



PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA
UNIVERZITA PALACKÉHO V OLMOUCI

KATEDRA
EXPERIMENTÁLNÍ FYZIKY

Dizertační práce

Mössbauerova spektroskopie
s pokročilou modulací energie
záření gama

Autor	Mgr. Pavel Kohout
Vedoucí práce	doc. RNDr. Jiří Pechoušek, Ph.D.
Konzultant	prof. RNDr. Miroslav Mašláň, CSc.
Studijní obor	Aplikovaná fyzika
Forma studia	Prezenční
Rok	2018

Jméno a příjmení autora	Mgr. Pavel Kohout
Název práce	Mössbauerova spektroskopie s pokročilou modulací energie záření gama
Typ práce	dizertační
Pracoviště	Katedra experimentální fyziky
Vedoucí práce	doc. RNDr. Jiří Pechoušek, Ph.D.
Konzultant	prof. RNDr. Miroslav Mašláň, CSc.
Rok obhajoby práce	2018
Počet stran	50
Počet příloh	0
Jazyk	český
Abstrakt	Cílem této práce je vývoj sestavy Mössbauerova spektrometru s pokročilou modulací energie na průmyslovém modulárním počítači CompactRIO od firmy National Instruments™ a jeho integrovaném FPGA poli. První část práce se zabývá vývojem spektrometrické aplikace běžící na zařízení CompactRIO, která provádí generování referenčního signálu, PID regulaci, sběr signálu z detektoru a registraci spektra. Druhá část se zabývá aplikací zlepšující linearitu rychlostní osy mössbauerovských spekter a jejím srovnáním s klasickým měřením využívajícím trojúhelníkový signál rychlosti a dalšími linearizačními metodami
Klíčová slova	Mössbauerův spektrometr, Mössbauerova spektroskopie, virtuální instrumentace, FPGA, linearizace, sinová rychlost

Author's first name and surname	Mgr. Pavel Kohout
Title	Mössbauer spectroscopy with advanced gamma ray energy modulation
Type of thesis	thesis
Department	Department of Experimental Physics
Supervisor	doc. RNDr. Jiří Pechoušek, Ph.D.
Consultant	prof. RNDr. Miroslav Mašláň, CSc.
Year of presentation	2018
Number of pages	50
Number of appendices	0
Language	czech
Abstract	The aim of this work is development of Mössbauer spectrometer setup with advanced gamma ray energy modulation. This spectrometer is based on National Instruments' CompactRIO industrial modular computer with integrated FPGA. Part of the work is focused on development of spectrometer application, which generates the reference signal, PID regulation, detector data acquisition and building the spectrum. Second part deals with application for linearization and investigating the quality of resulted linearized Mössbauer spectra comparing them with those obtained using traditional triangular velocity signal and also other linearization methods.
Keywords	Mössbauer spectrometer, Mössbauer spectroscopy, virtual instrumentation, FPGA, linearity, sine velocity

Prohlašuji, že jsem předloženou dizertační práci vypracoval samostatně pod vedením doc. RNDr. Jiřího Pechouška, Ph.D. a prof. RNDr. Miroslava Mašláně, CSc. a že jsem použil zdrojů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

V Olomouci dne

.....
podpis

Děkuji svému školiteli doc. RNDr. Jiřímu Pechouškovi, Ph.D. a svému konzultantovi prof. RNDr. Miroslavu Mašláňovi, CSc. za vedení, ochotnou pomoc, cenné rady a čas, který mi věnovali při vzniku této práce. Dále chci poděkovat své rodině, že mi umožnili studovat a po celou dobu studia mě podporovali. Také děkuji své ženě Aleně za trpělivost a shovívavost, které mi poskytuje při mé práci. V neposlední řadě děkuji za finanční podporu interním grantům Univerzity Palackého (IGA_PrF_2018_002 a IGA_PrF_2018_021).

Obsah

Přehled autorových publikací	7
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
1.2. PID regulace	13
1.2.1. PID regulátor	14
1.2.2. Číslicový PID regulátor	15
1.3. Možná vylepšení Mössbauerových spektrometrů	16
1.3.1. Generování dodatečného signálu eliminujícího časově stálou chybu	16
1.3.2. Opravy nelinearity dodatečnou korekcí	16
2. Použité přístroje a software	17
2.1. Virtuální instrumentace	17
2.1.1. Virtuální měřicí přístroj	17
2.1.2. LabVIEW™	17
2.2. FPGA – programovatelná hradlová pole	18
2.2.1. Využití FPGA v Mössbauerově spektroskopii a jaderné fyzice obecně	18
2.3. Systémy NI RIO	18
2.3.1. Systém NI CompactRIO	19
2.3.2. Kontrolér NI cRIO-9038	19
2.3.3. Karta analogových vstupů NI 9223	20
2.3.4. Karta analogových výstupů NI 9263	20
2.3.5. Karta digitálních vstupů a výstupů NI 9402	21
2.3.6. Karta digitálního osciloskopu NI PCI-5114	21
2.4. Scintilační detektor se zesilovačem a jednonábovým analyzátozem	21
2.5. Pohybové zařízení	22
2.5.1. Výkonový zesilovač referenčního a měřeného signálu rychlosti	23
2.5.2. Laserový systém Keyence LK-G	23
3. Vývoj spektrometru s pokročilým řízením pohybu na platformě CompactRIO	25
3.1. Program na FPGA	25
3.1.1. Virtuální generátor rychlosti	26
3.1.2. PID regulátor	27
3.1.3. Automatické ladění PID parametrů	29
3.1.4. Detekce signálu a tvorba Mössbauerova spektra	30
3.2. Program běžící na operačním systému reálného času	31
3.2.1. Další možnosti zobrazení čelního panelu	32
4. Rozšiřující režimy spektrometru	35
4.1. Využití sinusového průběhu rychlosti ke zlepšení linearit spektra	35
4.1.1. Porovnání metody	36
4.2. Linearizace modulací referenčního signálu pomocí signálu chyby měřeného laserovým vibrometrem	39
4.3. Opravy nelinearity dodatečnou korekcí	40
4.4. Porovnání všech výše uvedených metod	40
Závěr	43
Seznam použitých zdrojů	44

Přehled autorových publikací

- **KOHOUT Pavel**, Tomáš FRANK, Jiří PECHOUŠEK a Lukáš KOUŘIL. Mössbauer spectra linearity improvement by sine velocity waveform followed by linearization process, *Measurement Science and Technology*. 2018, DOI: 10.1088/1361-6501, Impakt faktor (2017): 1,685
- **KOHOUT Pavel**, Lukáš KOUŘIL, Jakub NAVAŘÍK, Petr NOVÁK a Jiří PECHOUŠEK. (2014) Optimized Linear motor and Digital PID Controller Setup Used in Mössbauer Spectrometer. *American Institute of Physics conference Proceedings*, vol. 1622, DOI: 10.1063/1.4898610, konferenční sborník, recenzováno a vedeno v databázích WoS a Scopus
- PECHOUŠEK Jiří, Daniel KONEČNÝ, Petr NOVÁK, Lukáš KOUŘIL, **Pavel KOHOUT**, Cüneyt ÇELIKTAŞ a Milan VŮJTEK. (2016) Software emulator of nuclear pulse generation with different pulse shapes and pile-up. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2016, 828, 81-85 DOI: 10.1016/j.nima.2016.05.032, Impakt faktor (2017): 1,336
- NOVÁK Petr, Jiří PECHOUŠEK, Vít PROCHÁZKA, Jakub NAVAŘÍK, Lukáš KOUŘIL, **Pavel KOHOUT**, Vlastimil VRBA a Libor MACHALA. Time differential ^{57}Fe Mössbauer spectrometer with unique 4π YAP: Ce 122.06keV gamma-photon detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2016, 832, 292-296 DOI: 10.1016/j.nima.2016.06.136 2017, Impakt faktor (2017): 1,336
- KOUŘIL Lukáš, **Pavel KOHOUT**, Petr NOVÁK, Jakub NAVAŘÍK, Jiří PECHOUŠEK. (2014) SETUP OF THE MÖSSBAUER SPECTROMETER BASED ON STAND-ALONE INSTRUMENTS – A CASE STUDY. *American Institute of Physics conference Proceedings*, vol. 1622, DOI: 10.1063/1.4898611, konferenční sborník, recenzováno a vedeno v databázích WoS a Scopus
- PECHOUŠEK Jiří, Petr NOVÁK, Jakub NAVAŘÍK, **Pavel KOHOUT** a Libor MACHALA. (2013) Mössbauer Spectroscopy System with Increased Performance and Flexibility — Utilization In Material Research. *Journal of Electrical Engineering*, vol. 64, issue 6, s. -. DOI: 10.2478/jee-2013-0059, Impakt faktor (5 letý průměr) 0,524
- KOUŘIL Lukáš, Jiří PECHOUŠEK, Petr NOVÁK, Jakub NAVAŘÍK a **Pavel KOHOUT**. (2018) Toroidal proportional gas flow counter for conversion X-ray Mössbauer spectroscopy, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, vol. 432, pp. 55–59, DOI: j.nimb.2018.07.020, Impakt faktor (2017): 1,323
- KOUŘIL Lukáš, Jiří PECHOUŠEK, Petr NOVÁK, Jakub NAVAŘÍK a **Pavel KOHOUT**. *Prstencový plynový detektor ionizujícího záření*, Úřad průmyslového vlastnictví České republiky, přihláška českého patentu

Úvod

V Roce 1958 objevil německý fyzik Rudolf Ludwig Mössbauer v oblasti jaderné fyziky jev bezodrazové rezonanční absorpce a emise záření gama v pevných látkách [1], který byl posléze nazván po něm a za který v roce 1961 obdržel Nobelovu cenu za fyziku [2]. Spektroskopie založená na tomto jevu se následně stala metodou rozšířenou do mnoha vědních disciplín. Na přelomu 20. a 21. století se v oblasti vývoje měřicích a testovacích systémů začíná využívat technika virtuální instrumentace, která umožňuje nahradit dříve složité analogové obvody počítačovými technologiemi [3,4]. 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 například přes internet. Další technologie, která se objevila na sklonku 20. století [5] a v posledních letech nabývá na významu, jsou programovatelná hradlová pole, která díky své konfigurovatelnosti, determinismu a rychlosti našla široké uplatnění v mnoha oborech, kde je potřeba velkého výpočetního výkonu – tedy i v jaderné fyzice. Tato práce si klade za cíl spojit výše uvedené technologie a vyvinout Mössbauerův spektrometr s pokročilou modulací energie záření gama. Práce navazuje na autorovu diplomovou práci [6], která se zabývala optimalizací řízení sestavy lineárního motoru s PID regulátorem pohybu u Mössbauerova spektrometru.

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 [7]. Díky tomu se Mössbauerova spektroskopie stala důležitou experimentální metodou nejenom fyziky pevných látek a chemie, ale i geologie a mineralogie [8] (a to nejen na Zemi, ale i na jiných planetách [9]), archeologie [10], biologie, medicínského výzkumu a průmyslové kontroly [7].

1.1.1. Mössbauerův jev

Bezodrazová 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 však daný atom pevně vázán v krystalové mřížce, zpětný ráz absorbuje celá krystalová mřížka – hmotnost m pak bude odpovídat hmotnosti celého krystalu a proto se bude velikost zpětného rázu limitně blížit k nule [7]. Například když se rozpadne ^{57}Co na ^{57}Fe je emitováno γ záření o energii 14,4 keV. Šířka spektrální čáry tohoto záření je pouze $4,7 \cdot 10^{-9}$ eV, což odpovídá dopplerovskému posunu pouhých 0,2 mm/s. To je mnohem méně než energie zpětného rázu volné částice, která je pro atom ^{57}Fe rovna $2 \cdot 10^{-3}$ eV [11]. Ke stejnému efektu dojde i při absorpci záření γ . V případě že zářič a vzorek jsou chemicky identické, pak dojde k překrytí absorpční a emisní čáry jaderného přechodu. Princip Mössbauerova jevu je podrobněji vysvětlen např. v [7], [11] nebo [12].

1.1.2. Experimentální pozorování Mössbauerova jevu

K experimentálnímu pozorování Mössbauerova jevu se v praxi využívá modulace 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. Změny energie Dopplerovskou modulací jsou extrémně malé (řádově v nanoelektronvoltech), díky tomu se nabízí možnost zkoumat hyperjemné interakce atomo-

vého jádra s jeho elektronovým obalem (který je ovlivněn chemickými vazbami a okolím atomu) a s vnitřním elektrickým a magnetickým polem uvnitř látek.

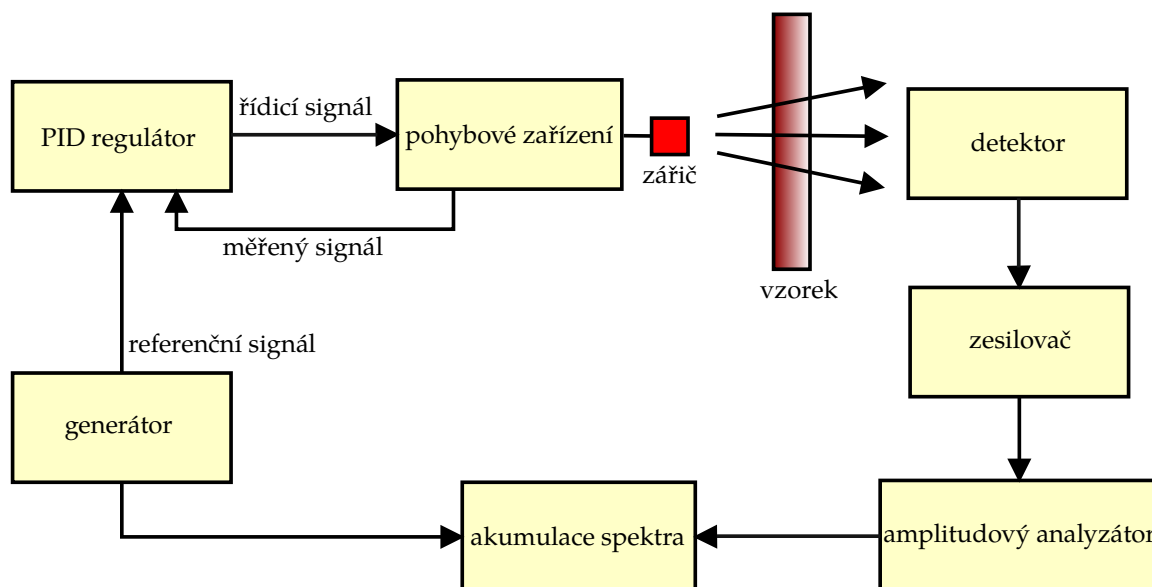
Nejvíce se používá jeden typ zářiče pro charakterizaci různých chemicky či fázově odlišných vzorků, obsahujících ale stejný mössbauerovsky aktivní izotop jako zářič. Existuje mnoho izotopů, u kterých byl pozorován Mössbauerův jev (viz např. [12]). Pro pozorování Mössbauerova jevu je nutné aby byly splněny následující dvě podmínky:

- Daný izotop musí mít excitovaný stav o velmi malé energii, aby byla krystalová mřížka schopná absorbovat foton vyzářený při přechodu na základní stav. [12]
- Musí existovat vhodný zářič s dostatečně dlouhou dobou života. [12]

V případě nejčastějších analýz se používá radioaktivní zářič ^{57}Co pro analýzu železo–obsahujících vzorků, tedy s izotopem ^{57}Fe .

1.1.3. Konfigurace Mössbauerova spektrometru

Typická konfigurace Mössbauerova spektrometru pro měření v transmisní geometrii je zobrazena na obrázku 1.

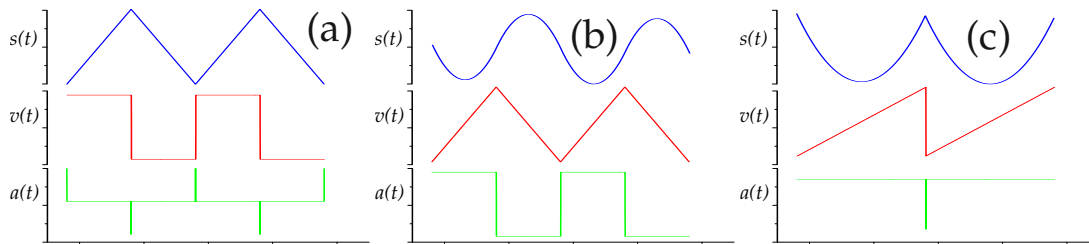


Obrázek 1 | Schéma Mössbauerova spektrometru pro měření v transmisní geometrii.

