



PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA
UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI

KATEDRA
EXPERIMENTÁLNÍ FYZIKY

Diplomová práce

Optimalizace řízení sestavy
lineárního motoru s PID
regulátorem pohybu
u Mössbauera spektrometru

Autor	Pavel Kohout
Vedoucí práce	RNDr. Jiří Pechoušek, Ph.D.
Studijní obor	Aplikovaná fyzika
Forma studia	Prezenční
Rok	2014

Jméno a příjmení autora	Pavel Kohout
Název práce	Optimalizace řízení sestavy lineárního motoru s PID regulátorem pohybu u Mössbauerova spektrometru
Typ práce	diplomová
Pracoviště	Katedra experimentální fyziky
Vedoucí práce	RNDr. Jiří Pechoušek, Ph.D.
Rok obhajoby práce	2014
Počet stran	60
Počet příloh	2
Jazyk	český
Abstrakt	Cílem této práce je optimalizace řízení sestavy lineárního motoru s PID regulátorem pohybu u Mössbauerova spektrometru. PID vazba je vyvíjena na zařízení sbRIO od firmy National Instruments. Část práce se zabývá vývojem aplikace běžící na zařízení sbRIO, která provádí PID regulaci. Dále jsou hledány optimální parametry PID vazby. Nakonec je PID vazba zařazena do sestavy Mössbauerova spektrometru a otestovány její vlastnosti.
Klíčová slova	Mössbauerův spektrometr, Mössbauerova spektroskopie, PID regulace, virtuální instrumentace

BIBLIOGRAPHICAL IDENTIFICATION

Author's first name and surname	Pavel Kohout
Title	Optimization of linear motor and PID controller setup used in Mössbauer spectrometer master
Type of thesis	Department of Experimental Physics
Department	RNDr. Jiří Pechoušek, Ph.D.
Supervisor	2014
Year of presentation	60
Number of pages	2
Number of appendices	czech
Language	The aim of this thesis is an optimization of a linear motor and PID controller setup used in the Mössbauer spectrometer. PID feedback unit is developed on the sbRIO device provided by the National Instruments. Part of the thesis deals with the development of an application running on the sbRIO device performing PID control. In the next stage, the PID feedback is integrated into the Mössbauer spectrometer and then tested.
Abstract	
Keywords	Mössbauer spectrometer, Mössbauer spectroscopy, PID regulation, virtual instrumentation

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením RNDr. Jiřího Pechouška, Ph.D. a že jsem použil zdrojů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

V Olomouci dne

.....
podpis

Děkuji svému vedoucímu diplomové práce RNDr. Jiřímu Pechouškovi, Ph.D. za vedení, ochotnou pomoc, cenné rady a čas, který mi věnoval při vzniku této práce.

Obsah

Úvod	8
1. Teoretická část	9
1.1. Mössbauerova spektroskopie	9
1.1.1. Mössbauerův jev	9
1.1.2. Experimentální pozorování Mössbauerova jevu	9
1.1.3. Konfigurace Mössbauerova spektrometru	11
1.1.4. Pohybové zařízení	12
1.1.5. Pohyb zářiče a akumulace Mössbauerova spektra	14
1.1.6. Systém řízení rychlosti	16
1.2. Řízení	17
1.2.1. PID regulátor	18
1.2.2. Číslicový PID regulátor	19
1.3. Analogová řešení PID vazby pro Mössbauerovy spektrometry	20
1.4. Další možná vylepšení systému zpětné vazby	22
1.4.1. Generování dodatečného signálu eliminujícího časově stálou chybu	22
1.4.2. Opravy nelinearity dodatečnou korekcí	22
2. Použité přístroje a software	23
2.1. Virtuální instrumentace	23
2.1.1. Virtuální měřicí přístroj	23
2.1.2. LabVIEW	23
2.2. Systémy NI sbRIO a NI CompactRIO	24
2.2.1. NI sbRIO	24
2.2.2. CompactRIO	25
2.3. Pohybové zařízení s integrovanými zesilovači	25
2.4. Experimentální sestava Mössbauerova spektrometru sestávající z autonomních přístrojů	26
3. Experimentální část	29
3.1. Sledované parametry kvality PID vazby	29
3.2. Realizace PID vazby na zařízení sbRIO	30
3.2.1. Aplikace běžící na FPGA poli systému sbRIO	31
3.2.2. Aplikace běžící na real-time procesoru systému sbRIO	32
3.2.3. Analýza.vi	34
3.2.4. Vzdálená aplikace běžící na počítači	35
3.2.5. Vzdálená aplikace běžící na mobilním telefonu	37
3.3. Hledání optimálních parametrů PID vazby	37
3.3.1. Aplikace na získání průměrovaného signálu chyby	38
3.3.2. Hledání optimálních parametrů PID vazby pomocí zkoumání průměrovaného signálu chyby	38
3.3.3. Měření kvality PID vazby s ohledem na kvalitu Mössbauerových spekter	44
4. Výsledky a diskuze	51
4.1. Měření reálného vzorku	53

Závěr	55
Seznam použitých zdrojů	56
Seznam použitých symbolů a zkratk	58
Příloha 1. Blokový diagram aplikace RT.vi	59
Příloha 2. Obsah přiloženého CD	60

Úvod

V Roce 1958 objevil německý fyzik Rudolf Ludwig Mössbauer v oblasti jaderné fyziky jev, který byl posléze nazván po něm a za který v roce 1961 obdržel Nobelovu cenu za fyziku. Spektroskopie založená na tomto jevu se následně stala metodou rozšířenou do mnoha vědních disciplín.

Obecnou podstatou Mössbauerovy spektroskopie je modulace emitovaného záření pohybem zářiče. Realizace přesně definovaného pohybu zářiče je u Mössbauerova spektrometru velmi důležitá, protože právě na přesnosti realizace pohybu závisí přesnost celého Mössbauerova spektrometru. Přesnost realizace pohybu je zaručena pomocí PID regulace, které se tato práce věnuje.

Na přelomu 20. a 21. století se začíná využívat technika virtuální instrumentace, která umožňuje nahradit dříve složité analogové obvody počítačovými technologiemi [1]. Díky této technice je dnes možné jednoduše tvořit komplexní automatické řídicí systémy, které umožňují implementovat procesy umožňující samodiagnostiku a samonastavování, a které nepotřebují bezprostřední přítomnost lidského operátora, protože jejich řízení může být realizováno přes internet.

1. Teoretická část

1.1. Mössbauerova spektroskopie

Mössbauerova spektroskopie je spektroskopická metoda, která využívá Mössbauerova jevu. Mössbauerův jev je proces bezdrazové rezonanční absorpce a emise záření γ jádru atomů určitých prvků. Velkou předností Mössbauerovy spektroskopie je absolutní selektivita k jádrům určitého typu, vysoká citlivost k malým změnám elektrických a magnetických polí na jádrech a rekordní energetické rozlišení, což dovoluje v celé řadě experimentů obdržet unikátní informace nedostupné jinými metodami. Díky tomu se Mössbauerova spektroskopie stala důležitou experimentální metodou nejenom fyziky pevných látek a chemie, ale i geologie, biologie, medicínského výzkumu a průmyslové kontroly [2].

1.1.1. Mössbauerův jev

Bezdražová absorpce a emise znamená, že při vyzařování a absorpci fotonů záření γ nedochází ke zpětnému rázu atomu. Pokud volný atom emituje či absorbuje foton, tak ze zákona zachování hybnosti vyplývá, že jádro o hmotnosti m získá hybnost

$$mv = \frac{E_\gamma}{c}, \quad (1)$$

kde m je hmotnost jádra, v jeho rychlost, E_γ energie fotonu γ a c rychlost světla ve vakuu. Při emisi zároveň jádro získá tzv. energii zpětného rázu E_r , která je rovna

$$E_r = \frac{mv^2}{2} = \frac{E_\gamma^2}{2mc^2}. \quad (2)$$

Jestliže je daný atom vázán v krystalové mřížce, zpětný ráz absorbuje celá krystalová mřížka, a proto se bude velikost zpětného rázu blížit k nule. Ke stejnému efektu dojde i při absorpci záření γ . Potom dojde k překrytí absorpční a emisní čáry jaderného přechodu. Princip Mössbauerova jevu je podrobněji vysvětlen např. v [2].

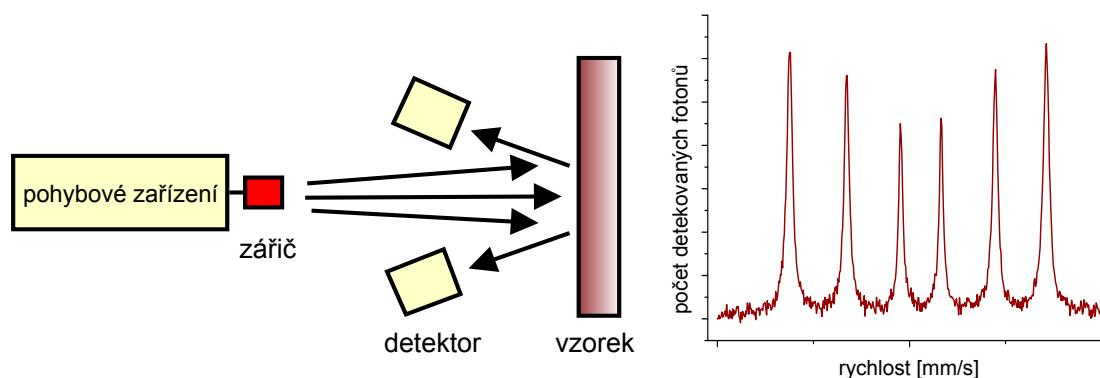
1.1.2. Experimentální pozorování Mössbauerova jevu

K experimentálnímu pozorování Mössbauerova jevu se v praxi využívá modulační energie záření γ pomocí Dopplerova jevu. Pokud je vzájemná rychlost zářiče a vzorku nenulová, dochází k prodlužování, respektive zkracování, vlnové délky záření a tím i snižování respektive zvyšování jeho energie. Tato změna energie je rovna

$$\Delta E = E_p \frac{v}{c} \cos \alpha, \quad (3)$$

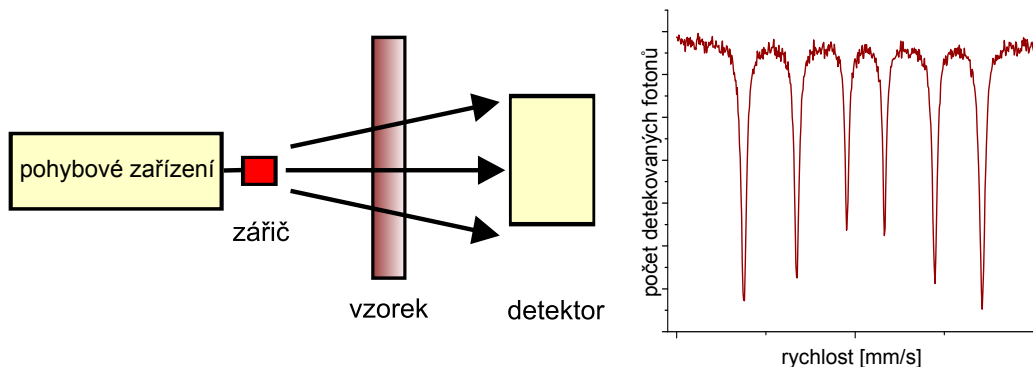
kde E_p je energie přechodu jádra z excitovaného do základního stavu, v je rychlost pohybu, c rychlost světla ve vakuu a α je úhel mezi směrem pohybu zářiče a směrem vyzáření fotonu. V praxi se ale obvykle rychlost pohybu na energii nepřepočítává a Mössbauerovo spektrum pak vyjadřuje závislost okamžité rychlosti zářiče (udávané v jednotkách mm/s) na intenzitě prošlého, respektive zpětně odraženého, záření.

Existují dvě možné varianty uspořádání Mössbauerových spektrometrů. První je Mössbauerova spektroskopie zpětného rozptylu (tzv. BMS – z anglického Back-scattering Mössbauer Spectroscopy), kam patří Mössbauerova spektroskopie konverzních elektronů (tzv. CEMS – Conversion Electron Mössbauer Spectroscopy) a Mössbauerova spektroskopie konverzního rentgenového záření (tzv. CXMS – Conversion X-ray Mössbauer Spectroscopy). Schéma uspořádání Mössbauerova spektrometru v geometrii zpětného rozptylu a typické spektrum je zobrazeno na obrázku 1.



Obrázek 1 | Uspořádání Mössbauerova spektrometru v geometrii zpětného rozptylu (vlevo) a typické BMS spektrum (vpravo).

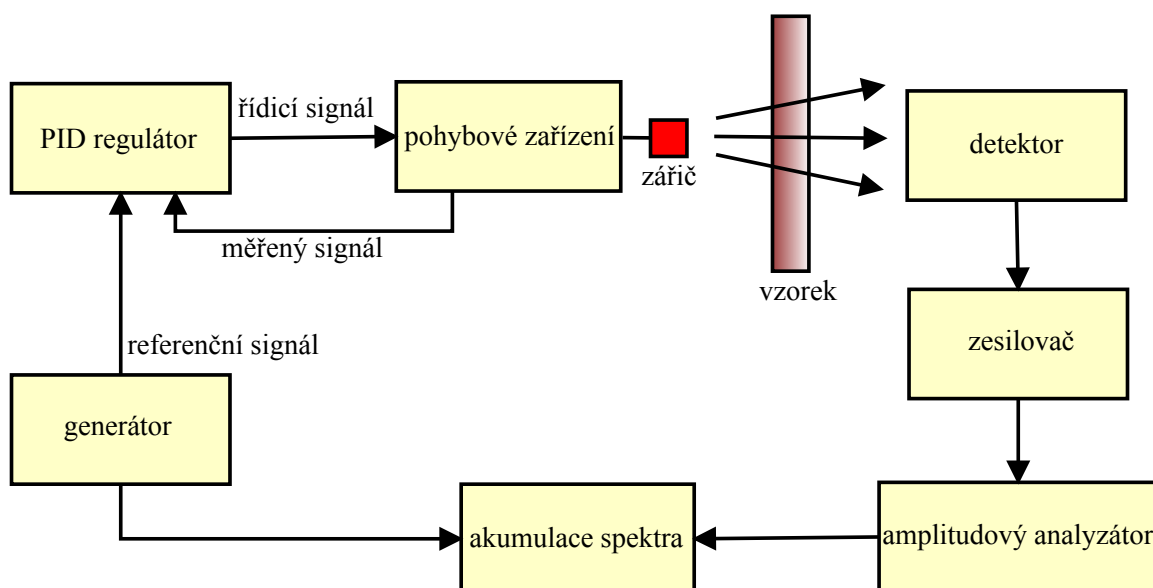
Druhá geometrie je transmisní (tzv. TMS – Transmission Mössbauer Spectroscopy), kde záření γ prochází vzorkem. Schéma uspořádání Mössbauerova spektrometru v transmisní geometrii a typické transmisní spektrum je zobrazeno na obrázku 2.



Obrázek 2 | Uspořádání Mössbauerova spektrometru v transmisní geometrii (vlevo) a typické TMS spektrum (vpravo).

1.1.3. Konfigurace Mössbauerova spektrometru

Typická konfigurace Mössbauerova spektrometru v transmisní geometrii je zobrazena na obrázku 3.

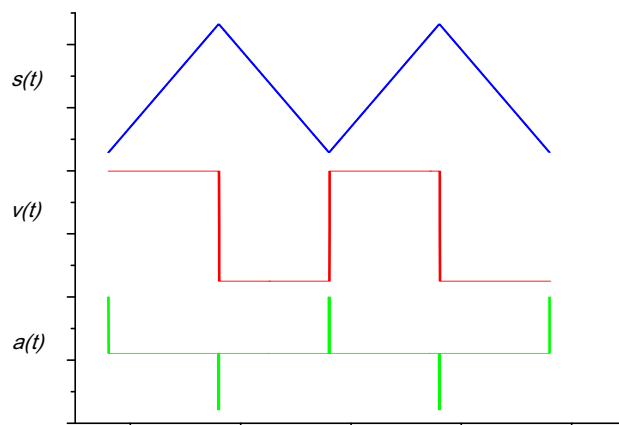


Obrázek 3 | Schéma Mössbauerova spektrometru v transmisní geometrii.

Generátor generuje referenční signál rychlosti pohybu zářiče, ten jde do PID regulátoru (proporcionálně integračně derivačního regulátoru – viz kapitola 1.2.1), který řídí pohybové zařízení. Pohybové zařízení moduluje pohybem zářiče energii vyzařovaného záření. Záření pak prochází přes vzorek a dopadá na detektor. Signál z detektoru je následně zesílen zesilovačem. Amplitudový analyzátor slouží k výběru jen těch impulzů v signálu z detektoru, které odpovídají požadované energii záření γ emitovaného ze zářiče. V závislosti na okamžité rychlosti pohybu zářiče jsou v paměti akumulátoru spektra otvírány jednotlivé kanály, do kterých je akumulováno spektrum.

Z hlediska použitého průběhu signálu rychlosti existují dva základní typy

Mössbauerových spektrometrů – spektrometry s konstantní a proměnnou rychlostí. Ve spektrometrech s konstantní rychlostí se provádí posloupnost měření, pro která se pohybovým zařízením zadává definovaná relativní rychlost pohybu zářiče vůči vzorku. Při použití tohoto způsobu se každý experimentální bod spektra měří samostatně. K tomuto cíli se používá obdélníkový průběh rychlosti pohybu zářiče [2]. Na obrázku 4 je zobrazen průběh posunu, rychlosti a zrychlení ve spektrometru s konstantní rychlostí.



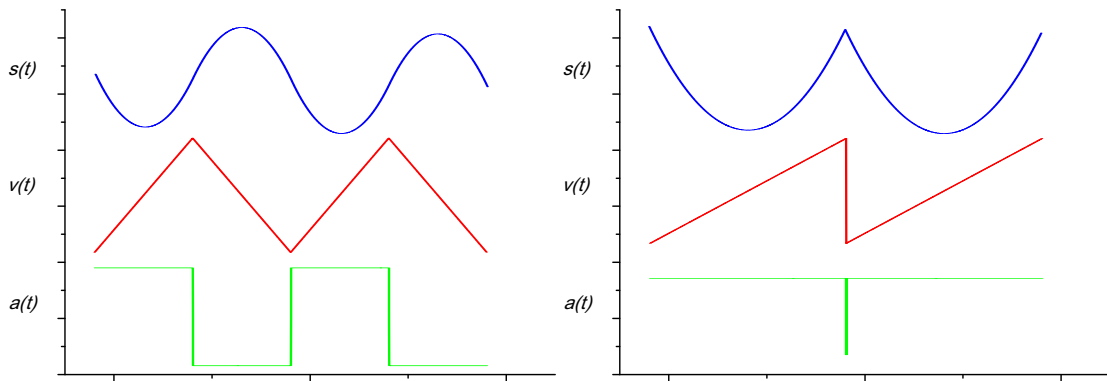
Obrázek 4 | Průběh posunu $s(t)$, rychlosti $v(t)$ a zrychlení $a(t)$ u spektrometru s konstantní rychlostí.

V dnešní době se více používá druhý typ – spektrometry s proměnnou rychlostí, neboli s konstantním zrychlením. Ve spektrometrech s proměnnou rychlostí se relativní rychlost pohybu zářiče vůči vzorku během každé periody měření mění spojitě od maximální záporné do maximální kladné hodnoty a zpět lineárně (viz obrázek 5) nebo (méně často) v souladu s jiným průběhem. Impulzy z detektoru registrované při odpovídajících různých okamžitých hodnotách rychlosti pohybu se rozdělují do různých kanálů mnohokanálového analyzátoru. Takovým způsobem se realizuje jednoznačný vztah mezi číslem kanálu a rychlostí [2]. Na obrázku 5 je zobrazen průběh posunu, rychlosti a zrychlení ve dvou nejčastěji používaných druzích pohybu – s trojúhelníkovým průběhem rychlosti a s pilovým průběhem rychlosti.

1.1.4. Pohybové zařízení

Pohybové zařízení je nejdůležitější částí Mössbauerova spektrometru, protože realizace přesně kontrolovaného průběhu rychlosti pohybu zářiče nebo vzorku určuje kvalitu celého spektrometru¹. Požadovaný interval rychlostí je dán šířkou měřeného spektra a může dosahovat až hodnot 100 cm/s. Použitý princip kon-

¹Výjimkou jsou spektrometry, které používají časově-modulační režim registrace spektra. Kvalita těchto spektrometrů je především určována parametry sledujícího analogově-digitálního převodníku [2].



