



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní



TÝMOVÉ PRÁCE NA VÝVOJI MĚŘICÍHO SYSTÉMU NA BÁZI MEMS SENZORŮ

Případová studie

Jaromír Škuta

Jiří Kulháněk

Ostrava 2012



Tyto studijní materiály vznikly za finanční podpory Evropského sociálního fondu (ESF) a rozpočtu České republiky v rámci řešení projektu OP VK CZ.1.07/2.3.00/09.0147 „Vzdělávání lidských zdrojů pro rozvoj týmů ve vývoji a výzkumu“.

Název: Týmové práce na vývoji měřicího systému na bázi MEMs senzorů
Autor/Autoři: Jaromír Škuta, Jiří Kulhánek, a kol.
Vydání: první, 2012
Počet stran: 43
Náklad: 5

Studijní materiály pro studijní obor Fakulty strojní



Tyto studijní materiály vznikly za finanční podpory Evropského sociálního fondu a rozpočtu České republiky v rámci řešení projektu Operačního programu Vzdělávání pro konkurenceschopnost.



Název: Vzdělávání lidských zdrojů pro rozvoj týmů ve vývoji a výzkumu
Číslo: CZ.1.07/2.3.00/09.0147
Realizace: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

© Jaromír Škuta, Jiří Kulhánek, a kol.

© Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

1 ÚVOD

Tato případová studie na téma „Týmové práce na vývoji měřicího systému na bázi MEMs senzorů“ vznikla v rámci projektu Vzdělávání lidských zdrojů pro rozvoj týmů ve vývoji a výzkumu. Popisované téma vzniklo postupně z dílčích částí řešených projektů na VŠB-TU, jejichž výsledky se také projevily při výuce specializovaných předmětů na fakultě strojní, katedře 352 (automatické systémy řízení). Tato studie popisuje zkušenosti nabyté při řešení rozsáhlejších témat, využívajících týmovou spolupráci a koordinaci požadavků mezi jednotlivými členy řešitelského týmu.

Vedoucím řešitelského týmu je pedagogický pracovník garantující funkčnost výsledků celého řešeného projektu. Obsah studie je vytvořen na základě osnovy případové studie, která by měla dle literatury obsahovat části, jako jsou „Definování cílů případové studie“, „Úvodní průzkum“. Tato práce by měla být návodem pro případné zájemce, kteří se chtějí poučit a seznámit se základy týmové spolupráce resp. s praktickým řešením týmové spolupráce.

2 POPIS ŘEŠENÉHO PROBLÉMU A URČENÍ POČTU OSOB V TÝMU

Velmi důležitou částí je přesná specifikace řešeného problému. Pokud toto zadání máme přesně vymezeno, můžeme provést funkční dekompozici a specifikovat dílčí úkoly a členy týmu (řešitelského kolektivu). Tato specifikace zadání musí být jednoznačná a proto je jí zapotřebí věnovat velkou pozornost. Přesná specifikace vyžaduje obecné znalosti o řešeném problému (použití, jaké úskalí při řešení mohou nastat, znalost technologie, ...), ale také podrobnější znalosti o možných (použitých) nástrojích při řešení (vnitřní struktura MEMs systému, popis a realizace přenosové cesty ILAN, ...).



Čas ke studiu: 2 -5 hodin (podle obtížnosti zadání)

Zadáním je navrhnout měřicí systém s využitím průmyslové sběrnice pro sběr dat do nadřazeného systému. Pro vlastní měření jsou použity MEMs systémy (akcelerometry, gyroskopy, ...). Podmínkou je online sledování měřených dat i na mobilních systémech a následné vyhodnocení naměřených dat. Jedním ze základních požadavků je i jednoduchá rozšiřitelnost celého měřicího systému.

Celou úlohu lze rozdělit do několika částí, které musí zaštiťovat jednotliví členové týmu. Hlavním koordinátorem týmu je v našem případě vyučující, který by měl rozdělit řešení problému do jednotlivých částí a najmenovat dílčí řešitelé dané problematiky s ohledem na jejich schopnosti. Například dobrý programátor bude programovat a nebude navrhovat obvodová zapojení pro jednotlivé snímače.

Při řešení (našeho) zadaného problému lze vyspecifikovat odbornosti, jako jsou:

- MEMs systémy
- Jednočipové počítače
- Meziobvodová komunikace
- Komunikace po průmyslové sběrnici
- Programování monitorovacích systému
- Specifikace umístění senzorů.

Pro řešení prvních tří zaměření je vhodné, aby všechny odbornosti byly soustředěny na jednoho člena, který má znalosti v možnostech vyčtení dat z MEMs systémů alespoň na úroveň aplikace v jednočipovém počítači. Následně se budou vyčítat data pomocí průmyslové sběrnice na úroveň SCADA/MMI systému, což může zajistit další člen týmu. Jeden z členů týmu by měl vyspecifikovat a zajistit vhodné umístění senzorů na měřeném objektu, v našem případě automobilu, což je specializace zmíněná v posledním bodu.

Této části zadání by se mělo věnovat dostatek času, který se zúročí až v celkovém řešení zadané úlohy.

3 ČLENOVÉ ŘEŠITELSKÉHO TÝMU

V týmu byly obsazeny tyto pozice:

Vedoucí projektu, koordinátor – náplní práce je definovat celkový a dílčí cíle projektu, kontrolovat jejich dosažení v určený termín a dosažení cílových parametrů zařízení a jednotlivých měření a kalibrací. Dále motivuje ostatní členy týmu k dosažení cíle projektu.

Elektronik – technická pozice, náplní pracovníka je navrhnout a realizovat zapojení elektronických obvodů nezbytných pro meziobvodovou komunikace po SPI a I2C sběrnici s MEMs senzorem. Dále definuje protokol po sběrnici CAN pro propojení s nadřazenou vrstvou řízení.

Programátor SCADA/HMI – technická pozice, náplní práce je realizovat na platformě PC nadřazenou část řídicího algoritmu. Definuje průběh zkoušky, zpracovává a ukládá naměřené údaje, realizuje zabezpečení proti havárii na vyšší vrstvě aplikace.

Konstruktér - technik – technická pozice, realizuje zapojení senzorů na testovacím automobilu, konstruuje a realizuje odolné pouzdra a kabelové svazky pro umístění senzorů.

Testovací technik – studentská pozice, provádí měření na testovacím vozidle a vyhodnocuje naměřená data.

4 ČTENÍ DATA Z MEMS SYSTÉMU



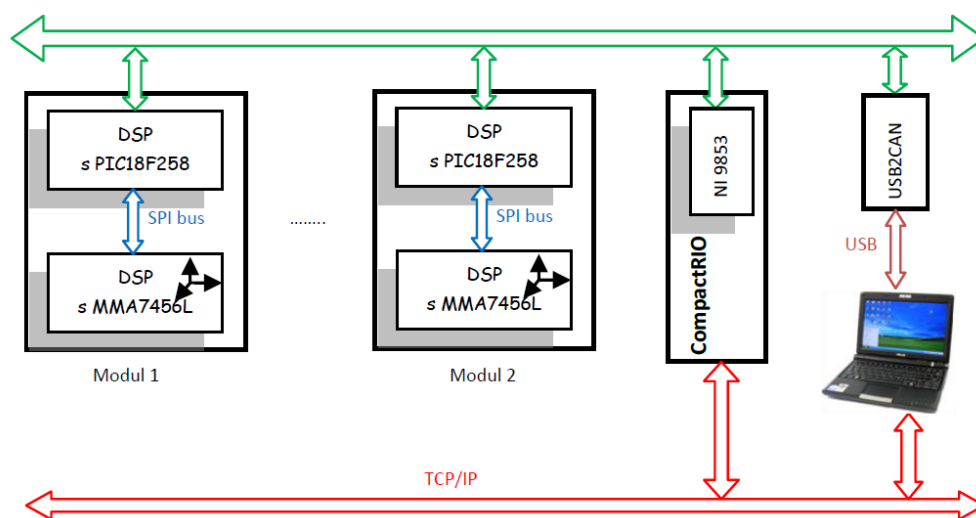
Čas ke studiu: 30 hodin

V rámci řešení bodu zajišťující přenos dat z MEMs systému na úroveň jednočipového počítače byli nasazeni dva studenti, kteří měli, zajisti:

- Specifikaci MEMs systému
- Návrh způsobu čtení dat z MEMs systému do jednočipového počítače (podle dostupného rozhraní)
- Specifikace typu jednočipového počítače s daným rozhraním
- Aplikace algoritmu pro vybraný jednočipový počítač
- Návrh koncové desky pro vybraný senzor (s ohledem na rozšiřitelnost celého systému)
- Návrh koncové desky pro vybraný jednočipový počítač (s ohledem na rozšiřitelnost celého systému).

4.1 Návrh systému čtení dat z MEMs

Celý měřicí systém je složen z modulů na bázi jednočipových počítačů komunikujících s MEMs systémy pomocí meziobvodové komunikace (SPI, I2C). Komunikace po této sběrnici je popsána v následující kapitole. Z aplikace na úrovni SCADA/MMI je možno provádět konfiguraci MEMs systému. Pak jednočipový počítač řady PIC realizuje most mezi CAN a meziobvodovou komunikací. Vše záleží na řídicím slovu, které je posláno danému modulu s MEMs systémem.



Obr. 1 Blokové schéma navrhované úlohy

4.2 Specifikace MEMS systému a jednočipového počítače

Co je to MEMS systém?

MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) je označení samotné technologie i produktů využívající tuto technologii. Pod tímto pojmem se míní umístění elektronických, ale především mikro-mechanických prvků, na křemíkovou bázi pomocí moderních výrobních metod, které mají svůj původ ve výrobě integrovaných obvodů. Produkty MEMS vychází z možností MEMS technologie a jedná se především pohybové senzory (akcelerometry, gyroskopy...), ale i mikročerpadla, mikropohony, mikrocívky aj. V souvislosti s těmito produkty se hovoří o systému na čipu nebo také o inteligentním snímači, jelikož je zde přítomen jak mechanický subsystém (nutný pro transformaci fyzikální podstaty na elektrickou veličinu), tak elektronický subsystém zajišťující následné zpracování, neboli postprocessing (zesílení, saturace, filtrace aj.). [wikipedia]

Na trhu je velké množství MEMS systému zajišťující měření zrychlení, které se liší základními technickými parametry jako jsou:

- počet os (1, 2, 3)
- rozsah měření ($\pm 2g$, $\pm 4g$, ... $\pm 70g$, ...)
- vzorkovací frekvence (100Hz, 200 Hz, ...)
- filtrací měřeného signálu
- komunikační rozhraní pro přenos dat (analog, SPI, I2C)
- Možnost trigrování vlastního měření
-

To jsou všechno vlastnosti a parametry, které museli členové řešitelského týmu nastudovat a porovnat a podle specifikace a omezení zadání vybrat konkrétní typ. Vzhledem na návaznost na vyšší vrstvu přenosu dat (jednočipový počítač) bylo nutno zohlednit také i komunikační (vyčítací) rozhraní MEMS systému. Z tohoto důvodu bylo vhodné, aby členové tohoto podtýmu měli znalosti jak z oblasti MEMS systému, tak z oblasti jednočipových počítačů.

Vzájemnou konfrontací a představením vlastního řešení dospěli členové řešitelského podtýmu pro danou problematiku (MEMS systémy, jednočipové počítače) a hlavní řešitel, který specifikoval požadavky na celý měřicí systém k těmto závěrům:

- Použité akcelerometry budou moci komunikovat po SPI nebo I2C sběrnici
- Jednočipový počítač bude zajišťovat transformaci dat z meziobvodové komunikace na průmyslovou síť CAN bez následného zpracování.

Podle těchto požadavků byl vybrán jednočipový počítač podporující jak komunikaci I2C (SPI), tak komunikaci CAN.

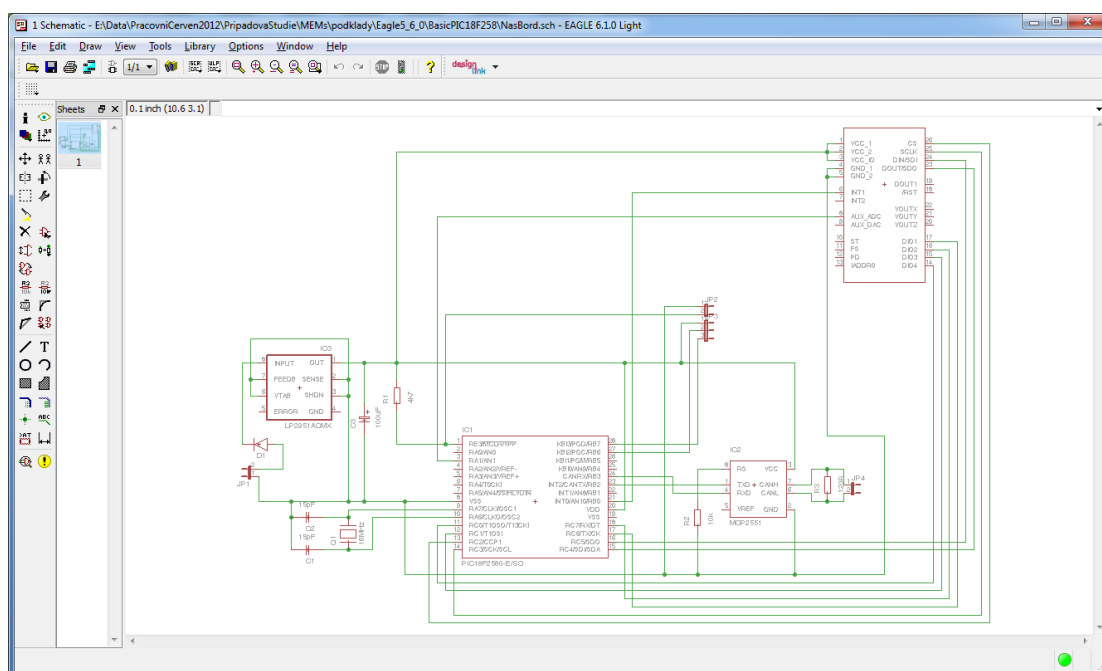
Firma Microchip vyrábí různé řady jednočipových procesorů podporující různé periférie. Vybrán byl jednočipový procesor PIC18F258 (PIC18F2580) podporující jak obě rozhraní meziobvodové komunikace (SPI, I2C), tak komunikaci po ILAN (CAN).

