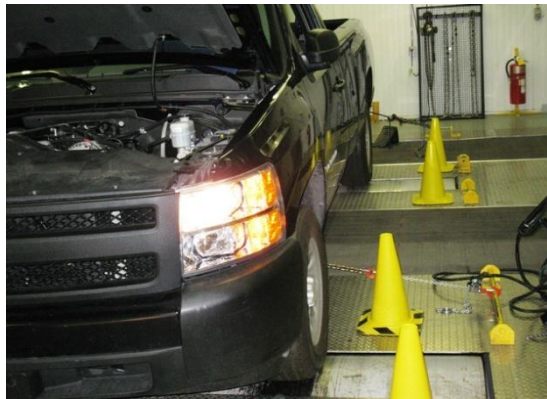
Vestavný řídicí prvek CompactRIO, na němž běží moduly LabVIEW Real-Time a LabVIEW FPGA, řídí provoz generátoru s palivovým článkem. Uživatel monitoruje řídicí systém prostřednictvím dotykového panelu instalovaného v kabině lokomotivy. Řídicí aplikaci tvoří modulární řídicí algoritmus VIs komunikující s ostatními prvky a systém I/O s hradlovým polem FPGA využívajícím architekturu značek, takže je možné odkazovat na každý I/O bod pomocí názvu přiřazeného v aplikaci LabVIEW. Každá značka má přiřazené vlastnosti včetně alarmových limitů, změny měřítka (konverze z napětí na technické jednotky) a události, například v případě, že je chce uživatel protokolovat na disk. Do našeho systému na bázi PAC byla zanesena mentalita programovatelného automatu PLC (Programmable Logic Controller).

## 7.6. Vývoj dokonalé řídicí platformy pomocí programu LabVIEW a zařízení CompactRIO

Jako platforma pro řešení bylo zvoleno LabVIEW a CompactRIO, protože moduly NI řady C s integrovanou úpravou signálu pomohly implementovat rychlé monitorování různých I/O bodů a zároveň připojit k široké paletě speciálních senzorů, jako jsou průtokoměry a tlakové snímače.

Navíc byly vytvořeny složité řídicí algoritmy nad rámec jednoduchého proporcionálně-integrálně-derivačního řízení s velmi krátkou dobou cyklu. Některé z vytvořených řídicích algoritmů zahrnovaly matematické modely, které byly implementovány pomocí aplikace LabVIEW a které by nebylo možné implementovat v méně flexibilních prostředích, jako je platforma PLC. Navíc bylo dosaženo požadované krátké doby cyklu, protože bylo možné umístit některé řídicí algoritmy do hradlového pole FPGA.

## 8. NI COMPACTRIO A LABVIEW V MODERNÍM ŘÍDICÍM SYSTÉMU VYSOKÉ ÚROVNĚ



Obrázek 8.1. Testování vozidla na dynamometru s pohonem všech kol

### 8.1. Popis cíle

Vyvinout komplexní řídicí systém pro přední a zadní válce dynamometru pro podvozek s pohonem všech kol tak, aby byl simulován odpor vozovky a zachováno stejné zrychlení, rychlost a vzdálenost pro všechna kola. Řídicí systém je kritický z hlediska bezpečnosti řidiče a je zodpovědný za přesnost a snadnou použitelnost dynamometru.

### 8.2. Řešení

Byla použita platforma NI CompactRIO se SW moduly NI LabVIEW FPGA a NI LabVIEW Real-Time pro připojení více, než 100 stávajících signálů, a vytvoření pokročilého PID řídicího systému. Signály jsou snímány milionkrát za sekundu a řídicí smyčka proběhne 250 krát za sekundu, což dohromady umožňuje efektivní a vysoce výkonné řízení systému s nízkou latencí.