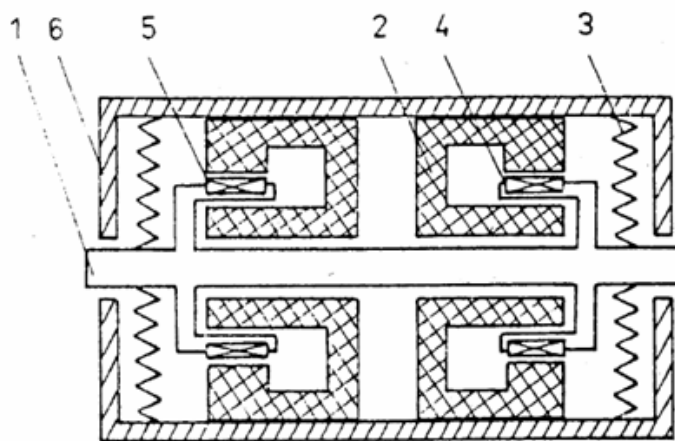
Obrázek 5 | Průběh posunu $s(t)$, rychlosti $v(t)$ a zrychlení $a(t)$ ve spektrometrech s konstantním zrychlením – s trojúhelníkovým průběhem rychlosti (vlevo) a s pilovým průběhem rychlosti (vpravo).

strukce pohybového zařízení je v první řadě určován požadovaným rozsahem rychlosti, závisí však také na celé řadě jiných požadavků (např. hmotnost pohyblivého se předmětu, umístění kryostatu,...)[2].

Pro konstrukci pohybového zařízení (tzv. transduceru) se využívají různé principy – mechanický, hydraulický, elektrodynamický, piezoelektrický. V případech, kdy jsou požadované rychlosti pohybu malé, je možné použít mechanická a hydraulická pohybová zařízení. Jejich aplikace je výhodná především v těch případech, kdy je potřebné pohybovat zařízením o velké hmotnosti (např. kryostaty, pece). Nevýhodou mechanických pohybových zařízení je existence parazitních vibrací, které rostou s růstem rychlosti, tudíž omezují shora interval dosažitelných rychlostí. Velmi malé rychlosti (do 0,1 mm/s) se dosahují pomocí piezoelektrických krystalů [2].

Největšího rozšíření dosáhla tzv. elektrodynamická pohybová zařízení, která dovolují pracovat v širokém intervalu rychlostí od asi 1 mm/s do 100 cm/s. Jejich konstrukce je následující: ve válcové mezeře magnetu je umístěna válcová cívka. Cívka je pružně upevněna tak, aby mohla konat kmitavý pohyb podél své osy. Do cívky je přiveden proud potřebného průběhu, který budí nucené kmity systému. V praxi se používají elektrodynamická pohybová zařízení, která jsou tvořena dvojicí pevně spojených cívek. Jedna cívka v tomto případě slouží jako řídicí a druhá jako měřicí. Při pohybu snímací cívky v magnetickém poli se v ní indukuje proud, jehož okamžitá hodnota je úměrná okamžité rychlosti jejího pohybu. Tento signál se využívá ke kontrole průběhu rychlosti, k řízení registračního zařízení spektrometru a především ke stabilizaci pohybu pohybového zařízení prostřednictvím záporné zpětné vazby [2]. Schéma elektrodynamického zařízení se dvěma cívkami je zobrazeno na obrázku 6.

Elektrodynamická pohybová zařízení pracují na zvukových frekvencích, což dovoluje dosáhnout při maximální rychlosti amplitudu kmitů 1–2 mm. Toto je výhodné, neboť to umožňuje umístit zářič do malé vzdálenosti od vzorku [2].



Obrázek 6 | Elektrodynamické pohybové zařízení (1 – pohyblivá část, 2 – magnetická soustava, 3 – pružina, 4 – řídicí cívka, 5 – měřicí cívka, 6 – pouzdro) [2].

1.1.5. Pohyb zářiče a akumulace Mössbauerova spektra

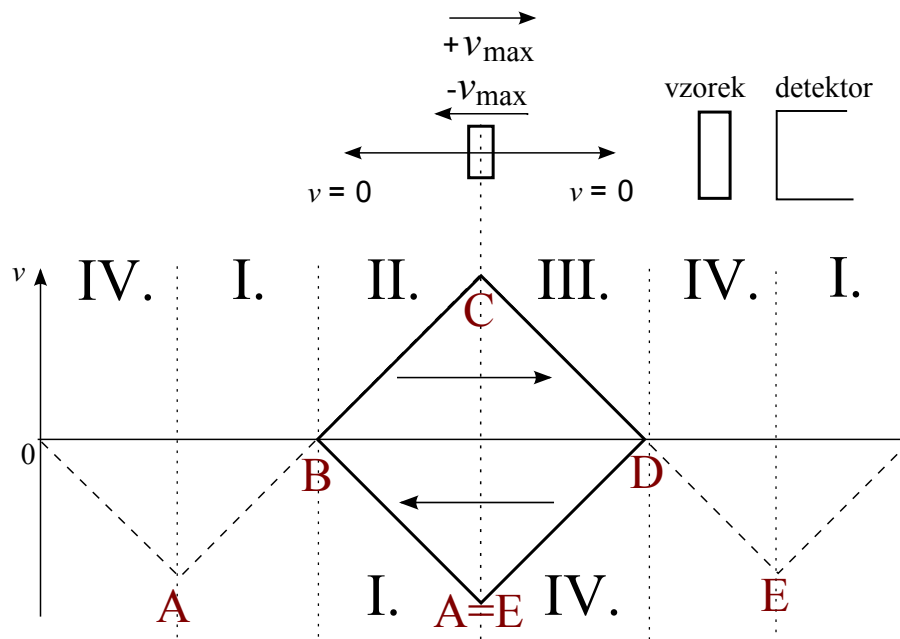
Pohybující se část pohybového zařízení vykonává společně se zářičem kmitavý pohyb. U nejčastěji používaných spektrometrů s konstantním průběhem zrychlení používajících trojúhelníkový signál rychlosti je pohyb následující.

Zářič se pohybuje mezi dvěma krajními body, v nichž má nulovou rychlost. Pokud se zářič nachází v poloze uprostřed, je jeho rychlost maximální. Poloha uprostřed, kdy zářič má maximální rychlost a dochází k obratu sklonu signálu rychlosti, se nazývá body obratu signálu rychlosti.

Na obrázku 7 je zobrazen pohyb pohybového zařízení a průběh okamžité rychlosti v jednotlivých fázích pohybu. Římskými číslicemi jsou na obrázku označeny čtyři fáze pohybu zářiče, písmeny význačné body v pohybu zářiče. Na začátku první fáze (v bodě A) se zářič nachází ve středové poloze a pohybuje se do polohy krajní (směrem k bodu B). Má vzhledem k detektoru zápornou rychlost $-v_{\max}$ (oddaluje se od detektoru) a postupně zpomaluje. Následně se dostane do krajní polohy (B), kde dochází k obratu směru pohybu. Druhá fáze začíná obratem směru pohybu a následně zářič zrychluje z nulové rychlosti na $+v_{\max}$, které dosáhne v bodě C. Třetí a čtvrtá fáze probíhají analogicky jako první a druhá. Zářič postupně zpomaluje a z bodu C se dostane do bodu D, kde dojde k obratu směru pohybu. Následně dále zrychluje, až největší záporné rychlosti dosáhne v bodě E.

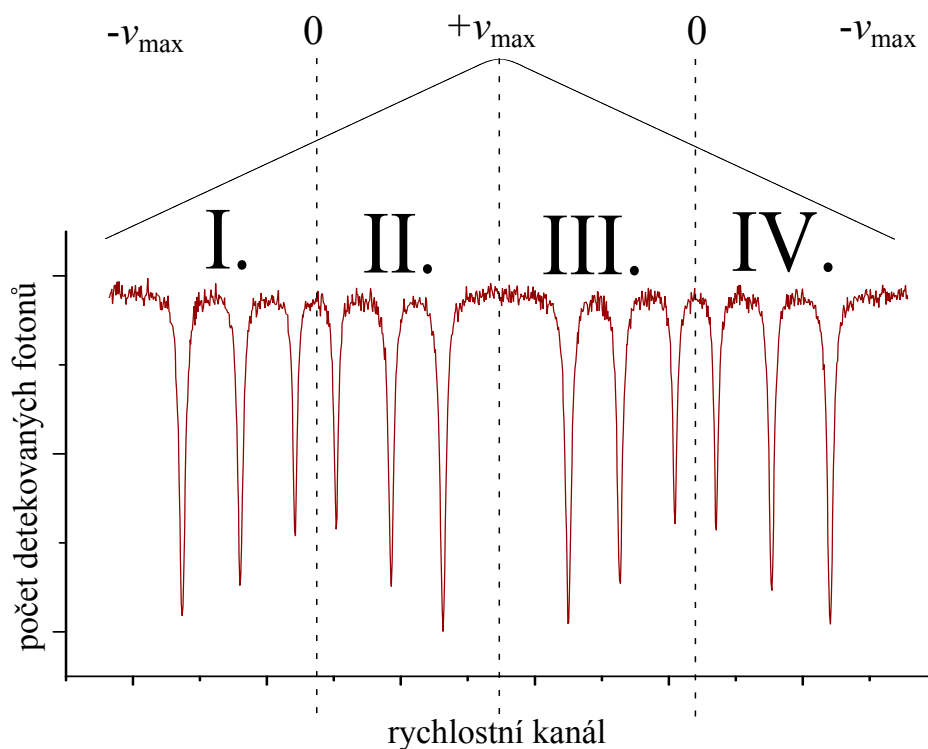
Ve střední poloze, když má zářič nejvyšší rychlost, je nejtěžší uregulovat jeho pohyb a v signálu chyby vzniká největší regulační odchylka. V této oblasti však nedochází k akumulaci Mössbauerova spektra.

V průběhu pohybu zářiče je shromažďováno spektrum. Každá perioda pohybu je rozdělena zpravidla na 1024 kanálů, do nichž jsou shromažďovány impulzy, viz obrázek 8. Nakonec je spektrum složeno. Skládání spektra probíhá tak, že část,

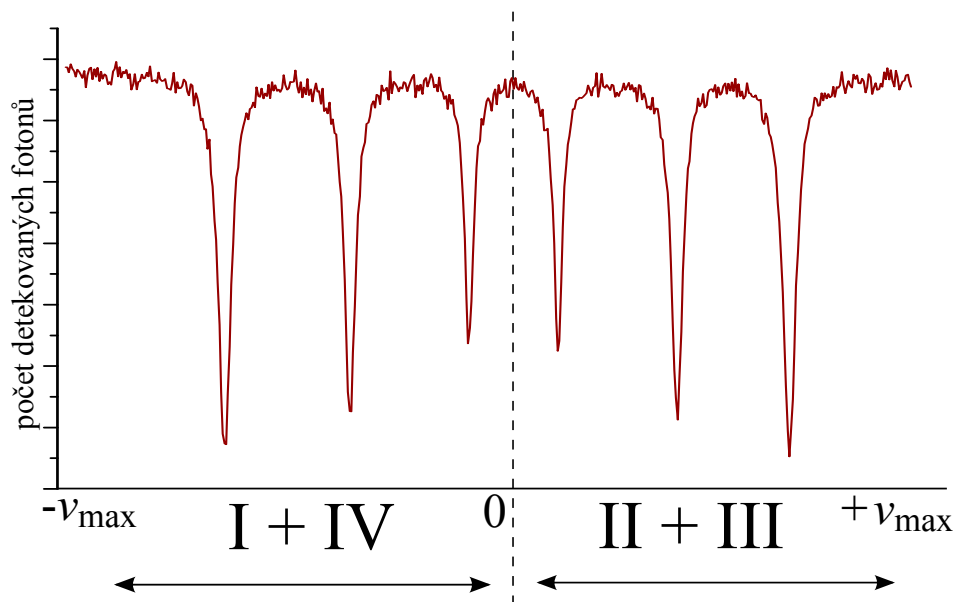


Obrázek 7 | Pohyb pohybového zařízení a průběh rychlosti v jednotlivých fázích pohybu.

kde rychlost klesá, je zrcadlově otočena a přičtena k druhé části spektra. Výsledné spektrum má potom 512 kanálů. První polovinu spektra tvoří první a čtvrtá fáze pohybu a druhou polovinu druhá a třetí fáze, viz obrázek 9.



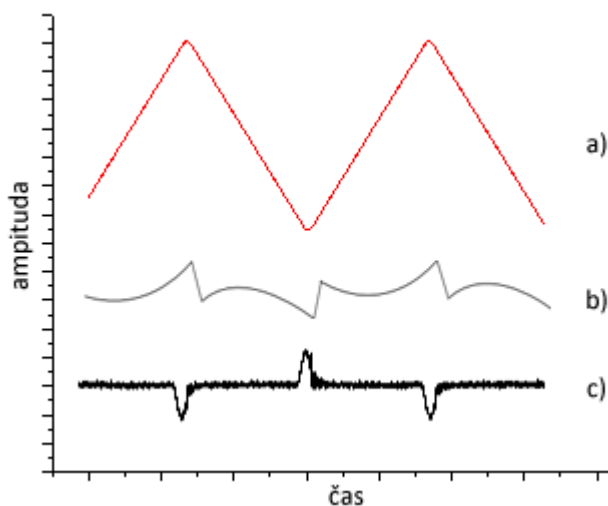
Obrázek 8 | Akumulace Mössbauerova spektra.



Obrázek 9 | Složené Mössbauerovo spektrum.

1.1.6. Systém řízení rychlosti

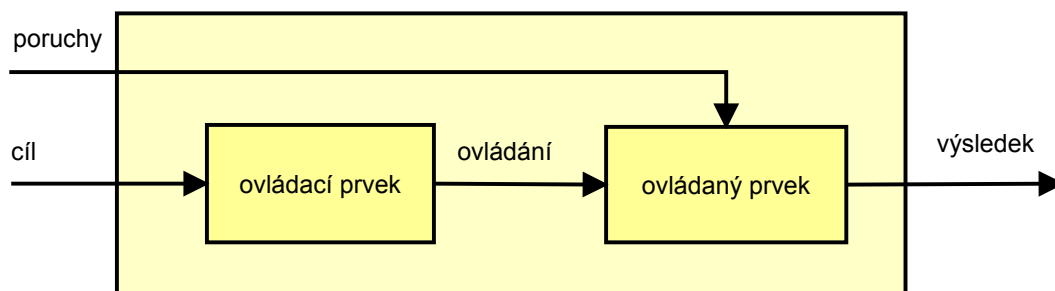
Běžný systém řízení rychlosti pro Mössbauerův spektrometr se skládá z generátoru signálu rychlosti, PID regulátoru, elektrodynamického lineárního převodníku (motoru), ke kterému je připevněn radioaktivní zdroj. Referenční signál rychlosti je veden přes PID regulátor do řídicí cívky motoru a signál z měřicí cívky se vede zpět do PID regulátoru [3]. Rozdíl referenčního signálu a signálu z měřicí cívky se nazývá signál chyby a odpovídá tzv. regulační odchylce, které bude věnována následující kapitola. Typický referenční signál rychlosti, řídicí signál a signál chyby jsou zobrazeny na obrázku 10.



Obrázek 10 | Referenční signál rychlosti a), řídicí signál b) a signál chyby c).

1.2. Řízení

K dosažení správné funkčnosti spektrometru je nutno řídit pohyb pohybového zařízení s velkou přesností. Proces, ve kterém jeden prvek působí na druhý prvek tak, aby byl splněn určitý cíl, se nazývá řízení. Prvek (subsystém), který vytváří toto působení, se nazývá řídicí. Prvek, na který je působeno se nazývá řízený [4]. Existují dva druhy řízení systémů. Prvním je řízení přímé, neboli ovládání, což je řízení bez zpětné vazby. Při ovládání je ovládací prvek informován pouze o cíli, ale není informován o poruchách a o stavu ovládaného prvku. Schéma systému ovládání je zobrazeno na obrázku 11.



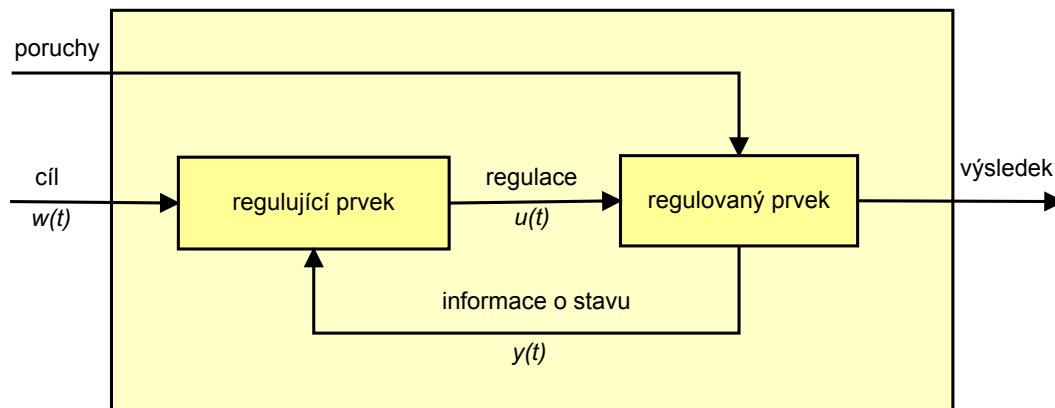
Obrázek 11 | Blokové schéma systému ovládání.

Tento typ řízení ale plně nedostačuje požadavkům na vysokou přesnost, protože nedokáže eliminovat poruchy vzniklé vnějším působením. Druhým typem řízení, tzv. nepřímým řízením, je regulace. Regulace se od ovládání liší v tom, že regulující prvek je pomocí zpětné vazby informován o stavu regulovaného prvku. Regulace je proces udržování dané veličiny $y(t)$ na požadované hodnotě $w(t)$. Podstata regulace je ve vyhodnocování regulační odchylky

$$e(t) = w(t) - y(t) \quad (4)$$

jako vstupního signálu, ve zpracování této odchylky, a ve vytvoření výstupního signálu - akční veličiny $u(t)$ s cílem tak, aby odchylka $e(t)$ byla zcela eliminována, nebo aby byla co nejmenší [4]. Blokové schéma systému regulace je zobrazeno na obrázku 12.

Regulátorem je nazýváno zařízení v regulačním obvodu, kterým se uskutečňuje proces automatické regulace. Do regulátoru (řídícího systému) zahrnujeme obvykle kromě regulované soustavy všechny členy regulačního obvodu [4]. Základní třídění regulátorů lze provést podle přívodu energie, a sice na regulátory přímé a nepřímé. Přímé regulátory ke svému chodu nepotřebují přívod energie. Mezi ně patří například Wattův regulátor otáček parního stroje či Polzunův regulátor hladiny. Regulátory nepřímé ke svému chodu potřebují vnější přívod energie. Tento typ regulátorů dnes převažuje. Podle typu energie ovládané regulátorem rozlišujeme regulátory na elektrické, hydraulické, pneumatické a jiné. Často



Obrázek 12 | Blokové schéma systému regulace.

se používá kombinovaných regulačních systémů, Využívají se např. přednosti hydraulické servomotoriky a přednosti elektronických regulátorů pro snadnou realizaci funkcí a snadný dálkový přenos signálu. Podle průběhu výstupní veličiny můžeme regulátory dělit na spojité a nespojité. U spojitých regulátorů jsou všechny veličiny spojité v čase. V nespojitém regulátoru některý člen pracuje nespojitě [4].

1.2.1. PID regulátor

PID regulátor je prvek, který se skládá z proporcionálního (P), integračního (I) a derivačního (D) členu [4]. Proporcionální člen, který akční veličinu $u(t)$ ovlivňuje podle rovnice

$$u(t) = k_R e(t), \quad (5)$$

je dán proporcionálním zesílením k_R a je v regulátoru přítomen kvůli zesílení signálu. Integrační člen, který akční veličinu ovlivňuje podle vztahu

$$u(t) = u_0 + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau, \quad (6)$$

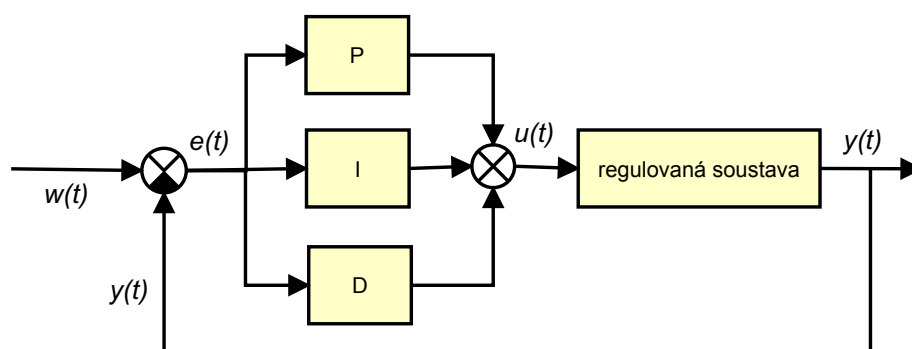
je dán integrační časovou konstantou T_I , a je v regulátoru přítomen kvůli odstraňování trvalé regulační odchylky. Derivační člen, který akční veličinu ovlivňuje podle vztahu

$$u(t) = T_D \frac{de(t)}{dt}, \quad (7)$$

je dán derivační časovou konstantou T_D , a je v regulátoru přítomen kvůli zlepšení stabilní vlastnosti regulačního obvodu. V PID regulátoru se tyto tři členy skládají a ovlivňují akční veličinu podle vztahu

$$u(t) = k_R \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_D \frac{de(t)}{dt} \right]. \quad (8)$$

Blokové schéma PID regulátoru je zobrazeno na obrázku 13.



Obrázek 13 | Blokové schéma PID regulátoru.