4.3 Návrh desky tištěného spoje pro procesorovou desku

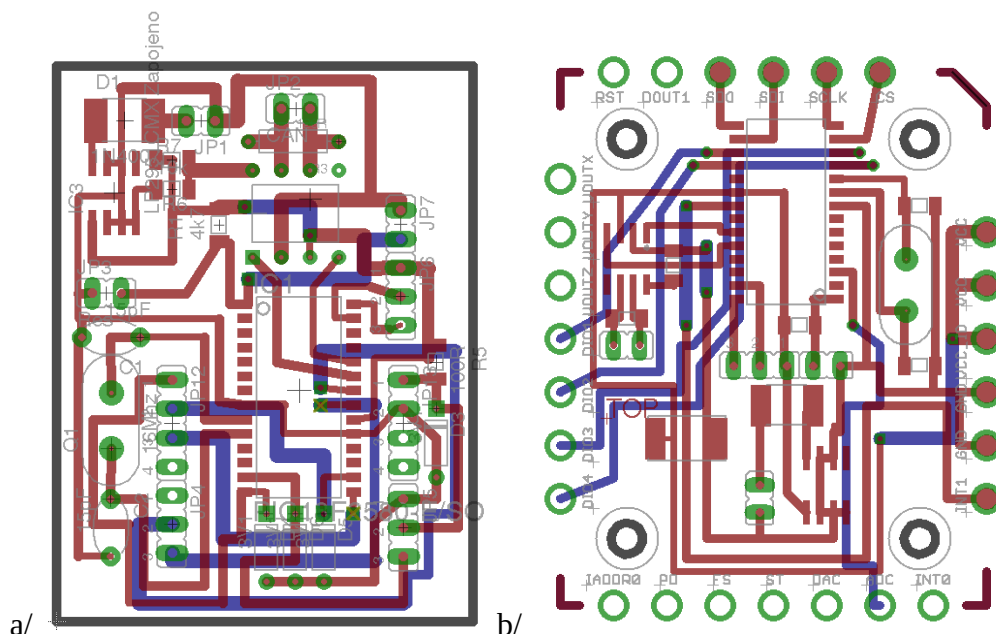
Celý navržený systém musí podporovat jednoduchou rozšiřitelnost o další typy MEMs akcelerometru. Proto byla navržena šablona (základní deska) pro jednočipový počítač, na které jsou po obvodu vyvedeny vybrané I/O jednočipového procesoru řady PIC. Podle této šablony budou vytvářeny také desky tištěného spoje pro jednotlivé MEMs systémy (zrcadlově), tak aby se daly využít rozhraní jednočipového počítače, jako jsou I2C, SPI. Každý jednotlivec z týmu může daný měřicí systém rozšířit podle potřeby o další MEMs systém, musí dodržet správné rozložení I/O na obvodu desky. Aby se předešlo záměně vstupů/výstupů (otočení desky tištěného spoje), je jeden roh desky seříznut a slouží jako klíč.

4.3.1 Prostředí pro tvorbu tištěného spoje

Pro tvorbu desek tištěného spoje byl použit software EAGLE (demo). Tento software dovoluje kreslit el. schemata a následně generovat obrazce pro tvorbu desky tištěného spoje. Mezi oběma pracovními plochami software se dá přepínat a provádět modifikace. Demo verze je omezena na velikost desky, do které se návrhy vlezou.



Obr. 2 Pracovní plocha programu EAGLE - tvorba schémat



a/ demo deska

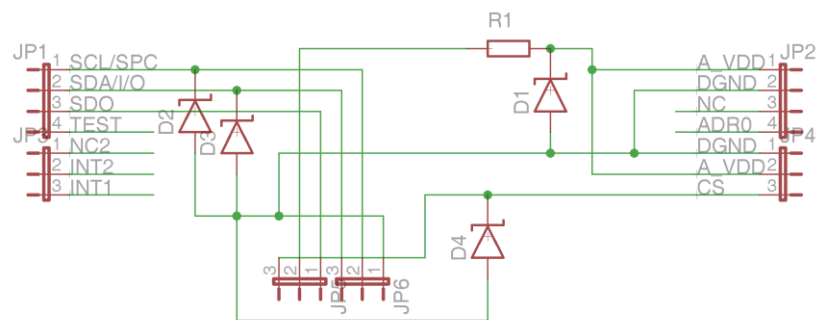
b/ koncová deska

Obr. 5 Obrazce oboustranného tištěného spoje desky s jednočipovým počítačem

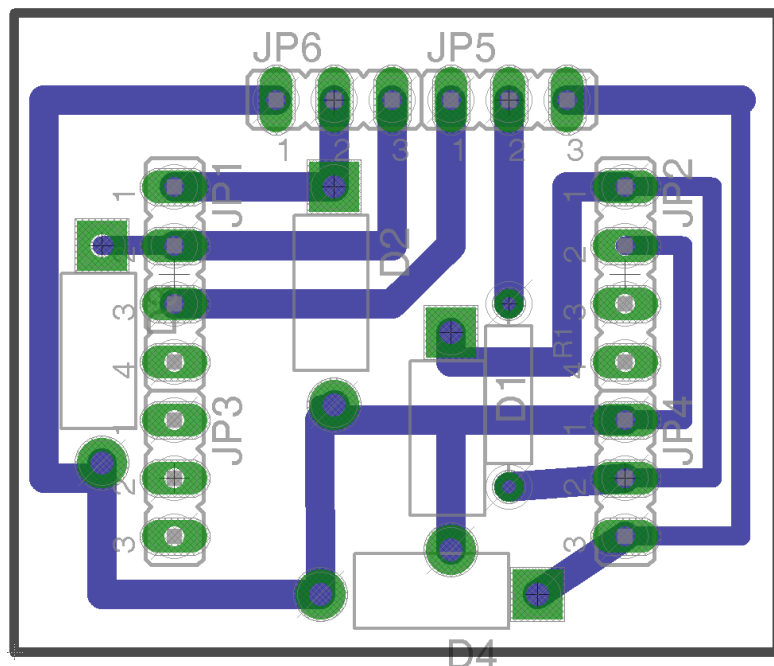
Na první desce tištěného spoje jsou vyvedeny jednotlivé signály meziobvodové komunikace na lámací lišty s možností připojení testovací desky akcelerometrů. Druhý obrázek zobrazuje výslednou desku tištěného spoje pro jednočipový procesor s vyvedenými vstupy/výstupy na okraj desky. Obě desky jsou osazeny programovacími piny umožňující měnit firmware procesoru přímo na desce bez nutnosti vypájení procesoru. Tato varianta umožňuje pracovat na vývoji firmware pro jednočipový počítač několika členům řešitelského kolektivu najednou. Tyto signály jsou společně vyvedeny s CAN_L a CAN_H a napájením na zásuvku RJ-45. To umožňuje ve výsledku operativně měnit firmware jednočipového počítače bez nutnosti demontáže celého systému vybraného senzoru a jeho vyjmutí z pouzdra.

4.4 Návrh testovací desky komunikace (CAN, SPI)

Pro ověření funkčnosti meziobvodové komunikace museli členové řešitelského týmu respektovat i dílčí kroky při návrhu rozhraní navzájem. Byla vytvořena deska tištěného spoje pro vybraný akcelerometr pracující s jinými úrovněmi napětí. Podle schématu na následujícím obrázku byla vytvořena členem řešitelského týmu, zabývajícím se komunikačním rozhraním SPI, I2C deska pro ověření této komunikace.



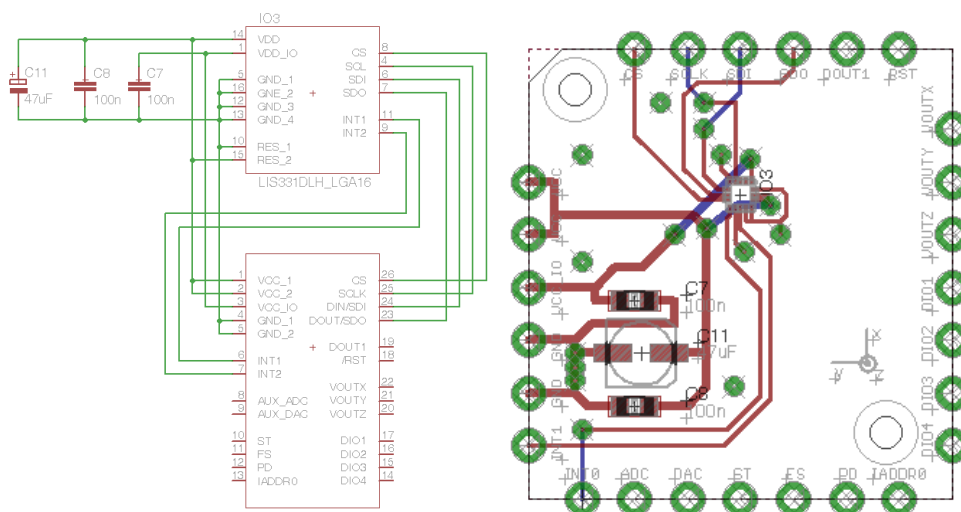
Obr. 6 Schéma zapojení unifikačního modulu pro vybraný MEMs systém



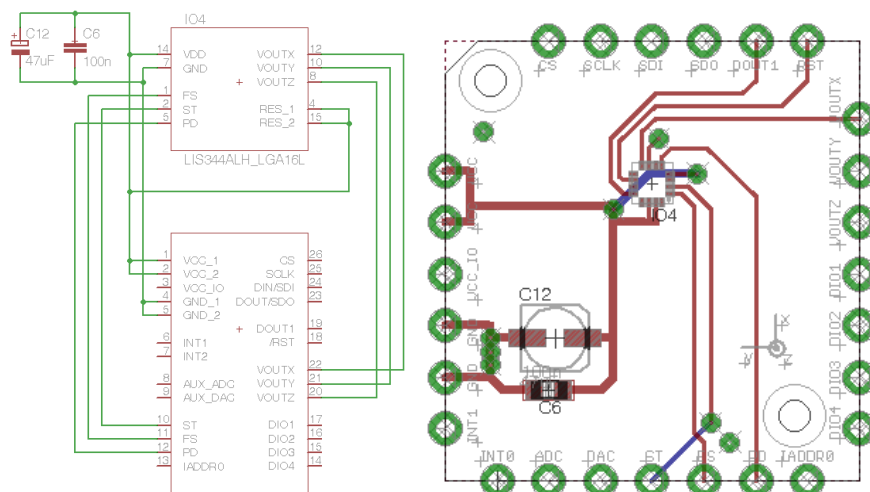
Obr. 7 Obrázek tištěného spoje unifikační desky pro vybraný MEMs systém

4.5 Návrh tištěného spoje pro MEMs systém

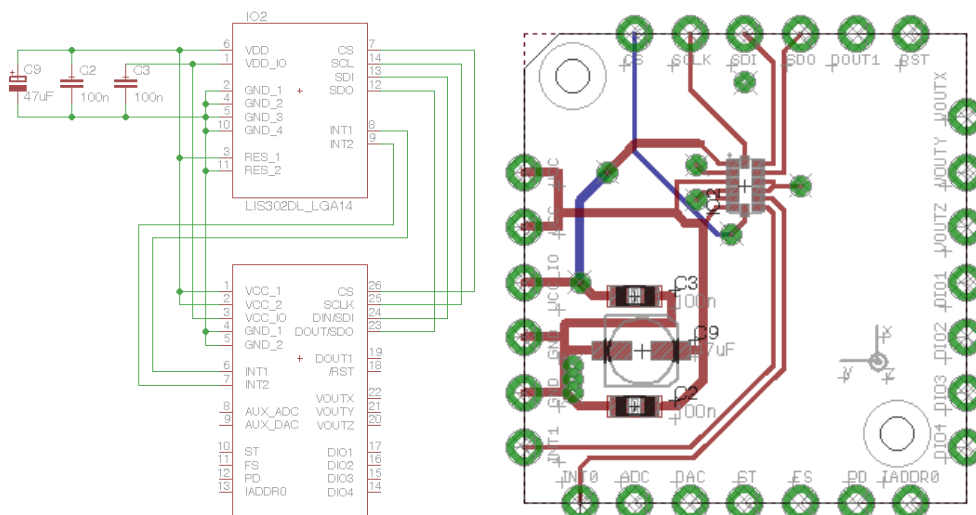
Po důkladném studiu vnitřní struktury vybraných MEMs systémů a doporučených zapojení pro tyto systémy bylo navrženo schéma zapojení pro desku tištěného spoje pro jednotlivé akcelerometry a gyroskopy. Zohledněny byly všechny možnosti vybraného systému (komunikace, možnosti přerušení, změna napájecího napětí, ...). Vytvořené schémata pro jednotlivé MEMs akcelerometry jsou na následujících obrázcích.



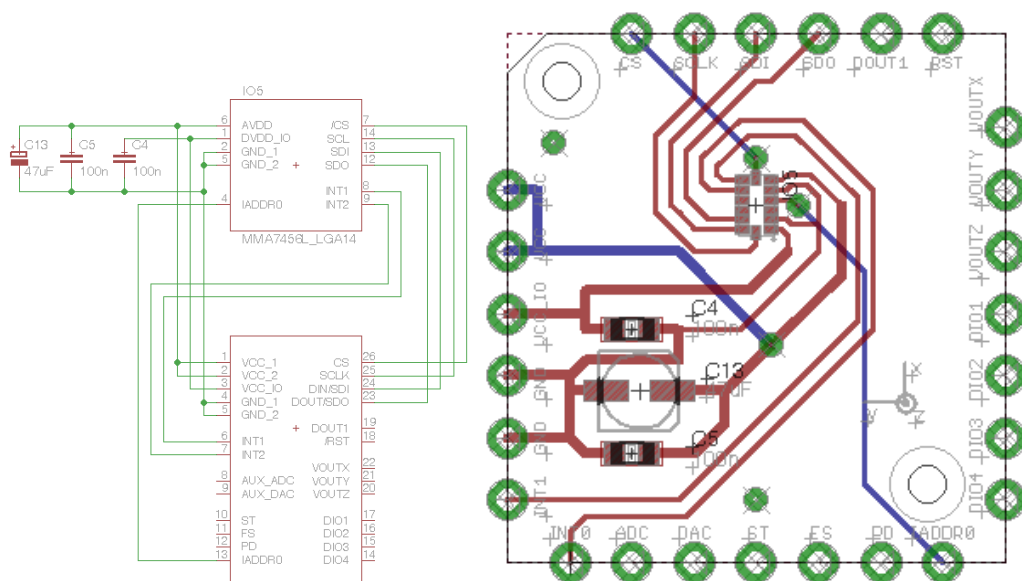
Obr. 8 Schéma zapojení a deska tištěného spoje pro LIS 331



Obr. 9 Schéma zapojení a deska tištěného spoje pro LIS 344

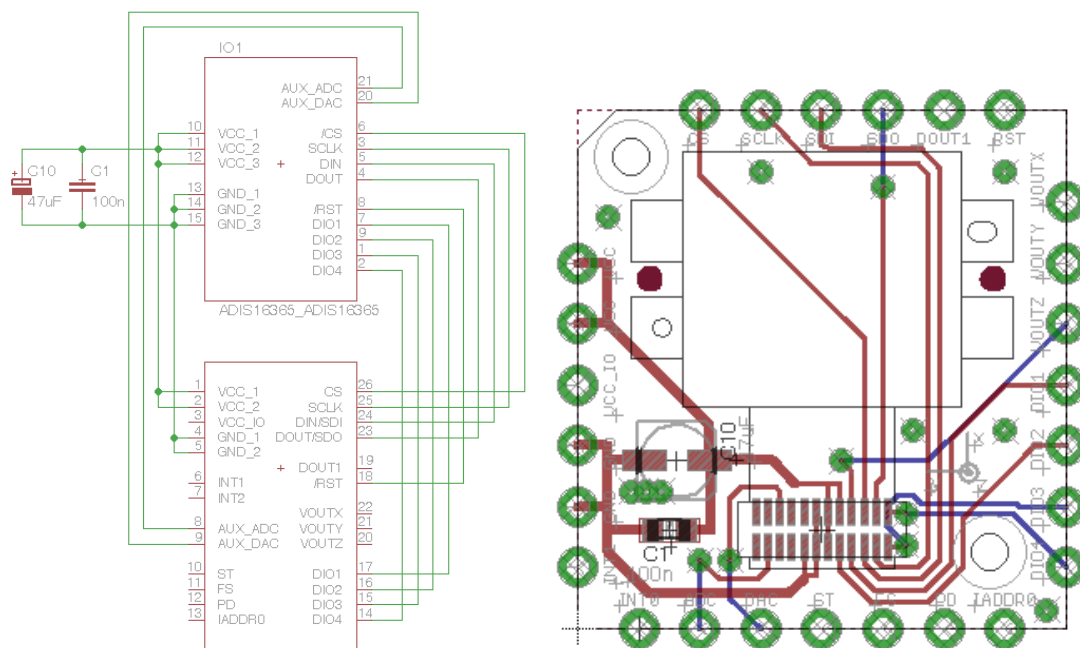


Obr. 10 Schéma zapojení a deska tištěného spoje pro LIS 302



Obr. 11 Schéma zapojení a deska tištěného spoje pro MMA 7456

Jednotliví členové řešitelského podtýmu vytvořili desky tištěných spojů pro různé MEMS akcelerometry a mimo jiné i pro MEMS gyroskop.