Generátor generuje referenční signál rychlosti pohybu zářiče, ten jde přes PID regulátor (proporcionálně integračně derivační regulátor – viz kapitola 1.2.1), do pohybového zařízení. Rychlost pohybového zařízení je měřena pomocí elektromagnetické indukce a sledována PID regulátorem. Pohybové zařízení moduluje pohybem zářiče energii vyzařovaného záření. Záření pak prochází přes vzorek, záření o rezonanční energii je pohlceno a nerezonanční záření projde beze změny 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 otevírány 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 [7]. Na obrázku 2(a) je zobrazen průběh posunu, rychlosti a zrychlení ve 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 2(b) a (c)) nebo (méně často) v souladu s jiným průběhem. Impulzy z detektoru registrované při odpovídajících různých okamžitých hodnotách rychlosti pohybu se rozdělují do různých kanálů mnohakanálového analyzátoru. Takovým způsobem se realizuje jednoznačný vztah mezi číslem kanálu a rychlostí [7]. Na obrázku 2 je zobrazen průběh posunu, rychlosti a zrychlení ve dvou nejčastěji používaných režimech pohybu – s trojúhelníkovým průběhem rychlosti (b) a s pilovým průběhem rychlosti (c).



Obrázek 2 Simulace průběhu posunu $s(t)$, rychlosti $v(t)$ a zrychlení $a(t)$ u spektrometru s konstantní rychlostí (a) a u spektrometrů s konstantním zrychlením – s trojúhelníkovým průběhem rychlosti (b) a s pilovým průběhem rychlosti (c).

1.1.4. Pohybové zařízení

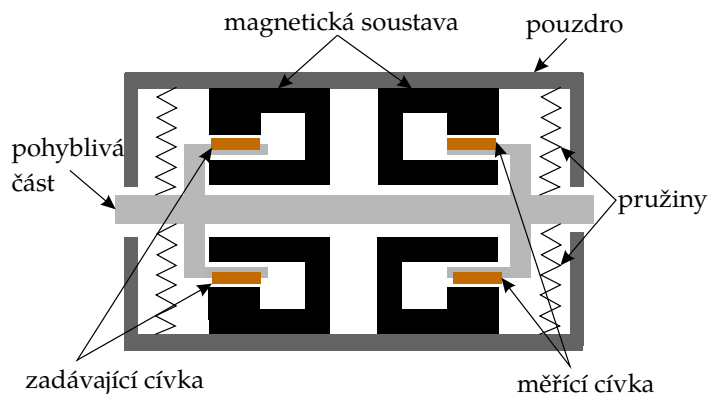
Pohybové zařízení je nejdůležitější částí Mössbauerova spektrometru, protože realizace přesně kontrolovaného průběhu rychlosti pohybu zářiče nebo vzorku určuje kvalitu celého spektrometru¹. Požadovaný interval rychlostí je dán šířkou měřeného spektra a může dosahovat až hodnot 1000 mm/s. Použitý princip konstrukce pohybového zařízení je v první řadě určován požadovaným rozsahem rychlosti, závisí však také na celé řadě jiných požadavků (např. hmotnost pohybového se předmětu, umístění kryostatu,...) [7, 13–15].

Pro konstrukci pohybového zařízení (tzv. transduceru) se využívají různé principy – mechanický, hydraulický, elektrodynamický, piezoelektrický nebo elektrostatický. V případech, kdy jsou požadované rychlosti pohybu malé (desítky až stovky mm/s), je možné použít mechanická a hydraulická pohybová zařízení [16]. 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 [7]. Elektrostatická pohybová zařízení vynikají svou malou velikostí a hmotností, nicméně dokážou pohybovat jen s lehkým zářičem [17]. V poslední době se začínají těšit oblibě piezoelektrická pohybová zařízení [18–20]. Jejich výhodou je zejména jejich malá velikost a hmotnost, důležitá například při geologickém průzkumu jiných planet pomocí kosmických sond [9, 20].

Největšího rozšíření dosáhla tzv. elektrodynamická pohybová zařízení, která dovolují pracovat v širokém intervalu rychlostí od cca 1 mm/s do 1000 mm/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 [7]. Schéma elektrodynamického zařízení se dvěma cívkami (tzv. typ dvojité reproduktor) je zobrazeno na obrázku 3. Další řešení jsou např. [21–26]

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 [7]. Blízká vzdálenost umožňuje detekci většího množství rezonančních gama fotonů, což snižuje čas měření, na druhou stranu blízká vzdálenost způsobuje u nevodových zářičů tzv. kosinový efekt [27].

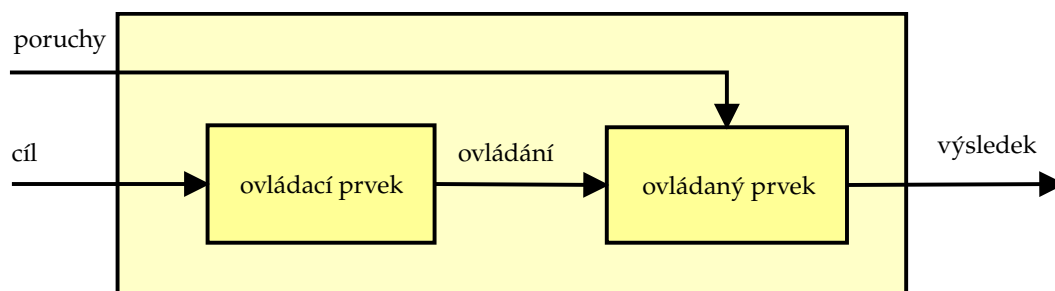
¹Výjimkou jsou spektrometry, které používají časově–modulační režim registrace spektra. Kvalita těchto spektrometrů je především určována parametry sledujícího analogově–digitálního převodníku [7].



Obrázek 3 | Elektrodynamické pohybové zařízení, upraveno podle [7].

1.2. PID regulace

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 [28]. 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 4.



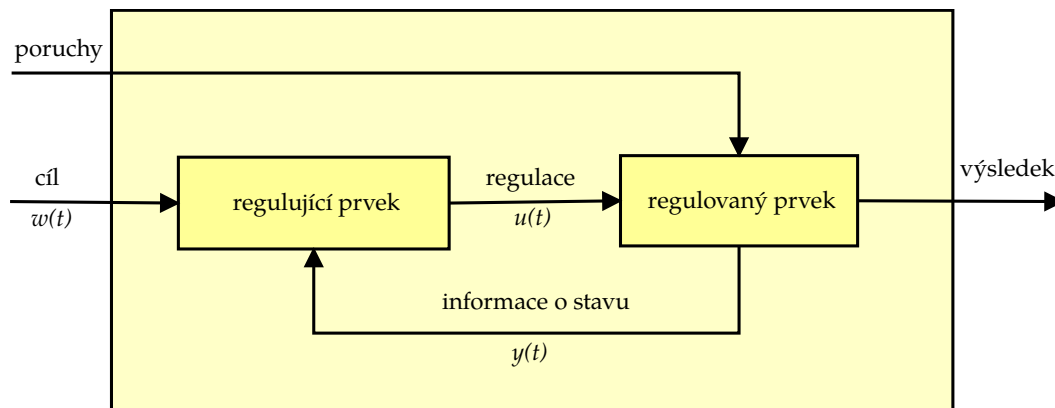
Obrázek 4 | Blokové schéma systému ovládání, upraveno podle [28].

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 [28]. Blokové schéma systému regulace je zobrazeno na obrázku 5.

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 [28]. Základní třídění regulátorů lze provést podle přívodu energie, a sice na regulátory přímé a nepřímé. Přímé regulátory ke svému chodu nepotřebují



Obrázek 5 | Blokové schéma systému regulace, upraveno podle [28].

přívod energie.² 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 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 [28].

1.2.1. PID regulátor

PID regulátor je prvek, který se skládá z proporcionálního (P), integračního (I) a derivačního (D) členu [28]. 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

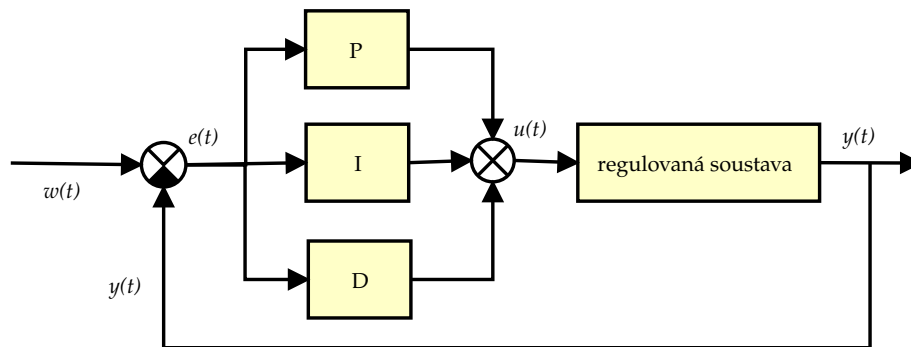
$$u(t) = T_D \frac{de(t)}{dt}, \quad (7)$$

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 6.

²Mezi přímé regulátory patří například Wattův regulátor otáček parního stroje či Polzunův regulátor hladiny [28].



Obrázek 6 | 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 $t = kT$, kde $k \in \mathbb{N}_0$ a 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 diskrétní 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

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

se třemi složkami: P – proporcionální, S – sumační a D – diferenční [28].

1.3. Možná vylepšení Mössbauerových spektrometrů

Linearita Mössbauerova spektra je velmi důležitý parametr definující přesnost celého Mössbauerova spektrometru. Současná vylepšení Mössbauerových spektrometrů se zaměřila na vylepšení detekčního systému [29, 30], či vylepšení řídicího systému rychlosti přidáním fotobuňky [31] či interferometru [32]. Některých vylepšení bylo dosaženo pomocí naprosto jiného přístupu, např. časově modulační Mössbauerovou spektroskopií [33, 34]. Jiné studie se zaměřují na zvýšení linearitu Mössbauerových spekter, například využitím vylepšeného PID regulátoru [14, 35–37], modifikací pohybového zařízení [13], celého systému řízení rychlosti [15] nebo přidáním dodatečného signálu, který moduluje řídicí signál [38]. Jiný přístup, diskutovaný v této práci, je využití referenčního signálu rychlosti ve tvaru funkce sinus a následná linearizace takto pořízených spekter. Tato metoda může zvýšit linearitu spektra, jelikož harmonické oscilace jsou přirozené pro většinu pohybových zařízení, včetně těch typu „dvojitého reproduktoru“ [39].

1.3.1. Generování dodatečného signálu eliminujícího časově stálou chybu

Kromě výše uvedeného je možné provést další vylepšení, z nichž některá budou popsána níže. V [38] 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 řečeno“, co má dělat, neboli je opraveno chybějící zesílení v určitých frekvenčních pásmech. Signál $z(t)$ bude mít tvar velmi podobný signálu chyby [38].

1.3.2. Opravy nelinearity dodatečnou korekcí

Při přesném vyhodnocování Mössbauerových spekter je už vždy využíván počítač. Počítač může být také použit k tomu, aby vykresloval 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 k přepočítání a korekci rychlostní osy [38].

2. Použité přístroje a software

K vývoji Mössbauerova spektrometru s pokročilou modulací energie gama záření byly využity měřicí karty a průmyslový počítač od firmy National Instruments™. National Instruments™ je celosvětově působící firma se sídlem v Austinu (Texas, USA). Zabývá se výrobou a vývojem automatických měřicích zařízení a softwarem pro tzv. virtuální instrumentaci. Technika virtuální instrumentace a měřicí zařízení na ní založená jsou v posledních letech využívány jak v průmyslu [40], tak i ve vědě – od velkých projektů jaderné fyziky jako CERN [41–44] a Dubna [45–47] po řízení kosmických raket [48].

Při vývoji a výrobě Mössbauerových spektrometrů na Katedře experimentální fyziky Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci a v Regionálním centru pokročilých technologií a materiálů byla zařízení a software od firmy National Instruments™ mnohokrát využita, viz např. [29, 49–51].

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, 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].

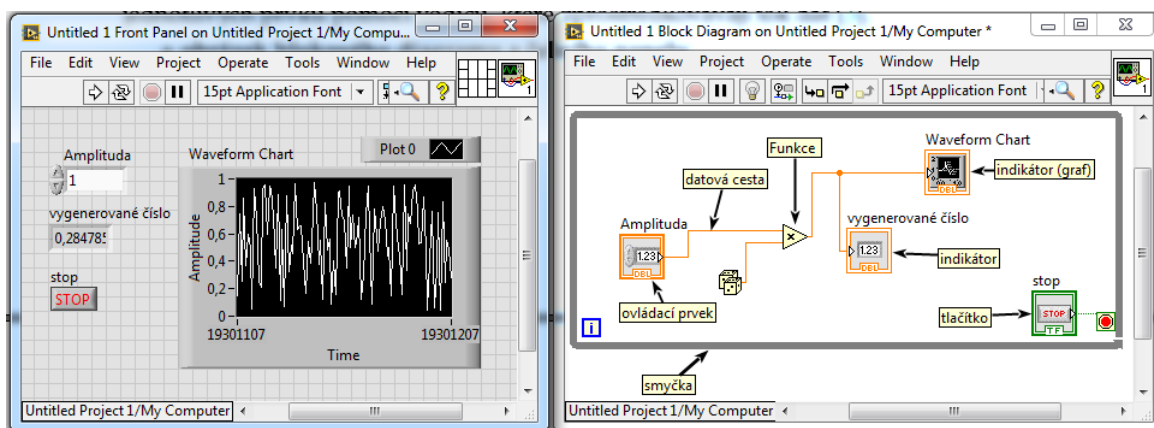
2.1.1. Virtuální měřicí přístroj

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 anglického výrazu Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench. Jde o grafické vývojové prostředí vyvíjené firmou National Instruments™, určené 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]. Velmi jednoduchý program ukazující programování v LabVIEW™

je zobrazen na obrázku 7. Vlevo se nachází čelní panel a vpravo blokový diagram s komentáři jednotlivých bloků programu.



Obrázek 7 Příklad jednoduchého programu, který generuje náhodná čísla a zobrazuje je v grafu, vytvořeného v LabVIEW™ s popsány základními prvky jeho programového kódu. Vlevo se nachází čelní panel reprezentující uživatelské prostředí a vpravo se nachází blokový diagram – zdrojový kód programu.

2.2. FPGA – programovatelná hradlová pole

FPGA je zkratkou anglického Field Programmable Gate Array – což česky znamená programovatelné hradlové pole. Jedná se o nejnižší úroveň elektroniky. FPGA na rozdíl od procesoru nemůžeme dynamicky programovat, ale hradla se musí předem nastavit do požadované „polohy“. Na druhou stranu se však FPGA vyznačuje velkou rychlostí a determinismem. Díky tomu se využívá všude, kde je potřeba obrovského výpočetního výkonu od experimentů v jaderné fyzice po tzv. těžbu bitcoinů. K programování FPGA polí bývají nejčastěji využívány jazyky Verilog a VHDL. Zkratka VHDL znamená VHSIC Hardware Description Language, kde VHSIC je zkratka z Very-High-Speed Integrated Circuit. Výraz VHDL se pak dá do češtiny přeložit jako jazyk pro popis velmi rychlých integrovaných obvodů [5]. V této práci je program určený pro FPGA pole programován v LabVIEW™, nicméně následně je pomocí překladače přeložen do jazyka VHDL.

2.2.1. Využití FPGA v Mössbauerově spektroskopii a jaderné fyzice obecně

Kompletní Mössbauerův spektrometr založený na FPGA poli zatím nebyl zkonstruován (respektive publikován či jinak prezentován), ale již dříve se v jaderné fyzice objevily detekční systémy založené na FPGA či systémy využívající zpracování signálu pomocí FPGA [52–57]. Díky své rychlosti a determinismu se využití FPGA polí přímo nabízí například v koincidenčních experimentech [58–61]. Oblíbené jsou také mnohakanálové analyzátory založené na FPGA [62, 63]. V Mössbauerově spektroskopii byly FPGA využity zejména pro systém řízení pohybu [14, 35, 36]. Mössbauerův spektrometr MIMOS IIA, který se nacházel na palubě marsovských vozítek Spirit a Opportunity [20], rovněž využíval FPGA pro systém řízení rychlosti a mnohakanálovou analýzu [64].