1.2.2. Číslicový PID regulátor

Pro řízení v diskrétních regulačních obvodech se velmi často používají diskrétní algoritmy regulace vycházející z odpovídajících spojitých (analogových) algoritmů. Na rozdíl od spojitého regulátoru, číslicový regulátor nevyhodnocuje informaci spojitě, ale v diskrétních okamžicích $t = kT$, ($k = 0, 1, 2, \dots$), kde T je perioda vzorkování. Pro dobrou shodu dané veličiny $y(t)$ s její požadovanou hodnotou $w(t)$ musí být vzorkovací perioda T regulačního obvodu poměrně krátká, aby číslicový PID regulátor zvládal uregulovat i rychlé změny signálu. Pro náhradu integračního členu se v číslicovém PID regulátoru používá:

- a) stupňovitá náhrada zpět (zpětná obdélníková)

$$\int_0^t e(\tau) d\tau \approx T \sum_{i=1}^k e(iT), \quad (9)$$

- b) stupňovitá náhrada dopředu (dopředná obdélníková)

$$\int_0^t e(\tau) d\tau \approx T \sum_{i=1}^{k-1} e(iT), \quad (10)$$

- c) sečnová náhrada (lichoběžníková)

$$\int_0^t e(\tau) d\tau \approx T \sum_{i=1}^k \frac{e(iT) - e[(i-1)T]}{2}. \quad (11)$$

Náhrada derivace se provádí zpětnou diferencí

$$T_D \frac{de(t)}{dt} \approx \frac{e(kT) - e[(k-1)T]}{T}. \quad (12)$$

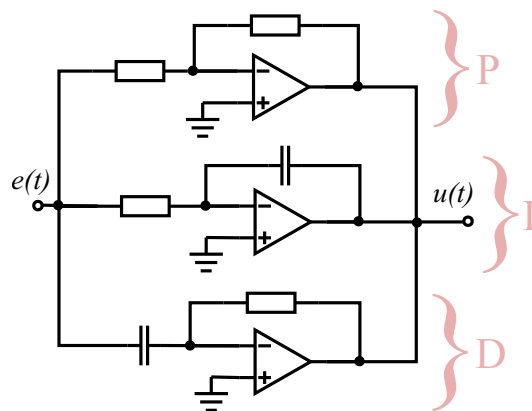
Pro malá T lze nalézt diskretní náhradu spojitého regulátoru tak, že integrál nahradíme sumou a derivaci zpětnou diferencí 1. řádu. Při nejběžněji používané náhradě integrálu zpětnou obdélníkovou metodou a náhradou derivace zpětnou diferencí dostáváme pro polohový algoritmus číslicového PID regulátoru diferenční rovnici

$$u(kT) = k_R \left\{ e(kT) + \frac{T}{T_I} \sum_{i=1}^k e(iT) + \frac{T_D}{T} \{e(kT) - e[(k-1)T]\} \right\} + u(0), \quad (13)$$

se třemi složkami – P – proporcionální, S – sumační a D – diferenční [4]. V následujícím textu bude popsán vývoj PSD regulátoru, pomocí techniky tzv. virtuální instrumentace.

1.3. Analogová řešení PID vazby pro Mössbauerovy spektrometry

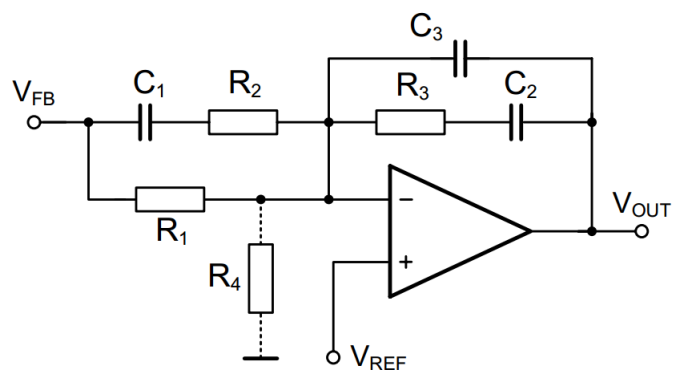
Nejjednodušší analogovou PID vazbu je možné realizovat pomocí operačních zesilovačů. Proporcionální člen může být realizován pomocí proporcionálního zesilovače, integrační člen pomocí integračního zesilovače a derivační člen pomocí derivačního zesilovače. Takto realizovaný zesilovač je zobrazen na obrázku 14.



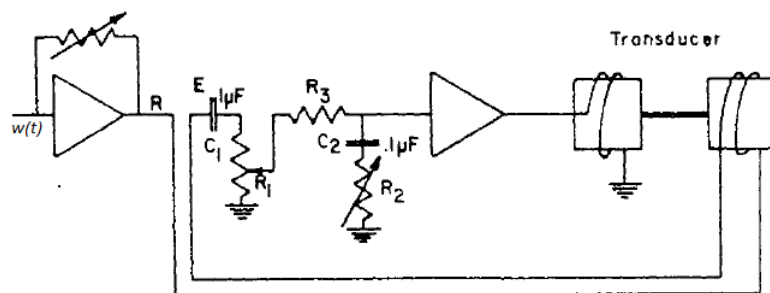
Obrázek 14 | Analogový PID regulátor z operačních zesilovačů.

Tento složitý obvod je ale možné také zjednodušit a nahradit jej jediným operačním zesilovačem, který proporcionálně zesiluje, ale i zároveň integruje a derivuje, viz obrázek 15. PID regulátor využívající pouze jeden operační zesilovač zavedl E. Kankleit [6] i v návrhu Mössbauerova spektrometru, viz obrázek 16

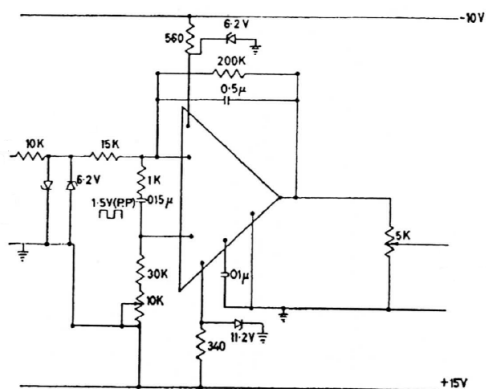
Na druhou stranu je pro zlepšení kvality PID regulace možné vytvářet složitější obvody, které mají lepší charakteristiky. Zatímco například G. M. Bancroft a kolektiv [7] zařazují elektronické prvky s nelineární charakteristikou (viz obrázek 17), V. A. Evdokimov a kolektiv [8] přidávají do PID vazby pohybového zařízení Mössbauerova spektrometru další operační zesilovače, viz obrázek 18.



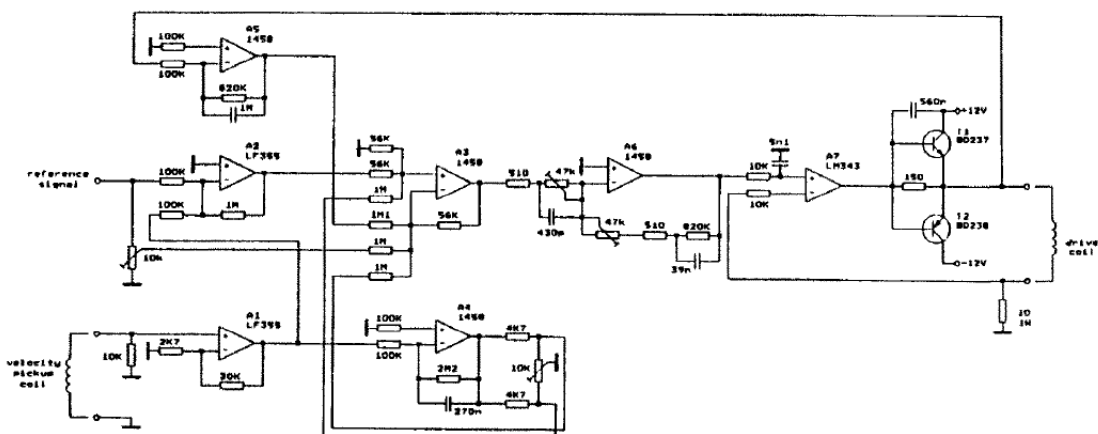
Obrázek 15 | PID regulátor z jednoho operačního zesilovače [5].



Obrázek 16 | PID vazba a pohybové zařízení Mössbauerova spektrometru vyvíjeného E. Kankeleitem [6].



Obrázek 17 | PID vazba vivinutá G. M. Bancroftem a kolektivem [7].



Obrázek 18 | PID vazba a pohybové zařízení vivinuté V. A. Evdokimovem a kolektivem [8].

Z návrhu V. A. Evdokimova vycházejí i analogové PID regulátory Mössbauerových spektrometrů vyvíjených a vyráběných v RCPTM (Regionálním centru pokročilých technologií a materiálů) v Olomouci. Mössbauerovy spektrometry využívající výše uvedenou PID vazbu mají garantovanou nelinearitu rychlostní osy pod 0,1 % a průměrná nelinearita se pohybuje kolem 0,02 % až 0,05 % v závislosti na použitém typu pohybového zařízení, viz [9].

1.4. Další možná vylepšení systému zpětné vazby

1.4.1. Generování dodatečného signálu eliminujícího časově stálou chybu

Systém zpětné vazby popsany výše je ve skutečnosti jedním z nejjednodušších. Kromě toho je možné provést další vylepšení, z nichž některá budou popsána níže. V [?] byl uvažován účinek ekvivalentní poruchy $z(t)$ přidané do součtového bodu. Veličina $z(t)$ může být také speciálně generovaný signál, který je přiváděn do skutečného sčítacího bodu a zvolený tak, že signál chyby $e(t)$ je minimalizován. Tímto způsobem je pohybovému zařízení „předem řečnuto“, co má dělat, neboli je opraveno chybějící zesílení v určitých frekvenčních pásmech. Signál $z(t)$ bude mít tvar velmi podobný signálu chyby [6].

1.4.2. Opravy nelinearity dodatečnou korekcí

Při vyhodnocování Mössbauerových spekter je využíván počítač. Počítač může být také použit k tomu, aby kreslil spektrum na lineární stupnici rychlosti i v případě, že v systému je poměrně velká, ale časově stálá odchylka od ideálního referenčního signálu. Pokud máme k dispozici skutečnou podobu signálu rychlosti nebo signálu chyby v digitalizované podobě, pak je možné použít tento signál přepočítání a korekci rychlostní osy [6].

2. Použité přístroje a software

K vývoji a optimalizaci řízení sestavy lineárního motoru s PID regulátorem pohybu u Mössbauerova spektrometru byly využity přístroje od firmy National Instruments. National Instruments je celosvětově působící firma se sídlem v Austinu (v Texasu, v USA). Zabývá se výrobou a vývojem automatických měřicích zařízení a softwarem pro tzv. virtuální instrumentaci. Při vývoji a výrobě Mössbauerových spektrometrů na Katedře experimentální fyziky Univerzity Palackého a v RCPTM byla zařízení a software od firmy National Instruments mnohokrát využita, viz např. [9].

2.1. Virtuální instrumentace

Současné technologie umožňují dříve složité analogové obvody nahradit výkonným měřicím DAQ (Data Acquisition) zařízením a DSP (Digital Signal Processing) softwarem. Vše je pak řízeno z hlavního počítače a vzniká tzv. virtuální přístrojová technika, jako kombinace hardwaru a softwaru s průmyslově standardizovanými počítačovými technologiemi, určená k tvorbě uživatelsky definovaných přístrojových řešení. Základním principem virtuální přístrojové techniky je také možnost využití jednoho měřicího zařízení pro více rozdílných aplikací. Konečné využití vytvořeného měřicího přístroje tedy určuje programátor a ne výrobce zařízení [3].

2.1.1. Virtuální měřicí přístroj

Virtuální měřicí přístroj (VI – Virtual Instrument) zpracovává data reprezentující reálné signály, převážně softwarově, podle vytvořených algoritmů a programových sekvencí. Obvykle se za virtuální přístroj považuje počítačem řízený měřicí systém skládající se z reálných částí (DAQ karta, měřicí přístroj) a virtuální části, kde jsou měřicí procedury zprostředkovány pouze počítačem. Důležitou roli zde hraje uživatelské rozhraní, které daný přístroj „zhmotňuje“. Tento „čelní panel“ virtuálního přístroje tvoří sám uživatel a může si vytvořit přístroj přesně takový, jaký je požadován [3].

2.1.2. LabVIEW

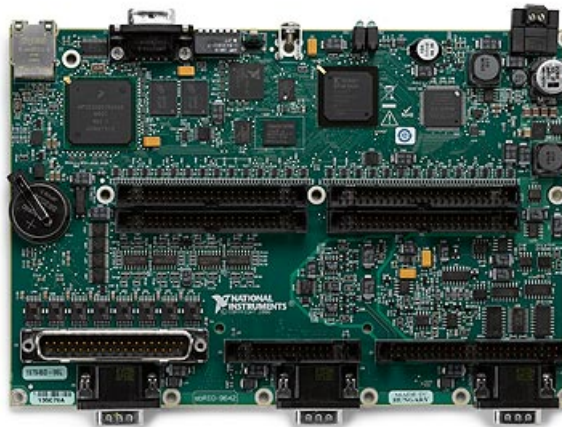
LabVIEW je zkratka z anglického Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench. Jde o grafické vývojové prostředí pro vytváření aplikací zaměřených do oblastí měření, testování a automatizace ve všech fázích těchto procesů, tj. sběru, analýzy a prezentaci naměřených dat, generování signálů a řízení. Podporuje všechny standardní způsoby sběru dat do počítače (z měřicích přístrojů

přes přístrojová rozhraní, ze zásuvných měřicích karet a z modulárních systémů). Výsledný produkt vývoje se nazývá virtuální měřicí přístroj (VI), kdy vytváření nového VI probíhá ve dvou oknech – v okně čelního panelu a okně blokového diagramu [3]. Čelní panel představuje interaktivní grafické prostředí pro koncového uživatele. Činnost VI je dána jeho blokovým diagramem, který je tvořen funkcemi, programovacími strukturami, terminály reprezentujícími v koncových blocích ovládací a indikační prvky čelního panelu a datovými cestami. V uzlech těchto cest jsou funkce (bloky), které zpracovávají procházející data. Datové cesty se tvoří spojováním jednotlivých prvků pomocí vodičů, které zprostředkovávají tok dat [3].

2.2. Systémy NI sbRIO a NI CompactRIO

2.2.1. NI sbRIO

Název sbRIO je anglická zkratka pro single board reconfigurable I/O (input/output), což se dá přeložit jako jednodeskový nastavitelný systém se vstupy a výstupy. Jedná se o programovatelný vestavěný (embedded) systém, který se skládá z real-time procesoru, uživatelsky programovatelného hradlového pole FPGA (Field Programmable Gate Array) a vestavěných digitálních a analogových vstupů a výstupů a periferních konektorů jako je USB, RS-232, RS-485, CAN či Ethernet [10]. Jak vypadá sbRIO lze vidět na obrázku 19.



Obrázek 19 | Zařízení sbRIO 9642 [10], použité pro realizaci PID vazby.

Použitý model sbRIO 9642 má 400 MHz procesor, 128 MB RAM a 256 MB flash paměť. K internetu je jej možné připojit přes 10/100 Mbit/s ethernet a obsahuje také sériový port RS-232. Použité FPGA pole je Spartan 3 od firmy Xilinx s dvěma miliony hradly. Dále obsahuje 110 digitálních vstupů/výstupů pracujících s napětím 3,3 V, jež jsou tolerantní i na 5 V napětí, 32 šestnáctibitových analogových vstupů, čtyři šestnáctibitové analogové výstupy. Vzorkovací rychlost těchto analogových vstupů a výstupů je 250 kS/s a používají napětí ± 10 V. Dále použité

sbRIO obsahuje 32 digitálních vstupů pracujících s napětím 24 V a 32 digitálních výstupů pracujících s napětím 24 V. Nakonec také obsahuje tři proprietární konektory pro připojení přídatných měřicích modulů od firmy National Instruments. SbRIO 9642 je nutné napájet stejnosměrným proudem o napětí 19 až 30 V a rozmezí provozních teplot je od -20 °C do 55 °C. Více podrobností o použitém modelu lze nalézt v jeho uživatelském manuálu [11].

2.2.2. CompactRIO

Dalším z produktů, které firma National Instruments nabízí je systém CompactRIO. Jak už z názvu vyplývá, jedná se o kompaktní rekonfigurovatelný systém s vstupy a výstupy. Obsahuje také real-time procesor a FPGA pole. Jak CompactRIO, tak sbRIO jsou modulární a je možno přidávat a měnit různé moduly podle toho, co od něj potřebujeme. Konstrukce systému CompactRIO je na rozdíl od systému sbRIO robustnější a více vhodná pro průmysl. Systém CompactRIO je zapouzdřen a poskytuje krytí proti vlhkosti a prachu. Přídatné moduly se napevno připevňují na šasi. Na obrázku 20 je zobrazen systém CompactRIO.



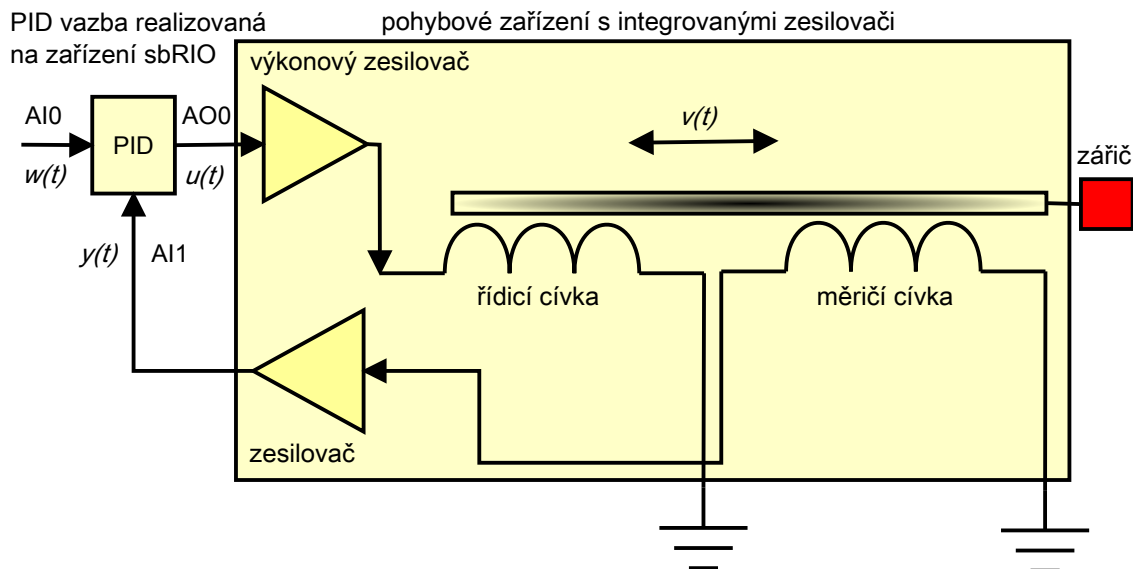
Obrázek 20 | CompactRIO sestava – kontrolér NI cRIO-9002, a čtyři I/O moduly [12].

Platforma CompactRIO byla v minulosti již k PID regulaci využita, viz [13]. V následujících kapitolách bude popsáno, jak byla na systému sbRIO realizována PID (PSD) vazba a její podpůrné programy.

2.3. Pohybové zařízení s integrovanými zesilovači

V experimentální části bylo použito pohybové zařízení pro Mössbauerovy spektrometry vyráběné v RCPTM, vycházející z [8]. Toto pohybové zařízení má v sobě integrován výkonový zesilovač pro zadávací signál a zesilovač signálu z měřicí cívky a bylo navrženo tak, aby bylo možné jej obsluhovat pomocí měřicích zařízení od firmy National Instruments. Schéma použitého pohybového zařízení a jeho zapojení je zobrazeno na obrázku 21.

Použité pohybové zařízení se skládá ze dvou cívek – jedné řídicí a druhé měřicí. Cívky jsou umístěny uvnitř permanentních magnetů a po přivedení elektrického



Obrázek 21 | Blokové schéma pohybového zařízení a jeho zapojení ($w(t)$ – referenční signál, $v(t)$ – rychlost pohybu, $y(t)$ – signál z měřicí cívky, $u(t)$ – signál přivedený na řídicí cívku – řídicí signál), AI0 a AI1 jsou analogové vstupy zařízení sbRIO, AO0 analogový výstup.

proudu na řídicí cívku dojde k rozpočívání pohybového zařízení. Tento elektrický proud je generován analogovým výstupem AO0 (Analog Output 0) PID vazby a poté je zesílen výkonovým zesilovačem. Pohybem měřicí cívky v magnetickém poli vzniká signál z měřicí cívky. Ten je zesílen zesilovačem a přiveden na analogový vstup AI1 (Analog Input 1) PID zařízení. Druhý analogový vstup – AI0 (Analog Input 0) je využit na vstup referenčního signálu rychlosti do PID vazby. Vlastní pohybové zařízení je zobrazeno na obrázku 22.