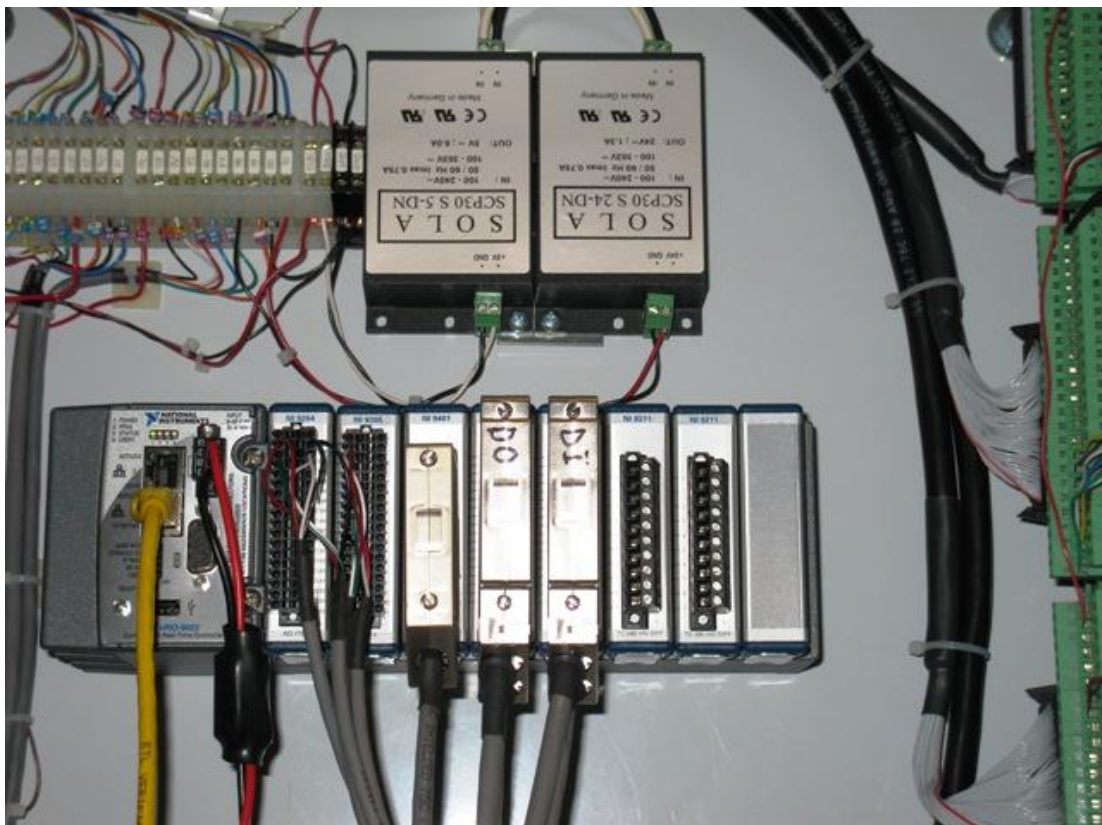
Nový řídicí systém byl navržen, vyvinut, nasazen a ověřen v průběhu několika měsíců. CompactRIO a LabVIEW poskytly úspěšné řešení pro náročný řídicí systém dynamometru s pohonem všech kol, který dosahuje pozoruhodného výkonu.“

Testování automobilu v laboratorním prostředí se simulací odporu vozovky umožňuje při návrhu vozidla provádět různá měření s ohledem na výkon motoru, spotřebu paliva a efektivitu emisí. Kola testovaného automobilu jsou



umístěna na přední a zadní válce dynamometru. Zatímco operátor ovládá vozidlo, řídicí systém měří jeho rychlost, zrychlení, krouticí moment a zároveň řídí dva stejnosměrné elektrické systémy pro absorpci energie (motory a generátory), které ovládají válce a působí silou na vozidlo. Aktivní absorbéry jsou řízeny tak, aby přesně simulovaly odpor silnice a aerodynamický tlak, který by na automobil působil při jízdě po skutečné silnici. Díky tomu, že jsou k dispozici pokročilé vybavení pro vzorkování a analýzu, je možné, mimo jiné, stanovit emise vozidla a studovat efektivitu alternativních typů paliva.