Obr. 12 Schéma zapojení a deska tištěného spoje pro ADIS 16365

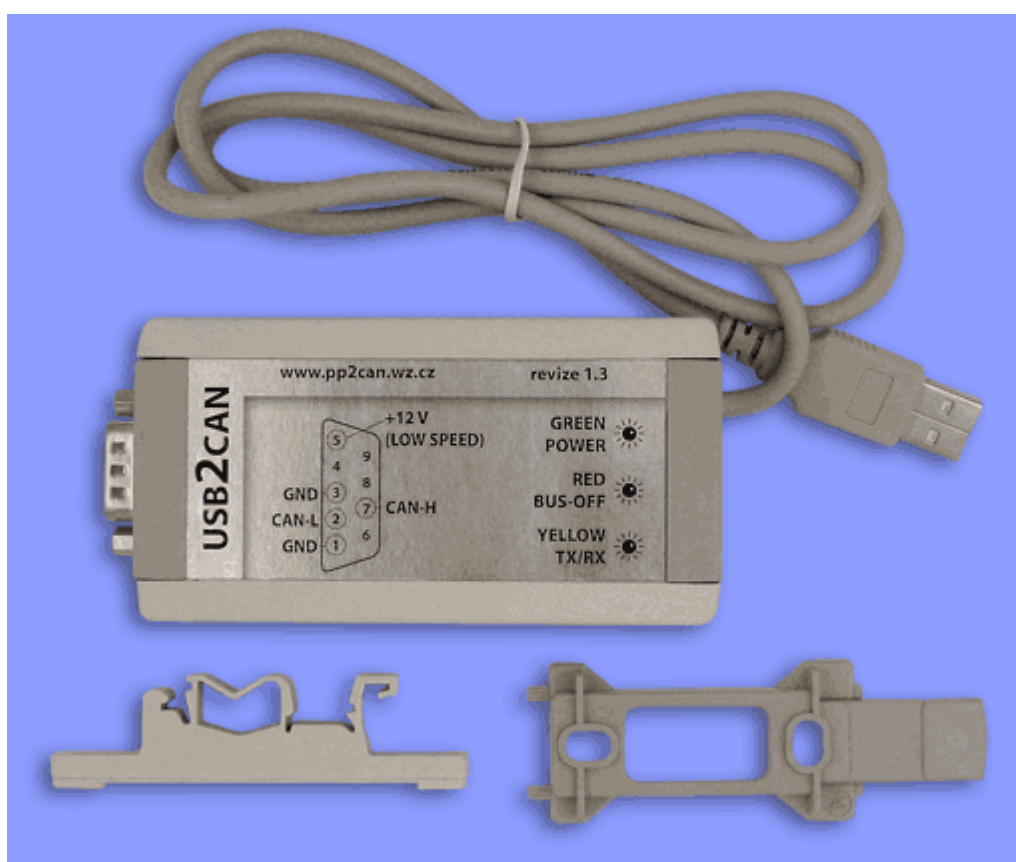
4.6 Programování jednočipových procesorů

Programování jednočipových počítačů se provádí pomocí software MPLAB umožňující programování například v assembleru. Vybraný jednočipový procesor obsahuje podporu rozhraní SPI, I2C, CAN. Pro tyto rozhraní existují knihovny pro vyšší programovací jazyk např. C.

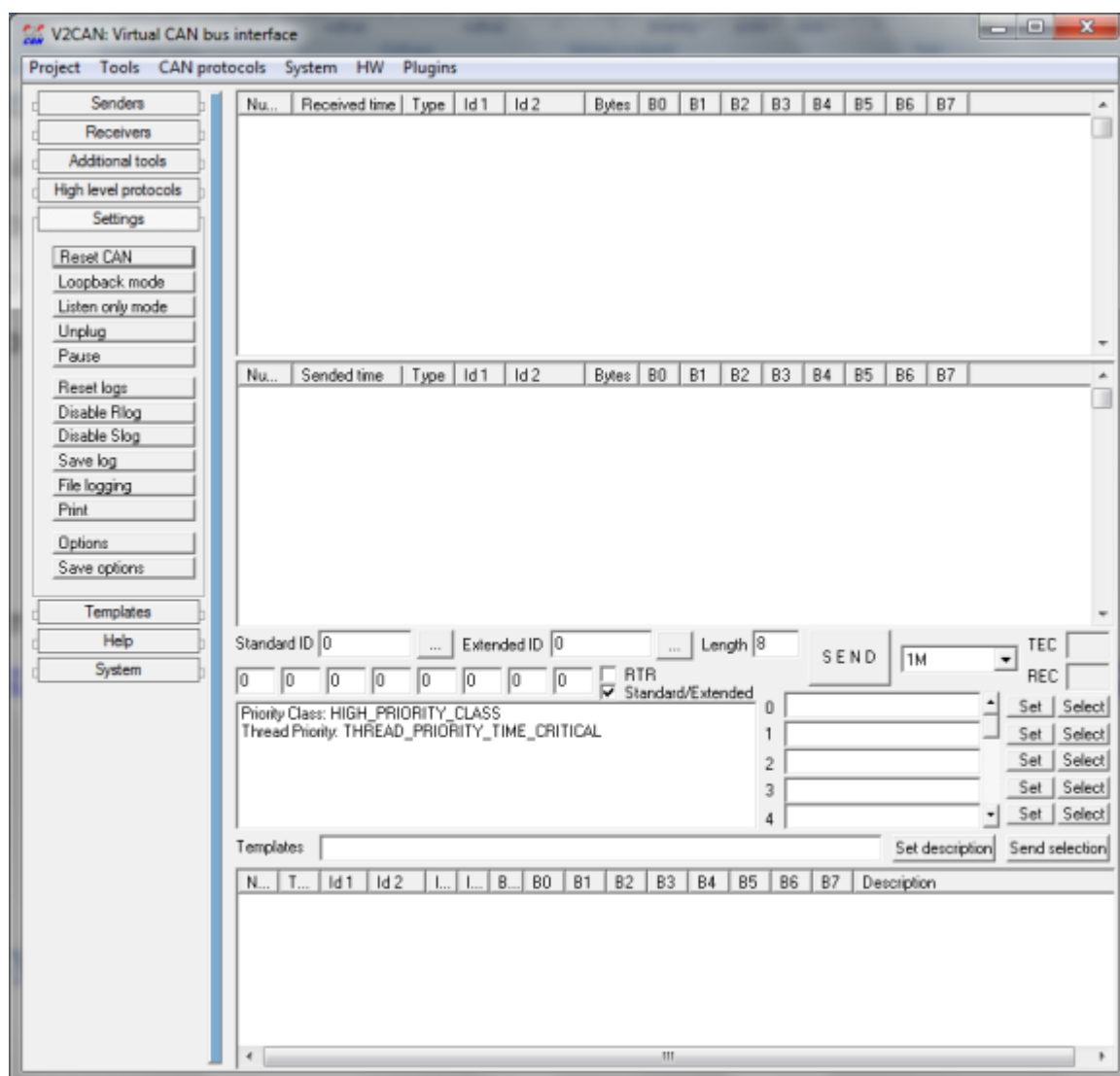
Z důvodu možnosti využití těchto knihoven bylo pro programování procesoru použito prostředí MikroC firmy MikroElektronika.

5 KONFIGURAČNÍ ROZHRANÍ USB2CAN

USB2CAN je adaptér pro připojení sběrnice CAN k PC prostřednictvím USB. Toto zařízení je inovovanou variantou CAN bus převodníku PP2CAN. Zařízení využívá pro komunikaci po USB obvodu firmy FTDI. Jako CAN bus controller je použit obvod SJA1000, který je dnes standardem pro CAN - PC interface. Mezi tyto dva obvody je vložen mikroprocesor PIC řady 18, který zajišťuje obsluhu obou obvodů, provádí transformaci dat a slouží jako další vrstva vyrovnávací paměti. Tento mikroprocesor obsahuje bootloader a dovoluje provádět update originálního firmware, případně zavádět specializovaný uživatelský firmware [<http://www.usb2can.wz.cz/>].



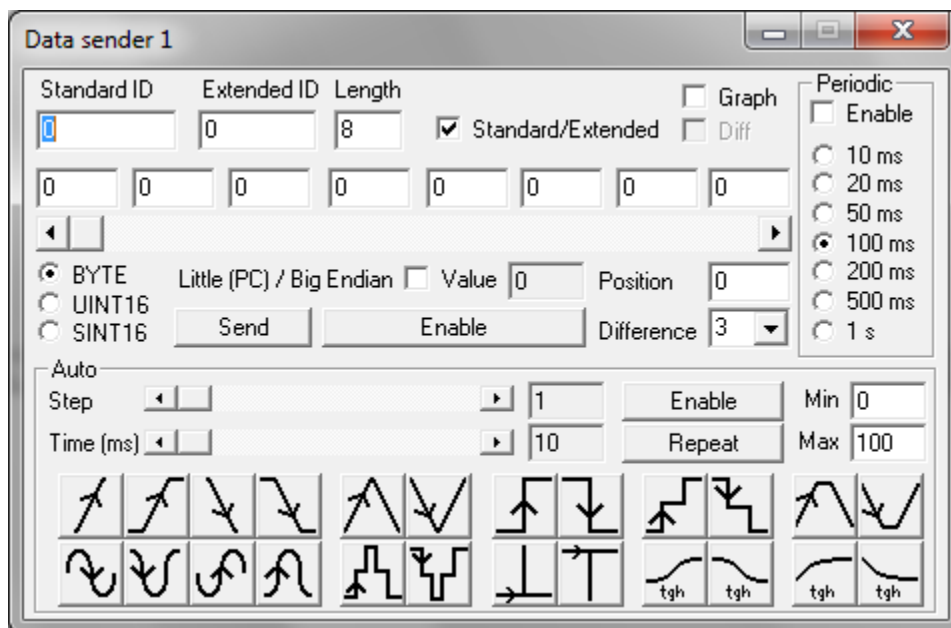
Obr. 13 Komunikační modul USB2CAN



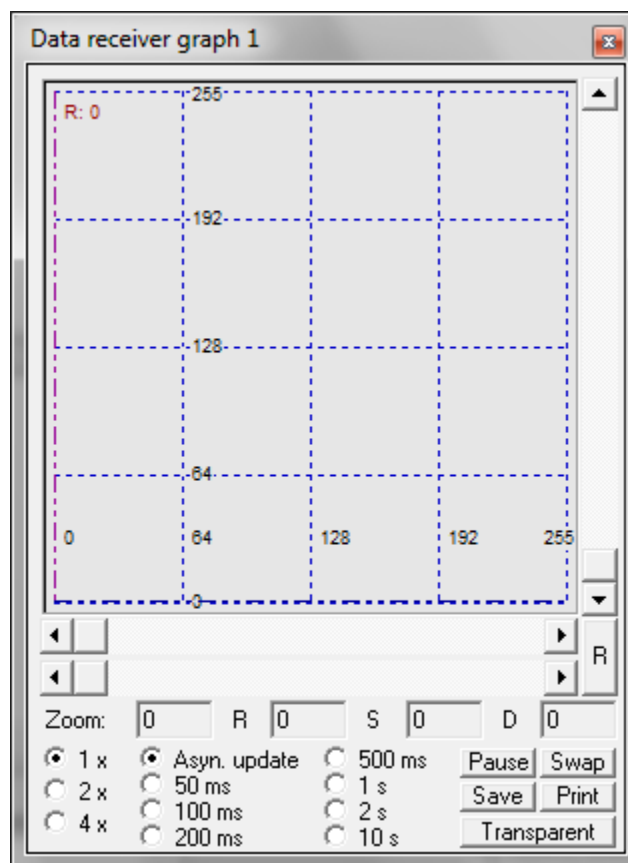
Obr. 14 Hlavní okno aplikace konfigurující USB2CAN a monitorující provoz na sběrnici CAN

Okno aplikace USB2CAN je rozděleno do několika částí. Nejdůležitější částí jsou:

- Menu programu, kde jsou k dispozici jednotlivé nástroje pro analýzu komunikace, nástroje pro generování dat apod.
- Okno logu přijatých zpráv
- Okno logu manuálně odeslaných zpráv
- Okno pro zobrazení hlášení programů
- Okno databáze předdefinovaných zpráv
- Pomocná lišta (ResetCAN, Reset Logu ...)
- Okno pro nastavení a manuální odeslání zprávy na CAN
- Okno pro práci s databází předdefinovaných zpráv
- Okno pro práci s výběrem více předdefinovaných zpráv.



Obr. 15 Okno cyklického zasílání rámců na CAN sběrnici



Obr. 16 Okno grafického zobrazení dílčích Bytů CAN rámce

Bližší popis naleznete v manuálu pro jednotku nebo na adrese <http://pp2can.wz.cz/pages/download/pp2can/Diagnosticky%20SW%20PP2CAN%20CZ.pdf>. Pro nás důležitými záložkami jsou záložky „Senders“ a „Receivers“. Pomocí těchto záložek lze cyklicky posílat např. zprávy, které obsahují 8 bytů datového rámce.

5.1 Popis komunikačních rámců pro MEMs moduly

Všechny senzory s komunikačním modulem jsou připojeny na CAN sběrnici. Pomocí software USB2CAN můžeme konfigurovat a číst data z jednotlivých modulů. Lze přistupovat až k registrům jednotlivých MEMs systémů.

Pokud chceme přečíst jen aktuální zrychlení všech senzorů připojených na sběrnici, musíme poslat rámeček s ID 1, který obsahuje jako 1. Byte 255.

Pokud chceme komunikovat jen s vybraným senzorem na sběrnici CAN, musíme nastavit v 1. Byte rámce s ID 1 hodnotu ID_modulu. Pak následuje selekce čtení/zápis apod. Následují hodnoty podle funkce. Všechny dotazy a odpovědi jsou popsány v následujících tabulkách. Senzor odpoví jen jedním rámcem ze snímače.

ID od modulu mastr (nadřazená úroveň) je vždy 1.