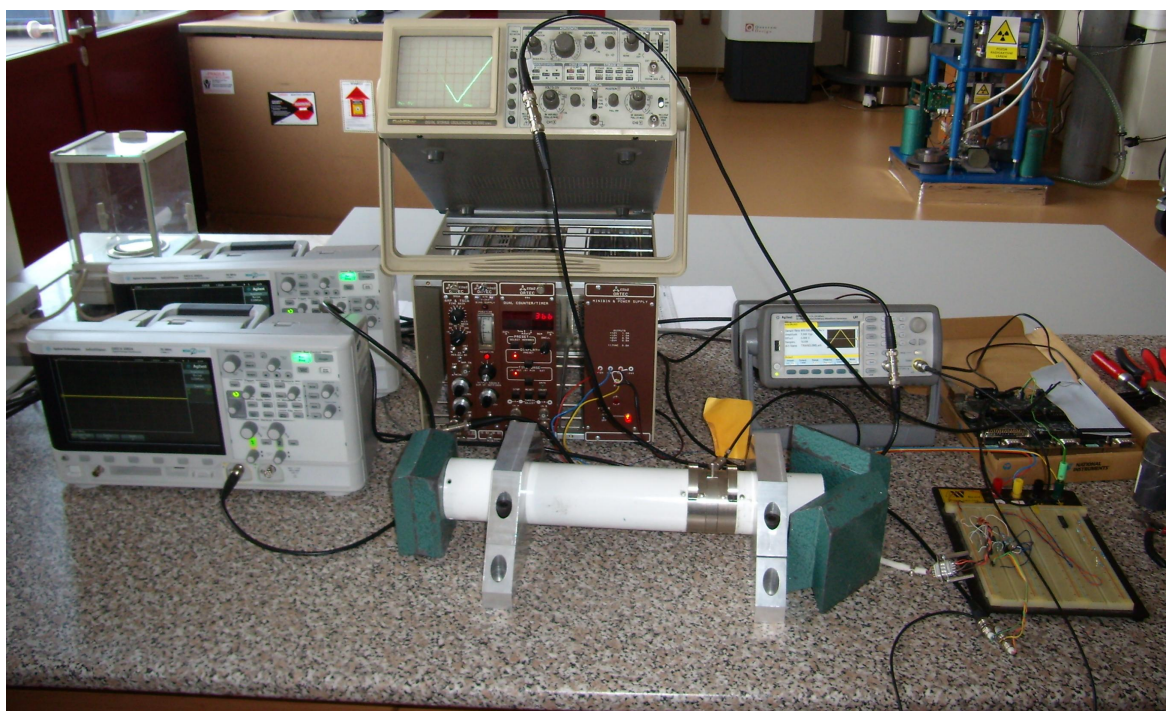


Obrázek 22 | Použité pohybové zařízení s integrovanými zesilovači (bez pouzdra).

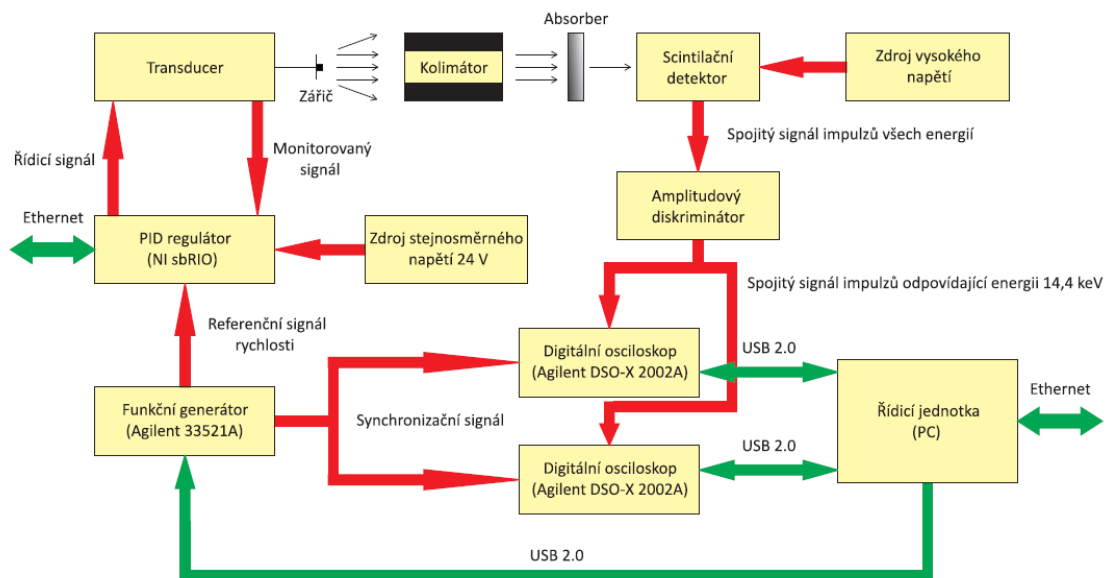
2.4. Experimentální sestava Mössbauerova spektrometru sestávající z autonomních přístrojů

V poslední fázi byla PID vazba zařazena do sestavy Mössbauerova spektrometru vyvíjené Bc. Lukášem Kouřilem sestávající z autonomních přístrojů. Tato se-

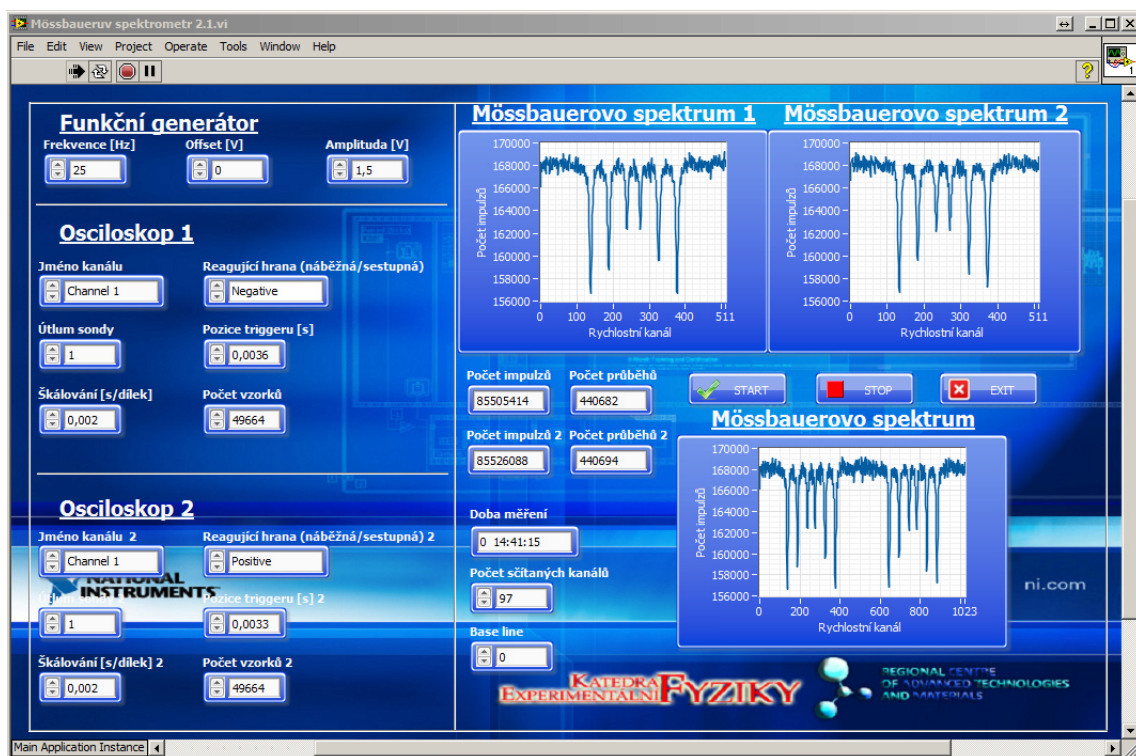
stava se skládá ze dvou osciloskopů Agilent DSO-X 2002A, funkčního generátoru Agilent 33521A, osobního počítače a modulárního systému ORTEC. Tato sestava, která je zobrazena na obrázku 23 a její schéma je zobrazeno na obrázku 24, je podrobněji popsána v [14]. Jedná se o transmisní Mössbauerův spektrometr pracující v režimu s konstantním zrychlením. Tento spektrometr je (rovněž jako PID vazba realizovaná na zařízení sbRIO) vytvořen pomocí techniky virtuální instrumentace. Čelní panel spektrometru sestávajícího z autonomních přístrojů vyvíjeného L. Kouřilem je zobrazen na obrázku 25.



Obrázek 23 | Sestava Mössbauerova spektrometru sestávající z autonomních přístrojů vyvíjeného L. Kouřilem.



Obrázek 24 | Schéma sestavy Mössbauerova spektrometru sestávajícího z autonomních přístrojů [14].



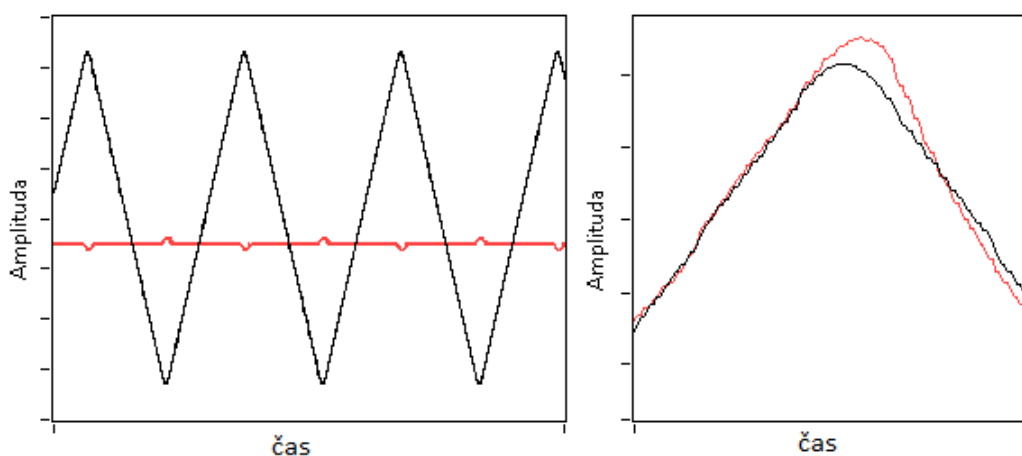
Obrázek 25 | Čelní panel virtuálního Mössbauerova spektrometru sestávajícího z autonomních přístrojů vyvíjeného L. Kouřilem.

3. Experimentální část

Vlastní realizace PID vazby byla programována v prostředí LabVIEW 2012 s FPGA toolkitem verze 12.0, Real-Time toolkitem verze 12.0, PID Control toolkitem verze 12.0 a ovladači NI-RIO verze 12.0. Je použita technika virtuální instrumentace a jsou tvořeny tzv. VI, neboli virtuální instrumenty – programy běžící v počítači, které zastupují funkci klasických měřicích přístrojů.

3.1. Sledované parametry kvality PID vazby

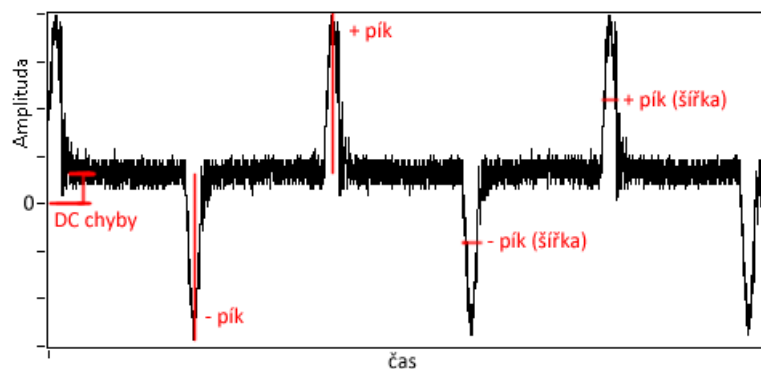
Kvalita PID regulace byla posuzována analýzou signálu chyby. V ideálním případě by signál chyby měl nulový průběh. PID regulátor má ale omezené možnosti a nestíhá regulovat signál v tzv. bodech obratu signálu rychlosti (viz obrázek 26 vpravo), kde je rychlost pohybu zářiče nejvyšší (viz kapitola 1.1.5). Tím v signálu chyby vznikají píky. Signál z měřicí cívky a signál chyby jsou zobrazeny na obrázku 26 vlevo.



Obrázek 26 Vlevo signál z měřicí cívky (černě) a signál chyby (červeně), vpravo detail referenčního signálu (černě) a signálu z měřicí cívky (červeně) v bodech obratu signálu rychlosti - příklad z ne úplně korektně nastaveného PID regulátoru.

Tyto píky v signálu chyby byly dále analyzovány a byly sledovány jejich amplitudy, které byly označeny A_{p+} (pro kladný pík) a A_{p-} (pro záporný pík) a šířky v polovině maxima W_{p+} respektive minima W_{p-} . Dále byla sledována stejnosměrná složka signálu chyby DC , která je zodpovědná za tzv. drift. Všechny vyhodnocované parametry signálu chyby jsou znázorněny na obrázku 27.

Tyto parametry jsou důležité, protože se z nich počítají další parametry. Z amplitudy píků v signálu chyby A_{p+} respektive A_{p-} a jejich šířky W_{p+} respektive W_{p-} lze spočítat obsah těchto píků. Za předpokladu, že se jedná o trojúhelníkové píky



Obrázek 27 | Signál chyby a jeho sledované parametry (červeně).

se obsah kladného píku počítá podle rovnice

$$S_{p+} = 2 \cdot A_{p+} \cdot W_{p+} \quad (14)$$

a záporného podle rovnice

$$S_{p-} = 2 \cdot |A_{p-}| \cdot W_{p-}. \quad (15)$$

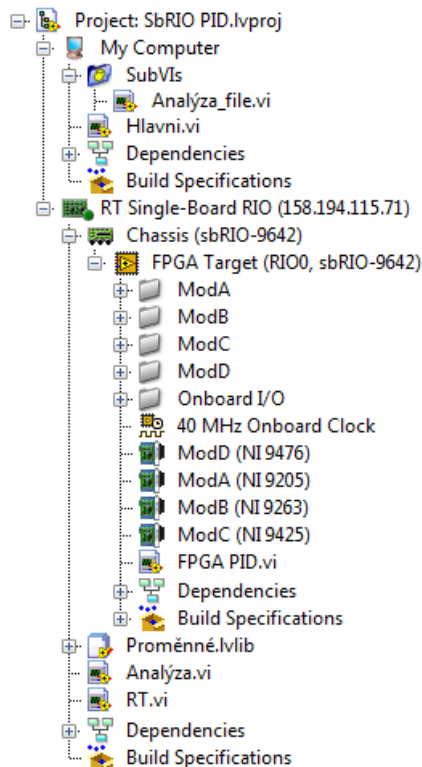
Při počítání obsahu „záporného píku“ je nutné použít absolutní hodnotu, aby nevycházely záporné obsahy, protože výšky „záporného píku“ jsou záporné. Pro popis chování signálu chyby v celé periodě byl zaveden souhrnný parametr obsahu píků chyby S_p . Tento parametr je součtem obsahů kladného a záporného píku

$$S_p = S_{p+} + S_{p-}. \quad (16)$$

3.2. Realizace PID vazby na zařízení sbRIO

Celý program je součástí jednoho projektu a dělí se na podprogramy, neboli subVI. Členění projektu je vidět v okně *Project Explorer* na obrázku 28.

Celý projekt se skládá ze dvou částí - části běžící na počítači a části běžící na zařízení sbRIO. Na sbRIO je možné programy umístit buď na FPGA pole, nebo spouštět na real-time procesoru. Na real-time procesoru běží hlavní VI s názvem *RT.vi*, který obsluhuje výpočty, které nepotřebují rychlé zpracování a nejsou příliš kritické. Dále se v real-time části zařízení sbRIO nachází podprogram *Analýza.vi*, který analyzuje signál. Kritičtější část programu běží na FPGA poli. Na něm je realizována samotná PID vazba a to v programu *FPGA_PID.vi*. Na počítači je přítomen program *Hlavni.vi*, který je ale prázdný a podprogram *Analýza_file.vi*, který je kopie podprogramu *Analýza.vi* upravený pro analýzu signálu uloženého v souboru na pevném disku, a který byl používán v průběhu vývoje. V knihovně *Proměnné.lvlib* se nacházejí síťově sdílené proměnné. Sdílené proměnné předsta-

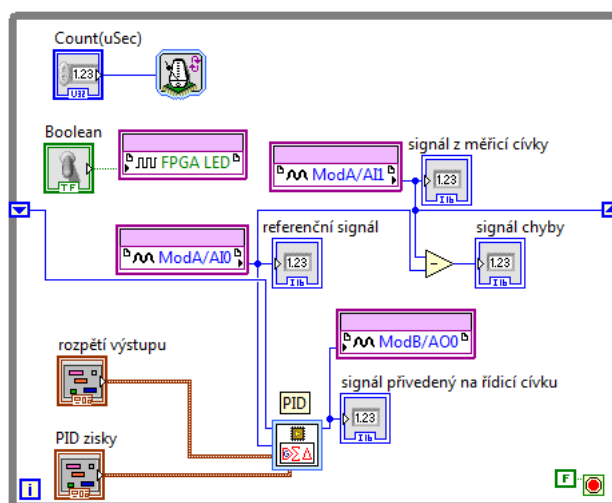


Obrázek 28 | Členění projektu běžícího na zařízení sbRIO.

vují způsob, jak sdílet data mezi jednotlivými VI, projekty, ale i počítači, protože mohou být tzv. network-published – sdíleny přes síť. V následujících kapitolách budou jednotlivé programy a podprogramy představeny.

3.2.1. Aplikace běžící na FPGA poli systému sbRIO

Na obrázku 29 je zobrazen blokový diagram aplikace běžící na FPGA poli zařízení sbRIO.



Obrázek 29 | Blokový diagram aplikace FPGA_PID.vi běžící na FPGA poli.

Fialově jsou zobrazeny analogové vstupy *ModA/AI0* a *ModA/AI1* (ke kterým je připojen referenční signál a signál z měřicí cívky), analogový výstup *ModB/AO0* (signál přivedený na řídicí cívku) a digitální výstup *FPGA LED* ovládající LED diodu na zařízení sbRIO, která bude blikat pro kontrolu činnosti. Všechny vstupy a výstupy mají vyveden indikátor (modře), který umožňuje sledovat měřené a generované signály. Uprostřed dole je PID člen, který má vyvedený vstup *PID parametry* pro nastavování proporcionální, integrační a derivační složky PID regulátoru a vstup *rozsah* pro regulaci rozsahu elektrického napětí výstupu. Nejdůležitějšími vstupy jsou vstup referenčního signálu – tzv. *setpoint* a vstup *proměnná procesu*, což je signál z měřicí cívky změřený v předchozím cyklu a uložený do posuvného registru. Výstupem je signál přivedený na měřicí cívku. Dále se zde počítá rozdíl zadávacího signálu a signálu měřeného – tzv. signál chyby. V programu je ještě přítomen časovač, umožňující nastavení časování *While* cyklu s přesností na mikrosekundy, který určuje vzorkovací periodu T , což je důležitá charakteristika PID (PSD) vazby, protože určuje vzorkovací frekvenci analogových vstupů a výstupů. Tato vzorkovací perioda ale nejde nastavit libovolně malá, protože je omezena vzorkovací frekvencí analogově-digitálních převodníků, která je maximálně 250 kS/s, což odpovídá minimální vzorkovací periodě $T = 4 \mu\text{s}$.

Standardně je vzorkovací perioda nastavena na $8 \mu\text{s}$, kvůli větší přesnosti. Použité zařízení sbRIO totiž používá A/D (analogově-digitální) převodníky s postupnou aproximací (viz [15]), u kterých se dá zvýšit vzorkovací rychlost zmenšením jejich přesnosti. Při vzorkovací periodě $8 \mu\text{s}$ je garantovaná maximální odchylka ± 30 ppm z měřeného rozsahu, a při $4 \mu\text{s}$ je garantovaná maximální odchylka ± 120 ppm z měřeného rozsahu, viz [16]. Pro potřeby PID regulace je v tomto případě lepší mít vyšší vzorkovací frekvenci. Přesnost ± 30 ppm (což při rozsahu ± 10 V znamená odchylku $\pm 2,4$ mV) je sice dostačující, ale dá se ještě zlepšit zvolením menšího rozsahu. Používaný signál z měřicí cívky má amplitudu 2 V, stačí mu tedy i rozsah ± 5 V. V kapitolách zabývajících se testováním různých parametrů bude kromě parametrů PID vazby testován i vliv vzorkovací frekvence a rozsahu A/D převodníku. Na obrázku 30 je zobrazeno dialogové okno s nastavováním maximální vzorkovací frekvence A/D převodníků a jejich napěťových rozsahů.

Parametry PID vazby, které se nastavují na vstupu *PID parametry* jsou proporcionální zesílení $P = k_R$, normovaná integrační časová konstanta $I = \frac{k_R T}{T_I}$ a normovaná derivační časová konstanta $D = \frac{k_R T_D}{T}$. Všechny tyto parametry jsou bezrozměrné veličiny.