Nástup vozidel s pohonem všech kol zvýšil složitost řídicích systémů dynamometrů. Kromě požadavků na fungování v reálném čase, nízkou latenci a dokonalou spolehlivost musí řídicí hardware také spravovat systém s více proměnnými při snaze o udržení shodné rychlosti i zrychlení na předních a zadních kolech. Vývoj takových systémů se ukázal velmi náročným, s vysokými požadavky na čas a náklady.



**Figure 8.2. Platforma CompactRIO s FPGA kontrolerem reálného času**

Požadavek společnosti Environment Canada na vývoj automatizovaného dynamometru s pohonem všech kol jsme vyřešili na platformě CompactRIO.

CompactRIO, obsahující programovatelné hradlové pole (FPGA) a výkonný kontrolér pracující v reálném čase, představuje cenově přijatelnou a technicky pokročilou platformu pro automatické řízení. Naším cílem bylo minimalizovat technologická rizika a čas potřebný pro vývoj využitím výkonných funkcí pro analýzu a řízení ve vývojovém prostředí LabVIEW.

### 8.3. Inovativní řešení technických výzev

Automatizace dynamometru s pohonem všech kol představuje hned několik výzev pro systémové inženýry. Možnosti platformy CompactRIO a flexibilita vývojového prostředí LabVIEW – zahrnující vývojové nástroje pro OS Windows, reálný čas a FPGA – byly klíčovými faktory při implementaci našeho řešení.

### 8.4. Rychlá reakční doba

Včasná reakce na dynamiku rychle se pohybujícího vozidla vyžaduje řídicí smyčku běžící s periodou v řádu malého zlomku sekundy. Řídicí smyčka implementovaná u našeho řešení v CompactRIO FPGA provádí všechna měření a bezpečnostní kontroly řádově milionkrát za sekundu. Řídicí smyčka na embedded procesoru reálného času probíhá 250 krát za sekundu, což zabezpečuje vynikající dynamickou odezvu.

### 8.5. Revoluční přístup k měření

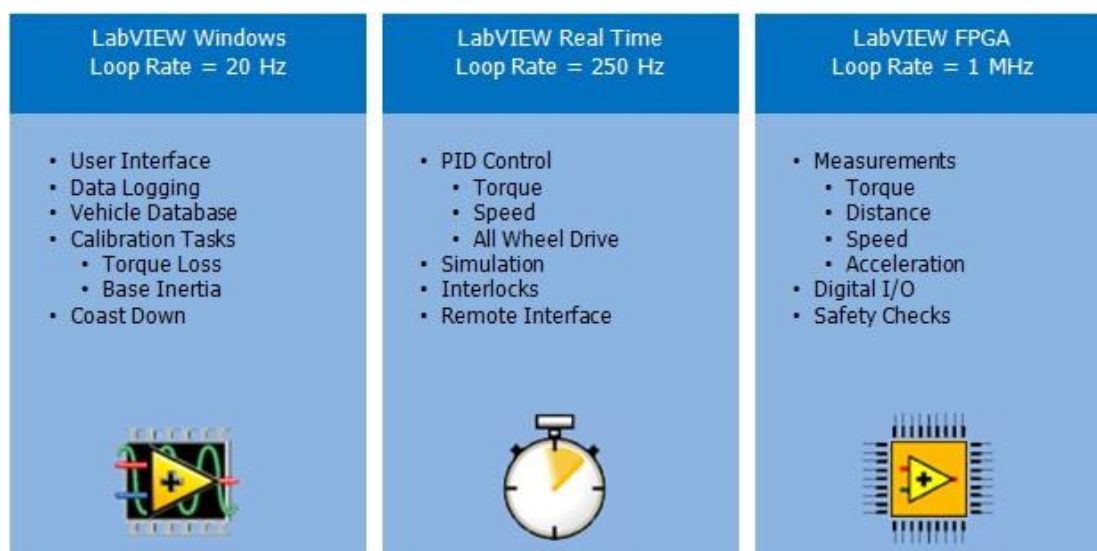
Kvalita všech měření, především pak měření rychlosti a zrychlení, přímo odráží schopnost dynamometru přesně řídit a simulovat průběhy. Platforma CompactRIO, použitá v našem řešení, nabízí několik inovativních a unikátních funkcí pro měření, včetně následujících:

- Vlastní filtrace šumu na digitálních vstupech implementovaná jako kód v FPGA
- Nová a přesná metoda měření hodnot dynamického zrychlení založená na měření periody jednotlivých pulzů enkodéru namísto tradiční metody počítání pulzů za čas, což bylo umožněno díky frekvenci smyčky 1 MHz

- Modulární vstupně/výstupní kanály s rychlou reakční dobou, velkým dynamickým rozsahem, vynikající linearitou a průmyslovou spolehlivostí

## 8.6. Distribuovaný software

Řídicí systém založený na CompactRIO a Windows OS nabízí kromě malých rozměrů a nízké ceny také výkonné řešení pro programování distribuovaných systémů na třech výpočetních platformách: FPGA, kontroléru reálného času CompactRIO a na Windows. Pro bezproblémovou integraci a programování těchto platforem jsme použili NI LabVIEW. Na obrázku 3 je znázorněno fyzické rozložení úloh.



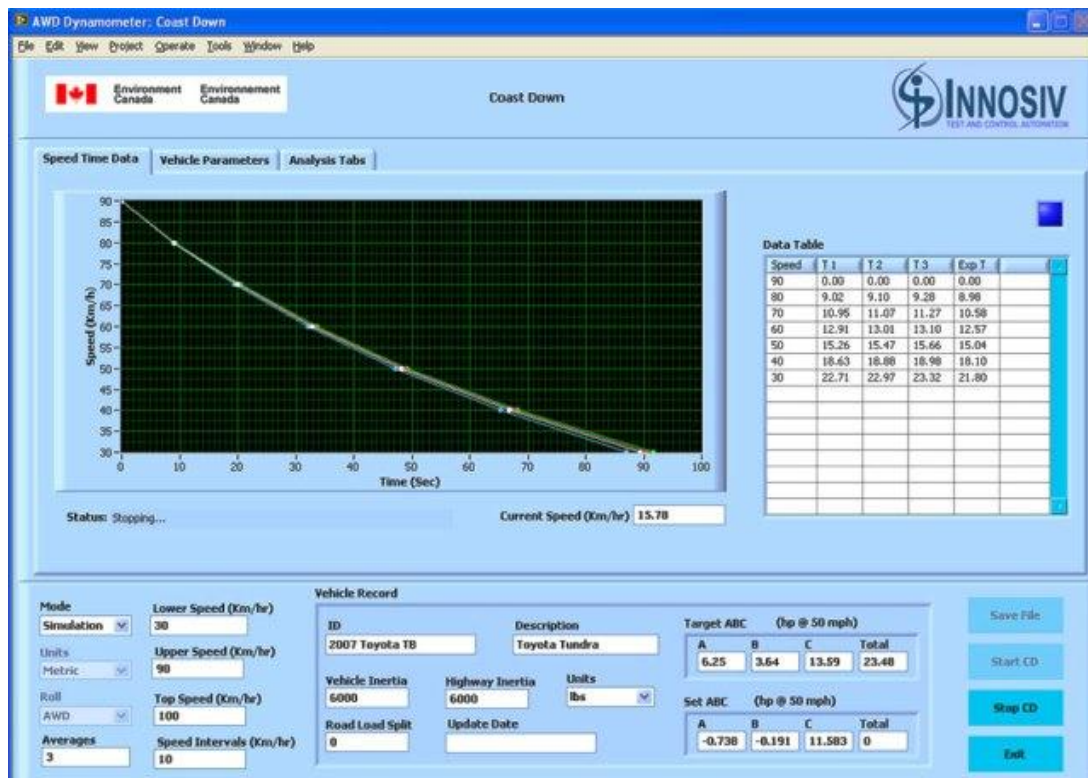
Obrázek 8.3. Distribuovaný návrh software řídicího systému

Hostitelský počítač s Windows v řídicí místnosti je s kontrolerem reálného času CompactRIO, umístěným ve skříni se vstupy a výstupy, spojen prostřednictvím vlastního komunikačního protokolu založeného na Ethernetu. CompactRIO bylo použito pro všechna měření a veškeré řízení a operační systém Windows byl využit pro všechna uživatelská rozhraní a pro záznam dat.