Tab. 1 Popis rámců vysílaných z modulu mastr (dotaz)

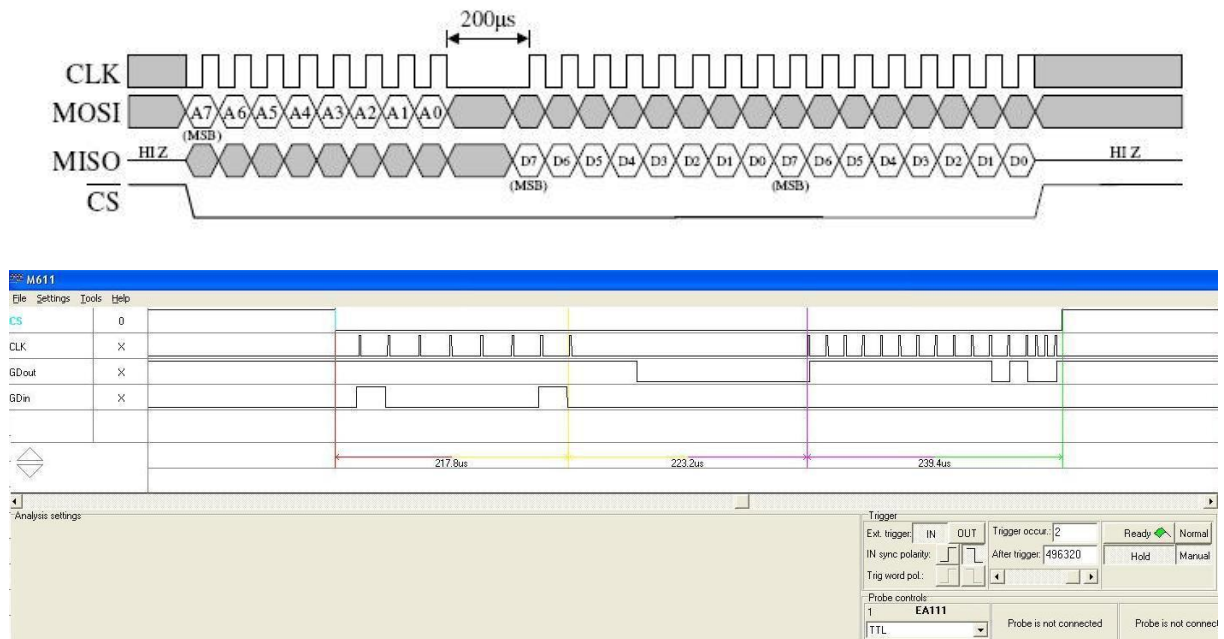
Byte	B0	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
C1	255	x	x	x	x	x	x	x čtení ze všech připojených
C2	ID_m	128	x	x	x	x	x	x čtení jen z jedné desky
C3	ID_m	1	ms	us	x	x	x	x nastavení časových int.
C4	ID_m	15	Adr	Hod	x	x	x	x zápis do registrů senzorů
C5	ID_m	240	Adr	x	x	x	x	x čtení z registrů senzorů

Tab. 2 Popis rámců vysílaných z modulu slave (odpověď)

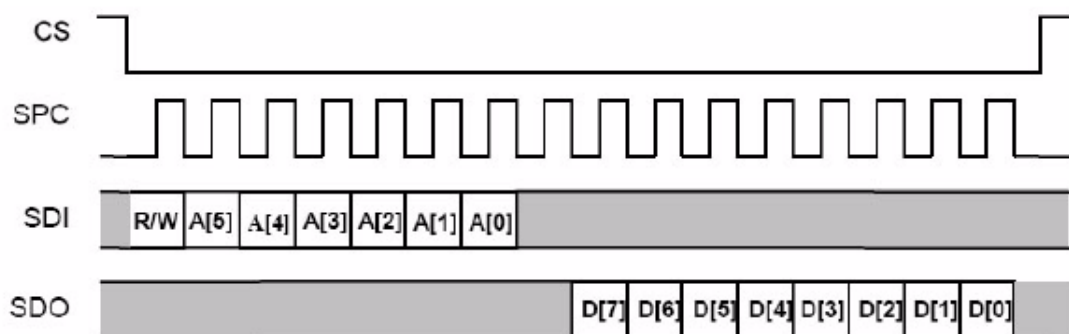
Byte	B0	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
Po příkazu C5	adr	hod	x	x	x	x	x	x čtení z registrů senzorů
Po příkazu C1 a C2	XL	XH	YL	YH	ZL	ZH	POC	DRDY
								vrací tento rámeček při čtení

6 POPIS SPI KOMUNIKACE

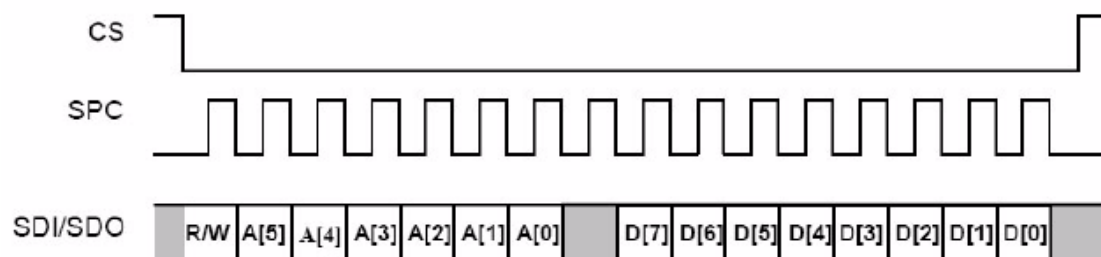
SPI je meziobvodová komunikace využívána v tomto případě na přenos dat z MEMs systému do komunikačního modulu. Základem komunikace jsou signály CS $\setminus$, SDI, SDO, SPC. Signál CS $\setminus$ slouží k výběru obvodu, se kterým bude obvod komunikovat. Signál SPC jsou hodinové pulsy synchronizující sériový přenos jednotlivých bitů z MEMs systému do komunikačního modulu na bázi PIC. Signály SDI a SDO jsou určeny pro přenos obsahu jednotlivých bitů (dat). Při třívodičovém spojení je SDI a SDO spojen do jednoho vodiče. V této konfiguraci je třeba zajistit přepínání směru toku dat na straně jednočipového počítače (komunikačního modulu). Na následujícím obrázku je grafické znázornění přenosu dat po SPI.



Obr. 17 Příklad SPI komunikace s reálnými průběhy



Obr. 18 Čtení 8-bitových registrů ve 4 vodičovém zapojení (MMA7456) [MMA7456. pdf]



Obr. 19 Čtení 8-mi bitových registrů v 3 vodičovém zapojení [MMA7456. pdf]

7 KONFIGURACE Z CAN ROZHRNÍ

Firmware pro jednočipové počítače je napsán tak, aby umožňoval konfiguraci přes CAN sběrnici. Pro tuto konfiguraci je třeba, aby uživatel znal vnitřní strukturu akcelerometru a uspořádání registrů. Příklad uspořádání registrů jednoho z akcelerometrů je na obr. 20.

Address	Name	Definition	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0
\$00	XOUTL	10 bits output value X LSB	XOUT[7]	XOUT[6]	XOUT[5]	XOUT[4]	XOUT[3]	XOUT[2]	XOUT[1]	XOUT[0]
\$01	XOUTH	10 bits output value X MSB	--	--	--	--	--	--	XOUT[9]	XOUT[8]
\$02	YOUTL	10 bits output value Y LSB	YOUT[7]	YOUT[6]	YOUT[5]	YOUT[4]	YOUT[3]	YOUT[2]	YOUT[1]	YOUT[0]
\$03	YOUTH	10 bits output value Y MSB	--	--	--	--	--	--	YOUT[9]	YOUT[8]
\$04	ZOUTL	10 bits output value Z LSB	ZOUT[7]	ZOUT[6]	ZOUT[5]	ZOUT[4]	ZOUT[3]	ZOUT[2]	ZOUT[1]	ZOUT[0]
\$05	ZOUTH	10 bits output value Z MSB	--	--	--	--	--	--	ZOUT[9]	ZOUT[8]
\$06	XOUT8	8 bits output value X	XOUT[7]	XOUT[6]	XOUT[5]	XOUT[4]	XOUT[3]	XOUT[2]	XOUT[1]	XOUT[0]
\$07	YOUT8	8 bits output value Y	YOUT[7]	YOUT[6]	YOUT[5]	YOUT[4]	YOUT[3]	YOUT[2]	YOUT[1]	YOUT[0]
\$08	ZOUT8	8 bits output value Z	ZOUT[7]	ZOUT[6]	ZOUT[5]	ZOUT[4]	ZOUT[3]	ZOUT[2]	ZOUT[1]	ZOUT[0]
\$09	STATUS	Status registers	--	--	--	--	--	PERR	DOVR	DRDY
\$0A	DETSRC	Detection source registers	LDX	LDY	LDZ	PDX	PDY	PDZ	INT2	INT1
\$0B	TOUT	"Temperature output value" (Optional)	TMP[7]	TMP[6]	TMP[5]	TMP[4]	TMP[3]	TMP[2]	TMP[1]	TMP[0]
\$0C		(Reserved)	--	--	--	--	--	--	--	--
\$0D	I2CAD	I ² C device address	I2CDIS	DAD[6]	DAD[5]	DAD[4]	DAD[3]	DAD[2]	DAD[1]	DAD[0]
\$0E	USRINF	User information (Optional)	UI[7]	UI[6]	UI[5]	UI[4]	UI[3]	UI[2]	UI[1]	UI[0]
\$0F	WHOAMI	"Who am I" value (Optional)	ID[7]	ID[6]	ID[5]	ID[4]	ID[3]	ID[2]	ID[1]	ID[0]
\$10	XOFFL	Offset drift X value (LSB)	XOFF[7]	XOFF[6]	XOFF[5]	XOFF[4]	XOFF[3]	XOFF[2]	XOFF[1]	XOFF[0]
\$11	XOFFH	Offset drift X value (MSB)	--	--	--	--	--	XOFF[10]	XOFF[9]	XOFF[8]
\$12	YOFFL	Offset drift Y value (LSB)	YOFF[7]	YOFF[6]	YOFF[5]	YOFF[4]	YOFF[3]	YOFF[2]	YOFF[1]	YOFF[0]
\$13	YOFFH	Offset drift Y value (MSB)	--	--	--	--	--	YOFF[10]	YOFF[9]	YOFF[8]
\$14	ZOFFL	Offset drift Z value (LSB)	ZOFF[7]	ZOFF[6]	ZOFF[5]	ZOFF[4]	ZOFF[3]	ZOFF[2]	ZOFF[1]	ZOFF[0]
\$15	ZOFFH	Offset drift Z value (MSB)	--	--	--	--	--	ZOFF[10]	ZOFF[9]	ZOFF[8]
\$16	MCTL	Mode control	--	DRPD	SPI3W	STON	GLVL[1]	GLVL[0]	MOD[1]	MOD[0]
\$17	INTRST	Interrupt latch reset	--	--	--	--	--	--	CLRINT2	CLRINT1
\$18	CTL1	Control 1	DFBW	THOPT	ZDA	YDA	XDA	INTRG[1]	INTRG[0]	INTPIN
\$19	CTL2	Control 2	--	--	--	--	--	DRVO	PDPL	LDPL
\$1A	LDTH	Level detection threshold limit value	LDTH[7]	LDTH[6]	LDTH[5]	LDTH[4]	LDTH[3]	LDTH[2]	LDTH[1]	LDTH[0]
\$1B	PDTH	Pulse detection threshold limit value	PDTH[7]	PDTH[6]	PDTH[5]	PDTH[4]	PDTH[3]	PDTH[2]	PDTH[1]	PDTH[0]
\$1C	PW	Pulse duration value	PD[7]	PD[6]	PD[5]	PD[4]	PD[3]	PD[2]	PD[1]	PD[0]
\$1D	LT	Latency time value	LT[7]	LT[6]	LT[5]	LT[4]	LT[3]	LT[2]	LT[1]	LT[0]
\$1E	TW	Time window for 2 nd pulse value	TW[7]	TW[6]	TW[5]	TW[4]	TW[3]	TW[2]	TW[1]	TW[0]
\$1F		(Reserved)	--	--	--	--	--	--	--	--

Obr. 20 Mapa registrů MEMs senzoru

8 TESTOVÁNÍ A KALIBRACE MEMS SNÍMAČE

Použité MEMs snímače mají uvedenou přesnost a rozsah, ale po další měření bylo nutné je kalibrovat na nulový stav a ověřit přesnost.

8.1 MEMS akcelerometr Freescale MMA7456

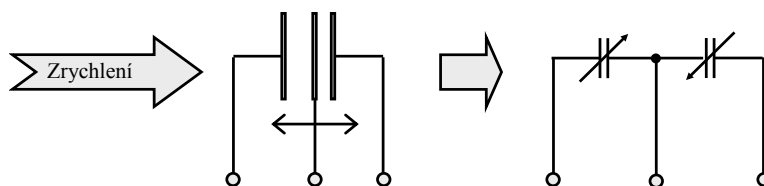
MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) akcelerometry typu MMA7456 jsou miniaturní a levné snímače zrychlení, které dokáží pracovat v několika uživatelem volitelných režimech. Snímač je digitální, dokáže komunikovat přes SPI nebo I2C sběrnici, díky tomuto řešení je možné snadno provádět změny nastavení snímače, nebo využívat různé funkce jako je měření zrychlení nebo detekce pulsů a úrovní. Zrychlení přečtené ze sběrnice může být v podobě 8 nebo 10 Bit čísla a to pro všechny osy. V praxi to vypadá tak, že pro každou osu je zde jeden registr pro 8 Bit přesnost a dva registry pro 10 Bit přesnost (čte se zvlášť horní a dolní úroveň).

Tento typ snímače dokáže měřit i statické zrychlení (např. gravitační zrychlení). K pevnému nastavení offsetu (vynulování os v počátečním stavu) zde slouží 6 registrů, do nichž se zapisuje hodnota vypočítaná z naměřeného zrychlení. Jeden výpočet a nastavení offsetu zpravidla nestačí, je vhodné ho zopakovat vícekrát (pro 10 Bit čtení stačí asi 5x). Nastavené hodnoty ve snímači zůstanou do odpojení napájecího napětí.

Snímač má dvě volitelné vnitřní frekvence měření a to 125 Hz s digitálním filtrem dolní propust 62.5 Hz a 250 Hz s filtrem dolní propust 125 Hz.

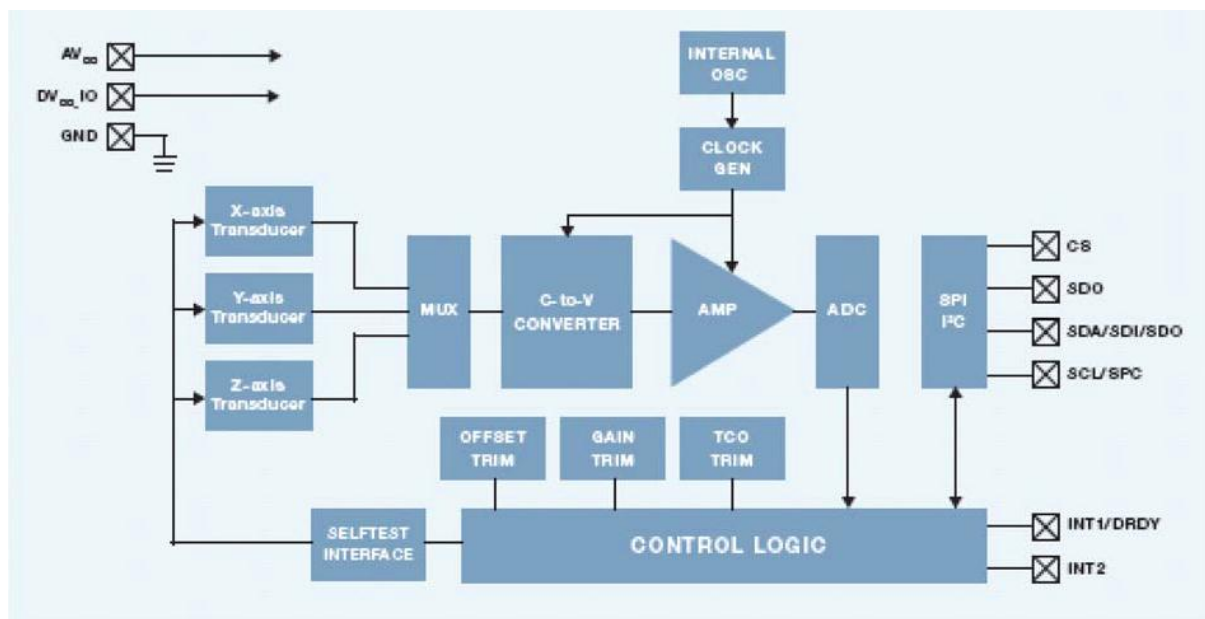
8.2 Konstrukční řešení snímače

Část snímače, která je citlivá na zrychlení je tvořena poměrnými kondenzátory s pohyblivou částí a třemi elektrodami. Zrychlení působící na snímač způsobí vychýlení pohyblivé elektrody a tím dojde ke změně kapacity. Toto řešení je výhodné v tom, že je možné měřit i statické zrychlení.