2.3. Systémy NI RIO

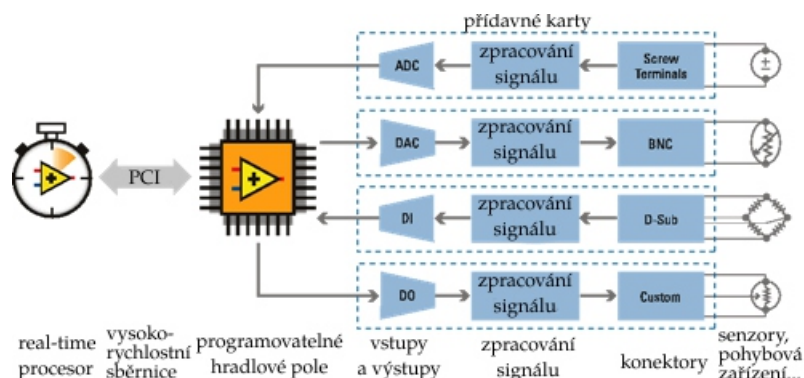
Firma National Instruments™ nabízí mnoho modulárních systémů – od systémů jako PXI (PCI eXtensions for Instrumentation) po systémy RIO. RIO je zkratka znamenající Reconfigurable I/O (input/output), což se dá přeložit jako systém s nastavitelnými vstupy a výstupy. Jedná se o malé

počítače, vyznačující se především svou jednoduchostí, a které jsou určeny především pro automatizaci v průmyslu ale i ve vědeckých experimentech. Jednodeskový systém sbRIO (Single-Board RIO) byl již dříve využit pro vývoj systému pro PID regulaci a je popsán detailněji v [6] a [35]. V této práci byl využit podobný systém s názvem CompactRIO.

2.3.1. Systém NI CompactRIO

CompactRIO je řada modulárních systémů firmy National Instruments™. Jeho název je složeninou slov compact – značící jeho malé rozměry (narozdíl od jiných systémů jako například PXI) a RIO vysvětlené výše. Jedná se o programovatelný vestavěný (embedded) systém, který se skládá z real-time procesoru, uživatelsky programovatelného hradlového pole FPGA a vestavěných digitálních a analogových vstupů a výstupů a periferních konektorů jako je USB, RS-232, RS-485, CAN či Ethernet [65].

Systém CompactRIO je modulární a je možno do něj přidávat a měnit různé moduly podle našich požadavků. Konstrukce systému CompactRIO je robustní a vhodná pro průmysl – systém je zapouzdřen a poskytuje krytí proti vlhkosti a prachu. Přídavné moduly se napevno připevňují na šasi. Programování probíhá na několika úrovních – nejkritičtější část programu běží na FPGA. FPGA umožňuje běh programů, které jsou deterministické a také masivní paralelizaci programového kódu. Méně kritické systémy běží na real-time části, která využívá operačních systémů reálného času a jsou tedy taktéž deterministické. Ovládací aplikace běží na vzdáleném osobním počítači. Na obrázku 8 je zobrazeno schéma architektury – real-time část je s FPGA propojena sběrnicí PCI a přímo na FPGA jsou rozšiřující karty s analogovými či digitálními vstupy a výstupy.

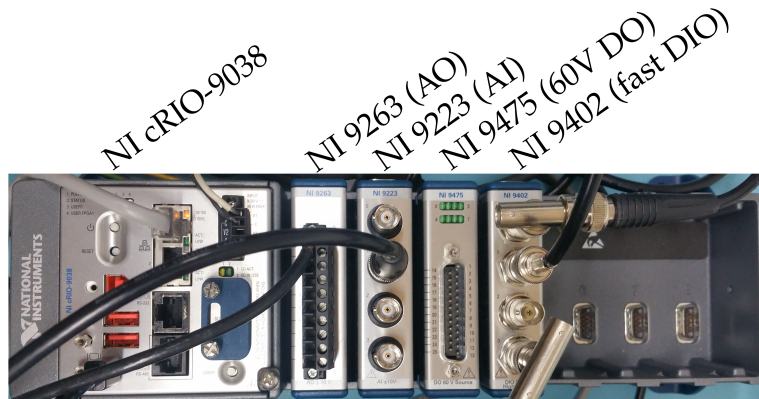


Obrázek 8 | Schéma architektury CompactRIO, převzato z [65], přeloženo.

V této práci bude pro realizaci PID vazby a následně celého Mössbauerova spektrometru využita sestava CompactRIO sestávající z kontroléru NI cRIO-9038, karty analogových vstupů NI 9223, karty analogových výstupů NI 9263, karty digitálních vstupů a výstupů NI 9402. V zařízení CompactRIO je přítomna i karta digitálních výstupů NI 9475, která dokáže generovat napětí až 60 V, ale která nebyla v následující práci využita. Použité zařízení CompactRIO včetně I/O modulů je zobrazeno na obrázku 9. Jednotlivá zařízení, ze kterých se sestává sestava CompactRIO, budou detailněji popsána níže.

2.3.2. Kontrolér NI cRIO-9038

Základní částí sestavy CompactRIO je kontrolér. Zde byl použit kontrolér NI cRIO-9038, obsahující dvoujádrový 64 bitový procesor Intel Atom® o frekvenci 1,33 GHz, na kterém běží NI Linux Realtime™, operační systém reálného času na bázi Linuxu vyvinutý firmou National Instruments™ přímo pro účely RIO systémů. Dále kontrolér obsahuje operační paměť DDR3L o velikosti 2 GB umožňující běh VI a 8 GB SSD paměť pro ukládání VI a dat a také FPGA pole Xilinx



Obrázek 9 | CompactRIO sestava – kontrolér NI cRIO-9038 a čtyři I/O moduly.

Kintex®-7 FPGA 7K160T, na kterém je rovněž možné spouštět VI. Časování tohoto FPGA pole je 25 ns. Z přední strany je 100MB Ethernet konektor na připojení k internetu, sériový port RS-232, miniDisplay Port, USB konektory (host i slave) a slot na SD kartu. Tento kontrolér nemá měnitelné šasi a tudíž je součástí kontroléru i 8 rozšiřujících slotů, 4 z nich jsou v této práci použity na karty digitálních a analogových vstupů a výstupů. Ze zadní strany šasi je mechanismus umožňující připevnění na TS-35 DIN nosnou lištu a montážní otvory. Kontrolér cRIO-9038 má velmi malou spotřebu (samotný kontrolér má příkon od 3,4 W do 46 W; příkon závisí na zatížení procesoru – procesor Intel Atom® jakožto procesor určený primárně do notebooků či tabletů používá dynamické taktování a uspávání, funkce známé z těchto zařízení) a má vyšší odolnost vůči vlhku, prachu a vibracím a je schopen pracovat při teplotách mezi $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ [66,67].

2.3.3. Karta analogových vstupů NI 9223

Použitá karta analogových výstupů NI 9223 má 32 kanálů s rozlišením 16 bitů a nastavitelným měřicím rozsahem od $\pm 200\text{ mV}$ do $\pm 10\text{ V}$. Tomu odpovídá vertikální rozlišení $6,1\text{ }\mu\text{V}$ v případě nejmenšího rozsahu a $305,2\text{ }\mu\text{V}$ v případě největšího rozsahu. Vzorkovací perioda analogových vstupů je $1\text{ }\mu\text{s}$, čemuž odpovídá vzorkovací frekvence 1 MS/s (karta obsahuje 4 analogově digitální převodníky s touto vzorkovací frekvencí a tudíž tato rychlost není multiplexována a platí i v případě použití všech 4 vstupů) [68]. Tato vzorkovací rychlost je pro PID regulaci pohybového zařízení Mössbauerova spektrometru dostačující (minimální vzorkovací frekvence, při které je možná PID regulace pohybového zařízení, je $15,36\text{ kS/s}$ – při frekvenci pohybu pohybového zařízení 30 Hz , 1024 bodech nesloženého spektra a dvou vzorcích na kanál, aby byl dodržen vzorkovací teorém). Bohužel to ale zdaleka není dostačující pro detekci signálu z detektoru gama záření (ze vzorkovacího teorému vychází minimální teoretická frekvence pro detekci signálu z detektoru cca 5 MS/s , jelikož délka impulzu je cca 400 ns).

2.3.4. Karta analogových výstupů NI 9263

Další použitou kartou je karta analogových výstupů NI 9263 se čtyřmi kanály, rozlišením 16 bitů a měřicím rozsahem $\pm 10\text{ V}$. Rozsah analogových výstupů není volitelný. Vertikální rozlišení karty je $305\text{ }\mu\text{V}$. Vzorkovací frekvence této karty je 100 kS/s , čemuž odpovídá vzorkovací perioda $10\text{ }\mu\text{s}$ [69]. Výstupy rovněž nejsou multiplexovány. Tato vzorkovací perioda je pro PID regulaci pohybového zařízení rovněž dostatečná. Maximální garantovaná multiplikativní chyba je $0,03\text{ }\%$ a aditivní chyba $0,1\text{ }\%$.

2.3.5. Karta digitálních vstupů a výstupů NI 9402

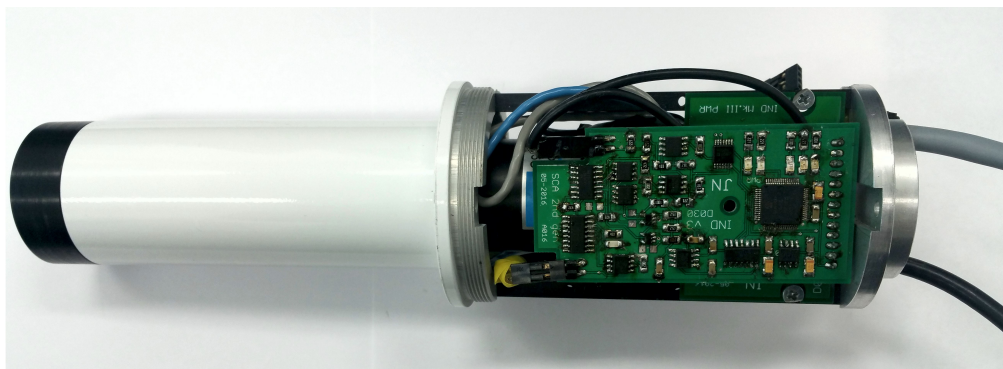
Poslední použitou měřicí kartou je NI 9402. Jedná se o velmi rychlou kartu s osmi digitálními kanály, které mohou pracovat jako výstupy i jako vstupy. Hardwarově má karta dva digitální výstupy a dva vstupy, které jsou multiplexovány. Při použití dvou digitálních vstupů je maximální frekvence digitálního signálu 30 MHz (čemuž odpovídá perioda 33,3 ns). Tato frekvence je po použití amplitudového diskriminátoru plně dostačující k detekci signálu z detektoru [70].

2.3.6. Karta digitálního osciloskopu NI PCI-5114

V průběhu vývoje spektrometru byla využívána karta NI PCI-5114, a to zejména pro digitalizaci signálu z detektoru ve vysokém rozlišení pro účely linearizace pomocí funkce sinus. Jedná se o kartu digitálního osciloskopu připojenou k osobnímu počítači pomocí sběrnice PCI, mající dva kanály s vertikálním rozlišením 8 bitů a vzorkovací frekvencí 250 MS/s. Tomu odpovídá vertikální rozlišení 156,25 μV (při použití nejmenšího rozsahu 0,04 V) respektive 0,039 V (při použití největšího měřicího rozsahu 10 V) a vzorkovací perioda 4 ns [71].

2.4. Scintilační detektor se zesilovačem a jednocanálovým analyzátozem

Pro detekci záření gama byl využit scintilační detektor s integrovaným zesilovačem a jednocanálovým analyzátozem blíže popsán v [30]. Detektor využívá scintilační krystal NaI:Tl o tloušťce 0,15 mm a fotonásobič R6095 od firmy Hamamatsu. Detektor dále obsahuje integrovaný zdroj vysokého napětí, zesilovač signálu a jednocanálový analyzátoz realizovaný pomocí dvou operačních zesilovačů a zpožďovací linky. Nastavování jednocanálového analyzátozu, stejně jako nastavení zesílení signálu a nastavení napájecího napětí fotonásobiče je realizováno nastavením digitálních potenciometrů. Ty jsou nastavovány přes mikrokontrolér PIC16F819, který zajišťuje i komunikaci s počítačem přes rozhraní I²C. V počítači je prostřednictvím aplikace napsané v LabVIEW™ zprostředkována mnohakanálová analýza pomocí postupného skenování signálu jednocanálovým analyzátozem [30,72]. Výstupem z detektoru může být jak analogový signál, tak logické impulzy o napětí 5 V, odpovídající platným detekcím z okna energií vybraných amplitudovým diskriminátorem. Díky použití detektoru s integrovaným jednocanálovým analyzátozem bylo možné zásadně zjednodušit vyvíjený spektrometr. Ten nemusí hledat platné detekce v analogovém signálu. Další výhoda spočívá v tom, že je možno využít pouze digitálních vstupů, což je i ekonomicky výhodnější, neboť karty s analogovými vstupy se srovnatelnou vzorkovací frekvencí bývají několikanásobně dražší. Použitá karta digitálních vstupů a výstupů NI 9402 sice nevyužívá TTL logiku (5 V) jako použitý detektor, ale LVTTTL logiku (3,3 V), nicméně je tolerantní i na 5 V. Použitý detektor bez pouzdra na části s elektronikou je zobrazen na obrázku 10.



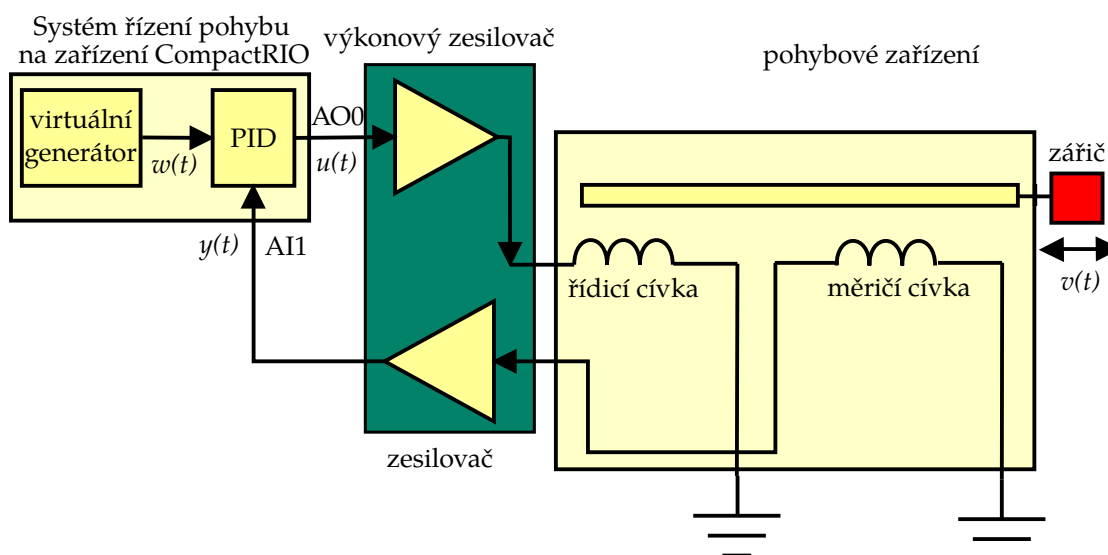
Obrázek 10 | Použitý detektor (bez pouzdra na části s elektronikou).

2.5. Pohybové zařízení

V experimentální části bylo použito pohybové zařízení pro Mössbauerovy spektrometry vycházející z [13]. Použité pohybové zařízení je zobrazeno na obrázku 11. Schéma vnitřního zapojení použitého pohybového zařízení a jeho připojení k systému řízení rychlosti je zobrazeno na obrázku 12.



Obrázek 11 | Použité pohybové zařízení (bez pouzdra a s namontovaným zářičem).