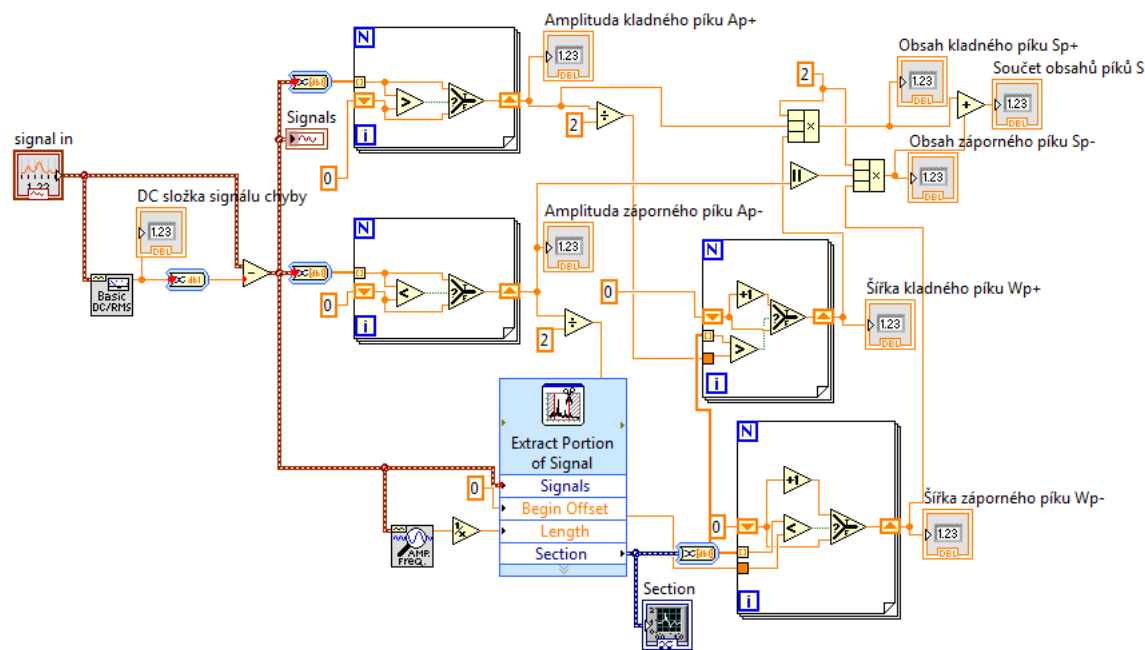
3.2.2. Aplikace běžící na real-time procesoru systému sbRIO

Na obrázku 31 je zobrazena aplikace běžící na real-time procesoru zařízení sbRIO. Tento obrázek je pro lepší čitelnost ve vyšším rozlišení umístěn v příloze

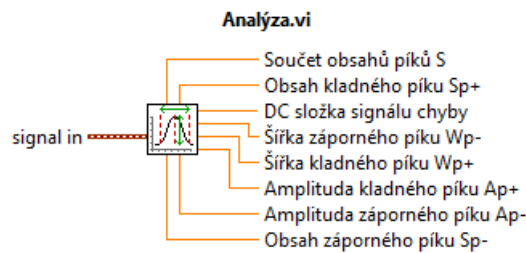
stejnosemnná složka a to jak signálu chyby, tak signálu z měřicí cívky. U signálu chyby je dále na vyhodnocování použit podprogram *Analýza.vi* (viz následující kapitola), který poskytuje informace o maximech a minimech signálu chyby a podobně. Všechny tyto údaje jsou kromě zobrazování na čelním panelu ukládány do síťově sdílené proměnné ke vzdálenému zobrazování (viz kapitola 3.2.4).

3.2.3. Analýza.vi

Na obrázku 32 je zobrazen blokový diagram podprogramu *Analýza.vi*. Tento podprogram funguje tak, že nejprve je změřena stejnosměrná složka vstupujícího signálu a ta je od něj odečtena. Následně je pomocí *For* cyklů signál analyzován bod po bodu a pomocí porovnávání je zjištěno jeho maximum a minimum. Dále je změřena frekvence signálu a z ní jeho perioda. Následně je signál ostřížen na jednu periodu. Tato jedna perioda se v dalším *For* cyklu projde bod po bodu a zjistí se počet bodů, které jsou nad polovinou maxima píků v signálu chyby. Tím se získá parametr šířky v polovině maxima (resp. minima). Z těchto parametrů jsou následně počítány obsahy píků v signálu chyby a součet těchto obsahů. Z těchto parametrů potom lze usuzovat na kvalitu PID regulace. Na obrázku 33 je zobrazeno zapojení podprogramu *Analýza.vi* a jeho ikonka. Podprogram má jediný vstup, na který je přiveden analyzovaný signál a osm výstupů, každý s jedním měřeným parametrem.



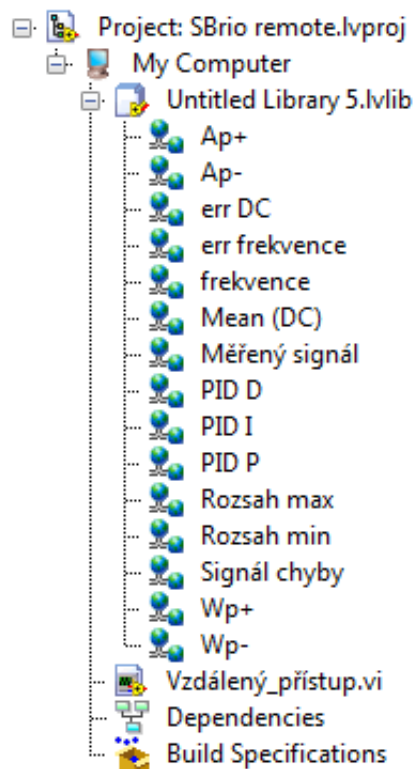
Obrázek 32 | Blokový diagram podprogramu *Analýza.vi*.



Obrázek 33 | Podprogram *Analýza.vi* a jeho zapojení .

3.2.4. Vzdálená aplikace běžící na počítači

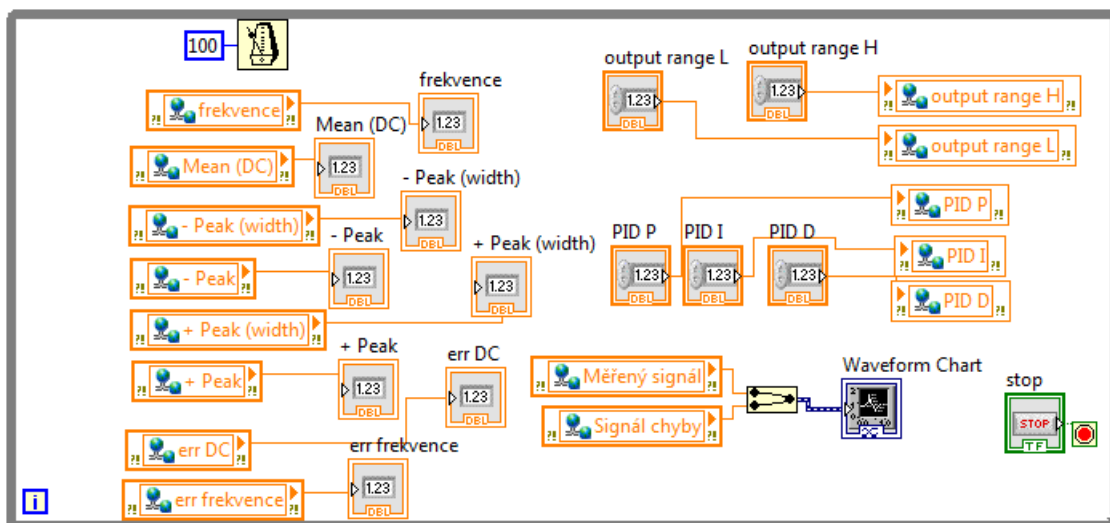
Protože celý program běží na platformě sbRIO, která nemá možnost přímého připojení monitoru, myši a klávesnice, tak byla vytvořena aplikace na zobrazování parametrů a ovládání programu běžícího na platformě sbRIO. SbRIO je zapojeno ethernetovým kabelem do lokální sítě (LAN) či internetu a má svou vlastní IP adresu. Díky tomu je možné jej přes internet ovládat odkudkoliv. Samotný program byl vytvořen jako samostatný projekt. Jeho členění lze vidět na obrázku 34.



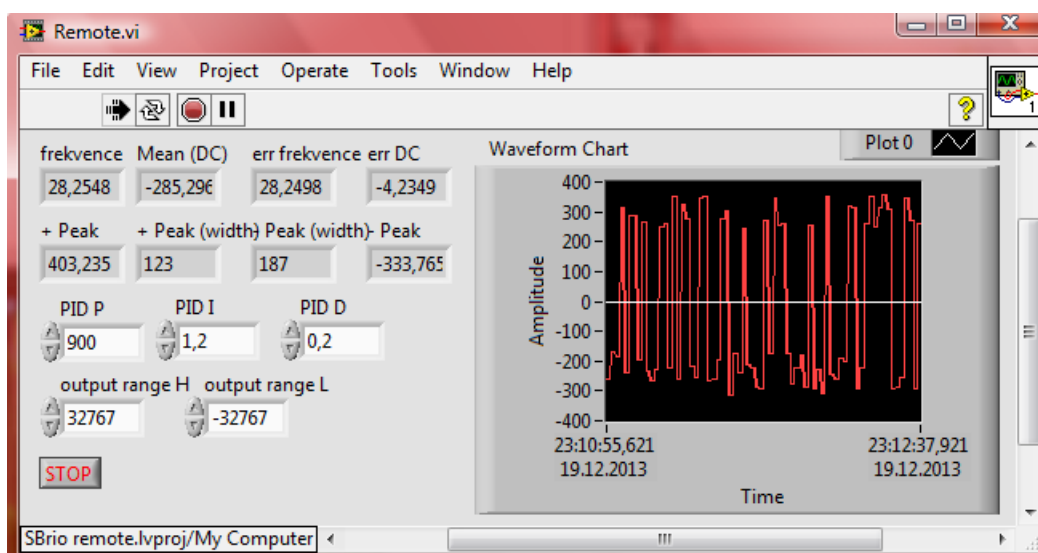
Obrázek 34 | Členění projektu aplikace vzdáleného přístupu *sbRIO remote.lvproj*.

Vzdálený_přístup.vi je hlavním VI programu. V knihovně jsou proměnné navázané přes internet na proměnné ze zařízení sbRIO. Tento program lze libovolně vypínat a spouštět, zatímco aplikace zařízení sbRIO běží samostatně. Blokový diagram této aplikace je zobrazen na obrázku 35. Čelní panel programu (viz obrázek

36) obsahuje možnost sledování parametrů signálu a možnost ovládání parametrů PID vazby. Je zde rovněž možnost sledování signálu chyby a měřeného signálu.



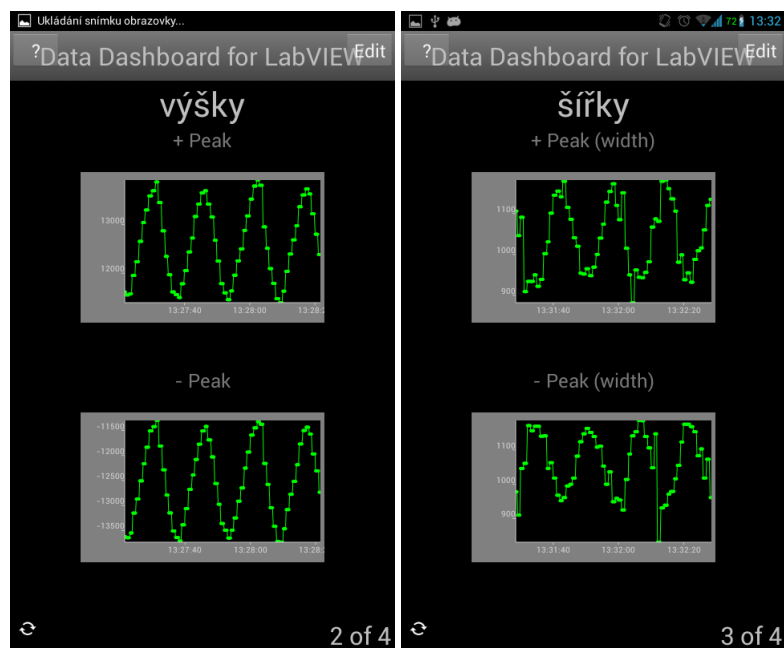
Obrázek 35 | Blokový diagram vzdálené aplikace *Vzdálený_přístup.vi*.



Obrázek 36 | Čelní panel aplikace *Vzdálený_přístup.vi*.

3.2.5. Vzdálená aplikace běžící na mobilním telefonu

Firma National Instruments nabízí pro telefony a tablety s operačními systémy Android a iOS aplikaci jménem Data Dashboard for LabVIEW. Tato aplikace umožňuje vytvářet čelní panely VI a zobrazovat je v telefonu respektive tabletu. Aplikace *Vzdálený_přístup.vi* z předchozí kapitoly byla proto přepsána i pro telefon. Bohužel tato aplikace v současné době (přelom let 2013 a 2014) umí pouze číst data ze sdílených proměnných. Možnost zapisovat do sdílených proměnných by se ale měla objevit v chystané verzi 2.0. Čelní panely této aplikace jsou zobrazeny na obrázku 37.



Obrázek 37 | Vzdálená aplikace běžící na mobilním telefonu.

3.3. Hledání optimálních parametrů PID vazby

Nejprve byly parametry PID vazby nastaveny ručně tak, aby odpovídaly co nejlepší shodě referenčního signálu a signálu z měřicí cívky. Parametry PID vazby byly nastaveny následovně: Proporcionální zesílení $P = k_R = 6$, normovaná integrační časová konstanta $I = \frac{k_R T}{T_I} = 1,5$ a normovaná derivační časová konstanta $D = \frac{k_R T_D}{T} = 6,5$. V této konfiguraci byly parametry signálu chyby následující: Amplituda kladného píku byla 75 bodů, záporného píku -92 bodů, šířka kladného píku byla 70 bodů a šířka záporného píku byla 35 bodů. Stejnosečná složka signálu chyby byla 97,38 bodu. Parametry pro další kombinace hodnoty parametrů P , I a D jsou zobrazeny v tabulce 1.

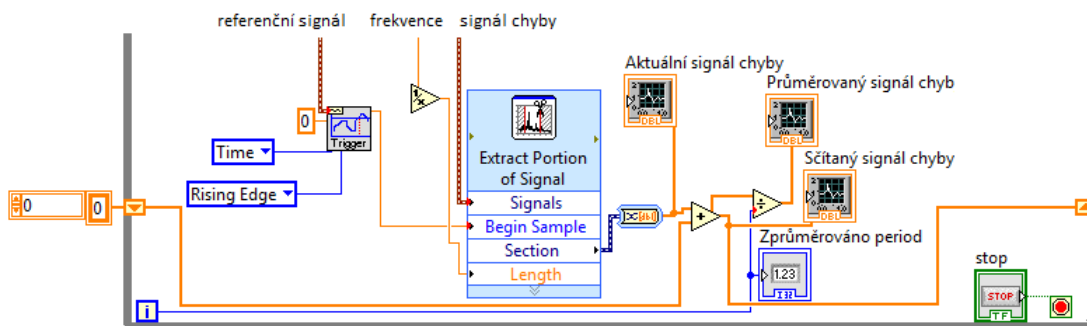
Touto metodou bylo rovněž zjištěno, že největší vliv na kvalitu PID regulace pohybu pohybového zařízení Mössbauerova spektrometru má parametr P .

Tabulka 1 | Parametry signálu chyby pro různé parametry P , I a D .

P	I	D	T [μs]	k_R	T_I [μs]	T_D [μs]	A_{p+}	A_{p-}	W_{p+}	W_{p-}	DC
10	1	4	8	10	80	3,2	75	-92	70	35	97,38
6	0,5	6,5	8	10	160	5,2	107	-117	52	49	24,96
6	0,5	6,5	4	10	80	2,6	72	-74	45	56	-87,68
6	1,5	6,5	4	10	27	2,6	63	-67	39	44	-103,19

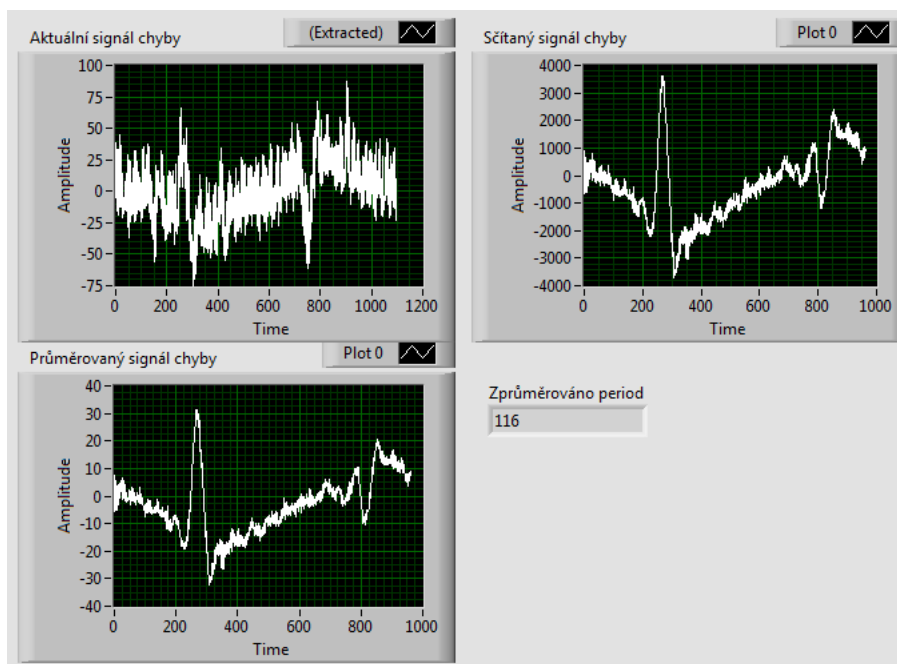
3.3.1. Aplikace na získání průměrovaného signálu chyby

Pro vyhodnocení kvality PID regulace a také pro (v této práci nerealizovanou) korekci nelinearity Mössbauerova spektra pomocí počítače a také pro cílené změny zadávacího signálu (viz kapitola 1.4) bylo nutné získat signál chyby, který by byl zbaven náhodného šumu. Toho se dá dosáhnout pomocí zprůměrování velkého množství period signálu chyby. Byla proto vytvořena aplikace pro záznam a průměrování signálu chyby. Její blokový diagram je vidět na obrázku 38. Signál chyby je rozstříhán pomocí expresní funkce *Extract portion of signal* na úseky o délce rovnající se jedné periodě signálu. Místa rozstříhání jsou určena pomocí funkce *Basic Level Trigger*. Jako spouštěcí signál (tzv. trigger) je použit referenční signál rychlosti pohybu $w(t)$. Po nastříhání jsou jednotlivé periody sečteny a jejich součet ukládán do posuvného registru. Následně jsou také poděleny počtem uplynulých cyklů *While* smyčky. Tím je získána průměrná hodnota signálu chyby. Na obrázku 39 je zobrazen čelní panel podprogramu průměrování signálu chyby. Vlevo nahoře je průměrný signál chyby, vpravo je sečteno 116 period signálu chyby a vlevo dole je zprůměrovaný signál chyby.

**Obrázek 38** | Blokový diagram podprogramu *Průměrování signálu chyby.vi*.

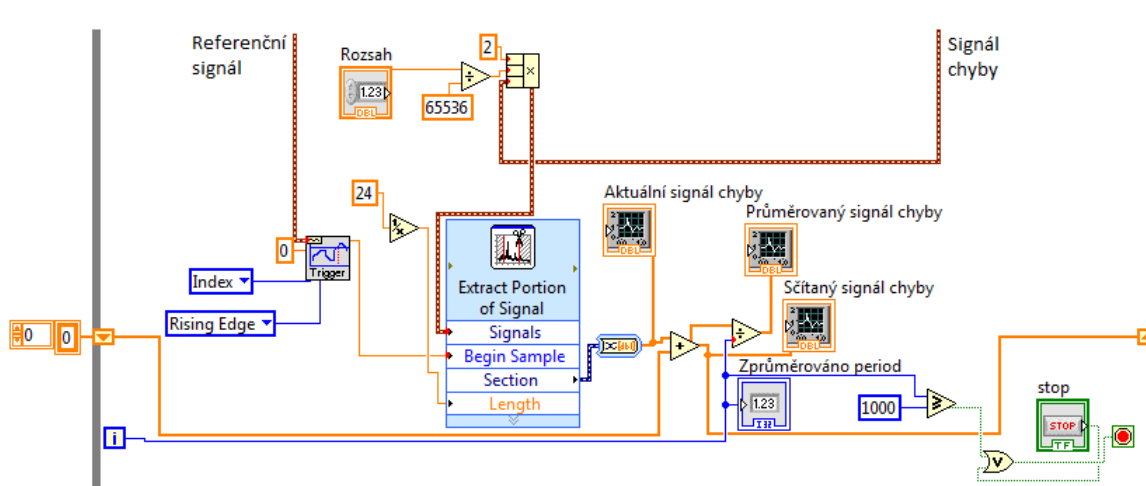
3.3.2. Hledání optimálních parametrů PID vazby pomocí zkoumání průměrovaného signálu chyby

Aplikace na průměrování signálu chyby byla dále využita pro hledání optimálních parametrů PID vazby. Byla zkoumána zejména amplituda signálu chyby a jeho tvar. Signál chyby byl převeden na jednotky SI, protože velikost udávaná ve



Obrázek 39 | Čelní panel podprogramu *Průměrování signálu chyby.vi*.