Obr. 21 Fyzikální princip MEMs akcelerometru

e skutečnosti je snímač značně složitější, zvláště pak když se jedná o tříosý akcelerometr. Blokové uspořádání celého snímače je na obrázku.

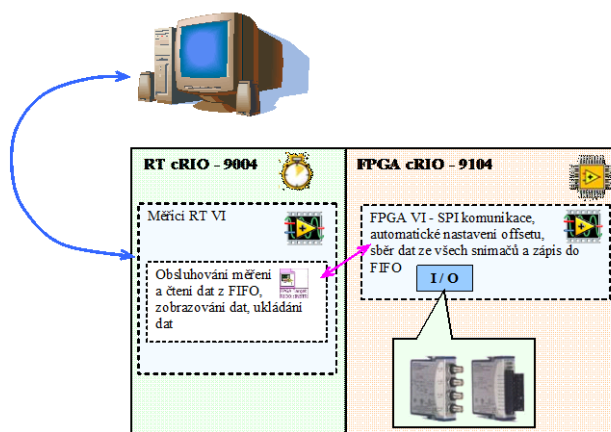


Obr. 22 Blokové uspořádání MEMS snímače

Pro snímač bylo vytvořeno ochranné pouzdro – standardní běžně dostupná krabička byla přizpůsobena pro umístění snímače. Ke spodní části krabičky byl navíc připevněn nástavec se zářezy, které umožňují využívat standardní úchyty pro tříosé akcelerometry Brüel&Kjær.

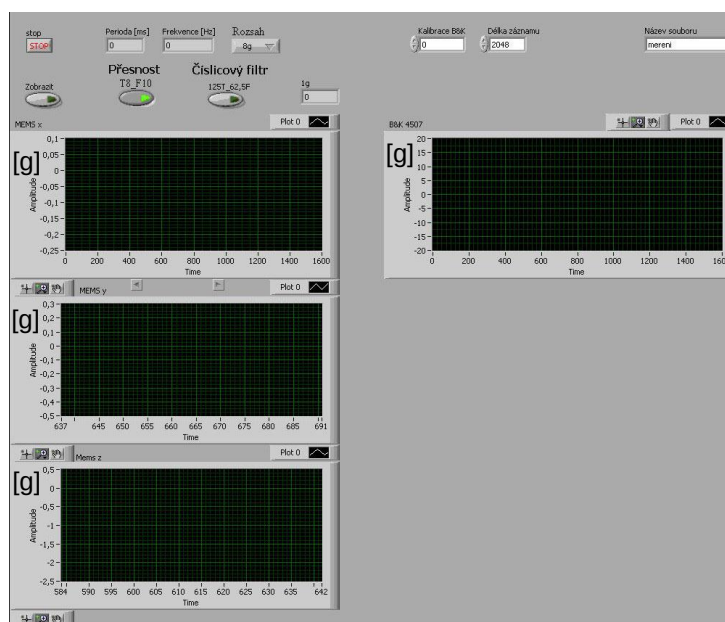
8.3 Měřicí aplikace

Pro testování senzoru byla vyvinuta řídicí aplikace na platformě National Instruments cRIO. cRIO může pracovat nezávisle na okolních zařízeních, v tomto případě bylo připojeno k PC, odkud je měření ovládáno a monitorováno. Pro cRIO byly vytvořeny aplikace v prostředí LabView. Byly využity obě části cRIO (Realtime i FPGA). V přesném FPGA byla vyřešena celá komunikace se snímačem, inicializace po spuštění sběr dat i nastavení offsetu, realtimeová část zde slouží jako uživatelské rozhraní, přes které lze měnit některé parametry FPGA aplikace a tím přímo ovlivňovat chování snímače a jeho režimy. Blokové schéma cRIO s potřebnými aplikacemi je na obrázku.



Obr. 23 Struktura aplikace v cRIO RT a FPGA

V tomto případě jsou aplikace přizpůsobeny pro připojení jednoho digitálního MEMS a jednoho analogového Delta Tron akcelerometru. Data z obou snímačů jsou čtena stejnou frekvencí a v realtime aplikaci jsou ukládána do jednoho souboru. Okno realtime aplikace pro ovládání měření je zobrazeno na obrázku.

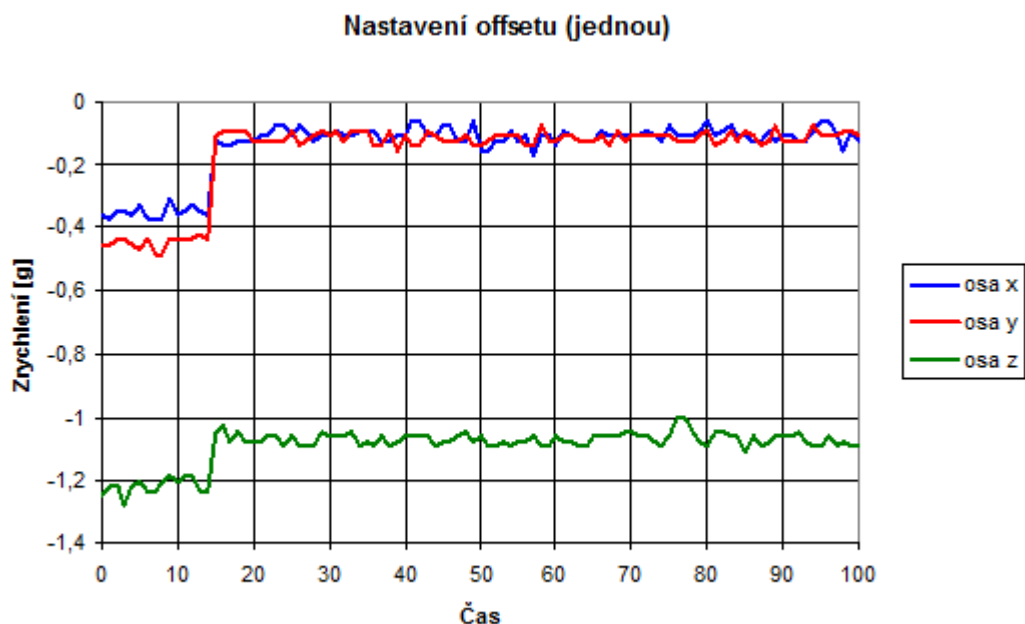


Obr. 24 Uživatelské rozhraní aplikace pro testování akcelerometrů

8.4 Metodika nastavení offsetu

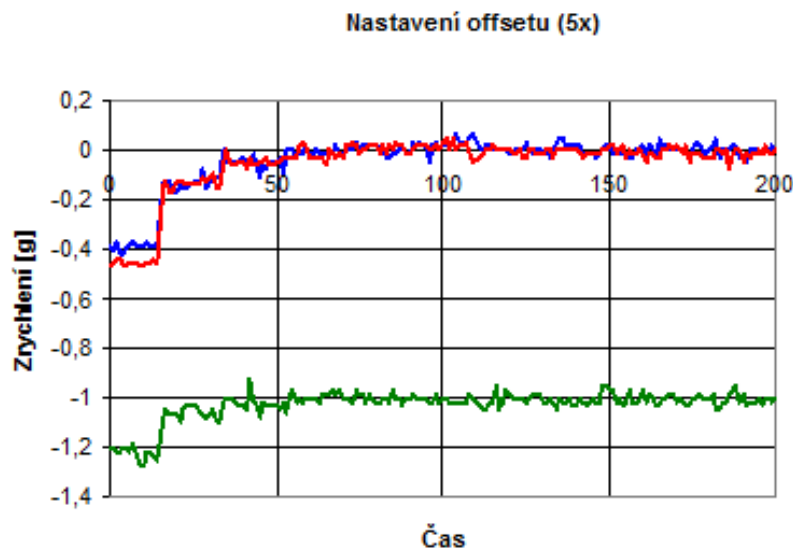
Bylo zde naprogramováno i automatické nastavení offsetu. Ten se vypočítá z naměřených dat průměrováním a zapíše se do správného registru. V případě, že na některé ose má být výstup 1g (osa z – gravitační zrychlení), musí být hodnota odpovídající tomuto zrychlení přičtena.

Vypočtená hodnota offsetu ještě musí být rozložena na dolní (8 Bit) a horní (3 Bit) úrovně, které se zapíší do registru. Pokud se výše uvedený postup provede jednou, offset se nenastaví dostatečně přesně.



Obr. 25 Jednorázové nastavení offsetu MEMs senzoru

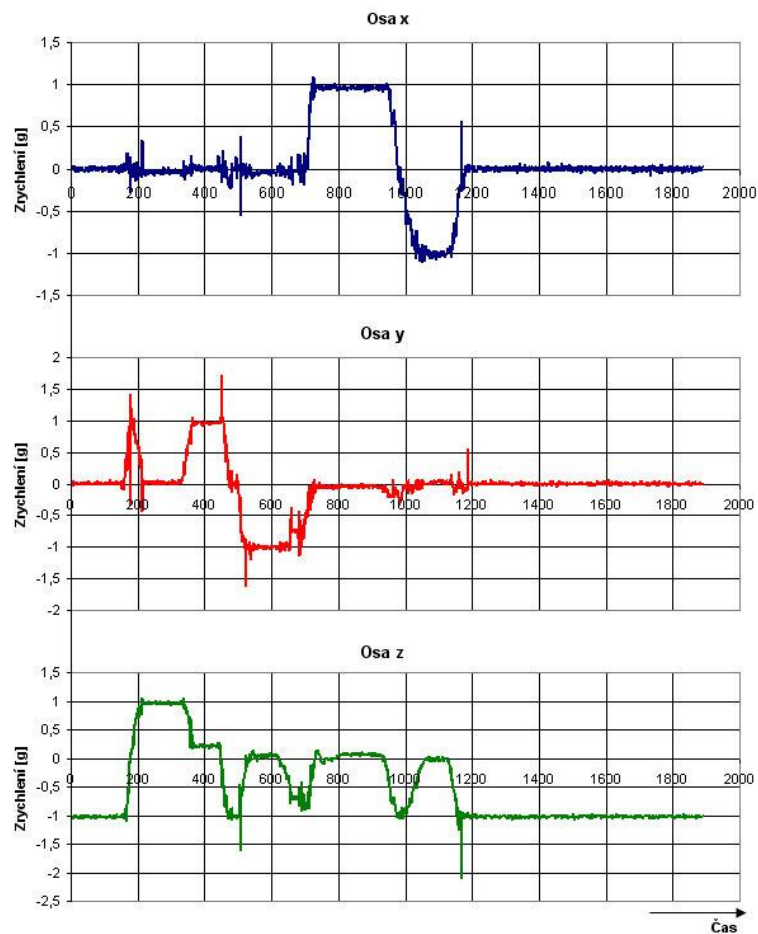
Aby byla hodnota zrychlení snímače v klidu nastavena přesně, musí se výpočet offsetu několikrát zopakovat. Hodnoty předešlých offsetů se musí k novému vždy přičíst. Výsledek pětinasobného výpočtu offsetu vypadá následovně.



Obr. 26 Zpřesnění offsetu pětinasobnou iterací

8.5 Metodika měření

Pro ověření správné činnosti snímače (všech os) byla nejprve provedena zkouška, jak snímač dokáže reagovat na gravitační pole Země. Výstupy kanálů při otáčení snímačem je zobrazeno na obrázku.

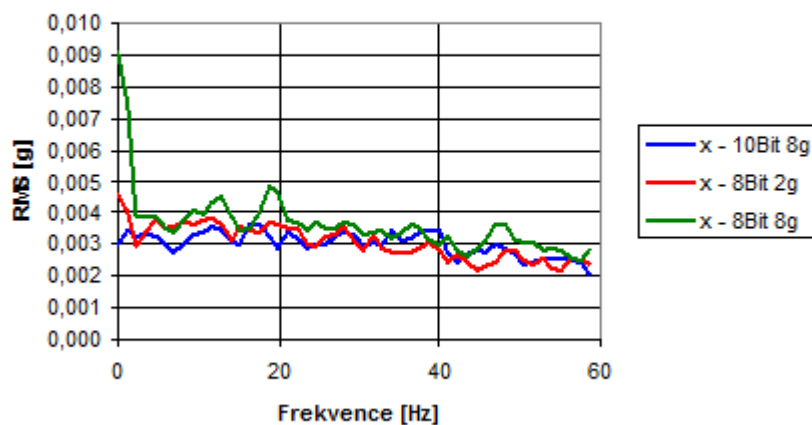


Obr. 27 Naklání snímače ve třech osách

Na obrázku je vidět, že výstup ze snímače a to na všech osách se mění od -1 do +1g podle jeho aktuální polohy vzhledem ke gravitačnímu poli Země.

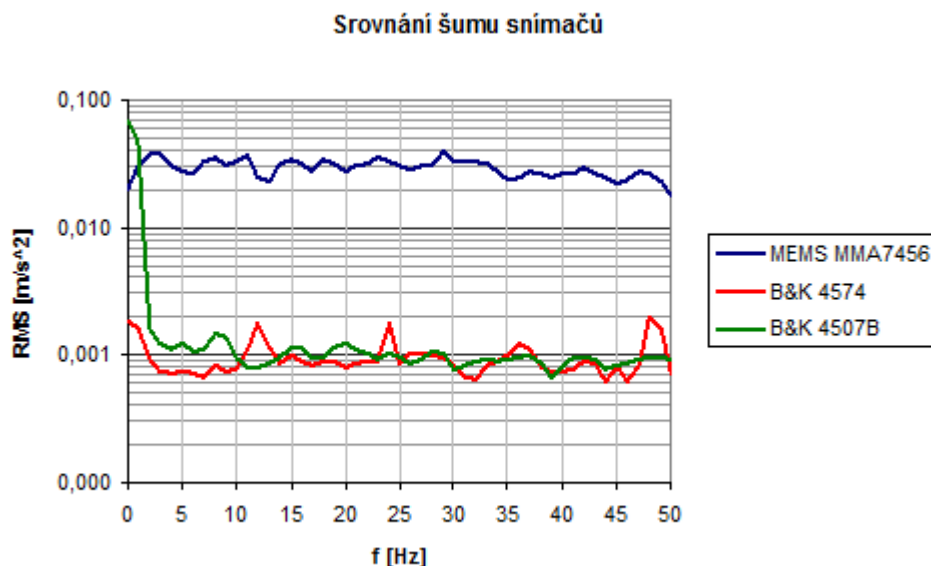
Na dalším obrázku je znázorněn šum snímače za klidu. Ten udává jaké minimální zrychlení je snímač schopen měřit.

Šum v klidu - různé nastavení snímače



Obr. 28 Naměřené frekvence šumu snímače v klidu

Měření šumu snímače bylo prováděno v různých režimech $10 \text{ Bit} \pm 8g$, $8 \text{ Bit} \pm 8g$ a $8 \text{ Bit} \pm 2g$. Největší přesnosti tohoto snímače lze dosáhnout při nastavení $10 \text{ Bit} \pm 8g$ a $8 \text{ Bit} \pm 2g$, naopak nejnižší přesnost nastane při nastavení $8 \text{ Bit} \pm 8g$. Šum snímače byl při nastavení nejmenší přesnosti o něco vyšší, nepřekračoval však hodnotu 5 mg , při nejpřesnějším nastavení byl menší než 4 mg . Na dalším obrázku je vidět srovnání šumu MMA7456 se snímači Brüel&Kjær.