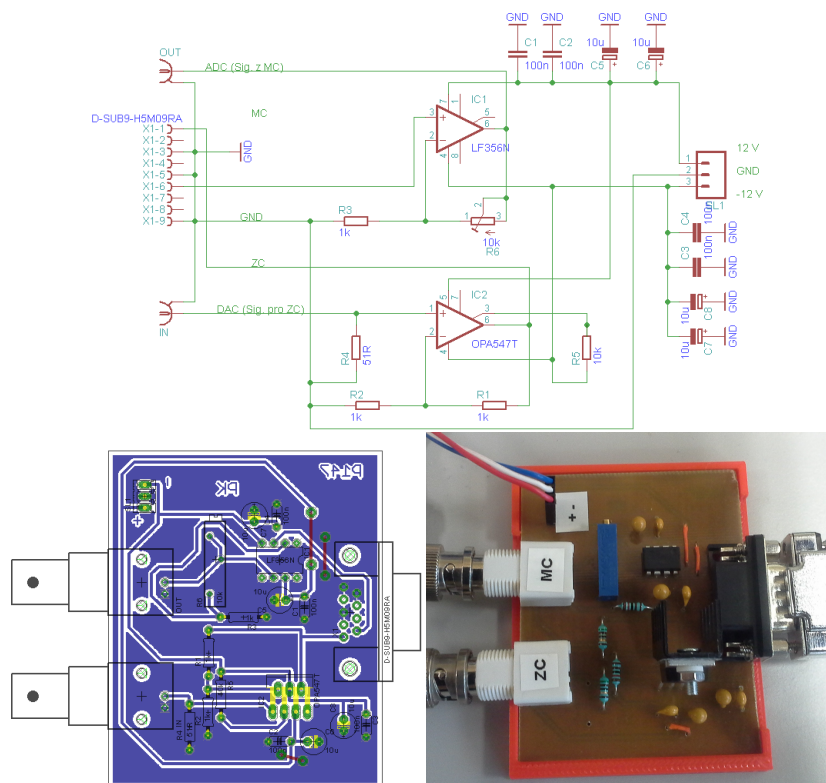


Obrázek 12 | Blokové schéma pohybového zařízení a jeho zapojení ($w(t)$ – referenční signál, $v(t)$ – rychlost pohybu, $y(t)$ – signál z měřicí cívky, $u(t)$ – signál přivedený na řídicí cívku – řídicí signál), AI1 je analogový vstup zařízení CompactRIO a AO0 analogový výstup.

Použité pohybové zařízení se skládá ze dvou pevně spojených cívek – jedné řídicí a druhé měřicí. Cívky jsou umístěny uvnitř permanentních magnetů a po přivedení elektrického proudu na řídicí cívku dojde k rozpohybování 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.

2.5.1. Výkonový zesilovač referenčního a měřeného signálu rychlosti

Zařízení CompactRIO je schopno dodávat svými analogovými výstupy proud 1 mA [69]. To je zejména pro velká elektrodynamická zařízení nedostatečné. Aby je bylo možné obsluhovat pomocí zařízení CompactRIO, byla vyvinuta sestava zesilovačů. Byly použity operační zesilovače v neinvertujícím zapojení. Zesilovač zadávacího signálu je proudový zesilovač OPA547T od firmy Texas Instruments, u kterého bylo nastaveno napěťové zesílení v poměru 1:1. Druhý zesilovač LF356N (rovněž od firmy Texas Instruments) zesiluje signál z měřicí cívky jednou až desetkrát (v závislosti na nastavení trimru). Na napájení zesilovačů jsou přítomny tantalové a keramické kondenzátory na odstranění šumů. Schéma zapojení je zobrazeno na obrázku 13 nahoře. Návrh desky plošných spojů a fyzická realizace jsou zobrazeny na obrázku 13 dole.



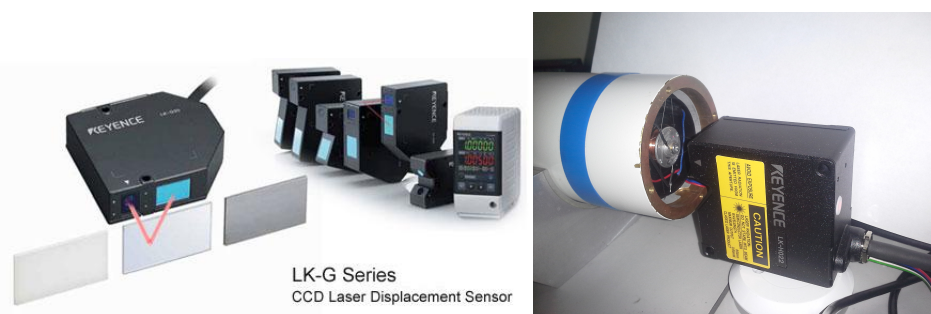
Obrázek 13 | Navržený zesilovač – nahoře schéma, vlevo dole návrh desky plošných spojů a vpravo dole fyzická realizace.

2.5.2. Laserový systém Keyence LK-G

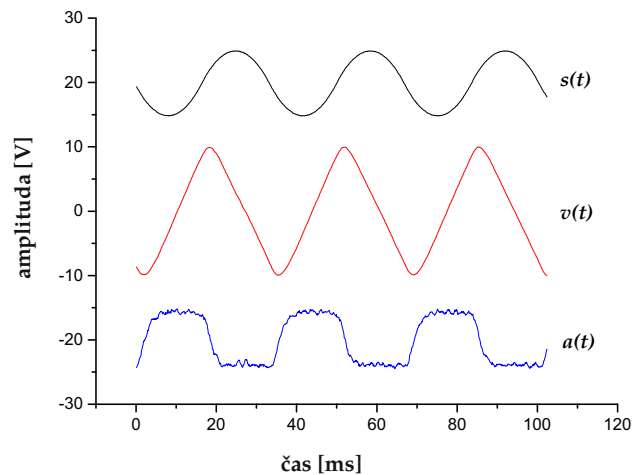
Keyence LK-G je modulární laserový vibrometr pracující na principu optické páky (viz obrázek 14 vlevo; princip optické páky bývá rovněž použit např. u mikroskopů atomárních sil [73]). Jeho předností je velká přesnost měření $\pm 0,02\%$, což v závislosti na měřicím rozsahu použité měřicí hlavy odpovídá opakovatelnosti měření až $0,005\ \mu\text{m}$ (výrobce udává opakovatelnost měření, nikoliv přesnost). Maximální vzorkovací frekvence je 392 kHz. Vibrometr umožňuje měřit polohu, rychlost a zrychlení a jejich okamžité hodnoty zobrazovat na segmentovém displeji kontroléru, v počítači pomocí programu LK Navigator nebo jinde pomocí analogových výstupů, na které jsou přivedeny elektrické signály přímo úměrné poloze, rychlosti a zrychlení pozorovaného předmětu [74]. Na obrázku 15 jsou zobrazeny signály odpovídající poloze, rychlosti a zrychlení pohybového zařízení Mössbauerova spektrometru. Přímo se nabízí využití vibrometru LK-G jako zdroje signálu rychlosti místo použití měřicí cívky. Analogové výstupy systému LK-G ale mají $10\ \mu\text{s}$ zpož-

dění [74]. Toto zpoždění vzniká při zpracování dat v elektronice (CCD čip v optické hlavě, procesor kontroléru...) a nejde nijak zmenšit. Se zpožděním 10 μs má PID regulace Mössbauerovského pohybového zařízení ještě smysl (jeden kanál spektra o 1024 bodech měřeného při frekvenci 30 Hz má 32 μs), nicméně experimentálně bylo zjištěno, že tato hodnota je platná jen pro signál odpovídající poloze sledovaného předmětu. Signál odpovídající rychlosti sledovaného předmětu má ještě větší zpoždění. Toto další zpoždění je pravděpodobně způsobeno zpožděním v digitálních obvodech a také tím, že signál rychlosti je vypočítáván digitálně z polohy pomocí digitální derivace (zpětné diference, viz rovnice 12). Tomu by odpovídalo i to, že se zpoždění mění při změně vzorkovací rychlosti laserového systému. Nicméně toto zpoždění je vždy již za hranicí maximálního zpoždění, při kterém by mělo smysl použití tohoto vibrometru místo měřicí cívky pohybového zařízení Mössbauerova spektrometru.

Tento systém byl v této práci využit u modulace referenčního signálu dodatečným signálem, u zpětné linearizace spektra (z průměrné periody rozdílu signálu z LK-G a referenčního signálu) a rovněž pro vyvíjenou real-time linearizaci (v reálném čase pro každou periodu). Konkrétně byla použita sestava kontroléru LK-G5000 a laserové hlavy LK-H022, která měla nejvhodnější měřicí rozsah ± 3 mm. Tato hlava má opakovatelnost měření 0,02 μm . Na obrázku 14 vpravo je zobrazena laserová hlava LK-H022 měřící výchylku pohybového zařízení Mössbauerova spektrometru, který má oddělané víko spektrometrické lavice, aby bylo pohybové zařízení přístupné.



Obrázek 14 | Modulární systém laserového vibrometru LK-G (kontrolér a různé laserové hlavy) a princip jeho fungování (vlevo; převzato z [74]) a laserová hlava LK-H022 měřící pohyb pohybového zařízení v Mössbauerově spektrometru (vpravo).



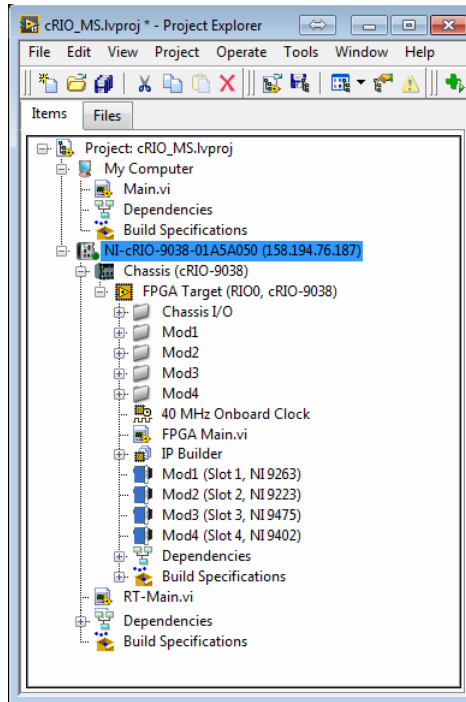
Obrázek 15 | Poloha, rychlost a zrychlení mössbaurovského pohybového zařízení naměřené pomocí laserového systému LK-G5000.

3. Vývoj spektrometru s pokročilým řízením pohybu na platformě CompactRIO

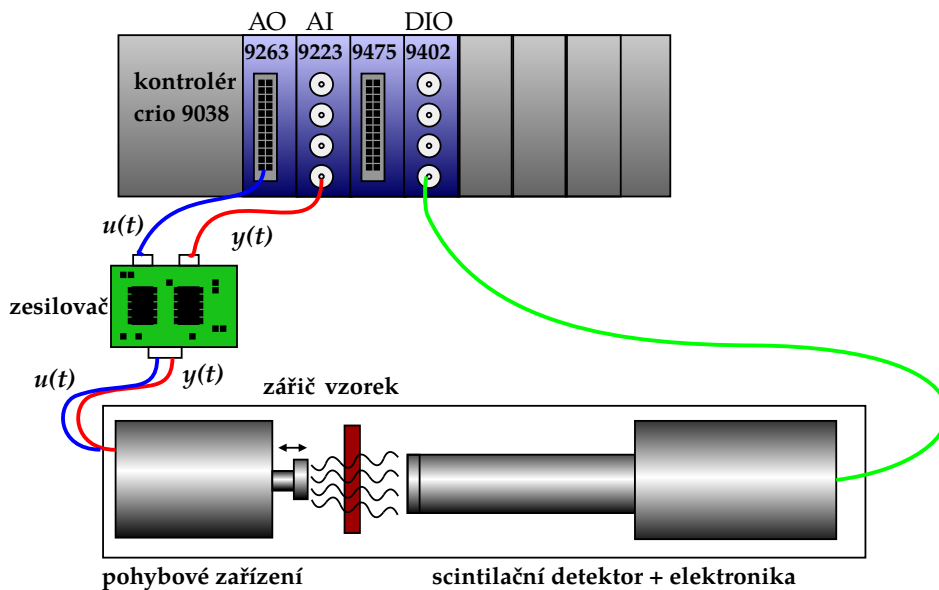
Zařízení firmy National Instruments™ byla programována v prostředí LabVIEW™ 2015 s FPGA toolkitem verze 15.5, Real-Time toolkitem verze 15.5, PID Control toolkitem verze 15.5 a ovladači NI-RIO verze 15.5. Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, při programování zařízení CompactRIO jsou tři možnosti, kde mohou být spouštěny naprogramované VI. Na obrázku 16 je zobrazen LabVIEW™ projekt vyvinutého Mössbauerova spektrometru. Soubor Main.vi je ovládací část aplikace, která je umístěna ve vzdáleném počítači. Soubor FPGA-Main.vi je umístěn na FPGA poli zařízení CompactRIO a soubor RT-Main.vi je umístěn ve flash paměti zařízení CompactRIO a je spouštěn na real-time procesoru. V projektu jsou též vidět připojené moduly analogových a digitálních vstupů a výstupů či 40 MHz oscilátor řídící jednotlivé „ticky“ FPGA pole a rovněž vzorkování analogových vstupů a výstupů. V *Builds specifications* je také nastaveno automatické spouštění VI uložených v zařízení CompactRIO. Schéma zapojení jednotlivých částí spektrometru je zobrazeno na obrázku 17. Nahoře je zařízení CompactRIO, z karty analogových výstupů NI 9263 vede koaxiální kabel do desky zesilovače. Odtud pak proudově zesílený signál vede do pohybového zařízení umístěného ve spektrometrické lavici, kde způsobí pohyb zářiče. Pohybem se indukuje v měřicí cívce proud, ten je veden zase koaxiálním kabelem do zesilovače a pak do karty analogových vstupů. Naproti pohybového zařízení je umístěn držák vzorků a za ním scintilační detektor s integrovaným zdrojem vysokého napětí, zesilovačem signálu a amplitudovým diskriminátorem. Amplitudově diskriminovaný signál je poté přiveden do karty rychlých digitálních vstupů a výstupů NI 9402.

3.1. Program na FPGA

Na FPGA se v LabVIEW™ programuje odlišně než na PC, jsou k dispozici jen některá předpřipravená VI (například tzv. expresní funkce nejsou k dispozici vůbec) a složitost naprogramovaného VI je omezena počtem hradel v FPGA. Naprogramované VI se kompiluje do VHDL kódu a následně optimalizuje a jeho kompilace trvá často i desítky minut (v závislosti na tom jak složitý je naprogramovaný kód). Na obrázku 18 je zobrazen blokový diagram vyvinutého spektrometru.



Obrázek 16 | LabVIEW™ projekt Mössbauerova spektrometru.

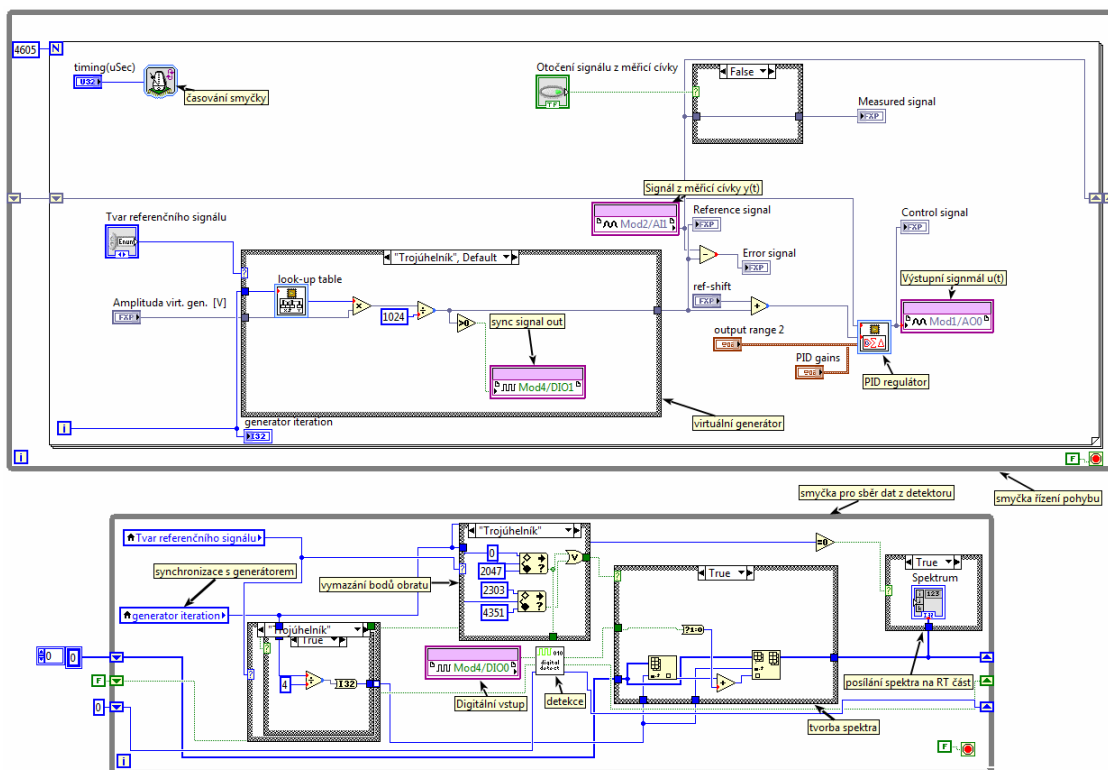


Obrázek 17 | Schéma zapojení jednotlivých částí spektrometru.