## 8.7. Ověření parametrů simulace

Provozní předpisy asociace SAE (Society of Automotive Engineers) obsahují přesně definované postupy pro ověření přesnosti simulace dynamometru. Podle nich bylo provedeno standardní měření doby zastavení, při kterém je

vozidlo uvedeno do pohybu o rychlosti 100 km/h a potom je ponecháno, aby zastavilo v neutrálním režimu. Následně byly nastaveny koeficienty simulace tak, aby bylo možné reprodukovat rychlost a čas očekávané na skutečné silnici při postupném zastavování vozidla. Rychlá konvergence a shoda měřených hodnot s očekávanou dobou zastavení při různých rychlostech představuje měřítko pro ověření správné funkce řídicího systému.



Obrázek 8.4. Detaily měření doby zastavení

Úspěšně bylo provedeno několik testů nového řídicího systému s různými typy vozidel. Systém byl vždy stejně úspěšný v rychlé reprodukci očekávané doby zastavení s výjimečnou přesností.

## 8.8. Závěr

V průběhu několika měsíců byl navržen, vyvinut, nasazen, ověřen a zdokumentován nový řídicí systém. CompactRIO a LabVIEW poskytly úspěšné řešení pro sestavení složitého řídicího systému dynamometru s pohonem všech 4 kol a s pozoruhodným výkonem. Procedury při zastavování vozidla konvergovaly během několika průběhů, plně v souladu s danými standardy v oboru. Při zastavení jsme dokázali reprodukovat časy s odchylkou 0,1 sekundy a

s chybou síly menší než 10 N. Také v režimu pohonu všech kol byl rozdíl v rychlostech mezi předními koly a zadními koly zhruba 0,07 ppm. Systém dokáže pracovat s rychlostí až do 140 km/h s rozdíly v rychlostech pouhých 0,01 m/s. Při dynamické jízdě na vzdálenost několika kilometrů je rozdílná vzdálenost uražená předními a zadními koly v řádu několika málo centimetrů. Na všechny potřeby měření a řízení, které byly objeveny v průběhu implementace, bylo nalezeno uspokojivé a inovativní řešení.

## 9. SNÍŽENÍ NÁKLADŮ NA TESTOVÁNÍ TELEMATICKÉ ŘÍDICÍ JEDNOTKY POMOCÍ HARDWARU NI PXI A PROSTŘEDÍ LABVIEW



Obrázek 9.1. Simulátor jízdy vozidla firmy DGE je založen na NI hardwaru a softwaru.

### 9.1. Popis cíle

Navrhnout nástroj pro rychlé a efektivní laboratorní testování integrace telematické řídicí jednotky (TCU) do vozidla bez nutnosti fyzického provádění testů na silnici.

### 9.2. Motivace

HUGHES Telematics, společnost se sídlem v Atlantě, se zabývá návrhem, tvorbou a správou řešení zaměřených na řidiče a vozidla, která mají za cíl zvýšit hodnotu vozidla, pohodlí, vylepšit zážitek z řízení, efektivitu a bezpečí. Společnost DGE Inc., součást HUGHES Telematics se sídlem v Rochester Hills v Michiganu, se zabývá vývojem na poli automobilového a přepravního průmyslu. DGE navrhla nástroj pro rychlé a efektivní testování integrace TCU ve vozidle. Systém VDS urychluje proces, během kterého dodavatel TCU a OEM



komponent ověřuje funkčnost rozhraní v řízených podmínkách bez použití testovacího vozidla.