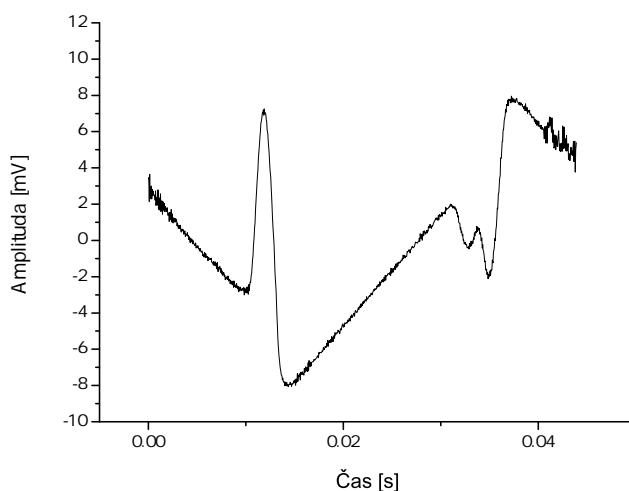
vzorcích se lišila pro různé měřicí rozsahy A/D převodníků. Analogové vstupy zařízení sbRIO používají šestnáctibitový A/D převodník. To znamená, že rozsah je rozdělen na $2^{16} = 65536$ hodnot. Pro rozsah ± 10 V je potom rozdíl jednoho dílku roven rozdílu napětí $\frac{20}{65536} \doteq 0,30$ mV, pro rozsah ± 5 V je jeden dílek roven $\frac{10}{65536} \doteq 0,15$ mV a podobně. Upravená aplikace na měření průměrného signálu chyby s přepočtem ze vzorků na volty je zobrazena na obrázku 40. Tento podprogram má rovněž obsaženo automatické vypnutí měření po 1000 průměrováních. Toho bylo využito při hledání optimálních parametrů PID vazby, aby byly výsledky srovnatelné.



Obrázek 40 | Upravený podprogram na průměrování tisíce period signálu chyby, doplněný o kód starající se o přepočet vzorků na volty.

V tabulkách 2, 3 a 4 jsou uvedeny jednotlivé parametry signálu chyby vazby

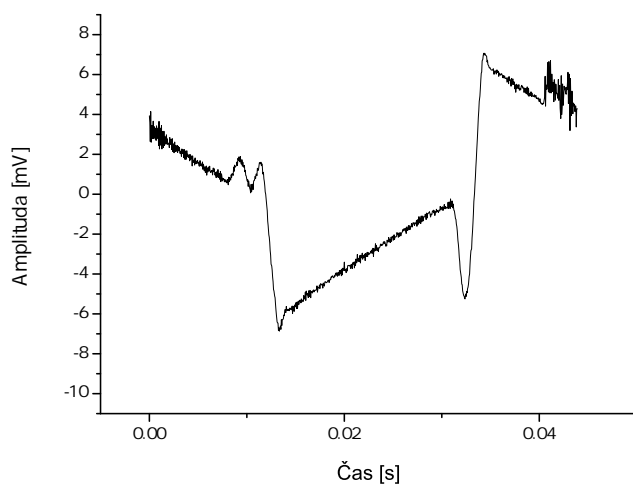
pro různá nastavení parametrů PID vazby. Na obrázcích 41 až 45 jsou zobrazeny průměrované signály chyby pro některá nastavení PID vazby. Velikosti amplitud signálů chyby jsou zobrazeny v grafech na obrázcích 46 a 47. Z těchto grafů a z tabulky 2 je patrné, že signál chyby se se zvyšujícími se parametry PID vazby zmenšuje a to až do doby, kdy dojde k rozkmitání pohybového zařízení na vysokou frekvenci. V tomto případě je zadávací signál v saturaci a velmi rychle osciluje mezi minimem a maximem. Zároveň se pohybové zařízení rozezní slyšitelným pískavým vysokofrekvenčním tónem. Při delším vystavení tomuto kmitání se pohybové zařízení také začne zahřívat.



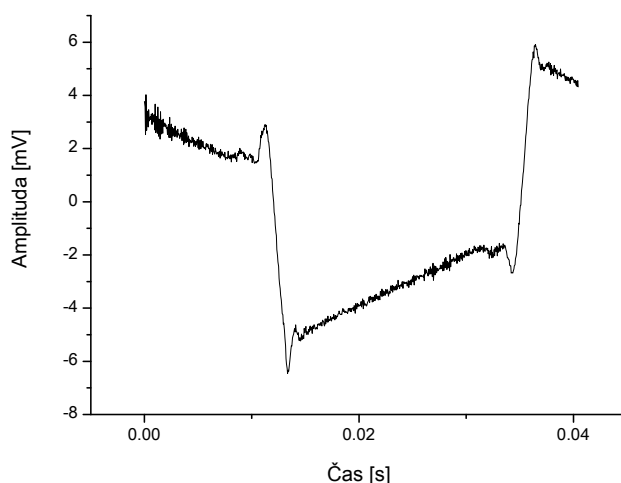
Obrázek 41 | Průměrovaný signál chyby pro parametry PID vazby $P = 6$, $I = 0,25$ a $D = 6,5$ a vzorkovací periodu $T = 4 \mu\text{s}$ a rozsah A/D převodníku ± 5 V.

Tabulka 2 | Jednotlivé parametry signálu chyby pro různé nastavení normované integrační časové konstanty I .

P	I	D	T [μs]	Rozs. [V]	A_{p+} [mV]	A_{p-} [mV]	A_p [mV]	DC [mV]
6	0,25	6,5	4	± 5	7,95441	-8,07327	16,02768	-0,11886
6	0,50	6,5	4	± 5	7,06741	-6,86005	13,92746	0,20736
6	0,75	6,5	4	± 5	5,91705	-6,45432	12,37137	-0,53727
6	1,00	6,5	4	± 5	5,22034	-5,58487	10,80521	-0,36453
6	1,50	6,5	4	± 5	4,38989	-4,57983	8,969728	-0,18994
6	1,75	6,5	4	± 5	5000	-5000	10000	0



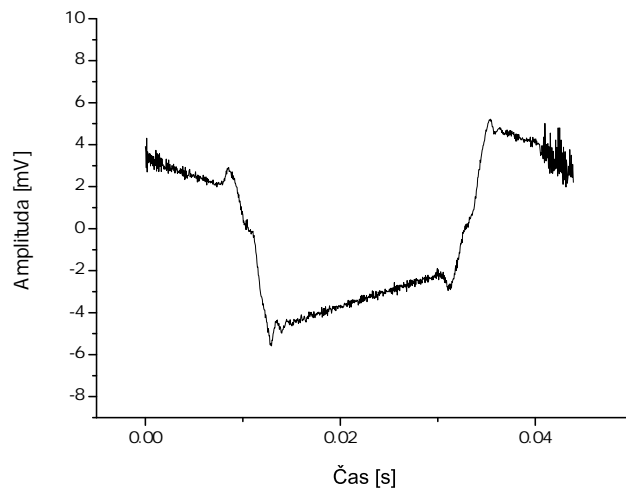
Obrázek 42 | Průměrovaný signál chyby pro parametry PID vazby $P = 6$, $I = 0,5$ a $D = 6,5$ a vzorkovací periodu $T = 4 \mu\text{s}$ a rozsah A/D převodníku $\pm 5 \text{ V}$.



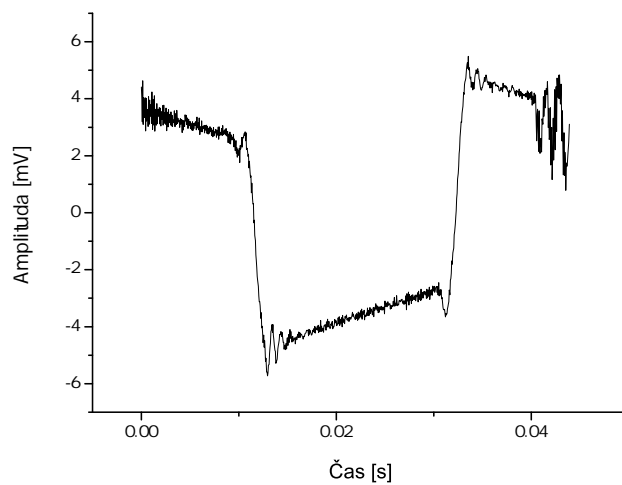
Obrázek 43 | Průměrovaný signál chyby pro parametry PID vazby $P = 6$, $I = 0,75$ a $D = 6,5$ a vzorkovací periodu $T = 4 \mu\text{s}$ a rozsah A/D převodníku $\pm 5 \text{ V}$.

Tabulka 3 | Jednotlivé parametry signálu chyby pro různé nastavení proporcionálního zesílení P .

P	I	D	T [μs]	Rozs. [V]	A_{p+} [mV]	A_{p-} [mV]	A_p [mV]	DC [mV]
1	1,5	6,5	4	± 5	127,4048	-156,1838	283,5886	-20,4149
2	1,5	6,5	4	± 5	10,8369	-10,9829	21,8198	0,3863
3	1,5	6,5	4	± 5	9,3206	-10,0483	19,3689	-0,5577
4	1,5	6,5	4	± 5	5,6327	-6,1472	11,7799	0,2291
5	1,5	6,5	4	± 5	4,9448	-4,8845	9,8293	-0,2005
6	1,5	6,5	4	± 5	4,3899	-4,5798	8,9697	-0,1899
7	1,5	6,5	4	± 5	5000	-5000	10000	0



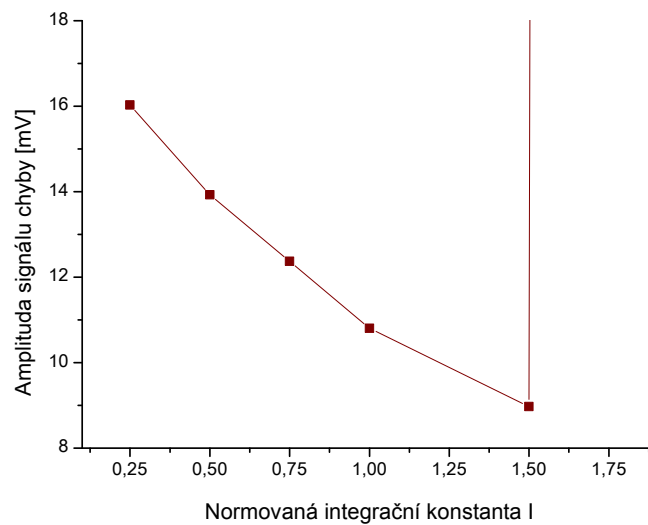
Obrázek 44 | Průměrovaný signál chyby pro parametry PID vazby $P = 6$, $I = 1$ a $D = 6,5$ a vzorkovací periodu $T = 4 \mu\text{s}$ a rozsah A/D převodníku $\pm 5 \text{ V}$.



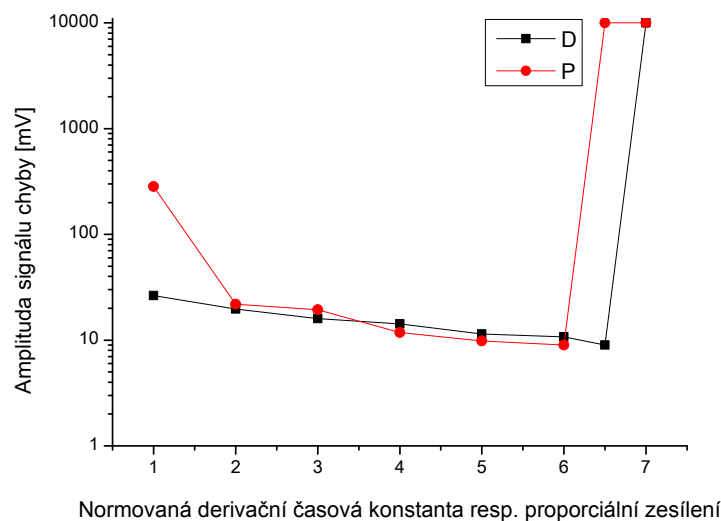
Obrázek 45 | Průměrovaný signál chyby pro parametry PID vazby $P = 6$, $I = 1,5$ a $D = 6,5$ a vzorkovací periodu $T = 4 \mu\text{s}$ a rozsah A/D převodníku $\pm 5 \text{ V}$.

Tabulka 4 | Jednotlivé parametry signálu chyby pro různé nastavení normované derivační časové konstanty D .

P	I	D	T [μ s]	Rozs. [V]	A_{p+} [mV]	A_{p-} [mV]	A_p [mV]	DC [mV]
6	1,5	1,0	4	± 5	12,4269	-14,0029	26,4298	-1,5760
6	1,5	2,0	4	± 5	11,0873	-8,5991	19,6864	0,4882
6	1,5	3,0	4	± 5	9,7479	-6,1952	15,9431	-0,5527
6	1,5	4,0	4	± 5	7,4085	-6,7914	14,1998	1,6171
6	1,5	5,0	4	± 5	6,0689	-5,3875	11,4564	-0,6814
6	1,5	6,0	4	± 5	5,7294	-4,9837	10,7131	0,7457
6	1,5	6,5	4	± 5	4,3899	-4,5798	8,9697	-0,1899
6	1,5	7,0	4	± 5	5000	-5000	10000	0



Obrázek 46 | Amplituda signálu chyby v závislosti na různém nastavení velikosti integrační časové konstanty.



Obrázek 47 | Amplituda signálu chyby v závislosti na různém nastavení velikosti derivační časové konstanty (černě) a proporcionálního zesílení (červeně).

Z grafů 46 a 47 a tabulek 2, 3 a 4 je též patrné, že při vyladění PID vazby na hodnotu $P = 6, I = 1, 5$ a $D = 6, 5$ se průměrná amplituda signálu chyby pohybuje pod 9 mV, a že offset (stejnoseměrná složka — DC) signálu chyby je pod 1 mV.

3.3.3. Měření kvality PID vazby s ohledem na kvalitu Mössbauerových spekter

Pro další posouzení kvality PID regulace byla vyvíjená PID vazba zařazena do sestavy Mössbauerova spektrometru. Byl využit experimentální spektrometr vyvíjený Bc. L. Kouřilem (viz [14]). Pomocí tohoto spektrometru byla měřena spektra kalibračního standardu α -železa. Porovnáním polohy změřených spektrálních čar Mössbauerova spektra a jejich známých pozic lze usuzovat na různé parametry určující kvalitu spektrometru.

Hlavní parametr který určuje kvalitu Mössbauerova spektrometru je nelinearita rychlostní osy. Ta se spočítá tak, že šest čar experimentálního spektra standardu (např. α -železa) se aproximuje Lorentzovou funkcí a nelinearita se určí metodou nejmenších čtverců podle rovnice (17)

$$non(i) = \frac{x(i) - a \cdot v(x) - b}{v(6) - v(1)}, \quad (17)$$

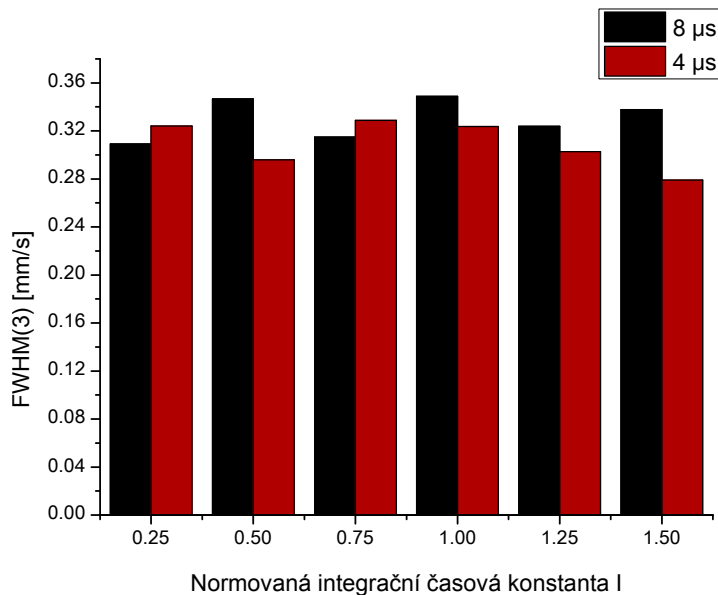
kde i ($i = 1, 2, \dots, 6$) je číslo čáry, $x(i)$ experimentální pozice čáry, $v(i)$ teoretická pozice čáry a a a b parametry z výpočtu metody nejmenších čtverců, viz [8].

Zatímco nelinearita rychlostní osy charakterizuje spíše stálou časově neměnnou regulační odchylku, další parametr – šířka spektrálních čar v polovině minima (tzv. FWHM - Full Width at Half of Minimum) je dána vlastnostmi vzorku a u stejného vzorku se zvyšuje spíše náhodným šumem v signálu rychlosti, který způsobuje rozmazání a rozšíření spektrálních čar. V tabulce 5 jsou uvedeny naměřené hodnoty průměrných nelinearit \overline{non} , které jsou prostým aritmetickým průměrem nelinearit jednotlivých spektrálních čar nesloženého spektra $\overline{non} = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} non(i)$. Dále jsou v tabulce uvedeny šířky třetí spektrální čáry v polovině minima FWHM spekter kalibračního vzorku pro různé parametry PID vazby a pro různou vzorkovací periodu a rozsah A/D převodníku. Všechny výše uvedené parametry byly ze spekter spočítány pomocí programu MOFAST. Pro lepší porovnání jsou jednotlivé parametry zobrazeny v grafech na obrázcích 48 – 51.

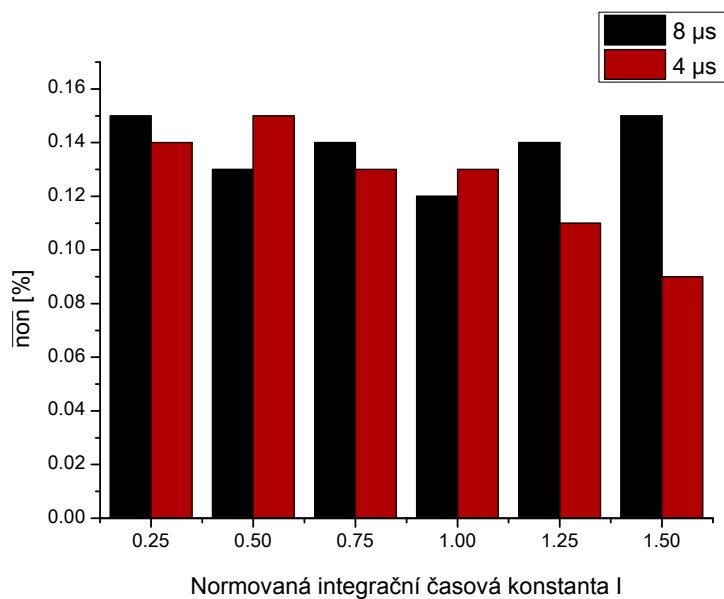
Pro získání dalších parametrů byla spektra vyfitována pomocí fitovacího programu MossWinn. Fitování je proces, při němž jsou experimentálně naměřená data prokládána křivkou (v tomto případě Cauchy-Lorentzovou funkcí) a jsou z něj určovány různé parametry. Parametry získané fitem spektra jsou uvedeny v tabulce 6. Parametr χ^2 určuje, jak fit vyhovuje naměřeným datům. Spočítá se

Tabulka 5 | Průměrná nelinearita \overline{non} a $FWHM$ třetí spektrální čáry spekter kalibračního vzorku pro různé parametry PID vazby.