Zdrojový kód se skládá ze dvou *while* smyček. Horní smyčka je systém řízení rychlosti. Uprostřed ní je virtuální generátor rychlosti (a) tvořený *case* strukturou ovládanou rozbalovací nabídkou typu *enum*, která umožňuje vybrat tvar generovaného signálu. Vpravo od virtuálního generátoru se nachází PID regulátor (b). Dole pod smyčkou pro řízení pohybu paralelně běží smyčka sběr dat z detektorem a přenášení jedné periody spektra z FPGA na RT. Synchronizace obou smyček je zajištěna pomocí lokální proměnné s názvem *generator iteration*.

3.1.1. Virtuální generátor rychlosti

První částí spektrometru je virtuální generátor, který generuje referenční signál rychlosti. VI virtuálního generátoru je zobrazeno na obrázku 18. Hlavní částí virtuálního generátoru je *look-up*

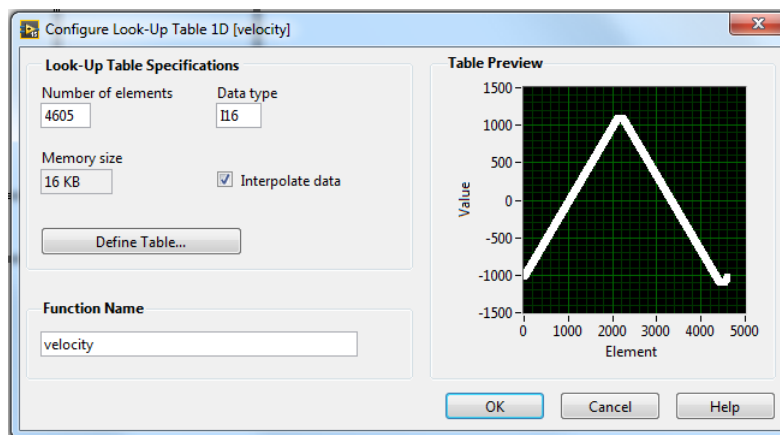


Obrázek 18 | Blokový diagram programu na FPGA části zařízení CompactRIO.

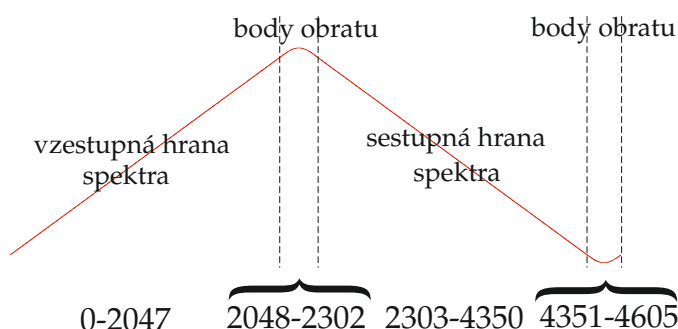
tabulka, ve které je uložen tvar referenčního signálu – trojúhelník se sinovým průběhem v bodech obratu rychlosti, viz obrázek 19. Tento tvar se již dříve osvědčil pro svou vyšší linearitu oproti jednoduchému trojúhelníku (viz např. [37, 75–77]). Referenční signál je tvořen 4605 body. VI generátor dokáže další body interpolovat (viz zkratka *Interpolate data* na obrázku 19). Na obrázku 20 je zobrazeno schéma referenčního signálu rychlosti ve tvaru trojúhelníku se sinovým průběhem v bodech obratu rychlosti. Body 0 – 2047 jsou vzestupná hrana spektra, body 2048 – 2302 jsou horní body obratu, 2303 – 4350 jsou sestupná hrana spektra a 4351 – 4605 jsou dolní body obratu. V bodech obratu, kde je průběh referenčního signálu sinový, neprobíhá měření spektra. *Case strukturou* je možné též vybrat tvar generovaného signálu. Dalšími módy jsou pila, sinus a režim konstantní rychlosti. Sinový režim je vhodný zejména pro linearizaci s využitím sinového průběhu rychlosti, viz dále v kapitole 4.1. V případě alternativních signálů rychlosti dochází k záznamu spektra po celou dobu. Na digitální výstup zařízení CompactRIO je přiveden synchronizační signál, využívaný zejména v průběhu vývoje pro synchronizaci čítání spektra pomocí externího čítacího zařízení (měřicí karty a virtuálního Mössbauerova spektrometru běžícího na osobním počítači). Nyní je čítání spektra a generování signálu synchronizováno virtuálním synchronizačním signálem, který je ze smyčky generátoru přenašen do smyčky detektoru pomocí lokální proměnné, nicméně synchronizační signál byl ponechán pro případnou synchronizaci jiných externích zařízení.

3.1.2. PID regulátor

Důležitou část systému řízení rychlosti je PID regulátor. Ve spektrometru byl využit dříve vyvinutý digitální PID regulátor blíže popsany v [35]. PID regulátor je virtuální a je implementován v FPGA poli (viz obrázek 21 vlevo). Součástí spektrometru je i druhý PID regulátor, který reguluje stejnosměrnou složku (tzv. drift), ten je umístěn na real-time části zařízení CompactRIO (viz obrázek 21 vpravo). Stejnoseměrná složka se může v pohybovém systému objevit při umístění Mössbauerova spektrometru v externím magnetickém poli, zejména při jeho zapínání a vypínání.



Obrázek 19 VI Look-up tabulka a uvnitř nahraný referenční signál rychlosti – trojúhelník se sinovým průběhem v bodech obratu rychlosti.



Obrázek 20 Referenční signál rychlosti se sinovým průběhem v bodech obratu rychlosti pohybového zařízení. Body 0 – 2047 jsou vzestupná hrana spektra, body 2048 – 2302 jsou horní body obratu rychlosti, 2303 – 4350 jsou sestupná hrana spektra a 4351 – 4605 jsou dolní body obratu rychlosti.

Rovněž je výhodné mít stejnosměrnou složku nulovou, jelikož negeneruje žádný pohyb ale jen teplo (což může být nevýhodné při použití kryostatů atd.) Pro PID regulaci byla využita předpřipravená VI, která jsou součástí LabVIEW™ PID toolkitu. Tyto VI používají zpětnou obdélníkovou náhradu integrálu (viz rovnice 9) a mírně odlišné PID parametry, než jsou ty uvedené v kapitole 1.2.2, v rovnici (13):

proporcionální zesílení

$$P = k_R, \quad (14)$$

normovaná integrační časová konstanta

$$I = \frac{k_R T}{T_I} \quad (15)$$

a normovaná derivační časová konstanta

$$D = \frac{k_R T_D}{T}. \quad (16)$$

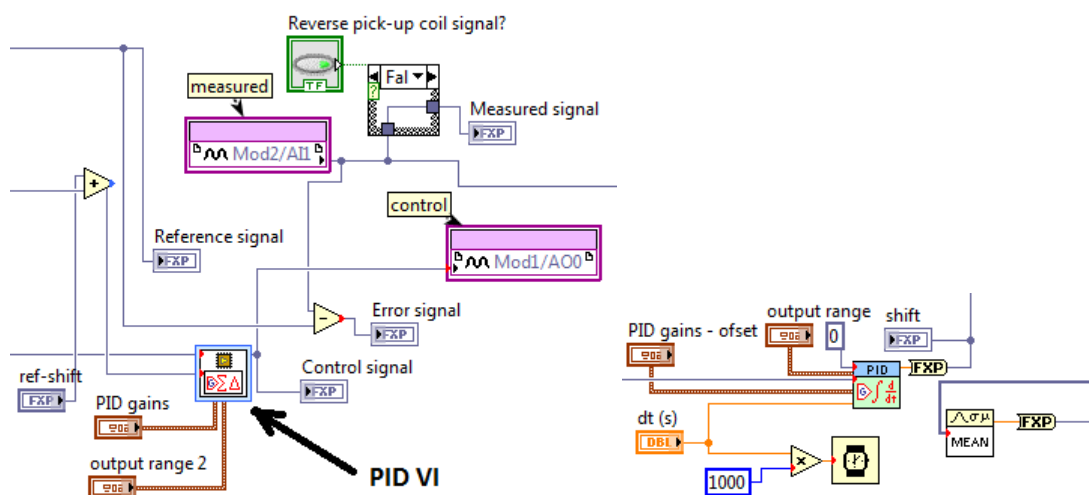
PID regulátor na zařízení CompactRIO pak používá mírně upravenou regulační rovnici:

$$u(kT) = P \cdot e(kT) + I \cdot \sum_{i=1}^k e(iT) + D \left\{ e(kT) - e[(k-1)T] \right\} + u(0), \quad (17)$$

Vzorkovací perioda T je rovna $10 \mu\text{s}$ – jelikož použité analogové výstupy mají vzorkovací periodu 100 kS/s (analogové vstupy jsou rychlejší a mají vzorkování 1 MS/s , ale musejí při PID regulaci „čekat“ na analogové výstupy). Vzhledem k tomu, že jeden kanál spektra měřeného při rychlosti 30 Hz , které má nesložené 1024 bodů, má délku

$$\frac{1}{30 \text{ Hz} \cdot 1024} = \frac{33,3 \text{ ms}}{1024} = 32,55 \mu\text{s}, \quad (18)$$

tak je tato vzorkovací perioda více než $3 \times$ kratší než čas shromažďování jednoho kanálu, tudíž za dobu po jakou se shromažďuje jeden kanál spektra dojde k opravě rychlosti pohybového zařízení celkem $3 \times$.

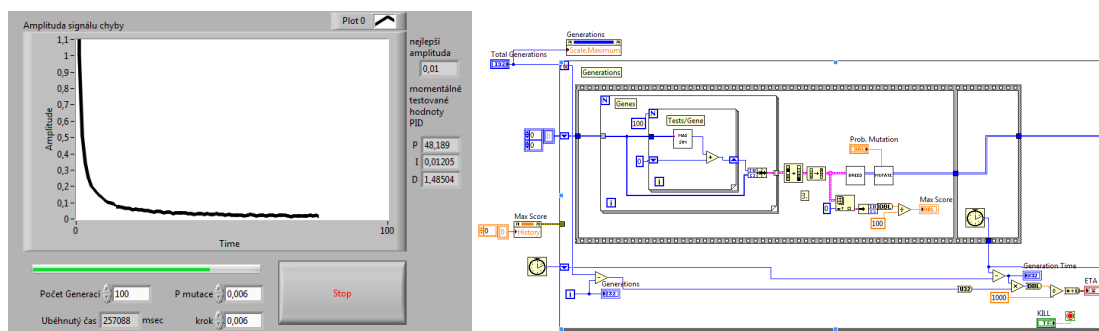


Obrázek 21 VI PID regulátoru nacházející se na FPGA (vlevo) a VI druhého PID regulátoru hlídajícího ofset, který se nachází na real-time části zařízení CompactRIO (vpravo).

3.1.3. Automatické ladění PID parametrů

Na real-time části je rovněž umístěn evoluční algoritmus, který dokáže sám najít parametry P, I a D. Použitý evoluční algoritmus vychází z příkladu z fóra National Instruments™, který byl původně určen pro řízení autonomních robotů [78]. Tento algoritmus je po úpravách aplikovatelný i na jiné situace, které na základě vyhodnocování informací na vstupu hledají optimální parametry na výstupu. Zde pracuje následně – začíná od P, I a D parametrů $[0; 0; 0]$. Následně dojde k tzv. mutaci – parametry P, I a D jsou pozměněny, je k nim s určitou pravděpodobností přičteno malé číslo. Jednotlivé mutace jsou posouzeny porovnáním parametrů chybového signálu (sleduje se zejména amplituda signálu chyby) a je ponechána pouze ta generace, která nejlépe vyhovuje (má nejmenší chybu) a ta následně pokračuje algoritmem a je zase zmutována atd. Otestování jedné generace trvá několik desítek sekund (je třeba počítat s časem nutným na ustálení PID regulátoru), projití celého samoladícího algoritmu pak trvá desítky minut (v závislosti na nastaveném kroku a pravděpodobnosti mutací). To je sice doba delší, než za jakou ladění PID zvládne zaškolený člověk, nicméně i tak může značně zjednodušit práci. Na obrázku 22 vlevo se nachází čelní panel a blokový diagram subVI (podprogram), které řídí hledání optimálních PID parametrů. Uprostřed je na grafu vidět průběh ladění – s každou generací se zmenšuje amplituda signálu chyby. Vpravo od grafu je aktuální amplituda signálu chyby a aktuální PID parametry. Dole pod grafem se nachází ovládací prvky na nastavování parametrů evolučního algoritmu, ovládající velikost kroku, pravděpodobnost mutace a počet generací. U použitého pohybového zařízení nalezneme evoluční algo-

ritmus optimální parametry PID regulátoru [42; 0,01171875; 1,1015625]. Velice podobné hodnoty byly nalezeny i pomocí ručního ladění. Tyto hodnoty jsou naprosto odlišné od hodnot získaných v [35], kde byly u pohybového zařízení stejného typu nalezeny hodnoty [6; 1,5; 6,5]. PID parametry závisí na elektromagnetických a dynamických vlastnostech pohybového zařízení jako vinutí použitých cívek (počet závitů, překřížení...), vycentrování cívek v dutině magnetu, tuhost pružin, na kterých je umístěna pohyblivá část, hmotnost použitého zářiče či délka použitého přívodního kabelu, který spojuje PID regulátor a pohybové zařízení.



Obrázek 22 | Čelní panel a blokový diagram subVI s evolučním algoritmem, který řídí automatické ladění PID parametrů.

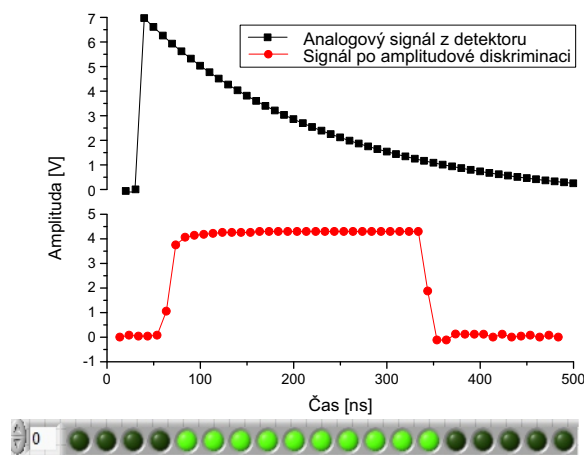
3.1.4. Detekce signálu a tvorba Mössbauerova spektra

Detekce signálu probíhá pomocí scintilačního detektoru s integrovaným jednodánalovým analyzátozem [30,72]. Jednodánalový analyzátor je pomocí programu napsanému v LabVIEW™ využit k mnohakanalové analýze a nastaven na vhodný interval kanálů, který odpovídá požadované energii gama fotonů. Na výstupu z jednodánalového analyzátoru získáme pulzy o délce kolem 300 ns a amplitudě 5 V. Signál z detektoru (nyní již pouze logické pulzy) je následně snímán pomocí digitálního vstupu na měřicí kartě NI 9402. Dále je ještě v rámci FPGA vytvořeno pole bitů, které značí detekce za jednu periodu – kladný bit značí že byl detekován platný impuls, který odpovídá detekci gama fotonu ve zvoleném intervalu energií. Nulový bit značí že nebyl detekován žádný impuls. Toto řešení bylo vybráno kvůli šetření kapacity FPGA – ukládání dat do FPGA je velmi náročné na množství použitých logických hradel. Ze stejných důvodů bylo využito pole bitů a ne pole čísel. Toto pole je následně přeneseno na real-time část systému CompactRIO, kde dochází k převodu na pole s 0 a 1 a následnému sčítání těchto polí ze všech period. Součtové pole pak představuje Mössbauerovo spektrum. Ze spektra jsou následně vymazány části představující body obrátu (viz obrázek 20 v sekci 3.1.1) a zbytek kanálů je sečten tak, aby v nesloženém spektru bylo 1024 kanálů, případně je ponechán tak jak je – jelikož je plánováno další zpracování jako linearizace, popsána dále v kapitole 4.1.