Koncern HUGHES Telematics požádal DGE o vývoj systému VDS, který by simuloval signály mobilních telefonů, satelitů a zařízení na sběrnici CAN, jež se běžně vyskytují v průběhu reálné jízdy. Testovací systém řídí zpětnou vazbu ve vztahu k TCU a nabízí uživateli možnost načíst konfigurační soubory, které obsahují parametry konkrétního vozidla, načíst vnější podmínky a simulovat všechna data vztahující se k jízdě, jako je počasí, odrazy VF signálů, geografické umístění a druhy cest. Poruchy, jako například zkrat baterie či anomálie v satelitních a mobilních signálech, mohou být také simulovány pro ověření reakce TCU. Díky tomu, že systém umožňuje vzdálené spouštění skriptů, tak jej mohou používat návrhové a testovací týmy sídlící na různých místech světa.

### 9.3. Řízení a monitorování více subsystémů pomocí VDS

S pomocí realizované aplikace mohou technici vytvořit virtuální jízdní scénář, který zahrnuje GPS satelity, mobilní síť GSM, hardwarové vstupy/výstupy a komunikaci na sběrnici vozidla, a použít jej pro vývoj a testování telematických řídicích jednotek. Pro ovládání několika vstupně/výstupních a telematických subsystémů je použito průmyslové PC (rack) s grafickým uživatelským rozhraním vytvořeným ve vývojovém prostředí LabVIEW. Grafické rozhraní slouží k ovládání a monitorování následujících subsystémů:

- Konfigurační data vozidla
- Rozhraní TCU (telematické řídicí jednotky)
- Rozhraní GPS satelitu
- Rozhraní mobilní sítě
- Simulace CAN ve vozidle
- Diagnostika vozidla
- Generování chyb
- Napájecí zdroje

- Skriptování/modelování subsystémů
- Logování subsystémů

#### 9.4. Vývoj VDS na platformě National Instruments

Kvůli realistické simulaci pohybujícího se vozidla musel systém VDS kombinovat několik komponent jízdního scénáře a udržovat jejich správné časování. Každá součást simulace obsahovala velké množství voleb a nastavení, které byly kritické pro přesnou reprodukci pohybu vozidla.

Čas je velice ceněnou komoditou a proto bylo zvoleno pro tvorbu grafického uživatelského rozhraní LabVIEW. To pomohlo ušetřit čas při tvorbě rozhraní pro komplexní subsystémy simulátorů GPS satelitů a mobilních sítí GSM. Testeři také potřebovali najít způsob, jak na VDS spouštět extrémně složité skripty. Namísto vymyšlení nového skriptovacího jazyka byla vytvořena možnost trvalého vzdáleného připojení, které uživatelům umožnilo plný přístup ke každému ovládacímu prvku z grafického rozhraní. Díky tomuto řešení mohou uživatelé psát skripty v jazycích svých hostitelských systémů.

Spojením NI hardware a softwaru byl vytvořen komplexní simulátor v malém inženýrském týmu. Knihovna vývojového prostředí LabVIEW obsahuje virtuální přístroje, které usnadnily integraci VDS subsystému. Bez grafického vývojového prostředí LabVIEW, které napomohlo rychlému vývoji zamýšleného software, by nebylo možné dodržet stanovaný časový rozvrh projektu. LabVIEW také poskytuje rozhraní pro všechny komponenty našeho systému, které nepocházejí od NI.

Páteř systému tvoří NI hardware včetně kontroléru NI PXI-8105 se dvěma jádry a rychlostí 2.0 GHz, modulu pro sběr dat řady M NI PXI-6259, modulu čítače/časovače NI PXI-6602, a analogového výstupního modulu NI PXI-6723.

#### 9.5. Změna testování telematického systému s VDS

Díky použití systému VDS byl značně zkrácen čas potřebný k integraci TCU do prostředí vozidel. Systém VDS urychluje proces, ve kterém dodavatel TCU a OEM komponent ověřuje funkčnost rozhraní v řízeném prostředí bez nutnosti



testování vozidla při provozu na silnici. Už není potřeba pro provedení testu čekat na vhodný čas a místo, neboť VDS dokáže simulovat jakoukoliv silnici, počasí a elektromagnetické podmínky. Technici mohou provádět testy přímo v laboratoři a tak odpadají náklady na přepravu lidí a vybavení po celém světě kvůli geografickému testování. Technici mohou ověřit funkčnost TCU v prostředí laboratoře bez potřeby testování na jednotlivých reálných vozidlech.