Obr. 29 Porovnání vnitřního šumu MEMS snímače Freescale a snímačů Brüel&Kjær

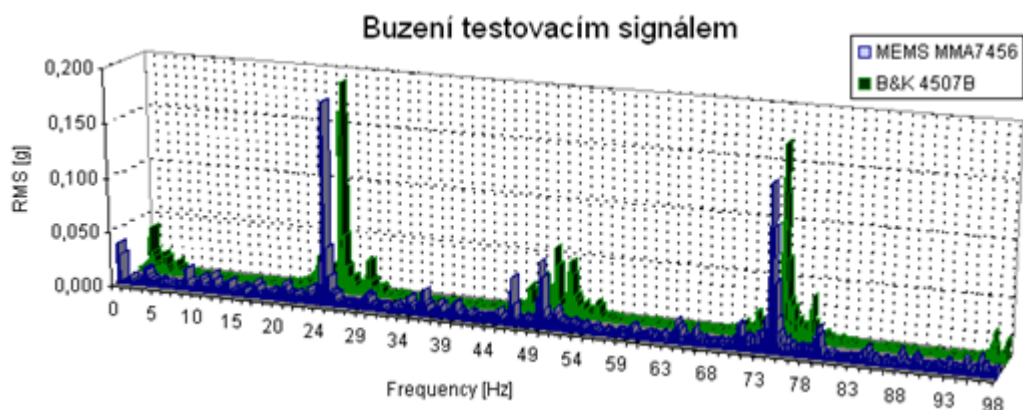
Měření šumu byla prováděna vzorkovací frekvencí 150 Hz , frekvence měření uvnitř snímače byla 250 Hz (filtr dolní propust 125 Hz).

Pro měření testovacího signálu byl použit vibrátor, který byl buzen pokusným signálem ze signálového analyzátoru Pulse.



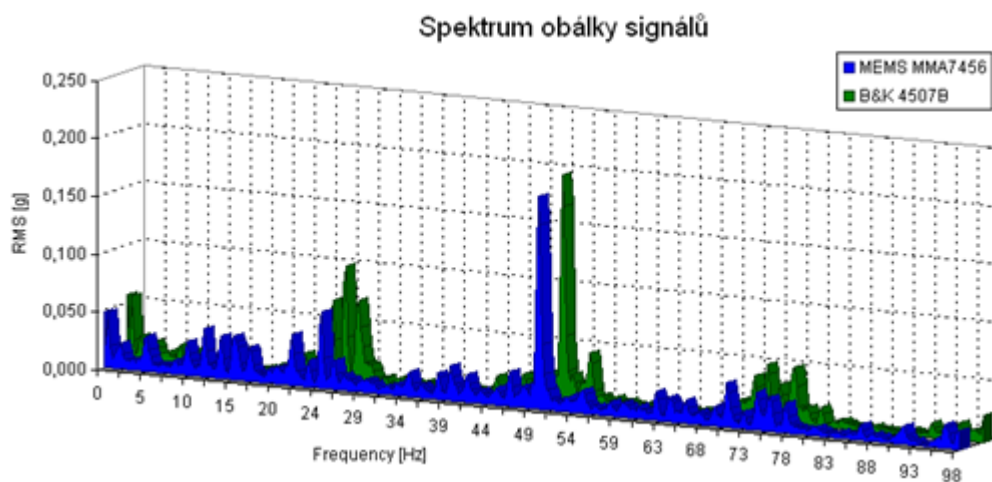
Obr. 30 Měřicí sestava s cRIO, hliníkovou deskou se senzory a vibrátorem Tira

Na vibrátoru byla připevněna tuhá hliníková deska, ke které byly připevněny akcelerometry. Na následujícím obrázku je zobrazeno spektrum dvou signálů z nichž jeden je získán ze snímače MMA7456 a druhý ze snímače 4507B. Oba snímače byly připojeny k měřicímu zařízení cRIO a byly vzorkovány stejnou frekvencí (250 Hz). Měřený signál obsahoval výraznou harmonickou složku 50 Hz.



Obr. 31 Spektrum měření budící frekvence 50Hz MEMs a referenčním senzorem

Na obrázku spektra signálu je možné vidět, že jsou si signály z obou snímačů podobné a je možné je použít pro další zpracování signálu. Dále byl použit nástroj Obálka signálu pro zjištění amplitudové modulace.



Obr. 32 Frekvenční spektrum obálky signálů

Výsledek je možné vidět na obrázku. Je zde jasné vidět harmonická složka o frekvenci 50 Hz, která byla změřena oběma snímači (MMA7456 i 4507B). Dále můžeme registrovat harmonické frekvence 25Hz a 75Hz.

8.6 Parametry referenčních snímačů

Delta Tron akcelerometry Brüel&Kjær (4507B a 4508B)

Tyto snímače byly speciálně navrženy pro to, aby odolávaly drsnému prostředí automobilového průmyslu. Jsou malé, lehké a mají velkou citlivost. Jsou vhodné pro měření karosérie automobilů, přenosu síly, pro modální atd. Přesnost piezoelektrických

akcelerometrů ovlivňují různé faktory, kterými jsou měnící se teplota okolí, vysoká vlhkost, nebo rušení vysokofrekvenčním elektromagnetickým polem. Tyto nepříznivé vlivy okolí jsou u snímačů řady 4508 a 4507 sníženy na minimum díky konstrukci a volbě vhodných materiálů.



Obr. 33 Akcelerometr 4508B

Delta Tron je označení akcelerometrů a produktů firmy Brüel&Kjær pro úpravu signálů. Tyto akcelerometry potřebují stálé proudové napájení a dávají výstupní signál napětově namodulovaný na výkonovém přivodním vedení. Jedna z výhod tohoto provedení je možnost používat i levné kabely. Nízká výstupní impedance umožňuje připojení akcelerometru k měřicímu zařízení pomocí dlouhého kabelu.

Piezoresistivní akcelerometry Brüel&Kjær (4574)

Tento snímač je zkonstruován tak aby kromě vibrací byl schopen měřit i statické zrychlení (gravitační zrychlení země). Tento snímač má vysokou teplotní stabilitu (od -55°C do 121°C), nízkou spotřebu, je odolný proti rázu až 10 000 g.



Obr. 34 Akcelerometr 4574

9 TESTOVÁNÍ SYNCHRONIZACE MEMS SNÍMAČŮ NA CAN SBĚRNICI

Pro realizaci levné sítě senzorů založených na MEMs bylo použito propojení pomocí průmyslové CAN sběrnice. Komunikace po sběrnici vnáší do měření významné zpoždění a nepřesnosti, toto bylo odstraněno speciálně navrženou architekturou měřicího řetězce a komunikačního protokolu. Kvalita vzájemné synchronizace více snímačů měřících identický signál byla testována na následující úloze.

9.1 Použité komponenty měřicí úlohy

Piezoaktivní akcelerometry Brüel&Kjær (4574)

Tento snímač je zkonstruován tak aby kromě vibrací byl schopen měřit i statické zrychlení (gravitační zrychlení země). Tento snímač má vysokou teplotní stabilitu (od -55 °C do 121°C), nízkou spotřebu, je odolný proti rázu až 10 000 g.

Signálový analyzátor LabShop Pulse (Brüel&Kjær)

Toto měřicí zařízení obsahuje 9 vstupních a 2 výstupní kanály. Frekvenční rozsah je až 25,6 kHz. Je to snadno přenosné zařízení, pro jeho obsluhu je nutné použít PC (notebook). S počítačem komunikuje přes TCP/IP.



Obr. 35 Signálový analyzátor Pulse

Z důvodů technických parametrů bylo toto profesionální měřicí zařízení použito jako etalon, se kterým byly porovnány výsledky zaznamenané ostatními zařízeními. Rovněž bylo Pulse využito pro generování testovacích signálů.

Vibrátor Tira

Toto zařízení slouží k přeměně vygenerovaného nebo zaznamenaného signálu zpět na pohyb (v jedné ose). Jak je vidět na následujícím obrázku, k vibrátoru je připevněna tuhá hliníková deska, ke které jsou připevněny snímače.



Obr. 36 Vibrátor Tira s připevněnými snímači

Real-time měřicí ústředna cRIO

Pro měření vibrací v reálném čase použijeme jednotku cRIO. Toto zařízení se skládá z controlleru (NI cRIO – 9014) a boxu (NI cRIO – 9104) do kterého se zasouvají I/O moduly a v němž je programovatelné hradlové pole (FPGA). Controller obsahuje 128 MB paměť DRAM, 2 GB flash paměť pro ukládání dat aplikací a průmyslový procesor o frekvenci 200 MHz. Je zde i speciální operační systém. Je vybaveno portem RS 232, USB a konektorem RJ-45 pro síťovou komunikaci. Pro napájení se používá stejnosměrné napětí 9 až 30 V.



Obr. 37 Měřicí ústředna cRIO se zásuvnými kartami

Toto zařízení bylo zvoleno pro svou robustnost, odolnost, nízkou spotřebu energie, malé rozměry, přesnost a variabilitu možností použití různých I/O modulů. Díky těmto vlastnostem je možné ho používat i pro měření za jízdy vozidla i za působení vibrací, při nichž by například notebook nemohl pracovat. Může být přímo ovládáno počítačem, ale může také pracovat nezávisle na ostatních zařízeních. Skládá se ze dvou částí. RT část, kde je procesor a speciální operační systém, který umožňuje přesnější vzorkování než to, které je možné dosáhnout na operačních systémech klasických počítačů. Přesné vzorkování je potřebné pro přesné měření vibrací. Druhá část je FPGA – část která přímo komunikuje s I/O moduly, ta umožňuje ještě přesnější vzorkování než RT část cRIO.

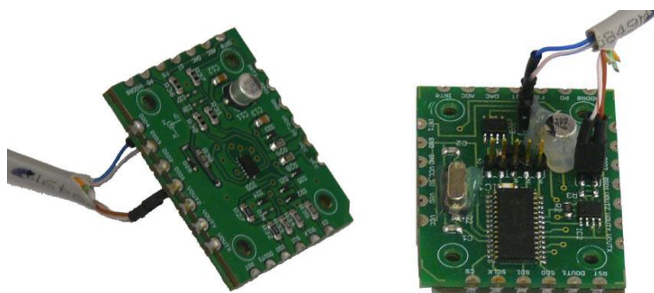
Popis CAN modul NI cRIO - 9853

K tomuto měření, abychom mohli připojit níže uvedený snímač s CAN rozhraním potřebujeme I/O modul NI cRIO – 9853. Tento modul slouží pro připojení CAN sběrnice. Obsahuje dva vysokorychlostní porty se standardními konektory DE9M (DB9) (Obrázek 6). První je napájen vnitřně, druhý z vnějšku. Obsahuje CAN controller SJA1000 a CAN vysílač/přijímač TJA1041 (Philips). Umožňuje synchronizaci s ostatními I/O moduly cRIO. Data jsou přenášena rychlostí 1 Mb/s.

Popis MEMS akcelerometru, způsob komunikace

MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) akcelerometry typu MMA7456 jsou miniaturní a levné snímače zrychlení, které dokážou pracovat v několika uživatelem volitelných režimech.

V této úloze snímač s okolím komunikuje přes CAN. Je složen ze dvou desek plošných spojů, které jsou připájeny dohromady. Na jedné desce je MEMS akcelerometr a komunikuje s deskou, na které je jednočipový procesor a ten obstarává komunikaci s okolím přes CAN.



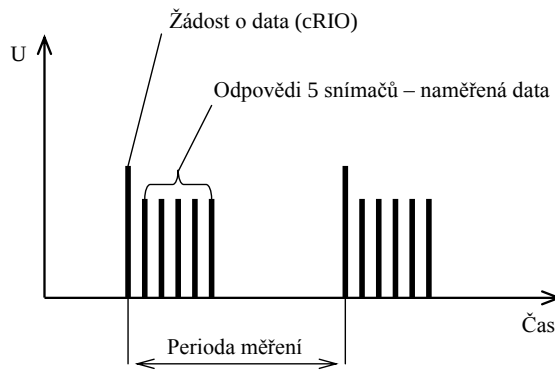
Obr. 38 Vícevrstvá deska tištěných spojů snímače vznikla spájením dvou dvouvrstevných desek dohromady

9.2 Čtení dat – synchronizace snímačů na CAN sběrnici

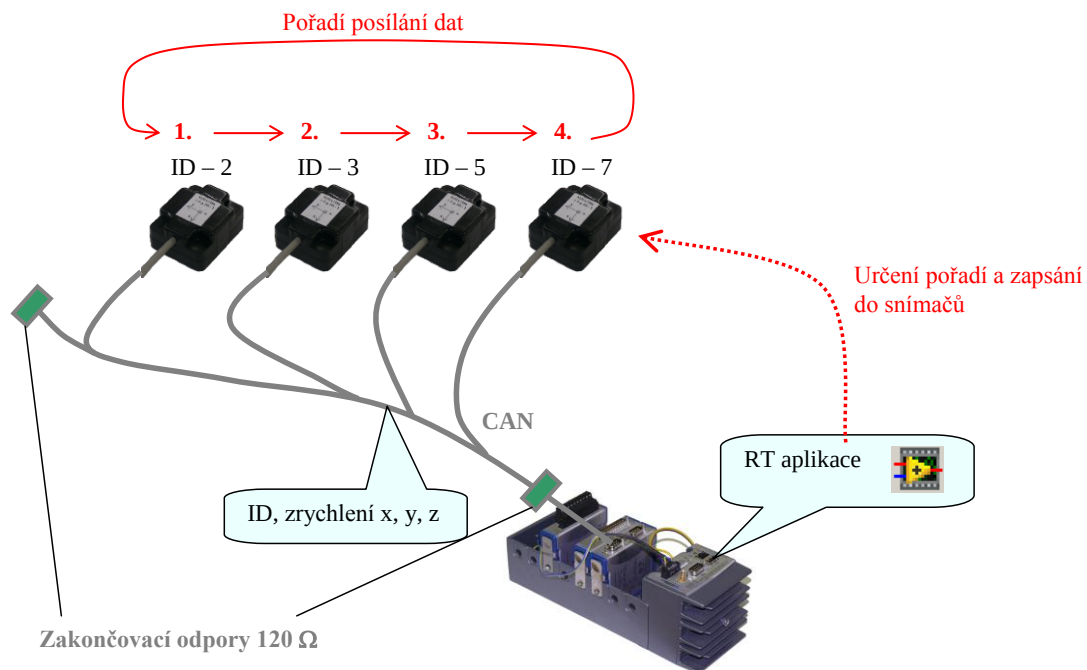
Každý snímač má svoje ID, které je pevně dáno, díky tomu je možné se snímači snadněji pracovat a umožňuje to využití seznamů s informacemi o kalibračních hodnotách či offsetu snímačů, které mohou být uloženy v měřicí ústředně.

Data jsou ze snímačů posílána po v okamžiku rozpoznání příkazu pro odesílání dat a splnění podmínky pořadí snímačů. Příkaz pro zaslání dat je poslán se zvolenou vzorkovací periodou. Přesnost vzorkování je dána přesností hradlového pole (FPGA), ve kterém je tato funkce realizována. Pořadí odesílání dat ze snímačů na sběrnici je dáno proměnnou na jednočipu snímače, ta říká, který snímač má odeslat data dřív. Toto pořadí se po startu měřicí aplikace automaticky generuje v závislosti na ID připojených snímačů.