Na obrázku 23 je zobrazen jeden impuls z detektoru před a po amplitudové diskriminaci. Pod ním je ve stejném měřítku znázorněno, jak je signál digitalizován a reprezentován v zařízení CompactRIO za použití pole booleovských diodových indikátorů. Jak je vidět, pulz tvoří 10 „svítících LEDek“ (10 bitů s logickou hodnotou „1“), které mají délku $33,3 \text{ ns}$, což je dáno vzorkovací periodou digitálního vstupu. To pak odpovídá délce pulzu

$$10 \cdot 33,3 \text{ ns} \doteq 333 \text{ ns} \approx 300 \text{ ns}. \quad (19)$$

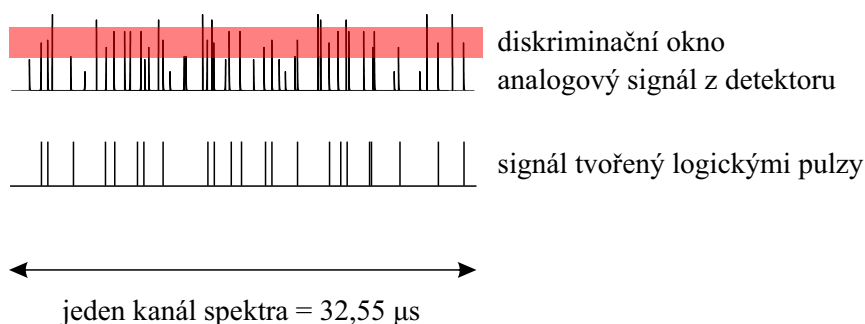
To, že si délky pulzů nasnímaných vysokorychlostním digitizérem a digitálním vstupem přesně neodpovídají je dáno hlavně vzorkováním signálu – pokud hrana pulzu padne doprostřed vzorku, tak může být ze signálu jak logická „0“, tak logická „1“. Dalším důvodem je, že logický pulz není



Obrázek 23 Jeden impuls z detektoru a pod ním pulz po amplitudové diskriminaci. Dole pulz digitalizovaný jako pole bitů, zobrazený pomocí pole diodových indikátorů.

dokonale čtvercový. Karta používá tzv. LVTTTL (low-voltage transistor-transistor-logic) logiku a je tolerantní na 5 V. Za logickou „0“ je považován signál mezi 0,0 V a 0,8 V a za logickou „1“ signál mezi 2,2 V a 5,5 V. Signál ale krátce probíhá i tzv. zakázanou oblastí, kde není definováno jestli je signál logická „0“ nebo „1“.

Na obrázku 24 je zobrazena ukázka signálu z detektoru a princip amplitudové diskriminace – červený pruh znázorňuje diskriminační okno. Dole pod ním je signál, který prošel amplitudovou diskriminací. Délka ukázkového úseku signálu z detektoru odpovídá jednomu kanálu spektra majícího 1024 bodů v nesložené podobě měřeného při 30 Hz.



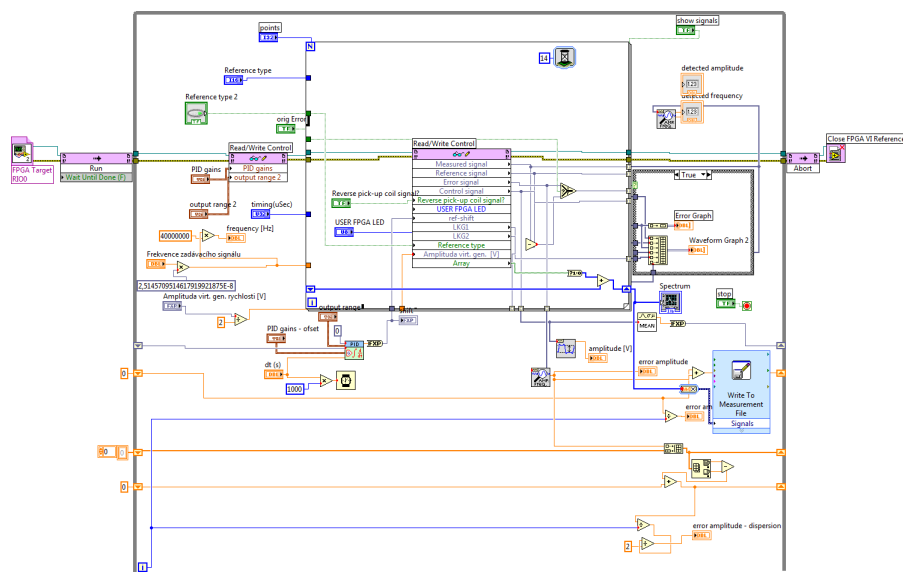
Obrázek 24 Ukázka signálu z detektoru a princip amplitudové diskriminace. Délka signálu odpovídá jednomu kanálu spektra, které má v nesložené podobě 1024 kanálů a pro frekvenci zadávacího signálu 30 Hz.

3.2. Program běžící na operačním systému reálného času

Uprostřed blokového diagramu programu na real-time části na obrázku 25 se nachází blok, který slouží pro přenášení všech proměnných mezi FPGA a real-time částí. Kromě přenosu jednotlivých period spektra program také umožňuje ovládání parametrů PID regulátoru. Dále se zde nachází kód určený k porovnávání kvality PID regulace a také druhý PID regulátor, který hlídá

drift rychlostní osy. A rovněž část, která z pole bitů, které reprezentuje jednu periodu spektra, skládá spektrum. Čelní panel využívá systému záložek. Na obrázku 26 je zobrazena první záložka, která ukazuje Mössbauerovo spektrum. Pod spektrem jsou ovládací prvky na spuštění a zastavení načítání spektra. Vedle spektra jsou informace o nastavení spektrometru, které se společně s dobou měření (zobrazena pod spektrem) zapíší do *.ini souboru, který má stejné jméno jako spektrum, to má ale koncovku *.1vm. Oba tyto soubory mají název, který odpovídá číslu spektra a ukládají se do interní paměti zařízení CompactRIO, do složky /home/1vuser/nat.inst/LabVIEW Data. Odtud se dají získat přes protokol SMB (ve Windows přístupné v *Místa v síti*, pokud se počítač nachází ve stejné síti), nebo lze spektrum uložit do počítače pomocí tlačítka *uložit spektrum*. Soubor se spektrem i soubor *.ini jsou prostým textovým souborem s ASCII kódováním a lze je otevřít v jakémkoliv textovém editoru. Díky tomu lze spektrum jednoduše exportovat do tabulkového editoru či do fitovacího softwaru. Soubor se spektrem obsahuje jen sloupec s počty detekovaných impulzů a má formát, jaký je obvyklý i u jiných Mössbauerových spektrometrů.

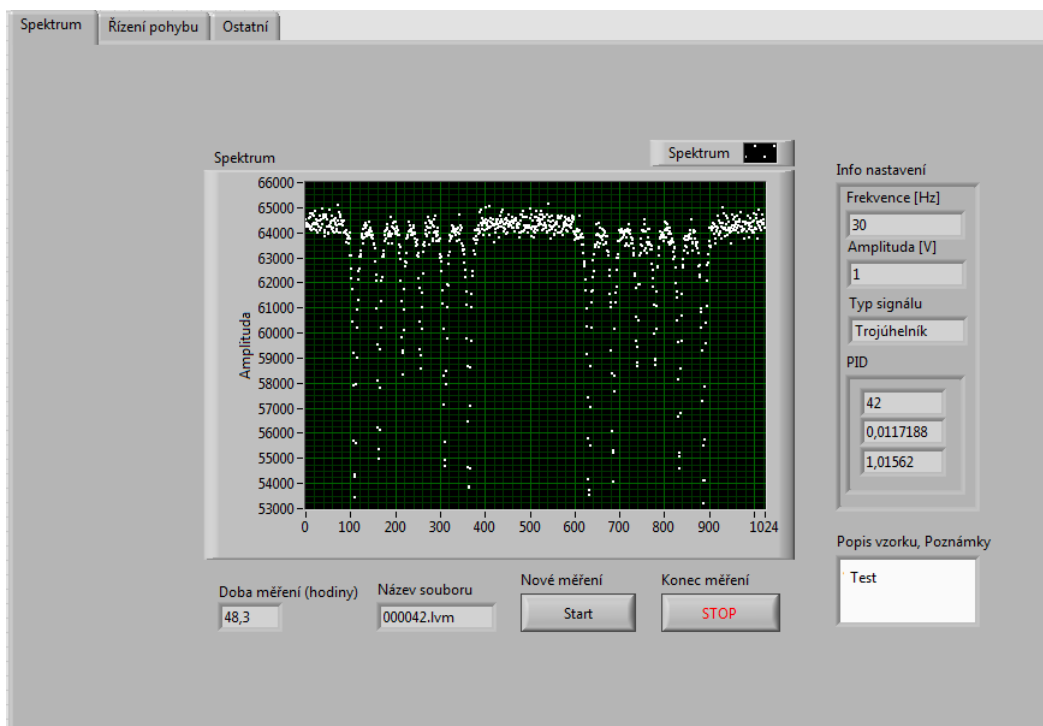
Na obrázku 27 je zobrazena druhá záložka čelního panelu. Na ní je možno nastavovat parametry systému řízení rychlosti – ovládat amplitudu a frekvenci virtuálního generátoru signálu rychlosti či nastavovat parametry PID regulátorů. Stisknutím tlačítka Autotuning se otevře nové okno a zahájí se automatické ladění PID parametrů. Vpravo se nachází grafy se signály. Dolní graf zobrazuje referenční signál $w(t)$, signál rychlosti s jakou se pohybuje pohybové zařízení $y(t)$, jejich rozdíl – signál chyby $e(t)$ a řídicí signál $u(t)$. Kromě toho jsou zde zobrazeny také výstupy z laserového systému LK-G. Nahoře je zobrazen ještě jednou signál chyby $e(t)$, tentokrát ale zvětšený a rozdíl rychlostí pohybového zařízení měřených pomocí měřicí cívky pohybového zařízení a laserového systému LK-G.



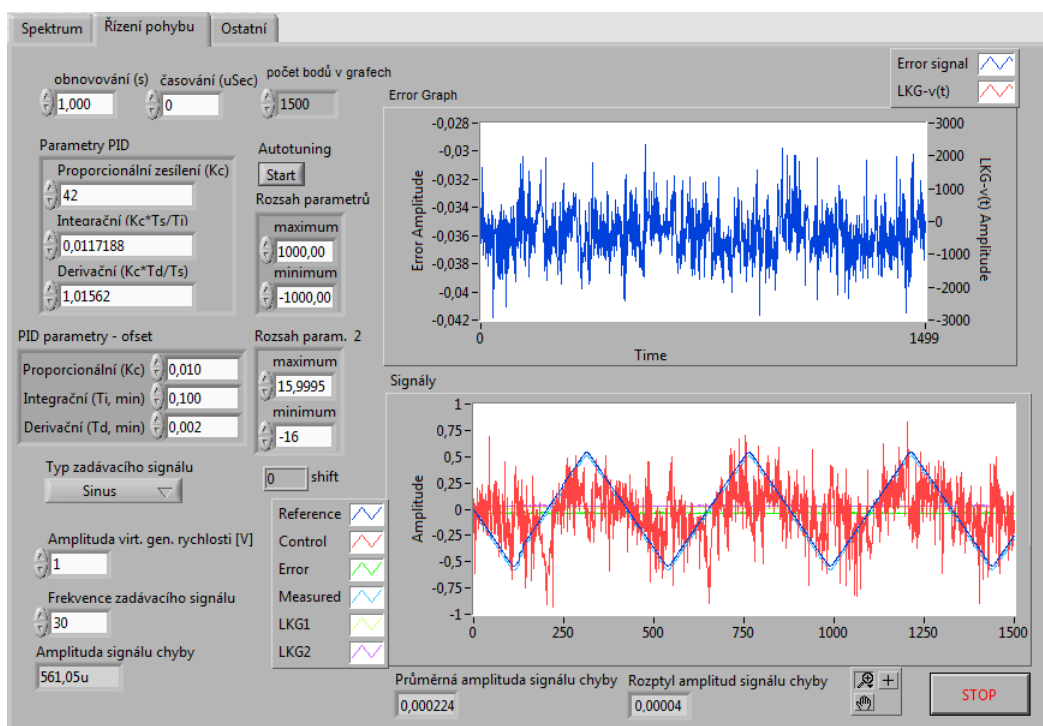
Obrázek 25 | Blokový diagram programu na real-time části zařízení CompactRIO.

3.2.1. Další možnosti zobrazení čelního panelu

Čelní panel na obrázcích 26 a 27 je zobrazen pomocí počítače na němž probíhá programování zařízení CompactRIO. V praxi to znamená, že v tomto případě je třeba mít u spektrometru naprogramovaného na platformě CompactRIO neustále zapnutý počítač obsahující LabVIEW™ s příslušnými toolkity. To ale není zrovna uživatelsky přívětivé. CompactRIO je samo o sobě počítačem a dokáže běžet bez počítače použitého k programování. Stačí jen nastavit, aby se vytvořený program spouštěl automaticky po startu operačního systému v zařízení CompactRIO. Ovládání pak



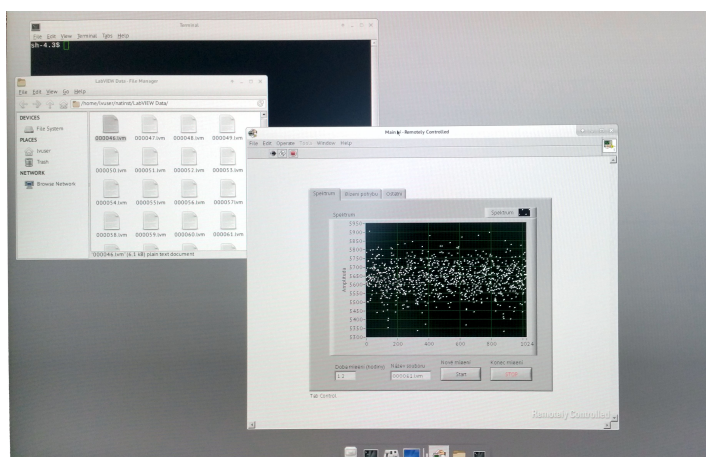
Obrázek 26 | Čelní panel aplikace spektrometru, záložka se zobrazováním spektra a informací o něm, a tlačítka ke startu nového měření a jeho zastavení.



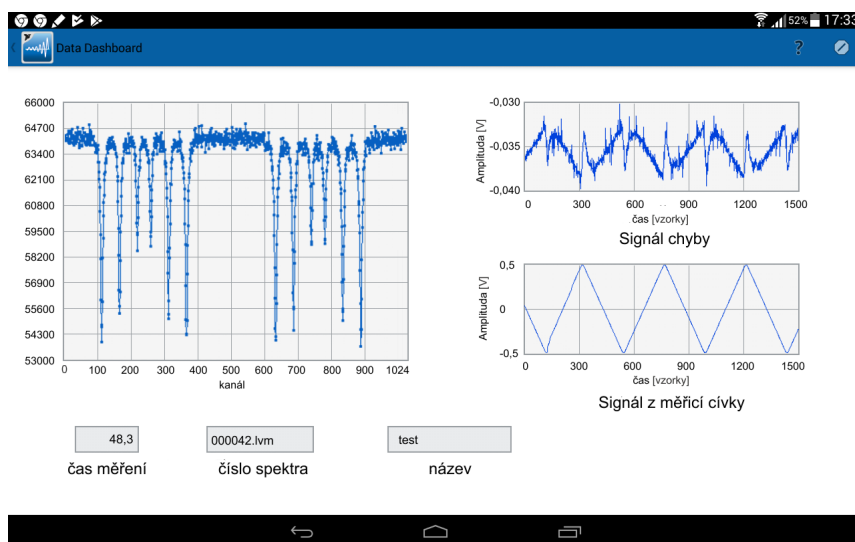
Obrázek 27 | Čelní panel aplikace spektrometru, záložka zobrazující průběh rychlosti a nastavování parametrů PID regulátoru a dalších parametrů systému řízení rychlosti.

může probíhat několika způsoby. Jednou z možností je přímo k zařízení CompactRIO připojit přes Mini DisplayPort monitor a přes sběrnici USB klávesnici a myš. Pokud je v NI MAX™ (Measurement and Automation eXplorer™) zapnuto GUI (Graphical User Interface – grafické uživatelské rozhraní), pak se na monitoru objeví prostředí XFCE (XForms Common Environment), jakožto

uživatelské rozhraní NI Linux Realtime™. Zobrazí se zde rovněž i okno s námi naprogramovaným programem (pokud není zapnuto grafické uživatelské rozhraní, zobrazí se pouze Linuxový terminál). Screenshot plochy s čelním panelem spektrometru postaveného na platformě RIO je zobrazen na obrázku 28. Druhou možností je místo monitoru, klávesnice a myši využít vzdálené plochy přes protokol VNC (Virtual Network Computing). VNC se dá používat i na smartphonech, nicméně uživatelsky přívětivějším řešením je využití aplikace zvané LabVIEW™ Data Dashboard. Jedná se o aplikaci, která umožňuje vytváření čelních panelů na míru. První verze této aplikace byla použita již v [6], nicméně aplikace od té doby urazila velkou cestu. Čelní panel spektrometru postaveného na platformě CompactRIO, který byl vytvořen pomocí aplikace LabVIEW™ Data Dashboard, je zobrazen na obrázku 29.