Díky flexibilnímu a rozšiřitelnému návrhu mění VDS platformu pro budoucí vývoj telematických systémů. Testeři již nemusí spoléhat na empirická data získaná z reálných testovacích vozidel. Mohou vytvářet řízené a opakovatelné testovací scénáře využívající systému se zpětnou vazbou, a to i takové, které by nebylo možné provést na testovacích vozidlech. V důsledku toho nemá VDS konkurenci v žádném jiném testovacím systému používaném v odvětví telematiky.

## 10. POUŽITÍ ZAŘÍZENÍ NI COMPACTRIO PRO NÁVRH ŘÍDICÍHO SYSTÉMU SLEDUJÍCÍHO BOD MAXIMÁLNÍHO VÝKONU V APLIKACÍCH SE SOLÁRNÍ ENERGIÍ

Obrázek 10.1.: Blokové schéma

### 10.1. Popis cíle

Najít efektivní bod, kdy se dosahuje maximálního výkonu solárního článku v měnících se podmínkách okolního prostředí na zařízení

### 10.2. Řešení

Vyvinout systém pro výpočet parametrů solárních panelů v reálném čase pro zajištění dosahování maximálního výstupního výkonu v různých podmínkách okolního prostředí.

Solární články mají optimální bod, kdy lze dosáhnout maximálního výstupního výkonu, avšak bod nejvyšší účinnosti se obvykle mění podle okolního prostředí. Při upravování výstupního napětí solárních článků v proměnlivém prostředí je obtížné trvale generovat maximální výstupní výkon. Proto funkce sledování bodu nejvyššího výkonu (Maximum Power Point Tracking – MPPT) u stávajících technologií solárních článků zvyšuje celkovou efektivitu výroby energie.

Cílem bylo vylepšit návrh řízení funkce MPPT solárních článků a vyvinout MPPT systém pro kvadratickou limitní hodnotu při měření výkonu. Vysokorychlostní pulzně-šířková modulace (Pulse-Width Modulation – PWM) a možnosti měření musí podporovat signály spínané s vysokofrekvenční PWM pro napěťový měnič sledující výkon. Navíc jsme chtěli vyvinout přenosný, embedded výpočetní systém pro použití v budoucích aplikacích. Pro vývoj stabilního a efektivního integrovaného systému jsme použili zařízení NI CompactRIO s NI LabVIEW FPGA modulem. CompactRIO rovněž obsahuje redukční (step-down) obvod a časový spínač přizpůsobený pro řízení výkonu a splnění maximálních požadavků na napájení. Kombinace těchto zařízení se podle analogových a skutečných testů ukázala být životaschopným systémem pro vývoj řídicího prvku MPPT.

### 10.3. Aplikace

Bylo navrženo MPPT zařízení pro výrobu solární energie pomocí softwaru LabVIEW 8.2, který generoval algoritmy pro vývoj rozhraní, modulu LabVIEW FPGA, který v DMA režimu získával signály a modulu LabVIEW Real-Time, který

vykonával funkci MPPT. Byl použit také embedded hardware CompactRIO pro získávání údajů o změnách proudu a napětí solárních článků, přičemž modul LabVIEW FPGA získával údaje z I/O modulů a přenášel je do modulu LabVIEW Real-Time pro výpočty v reálném čase. Následně PWM modul dodával správný pracovní cyklus pro uplatnění bodu maximálního výkonu do redukčního obvodu, kde bylo produkováno výstupní napětí za maximálního výkonu a zároveň se v reálném čase prováděl výpočet pro jiné zátěže, jako je bateriové napájení a napájení motoru.