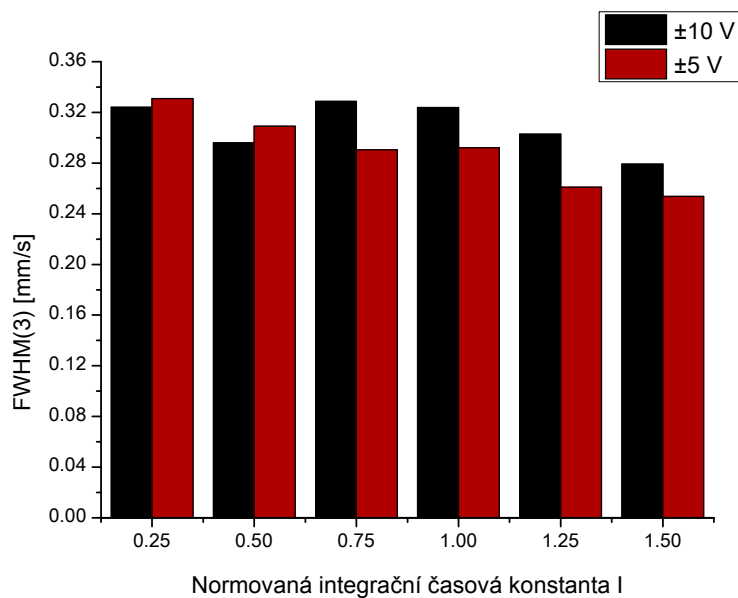
Měření	P	I	D	T [μ s]	Rozs. [V]	$non(i)$ [%]	$FWHM(3)$ [mm/s]
1	6	0,25	6,5	4	± 10	0,14	0,32412
2	6	0,50	6,5	4	± 10	0,15	0,29598
3	6	0,75	6,5	4	± 10	0,13	0,32870
4	6	1,00	6,5	4	± 10	0,13	0,32376
5	6	1,25	6,5	4	± 10	0,11	0,30280
6	6	1,50	6,5	4	± 10	0,09	0,27918
7	6	0,25	6,5	8	± 10	0,15	0,30906
8	6	0,50	6,5	8	± 10	0,13	0,34680
9	6	0,75	6,5	8	± 10	0,14	0,31492
10	6	1,00	6,5	8	± 10	0,12	0,34882
11	6	1,25	6,5	8	± 10	0,14	0,32384
12	6	1,50	6,5	8	± 10	0,15	0,33768
13	6	0,25	6,5	4	± 5	0,18	0,33092
14	6	0,50	6,5	4	± 5	0,16	0,30916
15	6	0,75	6,5	4	± 5	0,12	0,29054
16	6	1,00	6,5	4	± 5	0,09	0,29202
17	6	1,25	6,5	4	± 5	0,08	0,26102
18	6	1,50	6,5	4	± 5	0,07	0,25372



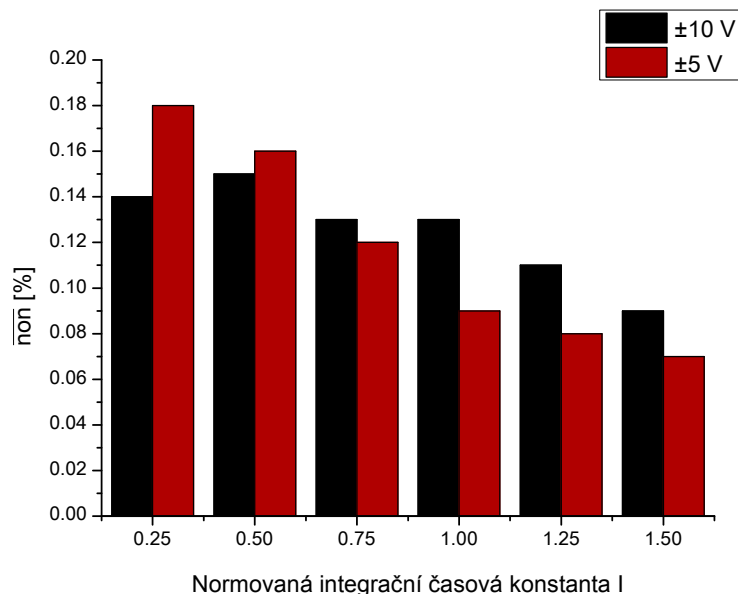
Obrázek 48 | Porovnání šířek 3. spektrální čáry pro různé parametry I a různé vzorkovací periody.



Obrázek 49 | Porovnání nelinearit rychlostí osy pro různé parametry I a různé vzorkovací periody..



Obrázek 50 | Porovnání šířek 3. spektrální čáry pro různé parametry I a různé rozsahy A/D převodníku.



Obrázek 51 | Porovnání nelinearit rychlostní osy pro různé parametry I a různé rozsahy A/D převodníku.

pomocí vztahu

$$\chi^2(\underline{\nu}) = \sum_{i=1}^h \frac{W_i - f_i(\underline{\nu})^2}{W_i}, \quad (18)$$

kde W_i popisuje počet impulzů v i -tém kanálu Mössbauerova spektra, h je počet kanálů spektra a f_i je hodnota fitovací funkce v i -tém kanálu spektra. Normované χ_{norm}^2 se spočítá jako

$$\chi_{norm}^2 = \frac{\chi^2}{DOF}, \quad (19)$$

kde DOF je stupeň volnosti, který je rozdílem čísla fitovaného kanálu a čísla fitovaného parametru, viz [17]. Hodnoty χ^2 a χ_{norm}^2 sice závisí na správnosti fitu, ale jsou do značné míry také ovlivněny i kvalitou spektra, která je ovlivněna kvalitou spektrometru a jeho PID vazby.

Dalším parametrem uvedeným v tabulce 6 je šířka fitované spektrální čáry v polovině minima $FWHM_{fit}$. Tento parametr se liší od $FWHM(i)$ uvedené v tabulce 5 hlavně tím, že $FWHM_{fit}$ je šířka v polovině minima Lorentzovy funkce, kterou se spektrum fituje, zatímco $FWHM(i)$ je šířka naměřené spektrální čáry. Šířka spektrální čáry v polovině minima fitované funkce je u všech spektrálních čar jednoho spektra stejná, zatímco u naměřeného spektra může být vlivem nelinearity rychlostní osy různá.

Posledním parametrem uvedeným v tabulce 6 je rezonanční efekt ε . Ten je dán vztahem

$$\varepsilon = \frac{I(\infty) - I(0)}{I(\infty)}, \quad (20)$$

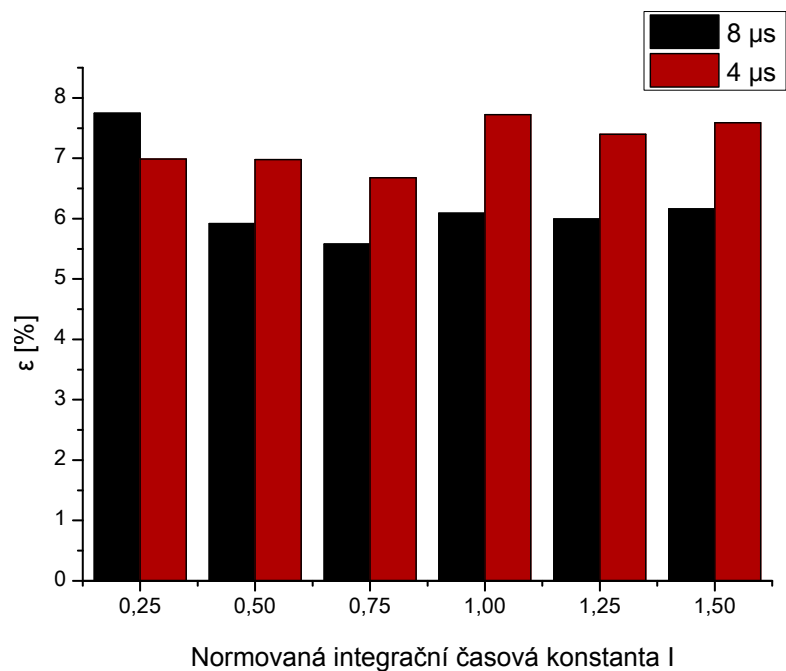
kde $I(\infty)$ je intenzita prošlého záření mimo rezonanci neboli úroveň pozadí a $I(0)$

je minimum spektrální čáry. Z dat tabulce 6 vyplývá, že naměřená spektra mají nižší rezonanční efekt. To je dáno pravděpodobně tím, že byl použit vysoce aktivní zářič a k tomu scintilační detektor s NaI:Tl krystalem. Tento detektor nedokázal dostatečně rozlišit fotony o rezonanční energii 14,4 keV od nerezonančních fotonů o energii 6,3 keV. Velká část fotonů tudíž vzorkem proletí a zvyšuje tak úroveň pozadí, zatímco absorbována je jen malá část.

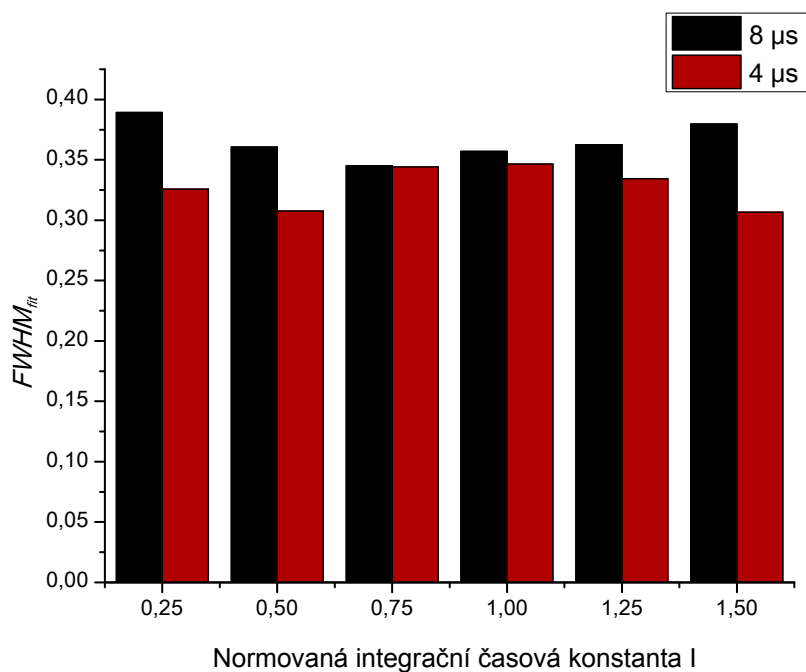
Tabulka 6 | Parametr χ^2 , normované χ_{norm}^2 , šířka čáry v polovině minima $FWHM_{fit}$ a rezonanční efekt ε pro různé nastavení PID vazby.

Č.	P	I	D	T [μ s]	Rozs. [V]	χ^2	χ_{norm}^2	$FWHM_{fit}$	ε [%]
1	6	0,25	6,5	4	± 10	669,3861	1,3281	0,3257	6,987
2	6	0,50	6,5	4	± 10	706,6451	1,4021	0,3076	6,975
3	6	0,75	6,5	4	± 10	700,0600	1,3890	0,3440	6,676
4	6	1,00	6,5	4	± 10	771,0379	1,5298	0,3466	7,723
5	6	1,25	6,5	4	± 10	600,7226	1,1919	0,3344	7,395
6	6	1,50	6,5	4	± 10	667,6901	1,3248	0,3066	7,588
7	6	0,25	6,5	8	± 10	576,4690	1,1438	0,3892	5,747
8	6	0,50	6,5	8	± 10	622,8702	1,2359	0,3606	5,919
9	6	0,75	6,5	8	± 10	556,8849	1,1027	0,3451	5,579
10	6	1,00	6,5	8	± 10	592,5164	1,1733	0,3569	6,087
11	6	1,25	6,5	8	± 10	672,8053	1,3349	0,3625	5,992
12	6	1,50	6,5	8	± 10	624,0938	1,2383	0,3796	6,159
13	6	0,25	6,5	4	± 5	578,3238	1,0041	0,3628	6,167
14	6	0,50	6,5	4	± 5	538,3841	1,0682	0,3232	7,093
15	6	0,75	6,5	4	± 5	558,5854	1,1605	0,3203	6,744
16	6	1,00	6,5	4	± 5	554,7303	1,1966	0,3025	7,126
17	6	1,25	6,5	4	± 5	550,8752	1,1603	0,3129	7,085
18	6	1,50	6,5	4	± 5	570,6136	1,1322	0,3094	7,572

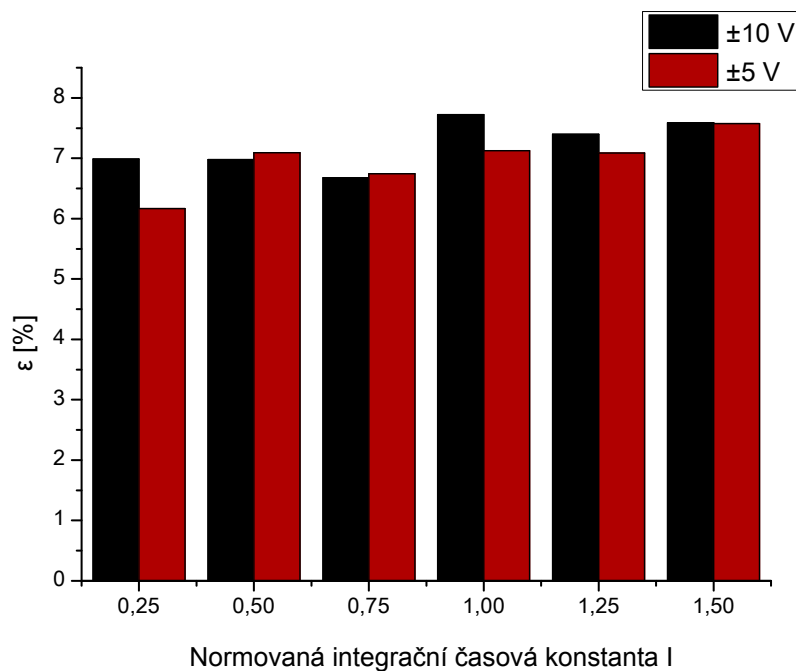
Pro jednodušší porovnání jsou některé parametry z tabulky 6 zaneseny do grafů. V grafech na obrázcích 52 a 53 je zobrazena závislost rezonančního efektu a šířek čar fitu spektra v polovině minima na normované integrační časové konstantě I při různé vzorkovací periodě. Na obrázcích 54 a 55 je zobrazena závislost rezonančního efektu a šířek čar fitu spektra v polovině minima na normované integrační časové konstantě I při různém rozsahu napětí A/D převodníku.



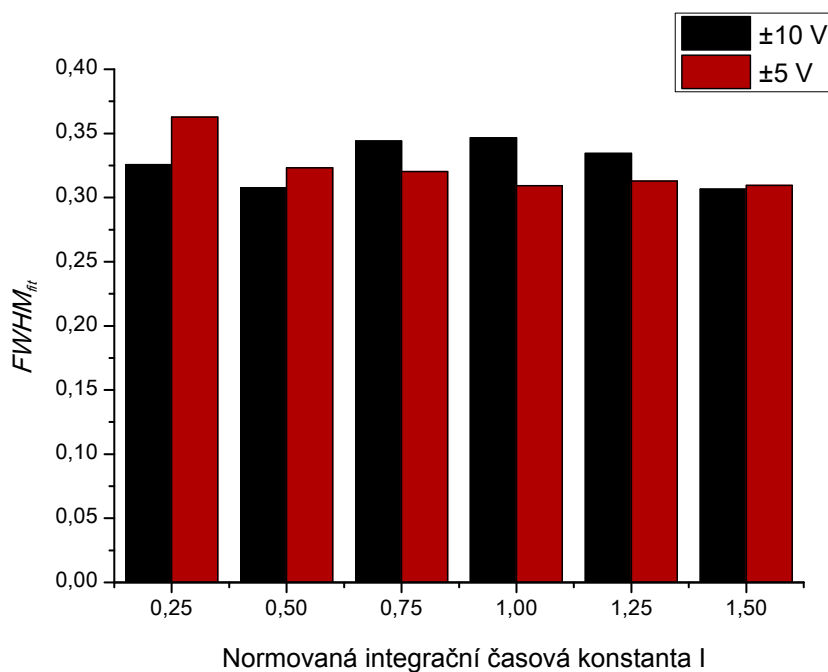
Obrázek 52 | Porovnání rezonančního efektu Mössbauerova spektra pro různé parametry I a různou vzorkovací periodou A/D převodníku.



Obrázek 53 | Porovnání šířek čar fitu spektra v polovině minima pro různé parametry I a a různou vzorkovací periodou A/D převodníku.



Obrázek 54 | Porovnání rezonančního efektu Mössbauerova spektra pro různé parametry I a různé rozsahy A/D převodníku.



Obrázek 55 | Porovnání šířek čar fitu spektra v polovině pro různé parametry I a různé rozsahy A/D převodníku.

4. Výsledky a diskuze

Z tabulky 5 a grafů na obrázcích 48 - 51 plyne, že nejlepších hodnot dosahuje nastavení, kde $P = 6$, $I = 1,5$ a $D = 6,5$ a pro vzorkovací periodu $4 \mu\text{s}$ a rozsah A/D převodníku ± 5 V. Veškeré parametry spektra naměřeného s tímto nastavením jsou v tabulce 7. Tyto parametry byly získány pomocí programu MOFAST. Samotné složené spektrum kalibračního vzorku α -železa měřené s parametry PID vazby $P = 6$, $I = 1,5$ a $D = 6,5$ je zobrazeno na obrázku 56.

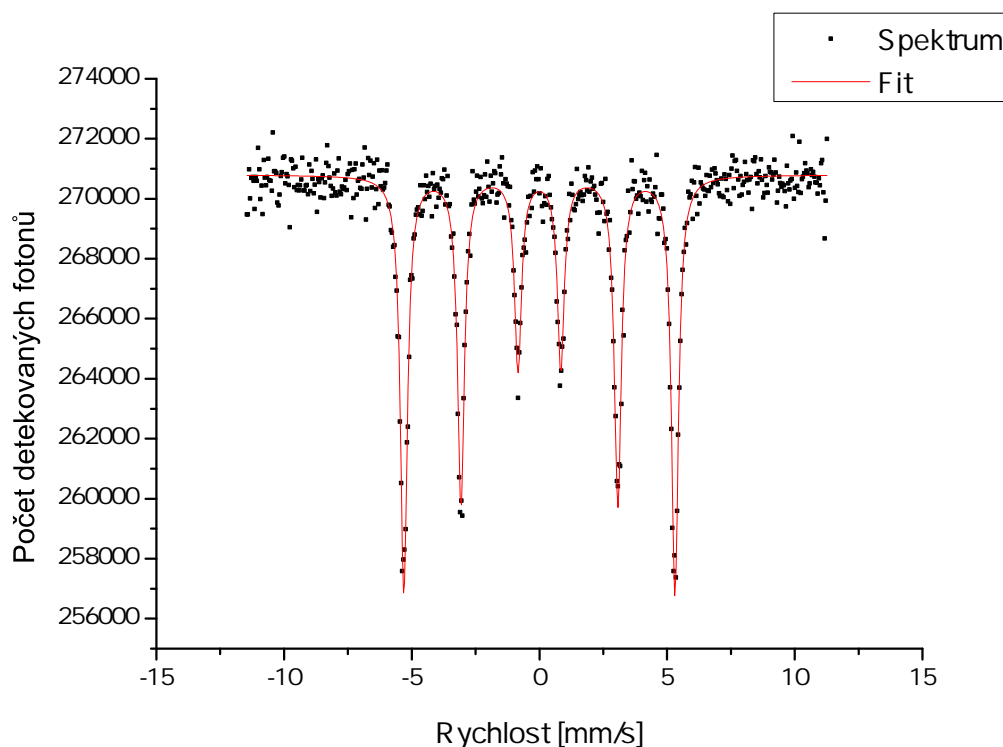
Tabulka 7 | Polohy čar Mössbauerova spektra ($x(i)$), nelinearita rychlostní osy ($non(i)$) a šířka spektrální čáry v polovině minima ($FWHM(i)$) první poloviny nesloženého Mössbauerova spektra odpovídajícího náběžné hraně signálu rychlosti (nahore) a sestupné hraně signálu rychlosti (dole) s optimálním nastavením PID regulátoru.

i	1	2	3	4	5	6
$x(i)$ [mm/s]	-5,31346	-3,08642	-0,85383	0,84108	3,06781	5,32113
$non(i)$ [%]	0,07376	0,06340	0,08832	0,04264	0,06743	0,07276
$FWHM(i)$ [mm/s]	0,32608	0,28630	0,25372	0,26102	0,33092	0,34870
$x(i)$ [mm/s]	-5,31223	-3,07804	-0,84683	0,85128	3,07237	5,29871
$non(i)$ [%]	0,01643	0,01936	0,05034	0,13847	0,01224	0,06458
$FWHM(i)$ [mm/s]	0,36308	0,31170	0,29200	0,33036	0,29924	0,32820

Z grafů 52 a 53 plyne, že lepších výsledků je dosaženo při použití rychlejšího vzorkování a menšího rozsahu A/D převodníku. Z výsledků je zřejmé, že velikost rezonančního efektu je pro různé nastavení normované integrační časové konstanty PID vazby téměř konstantní a tudíž nezávislé. Nejmenší šířky čáry funkce fitu v polovině minima je dosaženo při nastavení $P = 6$, $I = 1,5$ a $D = 6,5$, což odpovídá předchozímu porovnávání šířky třetí čáry experimentálně zjištěného Mössbauerova spektra.

V tabulce 8 jsou zobrazeny parametry tohoto spektra získané pomocí programu MossWinn. Kromě již dříve zmíněných parametrů χ^2 , χ_{norm}^2 , úrovně pozadí $I(\infty)$ a šířky fitu spektrální čáry v polovině minima $FWHM_{fit}$ jsou v tabulce obsaženy další parametry. Parametr TSA určuje plochu spektra vytyčenou úrovní pozadí a křivkou fitu. Parametry $A(1/6)$, $A(2/5)$ a $A(3/4)$ určují amplitudy funkce fitu pro první a šestou, druhou a pátou a třetí a čtvrtou čáru.