Obrázek 28 | Čelní panel aplikace spektrometru běžící na NI Linux Realtime OS™ na zařízení CompactRIO.

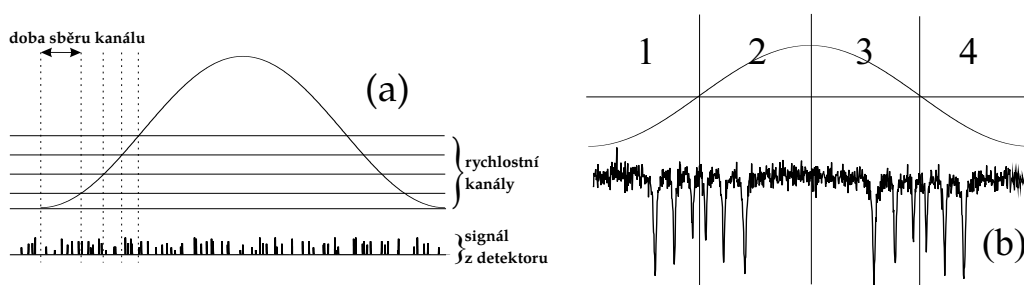


Obrázek 29 | Čelní panel aplikace spektrometru v tabletu s OS Android vytvořený za pomoci aplikace LabVIEW™ Data Dashboard.

4. Rozšiřující režimy spektrometru

4.1. Využití sinusového průběhu rychlosti ke zlepšení linearity spektra

Tento režim měření využívá sinusového referenčního signálu pro pohyb dopplerovského modulatoru. Na obrázku 30(a) je zobrazeno zjednodušené ilustrační schéma přiřazování detekovaných impulzů do kanálů spektra. Toto spektrum obsahuje čtyři kanály, které reprezentují stejně velké rychlostní intervaly. Na rozdíl od lineárního spektra měřeného s trojúhelníkovým referenčním signálem rychlosti jsou tyto kanály se stejně velkými rychlostními intervaly různou dobu otevřené pro čtení spektra. Kanály spektra jsou otevírány nerovnoměrně, tak aby odpovídaly průběhu rychlosti (viz obrázek 30(a)). Získaná spektra mají následně rychlostní osu modulovanou funkcí sinus. Pro zpracování a vyhodnocování spekter je tedy nutné tato spektra linearizovat. Tato linearizace je provedena normováním délek jednotlivých kanálů. Každý kanál obsahuje velké množství primárních kanálů, které odpovídají jednotlivým vzorkům signálu z detektoru. Normování je provedeno vymazáním určitého množství vzorků, tak aby byl jejich počet stejný u všech rychlostních kanálů spektra.



Obrázek 30 | Nelineární přiřazování impulzů do kanálů spektra (a) a rozdělení spektra na čtyři kvadranty (b).

Spektra jsou zaznamenávána ve velmi vysokém rozlišení se statisíci či milióny primárních kanálů. Počet primárních kanálů je určen podílem vzorkovací frekvence použitého digitizéru f_s a frekvence pohybu pohybového zařízení f . Například pokud použijeme vzorkovací frekvenci 20 MS/s a frekvence pohybového zařízení je 30 Hz, pak podle rovnice (20) dostaneme 666 666 primárních kanálů

$$n = \frac{f_s}{f} = \frac{20\text{MSa/s}}{30\text{Hz}} = 6, \bar{6} \cdot 10^5. \quad (20)$$

Následně je spektrum přepočítáno a linearizováno algoritmem poprvé popsaným T. Frankem [79]. Linearizační algoritmus byl vyvinut v prostředí LabVIEW™, tak aby byl kompatibilní s použitým spektrometrem. Tento algoritmus využívá cyklometrických funkcí arkus sinus a arkus kosinus. Jelikož jsou tyto funkce nespojitě, tak musí být spektrum rozděleno do čtyř kvadrantů (viz obrázek 30(b)), které budou zpracovány odděleně. Dalším důvodem dělení spektra na intervaly je, že chceme získat spektrum odpovídající trojúhelníkovému průběhu rychlosti. Algoritmus dále rozdělí danou čtvrtinu spektra na malé části, které odpovídají nelineární délce jednotlivých kanálů a které jsou určeny rovnicí (21). Samotné mazání vzorků je provedeno funkcí *array subset*. To, které primární kanály ve spektru zůstanou a které budou smazány je určeno pomocí rovnic (22 – 25).

$$L = n \frac{\arcsin\left(\frac{1}{N}\right)}{2\pi}, \quad (21)$$

$$I_1 = n \frac{\arccos(\frac{1}{N}i)}{2\pi}, \quad (22)$$

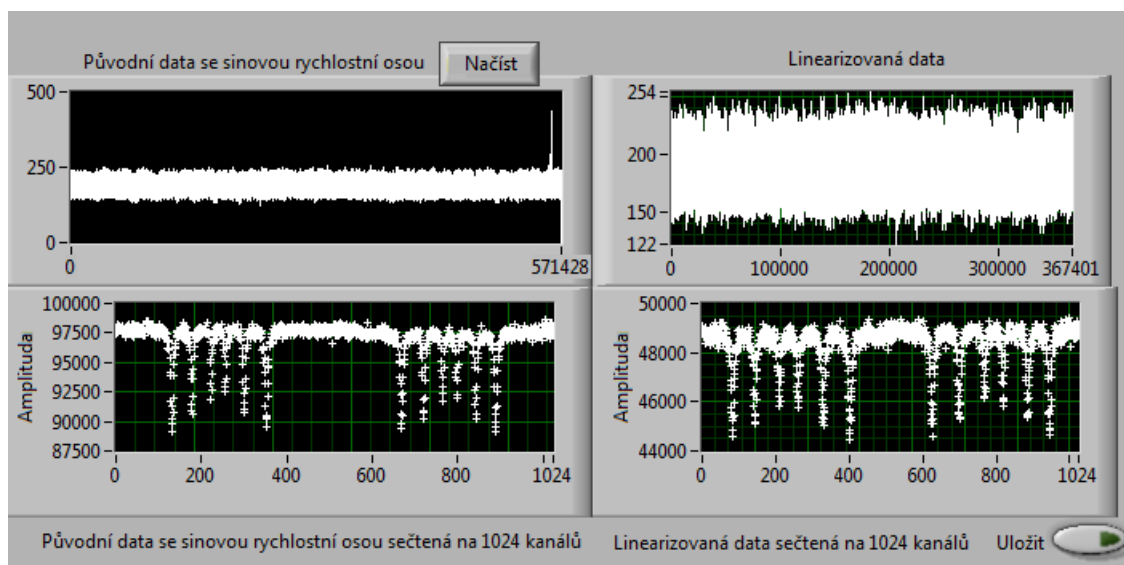
$$I_2 = n \frac{\arcsin(\frac{1}{N}(N-i))}{2\pi} + \frac{n}{4}, \quad (23)$$

$$I_3 = n \frac{\arccos(\frac{1}{N}i)}{2\pi} + \frac{n}{2}, \quad (24)$$

$$I_4 = n \frac{\arcsin(\frac{1}{N}(N-i))}{2\pi} + \frac{3n}{4}. \quad (25)$$

V kvadrantech 1 a 3 je spektrum přepočítáno pomocí funkce arcus kosinus s posunem $n/2$, kde n značí počet kanálů v Mössbauerově spektru. Ve kvadrantech 2 a 4 je spektrum přepočítáno pomocí funkce arcus sinus. $I_1 - I_4$ značí číslo (index) kanálu ve spektru, N je počet iterací algoritmu (a rovněž celkové číslo primárních kanálů), a i je číslo momentální iterace algoritmu (číslo momentálně řešeného primárního kanálu). Jakmile je provedena linearizace, dojde k sečtení primárních kanálů v jednotlivých kanálech a spektrum má následně 1024 kanálů (pro nesložené spektrum), aby bylo možné spektrum vyhodnocovat v běžně používaném softwaru.

Na obrázku 31 je zobrazen čelní panel aplikace, která provádí výše popsany algoritmus. Nahoře vlevo jsou vidět původní data, nahoře vpravo linearizovaná data. Při pohledu na první a druhý graf si lze všimnout úbytku primárních kanálů, ty byly při linearizaci vymazány. Pro názornost jsou data zobrazena i v grafech dole, kde jsou sečtena na 1024 bodů aby byly vidět spektrální čáry.

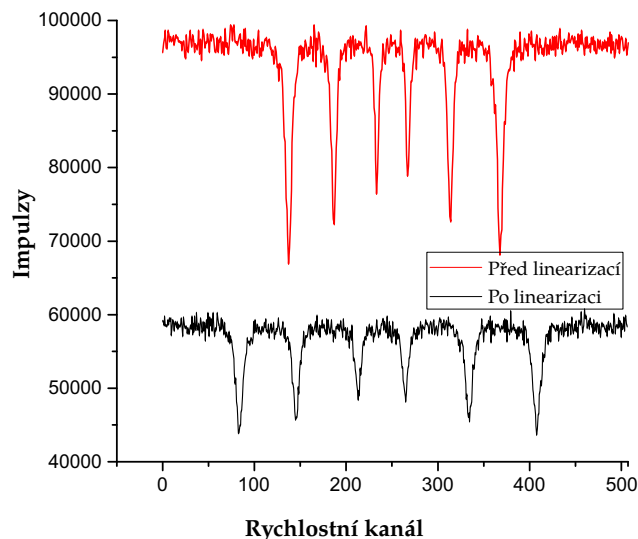


Obrázek 31 | Čelní panel linearizačního programu.

4.1.1. Porovnání metody

Pro porovnání metody byl využit upravený Mössbauerův spektrometr [49] s digitálním PID kontrolérem [35], a scintilačním detektorem gama záření [30]. Kvalita spektra byla popsána parametry FWHM (Full width at half of maximum – šířka spektrální čáry v polovině maxima, respektive zde u transmisních spekter šířka v polovině minima) a nelinearita rychlostní osy [13]. Linearizační program byl naprogramován v prostředí LabVIEW™, aby byl kompatibilní s použitým spektrometrem [49]. Pro porovnání metod byla měřena spektra obohaceného vzorku $^{57}\text{Fe}_2\text{O}_3$

ve frekvenčním rozsahu 10 – 100 Hz s konstantní amplitudou signálu rychlosti 0,7 V, která na použitém spektrometru přibližně odpovídá rychlostnímu intervalu ± 12 mm/s. Pro názornost je jedno spektrum zobrazeno na obrázku 32. Nahoře je původní spektrum a dole je to samé spektrum, které prošlo linearizací. Toto spektrum bylo měřeno při frekvenci 30 Hz, která je pro daný spektrometr nejčastěji používaná.



Obrázek 32 | Spektrum $^{57}\text{Fe}_2\text{O}_3$ měřené se sinovým referenčním signálem rychlosti (nahore) a to stejné spektrum, které prošlo linearizačním algoritmem (dole). Spektrum bylo měřeno při frekvenci 30 Hz a při amplitudě 0,7 V.

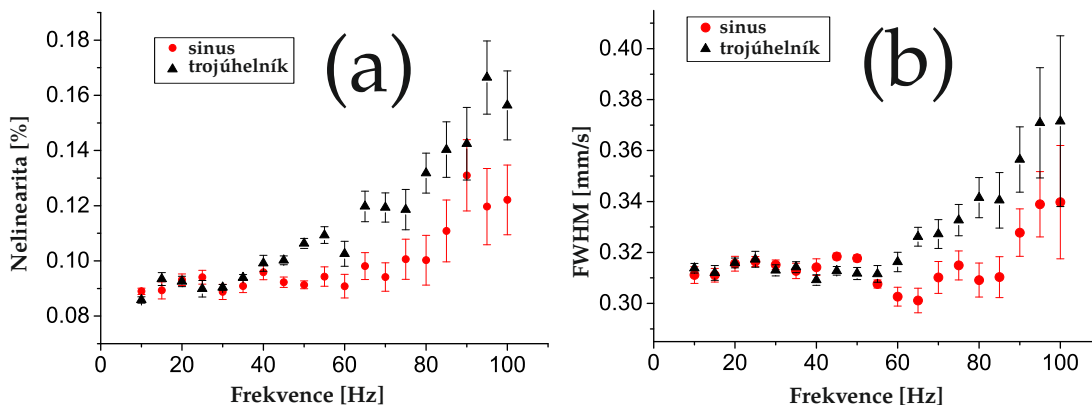
Na obrázku 33 je zobrazena frekvenční závislost kvality kalibračních spekter obdržených při klasickém módu využívajícím trojúhelníkový referenční signál (černá) a spektra získaná při sinové rychlosti, která byla následně linearizována (červená). Pro popis kvality spekter byly využity parametry *nelinearita rychlostní osy*, která je dána rovnicí

$$\text{non}(i) = \frac{x(i) - av(i) - b}{v(6) - v(1)}, \quad (26)$$

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 [13]. V grafu je uvedena vždy průměrná nelinearita ze všech čar a tzv. errorbary ukazují rozptýl hodnot pro jednotlivé spektrální čáry.

Druhý parametr zvolený pro popis kvality spekter je šířka spektrální čáry FWHM. Obrázek 33 jasně demonstruje, že použití rychlosti se sinovým průběhem vykazuje větší stabilitu ve větším frekvenčním intervalu (až do 100 Hz). Grafy frekvenční závislosti nelinearity rychlostní osy (viz obrázek 33(a)) a šířky spektrální čáry (viz obrázek 33(b)) ukazují, že rozdíl mezi spektry roste se zvyšující se frekvencí a že použití sinového signálu dovoluje řídit pohybové zařízení s vyšší přesností na širším rychlostním intervalu.

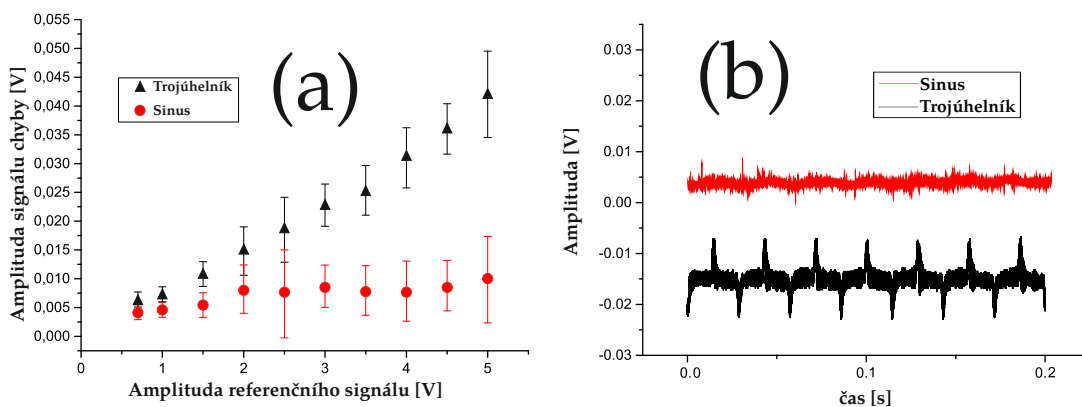
Jak je vidět z obrázku 33, linearizovaná sinová spektra mají nelinearitu pod 0,1 % až do frekvence 80 Hz a FWHM pod 0,32 mm/s až do 85 Hz, zatímco při použití trojúhelníkového signálu vykazují parametry spektra stabilitu jen do 60 Hz. Použitý Mössbauerův spektrometr má při obvykle používané rychlosti 30 Hz garantovanou nelinearitu rychlostní osy pod 0,1 % [49]. Šířka spektrálních čar je mírně širší kvůli použití ^{57}Fe obohaceného vzorku – obohacené vzorky mají vždy širší spektrální čáry kvůli zvýšené pravděpodobnosti zpětných rázů v krystalické mřížce (ve srovnání se vzorky s přirozeným zastoupením ^{57}Fe) [80].



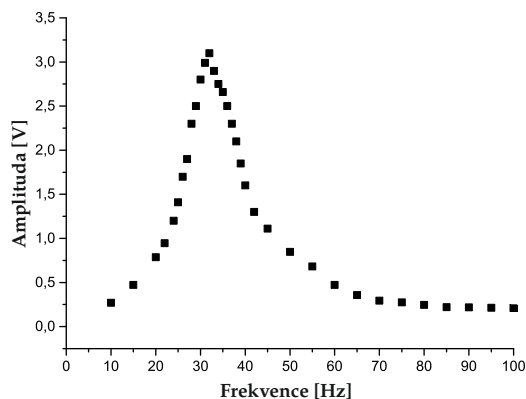
Obrázek 33 | Frekvenční závislost nelinearity rychlostní osy (a) a šířky čar (b) u kalibračního vzorku $^{57}\text{Fe}_2\text{O}_3$ měřené s trojúhelníkovým referenčním signálem rychlostí a lineárnizovaných spekter původně měřených se sinovým referenčním signálem rychlosti.