## 10.4. Architektura systému

Solární baterie 25 W a propustný měnič dodávají elektrickou energii, která je následně uložena v akumulátorech a převáděna do dobíjitelných olověných baterií 6 V, 10 Ah a zatěžujícího motoru, jak ukazuje schéma architektury systému na Obrázku 8.1. U zatěžujícího motoru byly použity PWM spínané signály poskytované digitálním vysokorychlostním výstupním modulem NI 9474 řady C pro změnu rozsahu napětí vstupů a výstupů měniče. Poté byl změřen výstupní výkon solárního článku pomocí NI 9221 modulu řady C a získána data pomocí čtyřslotové embedded skříně NI cRIO-9101 s 1M hradel. Embedded řídicí prvek NI cRIO-9002 pracující v reálném čase poskytl dostatečný výkon pro výpočet MPPT a PWM výstup signálu. Následně PWM signál měniče operujícího v pracovním bodě dosáhl pracovního cyklu odpovídajícího bodu maximálního výkonu křivky PD solární energie v pracovním cyklu, což byl výstup měniče, který zajistil maximální výstupní výkon solárního článku.

MPPT posloupnost testu spočívá ve výpočtu kvadratického limitu, v zaznamenání cílové hodnoty a lokální hodnoty pro kontrolu zaznamenaných dat. Byla mapována charakteristická křivka před každým MPPT, aby byla zajištěna kontrola, zda pracovní cyklus systému získaný z MPPT je bodem maximálního výkonu charakteristické křivky při slunečním osvětlení. Poté byla provedena funkce MPPT, byly srovnány dva pracovní cykly a zjištěn rozdíl ve výkonu pro dosažení efektivity MPPT. Pomocí tohoto systému bylo možné pochopit reálné chování MPPT kromě toho, že jsme zrušili krok sledování pracovního cyklu a doplnili proces nabíjení.

## 10.5. Úspěch s produkty společnosti NI

Ve srovnání s jinými hardwarovými platformami byl vývoj za pomoci zařízení CompactRIO časově mnohem efektivnější. Vyvinutý systém je srovnatelný s jinými systémy vytvořenými v hardwarovém programovacím jazyce VHDL nebo s jinými nástroji LabVIEW FPGA, a to díky zjednodušení mnoha komplikovaných

kroků. Byla použita vnitřní pracovní frekvenci 40 MHz pro zajištění 20 kHz PWM výstupního signálu a pro měření napětí/proudu požadované pro kalkulaci MPPT. Dále byly synchronizovány funkce, jako je displej a záznam pro informaci uživatele, přičemž embedded kontrolér cRIO-9002 zajistil výpočet v reálném čase a dále posílil stabilitu MPPT systému.

Po dokončení aplikace byl i nadále poskytován servis od aplikačních techniků NI. Díky produktům a asistenci společnosti NI byl úspěšně vyvinut MPPT systém pro kalkulaci parametrů solárních článků v reálném čase, který zajišťuje, aby byl v proměnlivých okolních podmínkách dosahován maximální výstupní výkon. Tento způsob výpočtu parametrů systému je možné v budoucnu použít pro sledování výkonu i jiných solárního systémů pro generování elektrické energie.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] URL: < <http://sine.ni.com/cs/app/doc/p/id/cs-10339> > [cit. 2011-04-01].
- [2] URL: < <http://sine.ni.com/cs/app/doc/p/id/cs-10387> > [cit. 2011-04-01].
- [3] URL: < <http://sine.ni.com/cs/app/doc/p/id/cs-11809> > [cit. 2011-04-01].
- [4] URL: < <http://sine.ni.com/cs/app/doc/p/id/cs-12996> > [cit. 2011-04-01].
- [5] URL: < <http://sine.ni.com/cs/app/doc/p/id/cs-11462> > [cit. 2011-04-01].
- [6] URL: < <http://sine.ni.com/cs/app/doc/p/id/cs-11738> > [cit. 2011-04-01].

## PŘÍLOHY



Centrum pro rozvoj výzkumu pokročilých řídicích a sensorických technologií  
CZ.1.07/2.3.00/09.0031

Ústav automatizace a měřicí techniky  
VUT v Brně  
Kolejní 2906/4  
612 00 Brno  
Česká Republika

<http://www.crr.vutbr.cz>

[info@crr.vutbr.cz](mailto:info@crr.vutbr.cz)