Tímto je zajištěna synchronizace posílání dat ze snímačů. Měřicí zařízení může v závislosti na počtu připojených snímačů přizpůsobit vzorkovací frekvenci měření, aby při větším počtu snímačů a vysoké vzorkovací frekvenci všechny snímače stačily odeslat svá data za méně než je délka jedné vzorkovací periody měření.



Obr. 39 Průběh signálu na CAN sběrnici během měření



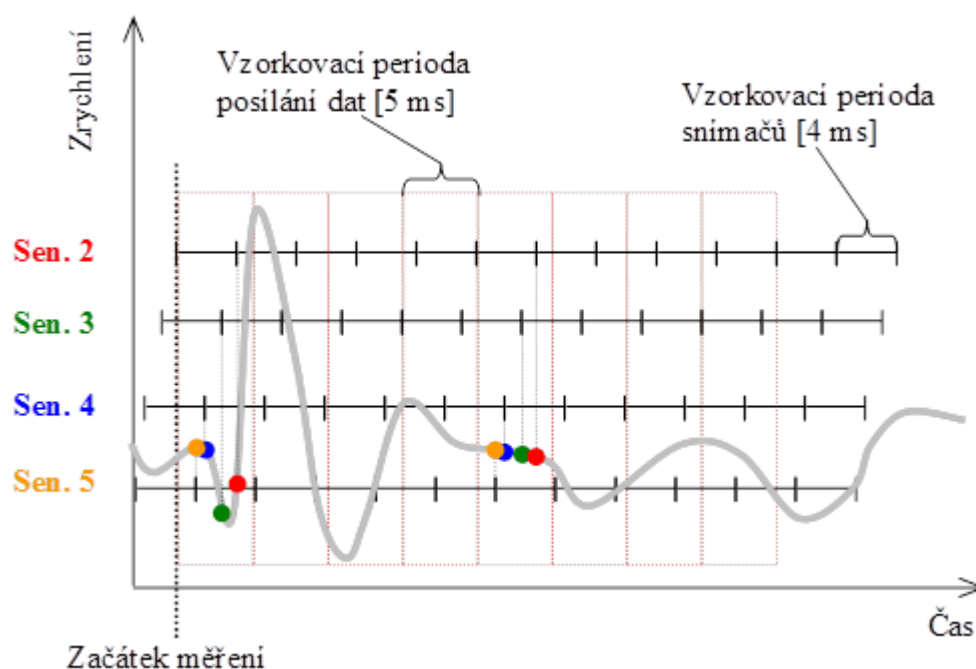
Obr. 40 Blokové zapojení s vyznačením synchronizace odesílání dat

Z důvodu zjištění a možného zlepšení synchronizace snímačů bylo 8 snímačů šrouby připevněno na tuhou hliníkovou desku, která je umístěna na vibrátoru. Cílem je, aby všechny snímače byly buzeny stejnými vibracemi. Signál pro vibrátor byl generován pomocí signálového analyzátoru Pulse a v několika případech i ručně (klepnutí do středu desky).



Obr. 41 Umístění snímačů na společné desce na vibrátoru

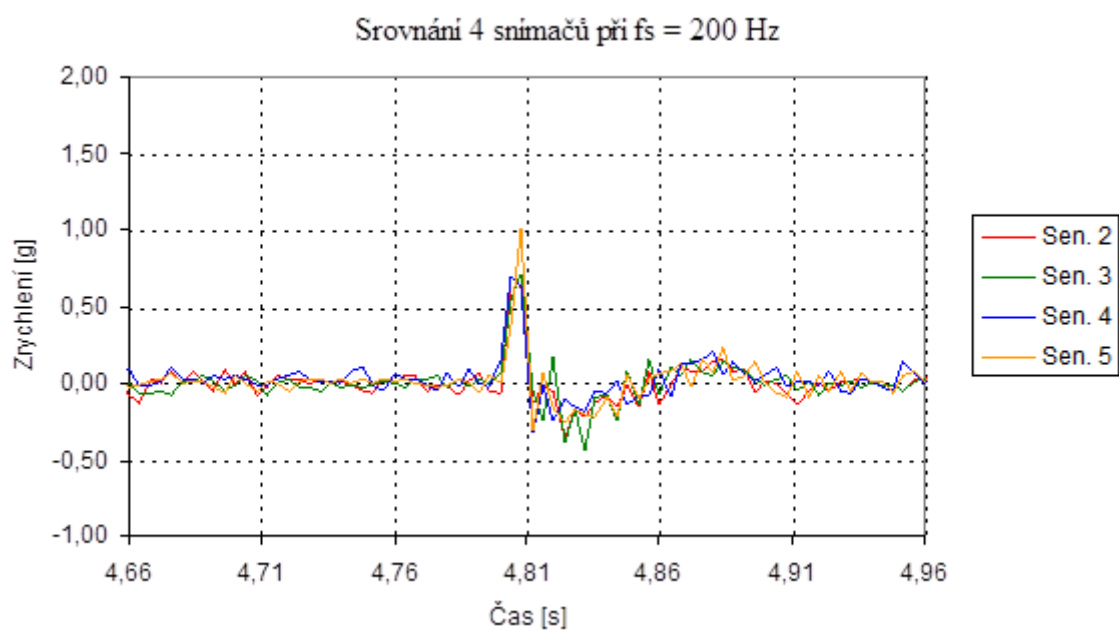
Samotné snímače sbírají data nezávisle na sobě s konstantní vzorkovací frekvencí 250 Hz (je možné i nastavit 125 Hz) a po obdržení zprávy od měřicí ústředny cRIO pošlou postupně všechny snímače právě naměřená data. Tento způsob měření však často způsobuje to, že každý snímač přečte zrychlení v jiný čas a to z toho důvodu, že vzorkovací frekvence jednotlivých snímačů nejsou mezi sebou synchronizovány.



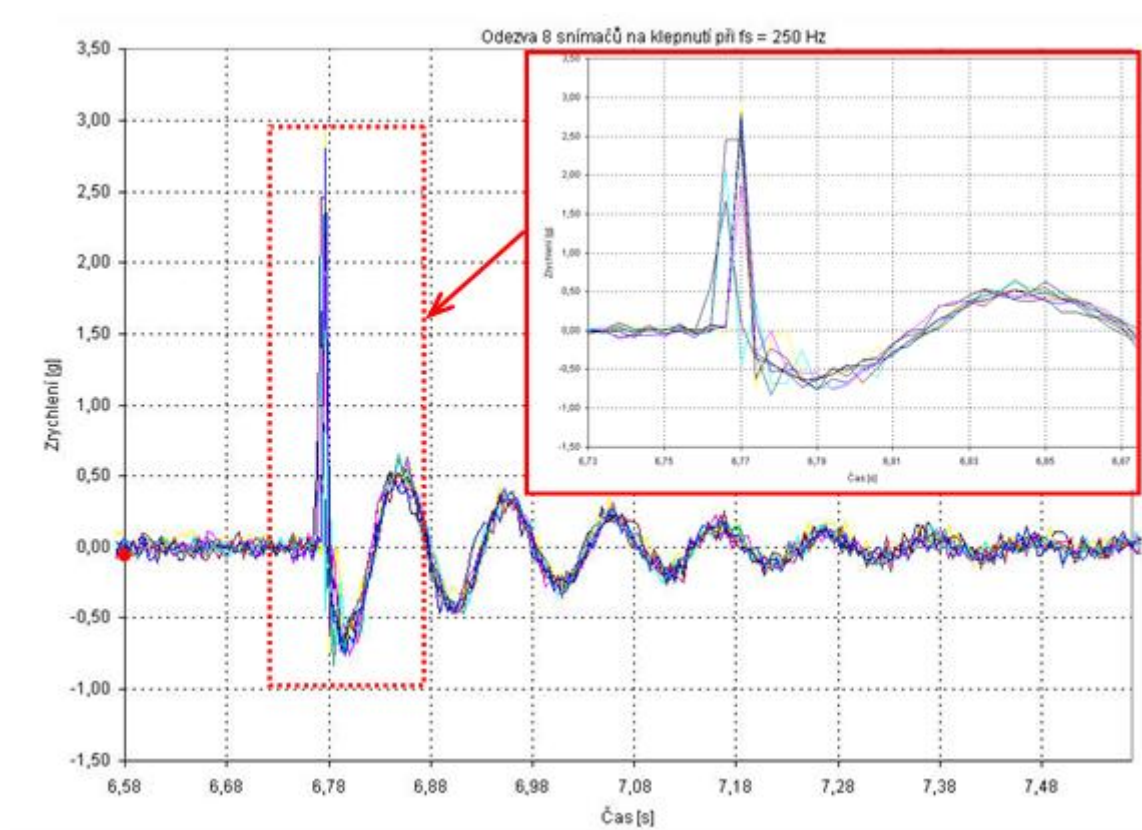
Obr. 42 Měření bez vzájemné synchronizace snímačů

9.3 Naměřené hodnoty

Po synchronizaci snímačů a zapojení měřicí úlohy byly provedeny kontrolní měření ověřující kvalitu synchronizace.

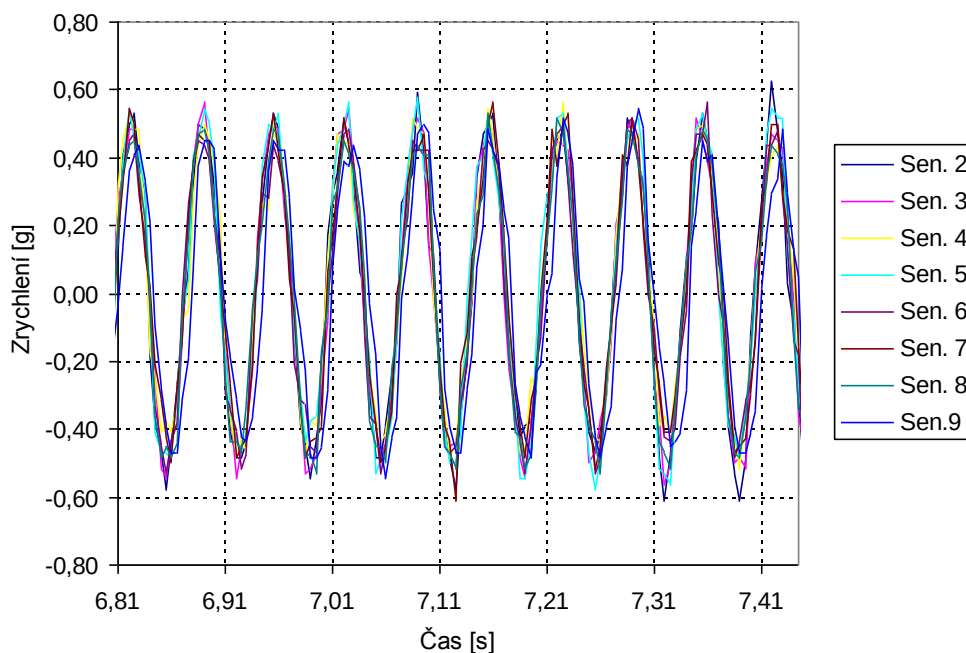


Obr. 43 Reakce 4 snímačů na identický pulzní signál vykazuje výbornou vzájemnou synchronizaci



Obr. 44 Reakce 8 senzorů na identický pulsní signál taktěž vykazuj vynikající parametry synchronizace

Srovnání 8 snímačů při měření $\sin 15 \text{ Hz}$ při $f_s = 200 \text{ Hz}$



Obr. 45 Zrychlení z 8 snímačů umístěných na jedné desce při buzení $\sin$. Signálem 15 Hz

Jak je patrné z předchozích obrázků, tento způsob měření je použitelný pro pomalé jevy, vibrace o nízkých frekvencích. Při výskytu krátkých rázů však dochází k viditelnému vzájemnému posunutí naměřených signálů jednotlivých snímačů na časové ose a tím i ke značnému rozdílu velikostí naměřených amplitud z jednotlivých snímačů. Ve frekvenčním spektru signálů se tyto jevy na měřitelném rozsahu (zhruba do 100 Hz) příliš neprojevují a frekvence i amplitudy vibrací jsou změřeny přesně.

Tyto nežádoucí jevy by bylo možné výrazně omezit restartem snímače při čtení každého vzorku, což by ale příliš snížilo vzorkovací frekvenci (přibližně na 100 Hz). Další možností by bylo restartovat všechny snímače na začátku měření, jejich případný posun by pak byl dán pouze nepřesností jejich vlastní vzorkovací frekvence.

10 MĚŘENÍ ZÁTĚŽOVÉ CHARAKTERISTIKY AUTOMOBILU POMOCÍ 4 MEMS SNÍMAČŮ

Při stavbě automobilů a jejich prototypů je často neznámým parametrem životnost jejich konstrukčních dílů a komponent. Proto je kromě pevnostních testů a výpočtů automobil zkoušen také v situacích napodobujících reálné zatížení během jízdy. Pro takové testy se využívá dynamická zkušebna, umožňující na jednotlivých kolech automobilu vyvozovat zatížení podobné skutečným zatížením během jízdy. Jelikož skutečné zatížení jednotlivých kol v provozu není známo, je toto zatížení měřeno při jízdách testech množinou senzorů. Naměřená data jsou poté upravena do podoby vhodné pro dynamickou zkušebnu a automobil je zatěžován na dynamické zkušebně.

V důsledku toho, že z naměřených dat odstraníme sekvence s nízkou zátěží a ponecháme pouze záznamy obsahující zátěž vysokou, tak jsme schopni na dynamické zkušebně během krátké doby zatížit automobil způsobem, který odpovídá mnoha dnům jeho reálného provozu – proto hovoříme o zrychlených životnostech zkoušek.

10.1 Sestava měřicí ústředny cRIO a senzorické sítě akcelerometrů

Pro měření provozního zatížení na nápravách automobilu je možno použít řadu různých senzorů, z nichž nejčastěji používané jsou senzory zrychlení. Tyto senzory jsou vhodné pro záznam dynamických zatěžovacích sil. Principiálně existují akcelerometry typu:

- Piezoelektrické.
- Piezorezistivní.
- Kapacitní.

Pro měření na kolech vozidla budeme používat senzory zrychlení (akcelerometry) na kapacitním principu. Kapacitní princip je založen na sestavě kondenzátoru se třemi elektrodami, z nichž okrajové elektrody jsou pevné a prostřední elektroda je pohyblivá, připojená na setrvačnou hmotu a pružinu. Při pohybu (zrychlení) ve směru kolmém na elektrody dochází působením setrvačné síly k vychýlení prostřední elektrody. V důsledku toho dojde ke změně kapacity dvou kondenzátorů, jejichž je součástí. Měřením kapacity těchto kondenzátorů můžeme vyhodnotit zrychlení, které na elektrodu působí.

Přepočítání změřené kapacity na zrychlení je ve skutečnosti dost složité, závislé na teplotě a nelineární. Pro měření zrychlení proto používáme již přesné kalibrované akcelerometry, které ukazují přímo úroveň zrychlení včetně kompenzace okolní teploty.

Jedno z možných provedení akcelerometrů je typu MEMS, tedy Mikro Elektro Mechanický Systém. Tyto senzory vynikají miniaturní velikostí, velikou odolností a malou cenou. Pro měření použijeme tři osy MEMS sensor MMA 7455L.