Spektrometr a vyvíjená PID vazba mohou rovněž pracovat v rozsahu rychlosti pohybového zařízení ± 20 mm/s, který je vhodný pro zkoumání prvků se „širším“ spektrem. Stačí na čelním panelu Mössbauerova spektrometru vyvíjeného L. Kouřilem přepnout rozsah napětí na ± 3 V (viz obrázek 25). Na obrázku 57 je zobrazeno spektrum kalibračního vzorku α -železa měřené na rychlostním rozsahu ± 20 mm/s. V tabulce 9 jsou zobrazeny parametry získané fitem spektra v programu MossWinn.



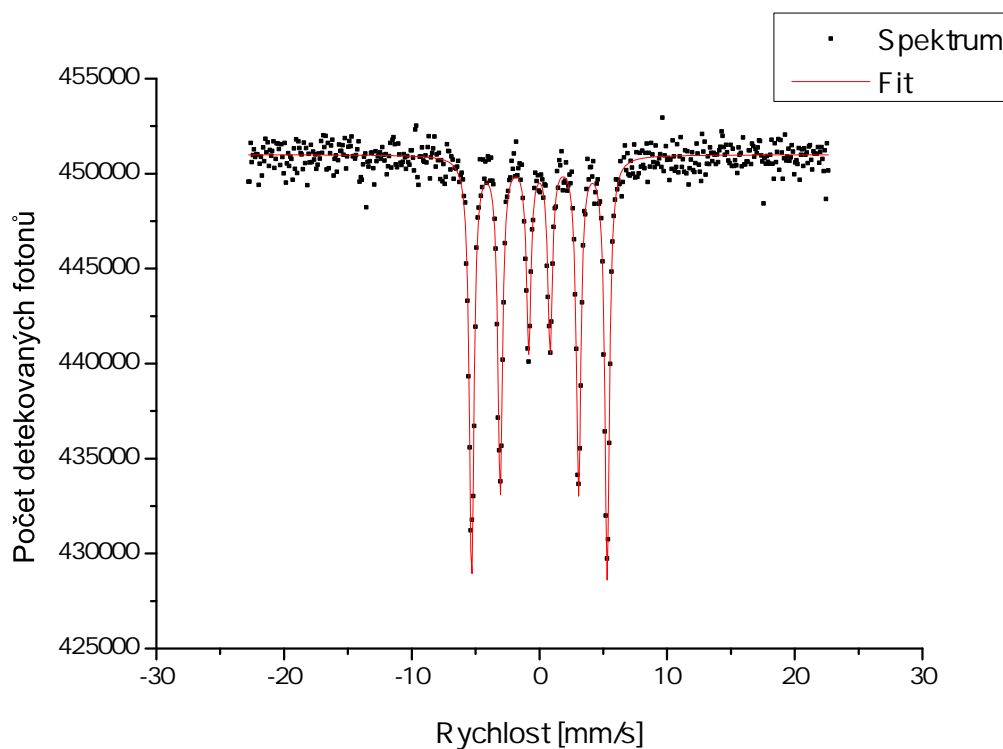
Obrázek 56 | Kalibrační spektrum α -železa měřené s parametry PID vazby $P = 6$, $I = 1,5$ a $D = 6,5$, $T = 4 \mu\text{s}$ a rozsahem A/D převodníku ± 5 V.

Tabulka 8 | Parametry kalibračního spektra α -železa zjištěné programem MossWinn, měřené s parametry PID vazby $P = 6$, $I = 1,5$ a $D = 6,5$, vzorkovací periodou $T = 4 \mu\text{s}$ a rozsahem napětí A/D převodníku ± 10 V.

χ^2	570,6136	$A(1/6)$	7230,7066
χ_{norm}^2	1,1322	$A(2/5)$	5676,1033
TSA	32477,19	$A(3/4)$	3331,7840
$I(\infty)$	270802	$FWHM_{fit}$	0,3094

Tabulka 9 | Parametry kalibračního spektra α -železa zjištěné programem MossWinn, měřené s parametry PID vazby $P = 6$, $I = 1,5$ a $D = 6,5$ na rozsahu rychlosti pohybového zařízení ± 20 mm/s.

χ^2	625,3904	$A(1/6)$	15053,9767
χ_{norm}^2	1,2409	$A(2/5)$	11928,6081
TSA	67584,37	$A(3/4)$	6809,5986
$I(\infty)$	451000	$FWHM_{fit}$	0,4309



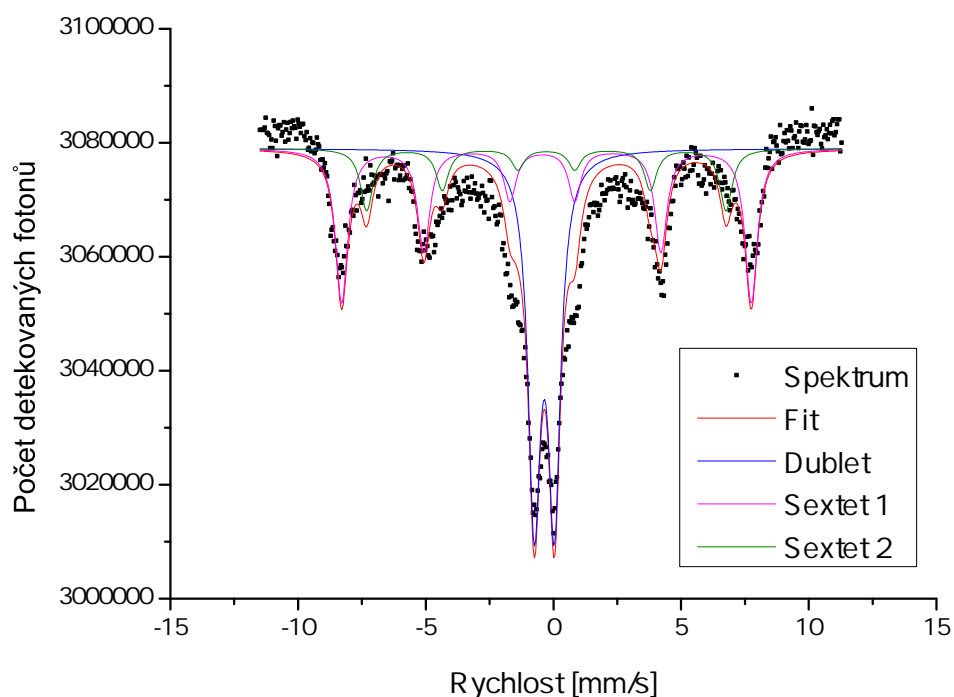
Obrázek 57 | Kalibrační spektrum α -železa měřené s parametry PID vazby $P = 6$, $I = 1,5$ a $D = 6,5$ a rozsahem rychlosti pohybového zařízení ± 20 mm/s.

4.1. Měření reálného vzorku

Pro ukázkou funkčnosti spektrometru vyvíjeného L. Kouřilem, který používá PID vazbu popisovanou v této práci, byl na tomto spektrometru změřen reálný vzorek. Jednalo se o vzorek obsahující oxidy železa, který byl připraven termickou dekompozicí octanu železnatého. Prekurzor octan železnatý vyrobený firmou Sigma Aldrich byl zahříván po dobu jedné hodiny v peci vyhřáté na $400\text{ }^{\circ}\text{C}$. Výsledkem byl vzorek obsahující směs nanočástic oxidů železa.

Vzorek byl nejprve připraven pro měření a následně vložen do spektrometru. U PID vazby spektrometru byly nastaveny nejlepší parametry, které byly zjištěny předchozími měřeními - a to $P = 6$, $I = 1,5$ a $D = 6,5$. Samotné měření vzorku trvalo celkem pět dní. Naměřené a vyfitované spektrum je zobrazeno na obrázku 58. Při fitování spektra bylo jako kalibrační spektrum použito spektrum na obrázku 56, měřené při stejném nastavení spektrometru.

Ve spektru jsou vidět tři komponenty. Dva sextety a jeden dublet. Jeden sextet odpovídá hematitu a druhý maghemitu. Dublet je způsoben superparamagnetickou složkou ve vzorku, která zahrnuje jak hematit, tak maghemit.



Obrázek 58 | Mössbauerovo spektrum směsi oxidů železa měřené výše popsaným spektrometrem.

Tabulka 10 | Tabulka jednotlivých parametrů vzorku.

Komponenta spektra	Dublet	Sextet 1	Sextet 2
Zastoupení [%]	20,8	69,9	9,4
Amplituda	35641,3840	7775,8205	2678,5508
Izomerní posuv	0,1597	0,2750	0,3769
Magnetické pole [T]	-	32,6433	51,6080
Kvadrupólové štěpení	0,7343	0,0000	-0,2000
Šířka čáry	0,5820	0,5096	0,5800
Odpovídající látka	superparamagnetická komb. hem. a magh.	maghemit	hematit

Závěr

Hlavním cílem této diplomové práce byl vývoj a optimalizace řízení sestavy lineárního motoru s PID regulátorem pohybu u Mössbauerova spektrometru s použitím zařízení na platformě sbRIO. Samotná PID vazba byla realizována na FPGA poli zařízení sbRIO a na real-time procesoru zařízení sbRIO běží pomocné programy. Díky tomu se povedlo vytvořit velmi přesný PID regulátor srovnatelný s analogovými systémy. Analogové PID regulátory vyvíjené a vyráběné v Regionálním centru pokročilých technologií a materiálů v Olomouci mají garantovanou nelinearitu rychlostní osy pod 0,1 %. PID vazba vytvořená pomocí zařízení sbRIO má nelinearitu rychlostní osy 0,08 %, což je rovněž pod 0,1 %. Analogové PID vazby sice dokáží dosáhnout ještě o trochu lepších výsledků (0,05 %), ale na druhou stranu neumožňují například ladění pomocí vzdáleného přístupu přes internet, díky čemuž není potřebná bezprostřední přítomnost operátora u zařízení. Další výhodou je snadná implementace pokročilých postupů na další minimalizaci nelinearity rychlostní osy, například těch zmíněných v kapitole 1.4.

V současné době je spektrometr vyvinutý L. Kouřilem, který využívá PID vazbu popisovanou v této práci, využíván v RCPTM k měření skutečných vzorků v rámci materiálového výzkumu, ale i v rámci zakázkových měření. Další vývoj bude směřovat k dalšímu vylepšování PID vazby a následnému vývoji celého spektrometru na platformě sbRIO, který bude plně autonomní (včetně automatického ladění parametrů PID vazby) a bude ovládán přes internet.

Seznam použitých zdrojů

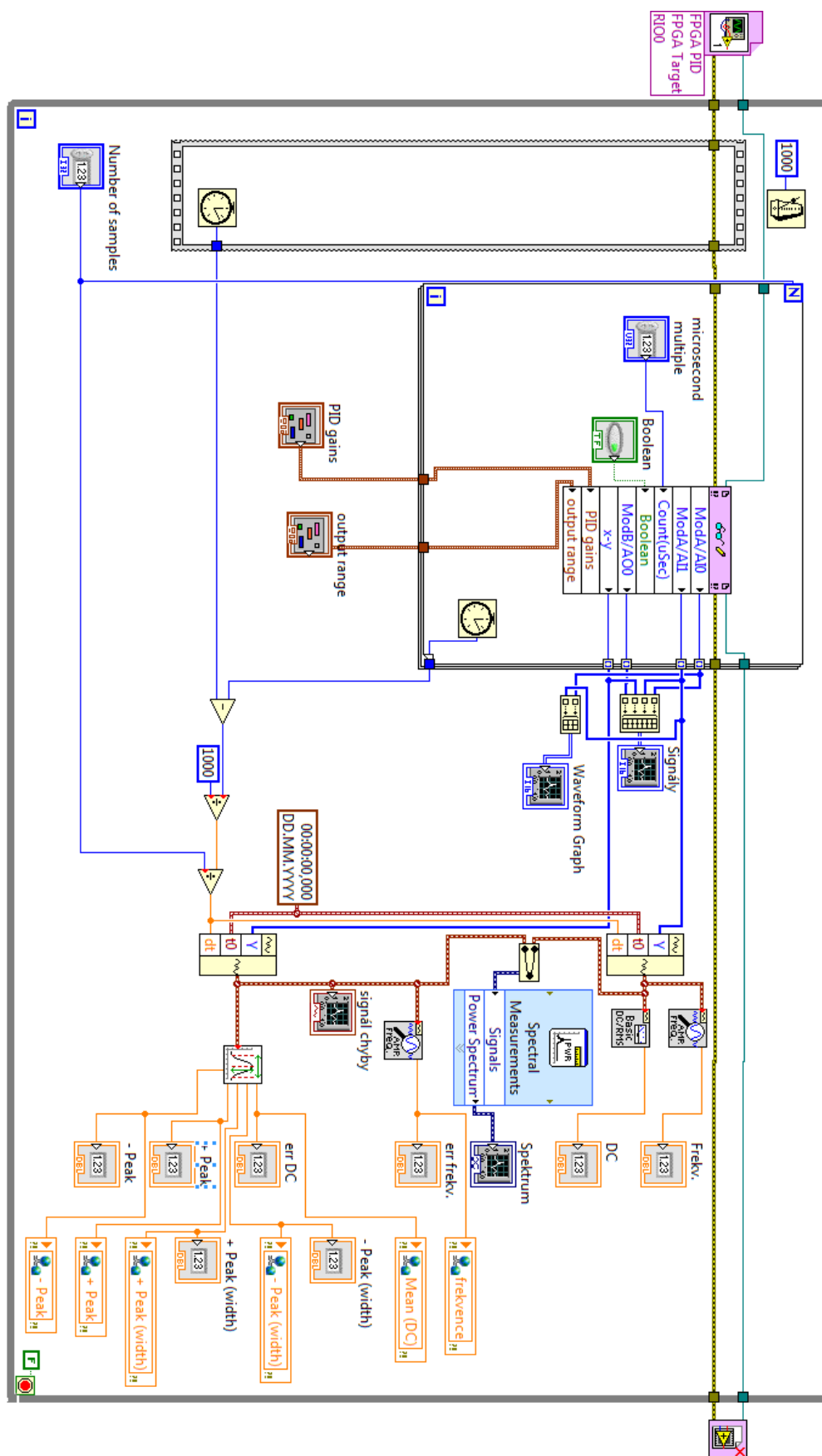
- [1] PECHOUŠEK, J. *Mössbauerův spektrometr jako virtuální měřicí přístroj v modulárním systému PXI, Dizertační práce*. Olomouc: PřF UP, 2006
- [2] MAŠLÁŇ, M. *Mössbauerova spektroskopie*. Olomouc: Vydavatelství Univerzity Palackého v Olomouci, 1993. ISBN 8070672692.
- [3] PECHOUŠEK, J., VŮJTEK, M., NOVÁK, P., NAVAŘÍK, J. a FRYDRYCH, J. *Číslicové měřicí systémy pro aplikovanou fyziku*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2012. ISBN 978-80-244-3136-9.
- [4] BALÁTĚ, J. *Automatické řízení*. Praha: BEN Technická literatura, 2004. ISBN 8073001489.
- [5] MICHAL, V., PREMONT, C., PILLONET, G. a ABOUCHI, N. *Single active element PID controllers* [online]. [cit. 2014-04-20]. Dostupné z: <http://www.postreh.com/vmichal/papers/PID-Radio.pdf>
- [6] KANKELEIT, E. Feedback in Electromechanical Drive Systems. *Mössbauer Effect Methodology*. Boston, MA: Springer US, 1965, s. 47. DOI: 10.1007/978-1-4757-1541-5_4.
- [7] BANCROFT, G. M., MADDOCK, A. G. a WARD, J., A simple Mössbauer Spectrometer. *Chemistry and Industry*. [Velká Británie]: [s.n], 1966
- [8] EVDOKIMOV, V. A., MASHLAN, M., ZAK, D., FYODOROV, A. A., KHOLMETSII, A. L., a MISEVICH, O. V. Mini and micro transducers for Mössbauer spectroscopy. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 1995, vol. 95, issue 2, s. 278-280. DOI: 10.1016/0168-583X(94)00611-3. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0168583X94006113>
- [9] PECHOUŠEK, J., JANČÍK, D., FRYDRYCH, J., NAVAŘÍK, J., a NOVÁK, P. Setup of Mössbauer spectrometers at RCPTM. *AIP Conference proceedings*. 2012, s. 186-193. DOI: 10.1063/1.4759489. Dostupné z: <http://scitation.aip.org/content/aip/proceeding/aipcp/10.1063/1.4759489>
- [10] NATIONAL INSTRUMENTS. *Single Board RIO* [online]. [cit. 2013-12-11]. Dostupné z: www.ni.com/singleboard
- [11] NATIONAL INSTRUMENTS. *NI sbRIO-961x / 963x / 964x and NI sbRIO-9612XT / 9632XT / 9642XT user guide*. Austin: National Instruments, 2010. Dostupné také z: www.ni.com/pdf/manuals/375052c.pdf

- [12] NATIONAL INSTRUMENTS. *Compact RIO* [online]. [cit. 2013-12-11]. Dostupné z: www.ni.com/compactrio
- [13] PECHOUSEK, J., PROCHAZKA, R., MASHLAN, M., JANCIK, D., FRYDRYCH, J. a MISEVICH, O. V. Digital proportional-integral-derivative velocity controller of a Mössbauer spectrometer. *Measurement Science and Technology*. 2009-01-01, vol. 20, issue 1, s. 017001-. DOI: 10.1088/0957-0233/20/1/017001. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/0957-0233/20/i=1/a=017001>
- [14] KOUŘIL L., *Vývoj pokročilého měřicího systému na bázi samostatných přístrojů*, Diplomová práce. Olomouc: Přf UP, 2014
- [15] NATIONAL INSTRUMENTS. *National Instruments Knowledge Base: What Kind of Analog-to-Digital Converters Are Used in National Instruments Multifunction DAQ Devices?* [online]. 2005 [cit. 2014-03-31]. Dostupné z: <http://digital.ni.com/public.nsf/allkb/32FD9AA817D0EBE68625708C005E1B26>
- [16] NATIONAL INSTRUMENTS. *NI 9205 OPERATING INSTRUCTIONS AND SPECIFICATIONS*. Austin: National Instruments, 2008. Dostupné také z: <http://www.ni.com/pdf/manuals/374188d.pdf>
- [17] KLENCSÁR, Z. *MossWinn 4.0Pre Manual*. Budapest: [s.n], 2013. Dostupné také z: <http://www.mosswinn.com/downloads/mosswinn.pdf>

Seznam použitých symbolů a zkratek

A/D	analogově digitální
A_p	amplituda signálu chyby
A_{p-}	amplituda záporného píku signálu chyby
A_{p+}	amplituda kladného píku signálu chyby
AI	analogový vstup
AO	analogový výstup
BMS	Mössbauerova spektroskopie zpětného rozptylu
CEMS	Mössbauerova spektroskopie konverzních elektronů
CXMS	Mössbauerova spektroskopie konverzního rentgenového záření
D	normovaná derivační časová konstanta
DAQ	data acquisition (sběr dat)
DC	stejnoseměrná složka
DSP	digital signal processing (digitální zpracování signálu)
ε	rezonanční efekt
$e(t)$	regulační odchylka
E_γ	energie gama záření
E_r	energie zpětného rázu
FPGA	programovatelné hradlové pole
$FWHM$	celá šířka v polovině maxima respektive minima
I	normovaná časová integrační konstanta
$I(\infty)$	úroveň pozadí Mössbauerova spektra
k_R	proporcionální zesílení
<i>non</i>	nelinearita
P	proporcionální zesílení
PID	proporcionálně integračně derivační
PSD	proporcionálně sumačně diferenční
RCPTM	Regionální centrum pokročilých technologií a materiálů v Olomouci
Rozs.	rozsah napětí A/D převodníku
T	vzorkovací perioda
T_D	derivační časová konstanta
T_I	integrační časová konstanta
TMS	transmisní Mössbauerova spektroskopie
TSA	plocha Mössbauerova spektra vytyčená fitovací křivkou
$u(t)$	akční veličina (signál přivedený na řídicí cívku)
VI	virtuální měřicí přístroj
$w(t)$	referenční signál
$y(t)$	regulovaná veličina (signál z měřicí cívky)
$z(x)$	ekvivalentní porucha

Příloha 1. Blokový diagram aplikace RT.vi



Příloha 2. Obsah příloženého CD

DP_Pavel_Kohout.pdf	elektronická verze diplomové práce
img/	adresář s obrázky, schémata a fotodokumentací
SbRIO PID/	adresář obsahující VI spustitelné na zařízení sbRIO
FPGA.vi	aplikace spustitelná na FPGA poli zařízení sbRIO
Proměnné.lvlib	knihovna se sdílenými proměnnými
RT.vi	VI spustitelné na Realtime procesoru zařízení sbRIO
RT_Průměrování	aplikace na průměrování signálu chyby
SbRIO.lvproj	projekt s VI spustitelnými na zařízení sbRIO
SubVIs/	adresář obsahující podprogramy
Analýza.vi	podprogram na analýzu signálu chyby
SbRIO Remote/	adresář s aplikací na vzdálené ovládání zařízení sbRIO
Vzdálený přístup.vi	aplikace pro vzdálený přístup k sbRIO
Spektra/	adresář obsahující naměřená a vyhodnocená spektra