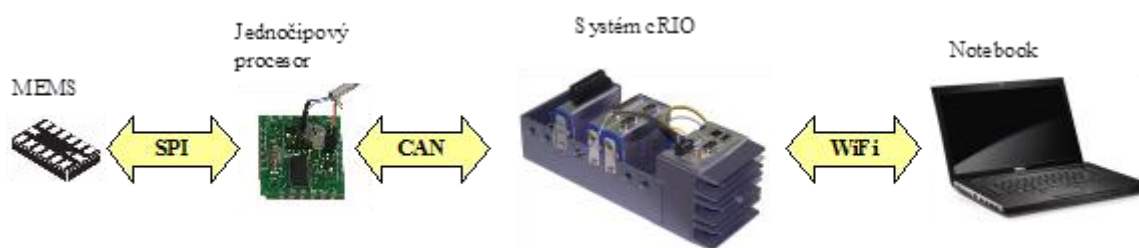
Tento sensor komunikuje s okolím pomocí digitální SPI sběrnice, která je vhodná pouze na krátké vzdálenosti (do 10ti cm) a není možné ji jednoduše zapojovat do sítě (řetěžit senzory). Pro připojení více senzorů na automobilu najednou proto musíme použít sběrnici

jinou, v našem případě využijeme v automobilovém průmyslu ověřenou sběrnici CAN. Sensor samotný není schopen po sběrnici CAN komunikovat, proto je nutné jej doplnit o programovatelný jednočipový procesor, který bude provádět měření na sensoru a komunikovat po sběrnici CAN s nadřazenou jednotkou.



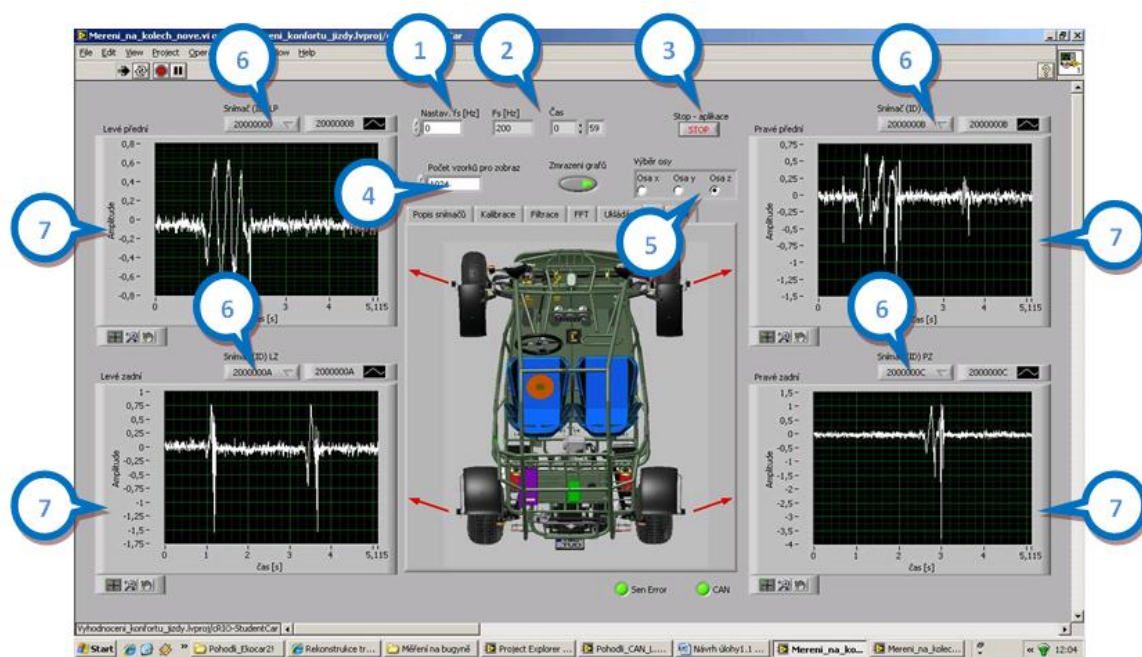
Obr. 46 Sensor s jednočipovým mikroprocesorem, krabičkou a vývodem CAN sběrnice

Jednotlivé sensory je nutné po CAN sběrnici ovládat, a naměřené údaje ukládat pro pozdější zpracování. Tento úkol realizuje robustní a přesná programovatelná real-time ústředna cRIO, doplněná o vysokorychlostní CAN rozhraní a o WiFi access point pro komunikaci s nadřazeným počítačem. Celý měřicí řetězec je na následujícím obrázku.



Obr. 47 Měřicí řetězec

Pro naměření veličin a jejich následné uložení na PC bude využito aplikace na cRIO, jejíž čelní obrazovka je spuštěna na notebooku.



Obr. 48 Čelní panel aplikace pro měření dat na testovacím vozidle

Tab. 1 Popis jednotlivých ovládacích prvků aplikace pro měření dat

Číslo ovl.prvku	Popis ovládacího prvku
1	Tlačítko START pro začátek měření a ukládání dat
2	Box s maximální délkou měření po které se ukládání dat zastaví.
3	Tlačítko STOP pro předčasné ukončení měření – naměřená data budou uložena
4	Popisek souboru (se jménem studenta)
5	Přepínač zobrazované osy v grafech, Osa X, Y nebo Z
6	Volba čísla senzoru instalovaného na konkrétním kole
7	Zobrazování aktuálně měřeného zrychlení zvoleným senzorem na zvolené ose

10.2 Zpracování naměřených dat

Při měření na experimentálním vozidle se používají akcelerometry, které měří zrychlení působící na kola vozidla. Při zrychlené životnostní zkoušce se ale řídí hydraulické válce polohou (vysunutím). Je proto nutné převést zrychlení na polohu. K tomu poslouží dvojí integrace naměřených dat, podle vztahů:

$$a = \frac{dv}{dt} [m \cdot s^{-2}], v = \frac{ds}{dt} [m \cdot s^{-1}]$$

Pokud vztahy obrátíme, získáme požadovanou polohu. Tedy:

$$v = \int_0^t a \cdot dt + v_0, \quad s = \int_0^t v \cdot dt + s_0$$

Pro zjednodušení uvažujeme počáteční hodnoty rychlosti a dráhy nulové,

$$s = \iint_0^t a \cdot dt$$

Dvojnou integrací zrychlení tedy získáme polohu. S tímto postupem se váží dva problémy, které je nutné řešit:

1. Skutečná změna polohy automobilu v testu je ve stovkách metrů nebo v kilometrech, zatímco válce na zkušebně mají zdvih v centimetrech – polohu tedy nelze přímo přenést na válce.

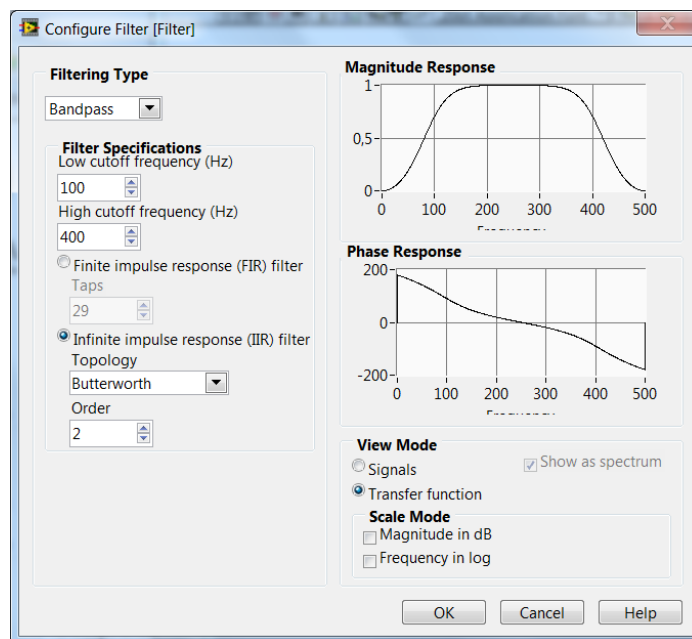
2. Každé reálné měření je zatíženo parazitními údaji a šumem, v našem případě lze za parazitní údaje například považovat vibrace motoru. Šum je vlastností každého digitálního převodníku a typicky se pohybuje v oblasti nejnižších 2 bitů převodníku. Dvojitá integrace šumu a parazitních vibrací nám může náhodně generovat změny polohy, které ve skutečnosti nenastaly.

Pro řešení uvedených problémů je proto zapotřebí data upravit do podoby vhodné pro dynamickou zkušebnu. Oba uvedené problémy se řeší digitální filtrací naměřených dat.

Digitální filtry používáme především pro odstranění nežádoucích frekvencí z naměřených dat. V případě měření vibrací na kolech chceme odstranit:

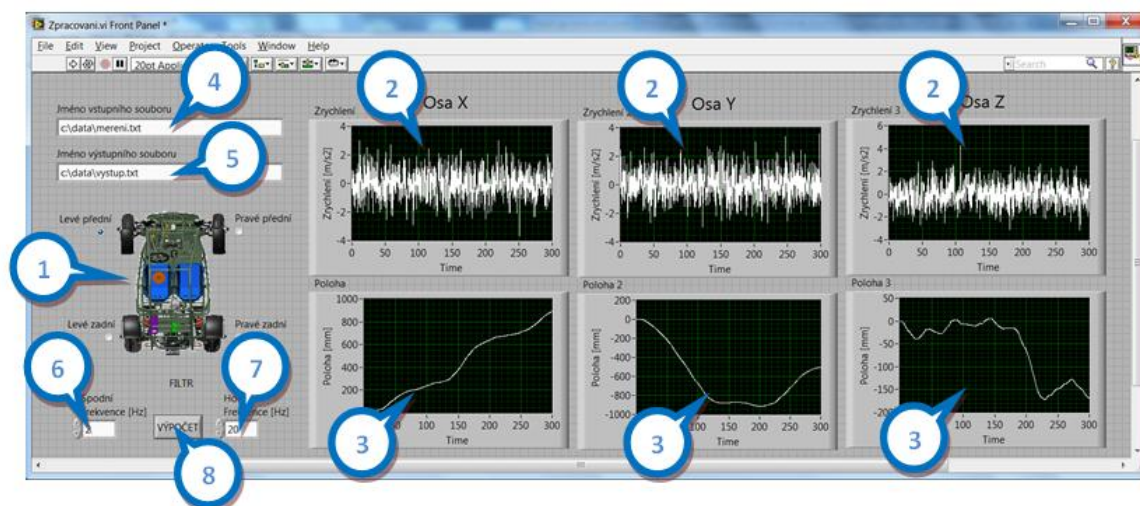
- nulové a velmi malé frekvence – tím odstraníme ze signálu velmi pomalé změny – tedy samotnou jízdu a rozsáhlé změny polohy.
- Vysoké frekvence obsahující šum a parazitní jevy.

Pro odstranění jak nízkých tak i vysokých frekvencí ze signálu použijeme filtry typu dolní propust a horní propust, jejichž kombinací vznikne tzv. pásmová propust. Na obrázku pásmové propusti je v pravé horní části znázorněna tzv. přenosová funkce tohoto filtru (Magnitude response). Graf ukazuje, jak jsou zesíleny nebo zeslabeny jednotlivé frekvence. Filtr je na obrázku nastaven na propuštění frekvencí mezi 100-400 Hz. Jak je na obrázku vidět, ostatní frekvence jsou tlumeny postupně k nule. V našem případě budeme tlumit frekvence pod přibližně 1Hz a nad přibližně 20Hz.



Obr. 49 Digitální filtr typu pásmová propust mezi 100-400 Hz

Pro filtraci a integraci naměřených dat byla vytvořena uživatelská aplikace.



Obr. 50 Aplikace pro zpracování dat

Tab. 2 Popis jednotlivých ovládacích prvků aplikace pro zpracování dat

Číslo ovl.prvku	Popis ovládacího prvku
1	Přepínač zobrazení naměřených dat na jednotlivých kolech
2	Grafy naměřených zrychlení v osách X,Y,Z.
3	Graf polohy po filtraci a integraci.
4	Jméno vstupního souboru s naměřenými daty.

5	Jméno výstupního souboru s vypočtenými daty.
6	Nastavení spodní frekvence pro filtraci dat.
7	Nastavení horní frekvence pro filtraci dat.
8	Tlačítko pro spuštění výpočtu a uložení dat.

11 ZÁVĚR

Výstupem této práce je popis týmové spolupráce při realizaci rozsáhlého měřicího a diagnostického systému využívajícího MEMS komponenty. V průběhu projektu byla navržena a vytvořena senzorická síť digitálních MEMS akcelerometrů komunikujících po sběrnici CAN. Jednotlivé senzory i celá senzorická síť byla testována a kalibrována, testována byla také jejich vzájemná synchronizace. Finální produkt byl zapojen do výuky ve formě měření vibrací na testovacím automobilu.

V dokumentu je popsána cesta přenosu dat z MEMs systému až po konfigurační a monitorovací systém vytvořený v LabView, který umožňuje také následné vyhodnocení naměřených signálů (dat).

Při řešení projektu byl vytvořen tým odborníků a studentů, podílejících se na dílčích cílech projektu ve formě menších týmů (cca 2 osoby).

Jsou zde také kapitoly věnovány návrhu podpůrných elektronických obvodů a jejich programování, umožňující tento přenos. Při řešení zadaného problému jsou využity disciplíny, jako je mechanik, elektronik, programátor atd.

12 LITERATURA

Freescale, $\pm 2g/\pm 4g/\pm 8g$ Three Axis Low-g Digital Output Accelerometer. [online]., aktualizace 4.4. 2009 Dostupný z WWW: <URL: [http:// www.freescale.com /files /sensors /doc /data_sheet/MMA7456L.pdf](http://www.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MMA7456L.pdf)>

VLACH, J. Počítačová rozhraní, přenos dat a řídicí systémy. Praha, BEN-technická literatura, 1997, ISBN 80-85940-17-4

HRBÁČEK, J. 1996. Mikrořadiče PIC16CXX a vývojový kit PICSTART. Praha BEN – technická literatura, 1996, 142 s. ISBN 80-901984-0-6

HRBÁČEK, J. 1997. Programování mikrokontroléru PIC16CXX. Praha, BEN – technická literatura, 1997, 111 s. ISBN 80-86056-16-3

HRBÁČEK, J. 1999. Komunikace mikrokontroléru s okolím – 1. díl. Praha, BEN – technická literatura, 1999, 159 s. ISBN 80-86056-36-8

HRBÁČEK, J. 2002. Komunikace mikrokontroléru s okolím – 2. díl. Praha, BEN – technická literatura, 2002, 151 s. ISBN 80-86056-73-2

I2C a SPI 2012 Wikipedia. Dostupný z WWW: <http://www.usb2can.wz.cz/>

Marek, H. 2010. Využití bezdrátové technologie pro konfiguraci a monitorování reálných úloh. Diplomová práce VŠB-TU, kat.352, 2010 vedoucí Jaromír Škuta.

VACEK, V. 2001. Učebnice programování PIC. Praha, BEN – technická literatura, 2001, 144 s. ISBN 80-86056-87-2

USB2CAN 2012. Dostupný z WWW: <http://www.usb2can.wz.cz/>

Crouzet. Motor Crouzet 82862006 [online]. 2004 [cit. 2010-01-20]. Dostupný z WWW: <<http://cz.farnell.com/crouzet/82862006/motor-geared-24vdc-45rpm/dp/3079570>>.

Freescale. Akcelerometr MMA7260Q [online]. 2005 [cit. 2009-12-21]. Dostupný z WWW: <http://www.freescale.com/files/abstract/article/LEADERSHIP_MMA7260Q.html?tid=FS200505TSP6428SENLP>.

Maxim. DS18B20 [online]. 2008 [cit. 2009-12-23]. Dostupný z WWW: <http://www.maxim-ic.com/quick_view2.cfm?qv_pk=2812>.

StraightCore. WRT 312 [online]. 2007 [cit. 2009-12-20]. Dostupný z WWW: <http://www.straightcoreshop.com/_mgxroot/page_10810.html>.