Vyšší hodnoty nelinearity rychlostní osy a šířky spektrálních čar ve vyšších frekvencích pravděpodobně korespondují s neoptimálním nastavením PID parametrů. Nicméně, jak ukazuje obrázek 33, sinová řídicí rychlost je méně náchylná na použitou hodnotu frekvence pohybového zařízení, což souvisí s tím, že se jedná o přirozenější pohyb a také to, že je jednodušší jej regulovat pomocí PID regulátoru. Frekvence, při níž dochází k nárůstu nelinearity a šířky čar, koresponduje s rezonanční frekvencí (viz obrázek 35). Jak bylo totiž již dříve zjištěno, PID regulátor nejlépe reguluje těsně pod rezonanční frekvencí pohybového zařízení.

Pro měření amplitudové závislosti kvality této metody nebylo možno porovnávat kvalitu spekter, jelikož vyšší amplitudy zadávacího signálu (5 V) odpovídají vyšším rychlostním intervalům (± 60 mm/s) a tudíž by nebylo možné porovnávat spektra jednoho vzorku. Byly proto porovnávány amplitudy signálu chyby. Závislost amplitudy chybového signálu na použité amplitudě zadávacího signálu je zobrazena na obrázku 34(a) společně s příkladem signálu chyby při použití sinového a trojúhelníkového řídicího signálu (obrázek 34(b)). Z obrázku 34(a) jasně vyplývá, že amplituda signálu chyby je přímo úměrná amplitudě řídicího signálu, nicméně při použití sinového řídicího signálu je růst signálu chyby pozvolnější. To je mimo jiné dáno tvarem signálu chyby, který má v bodech obratu rychlosti pohybového zařízení znatelné píky při použití trojúhelníkového signálu, viz obrázek 34(b) dole. Lepší stabilita ve vyšších rychlostních intervalech může umožnit měření bez potřeby speciálních pohybových zařízení.



Obrázek 34 | Závislost amplitudy signálu chyby na amplitudě zadávacího signálu (a) a příklad signálu chyby (b).

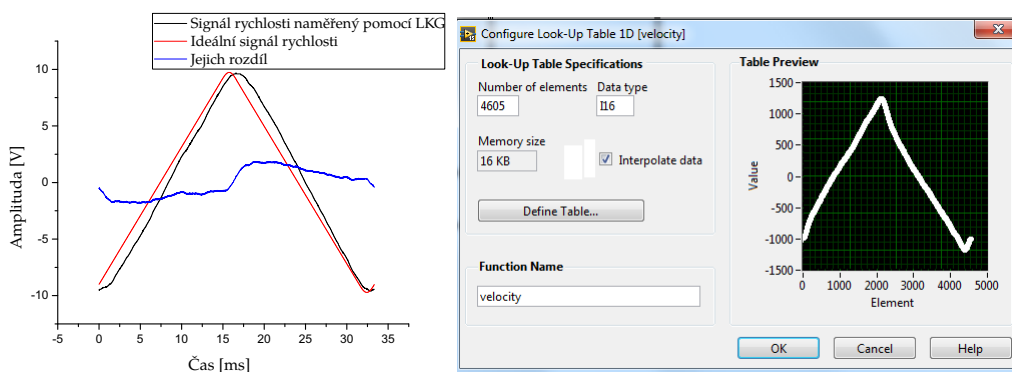


Obrázek 35 | Frekvenční amplitudová charakteristika použitého pohybového zařízení.

4.2. Linearizace modulací referenčního signálu pomocí signálu chyby měřného laserovým vibrometrem

Tato kapitola se věnuje dalšímu způsobu linearizace rychlostní osy Mössbauerova spektrometru. Jak již bylo zmíněno v kapitole 1.3.1, tento způsob linearizace rychlostní osy vychází z metody poprvé nevržené v [38]. Zde bude popsána varianta tohoto linearizačního postupu, která využívá laserový vibrometr Keyence LK-G5000. Laserový vibrometr byl použit protože na rozdíl od cívek pohybujících se v magnetickém poli není náchylný na elektromagnetické rušení. Náhodné elektromagnetické rušení v systému řízení se následně projevuje rozmazáním spektrálních čar – zvětšením jejich šířky. Laserový systém rovněž není náchylný na nehomogenity magnetického pole permanentních magnetů či vinutí cívky, které se projeví nelinearitou rychlostní osy.

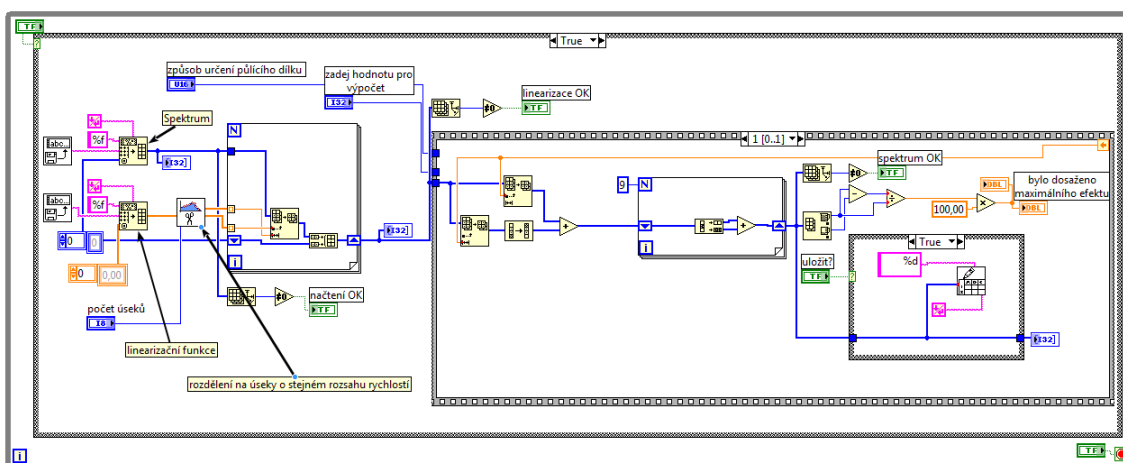
Pomocí laserového vibrometru LK-G byl měřen průběh rychlosti pohybového zařízení. Tento průběh byl zaznamenáván a následně zprůměrován. Změřený průběh rychlosti byl odečten od ideálního průběhu rychlosti (viz obrázek 36 vlevo). Tento rozdíl byl následně použit k modulaci zadávacího signálu. Signál s přidanou modulací byl následně nahrán do *look-up* tabulky virtuálního generátoru rychlosti (viz obrázek 36 vpravo).



Obrázek 36 | Signál rychlosti měřený vibrometrem LK-G5000, ideální signál a jejich rozdíl (vlevo) a referenční signál modulovaný tímto rozdílem, nahraný v *look-up* tabulce virtuálního generátoru rychlosti (vpravo). Měřeno při 30 Hz a amplitudě zadávacího signálu 10 V (což odpovídá zhruba ± 120 mm/s) a při mírně rozladěných PID parametrech (pro demonstraci a lepší viditelnost rozdílů mezi signály).

4.3. Opravy nelinearity dodatečnou korekcí

Zprůměrovaný signál chyby byl rovněž využit pro dodatečné přepočítávání spektra. Tato metoda funguje podobně jako linearizace pomocí sinového signálu rychlosti (viz kapitola 4.1). Spektrum je zaznamenáno ve vysokém rozlišení a přepočítáno pomocí inverzní funkce k funkci, rozdílu skutečného signálu rychlosti a ideálního průběhu. Na obrázku 37 je zobrazen blokový diagram linearizačního softwaru. Jeho funkce je následující – nejprve je načteno spektrum a linearizační funkce – naměřený průměrný signál rychlosti. Ten je rozdělen na malé intervaly, které nejsou stejně dlouhé, ale mají stejně velký rychlostní rozsah a následně jsou algoritmem ze spektra vymazávány jednotlivé body tak, aby byly dané intervaly stejně dlouhé. Dále je spektrum sečteno na 1024 bodů a případně i složeno. Omezením tohoto algoritmu je, že linearizační funkce musí být prostá na intervalech $(0; \frac{T}{2})$ a $(\frac{T}{2}; T)$, kde T je perioda signálu. Tato podmínka je většinou splněna, jelikož šum je eliminován pomocí průměrování a linearizační funkce se většinou jen málo liší od trojúhelníkového signálu.

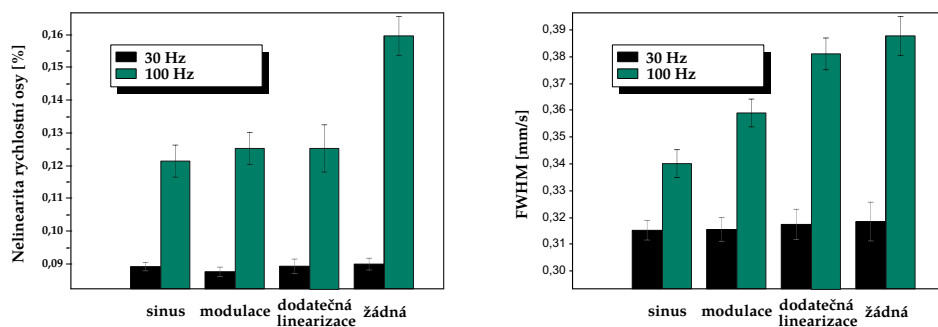


Obrázek 37 | Blokový diagram programu na dodatečnou linearizaci spektra.

4.4. Porovnání všech výše uvedených metod

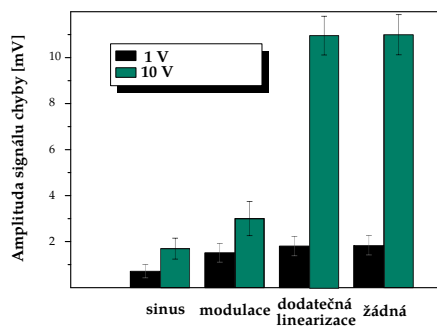
V grafech na obrázku 38 je zobrazena závislost nelinearity rychlostní osy spektra (vlevo) a šířky spektrálních (vpravo) čar kalibračních spekter obohaceného vzorku $^{57}\text{Fe}_2\text{O}_3$ při použití různých linearizačních metod. Černé sloupce jsou hodnoty pro spektra měřená při 30 Hz a zelené sloupce při 100 Hz. Z grafů plyne, že při vyšší frekvenci pohybu pohybového zařízení vykazují Mössbauerova spektra větší nelinearitu rychlostní osy. Tento nárůst nelinearity je však menší při použití dodatečných metod linearizace. Všechny tři porovnávané metody mají na snížení nelinearity rychlostní osy zhruba stejný účinek. Nicméně při porovnání šířek (FWHM) spektrálních čar spekter je vidět, že linearizace sinem je zdaleka nejlepší, po něm následuje linearizace pomocí modulace referenčního signálu. Dodatečná linearizace příliš šířku spektrální čáry nesnižuje. Šířky spektrálních čar jsou širší, jelikož, jak již bylo zmíněno v sekci 4.1, byl z důvodu rychlejšího měření použit kalibrační ^{57}Fe obohacený vzorek, což způsobilo mírné rozšíření spektrálních čar [80]. Na obrázku 39 je zobrazen graf závislosti amplitudy signálu chyby na amplitudě zadávacího signálu pro různé linearizační metody. Sinus má nejnižší signál chyby, následuje modulace. Metoda dodatečné linearizace nemá na snížení signálu chyby žádný vliv, jelikož jako dodatečná metoda signál chyby vůbec neovlivňuje.

Na obrázku 40 je zobrazen graf závislosti amplitudy signálu chyby pro různé módy spektrometru v závislosti na nastavení parametru P PID regulátoru. Parametr P byl vybrán protože v praxi



Obrázek 38

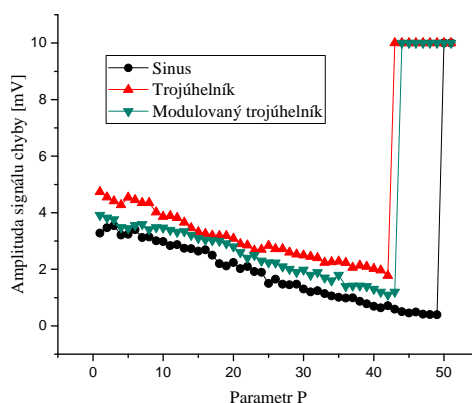
Porovnání nelinearity rychlostní osy spektra (vlevo) a šířky spektrálních (vpravo) čar kalibračních spekter obohaceného vzorku $^{57}\text{Fe}_2\text{O}_3$ při použití různých linearizačních metod. Černé sloupce jsou hodnoty pro spektra měřená při 30 Hz a zelené sloupce při 100 Hz.



Obrázek 39

Porovnání amplitudy signálu chyby při použití různých linearizačních metod, černě pro amplitudu 1 V (což odpovídá cca ± 12 mm/s) a zeleně pro amplitudu 10 V (což odpovídá cca ± 120 mm/s).

bylo zjištěno, že nejvíce ovlivňuje kvalitu PID regulace. Parametry I a D byly fixovány na hodnotě 0 a 0. Z grafu 40 jednoznačně plyne, že pro různé zadávací signály je signál chyby různě velký a že se liší i nástup saturace, nastavení, kde PID regulátor nezvládá regulovat pohybové zařízení a místo toho jen přepíná mezi maximální a minimální hodnotou AD převodníku (zde ± 10 V). Tento stav je lehce rozpoznatelný, jelikož při něm pohybové zařízení začne vydávat vysokofrekvenční tón (ten vzniká v důsledku toho, že se pohybové zařízení pohybuje už při frekvencích slyšitelných lidským sluchem). Graf na obrázku 40 ukazuje, že nejmenší amplitudy signálu chyby se dá dosáhnout při použití sinového referenčního signálu rychlosti. Amplituda signálu chyby dosahuje v tomto případě pod 1 mV. K saturaci u sinu dochází pokud je parametr P nastaven na hodnotu 50 a více. Pokud je referenčním signálem modulovaný trojúhelník, tak je amplituda signálu chyby vyšší (pod 2 mV) a saturace nastupuje pokud je hodnota P nastavena kolem 44. Pro obyčejný trojúhelník (se sinovým průběhem v bodech obratu) saturace nastupuje pokud je hodnota P nastavena na více než 42 a amplituda signálu chyby o něco málo vyšší než 2 mV. Tato amplituda je nicméně dána hlavně píky v signálu chyby, které vznikají v bodech obratu rychlosti, kde se neměří. V oblastech, kde se měří spektrum, je amplituda signálu chyby menší (viz např. obrázek 34(b)).



Obrázek 40 | Amplituda signálu chyby pro různé módy spektrometru v závislosti na nastavení parametru P PID regulátoru.

Závěr

První část této práce se zabývá vývojem a testováním nového typu Mössbauerova spektrometru pomocí techniky virtuální instrumentace na platformě CompactRIO. Práce se zabývá programováním aplikace určené k běhu na programovatelném hradlovém poli vestavěném do zařízení CompactRIO, a také programováním aplikace běžící na operačním systému NI Linux Real-Time OS™. Dále se zabývá digitalizací impulzů z detektoru pomocí digitálních vstupů s využitím jednonábového analyzátoru. Velká část této práce se zabývá systémem řízení rychlosti, generováním různých tvarů řídicího signálu a PID regulací pohybu pohybového zařízení. Pro potřeby řízení pohybového zařízení byl zkonstruován zesilovač signálů. Důležitou součástí vyvinutého spektrometru je systém automatického ladění PID parametrů, který dokáže uživateli usnadnit práci. Vyvinutý spektrometr přináší díky své jednoduché konfigurovatelnosti mnoho možností, jako například snadnou implementaci pokročilých postupů na další minimalizaci nelinearity rychlostní osy. Těmto linearizačním postupům se věnuje druhá část. Práce se zaměřuje nejprve na linearizaci pomocí sinového průběhu rychlosti a následné linearizace pomocí vyvinutého algoritmu. Popsaný linearizační přístup přináší lepší stabilitu v širším frekvenčním pásmu pohybu pohybového zařízení a možnost měřit ve vyšších rychlostních intervalech za použití stejných pohybových zařízení díky snížení amplitudy chybového signálu až o 75 %. Při užití běžně využívaných parametrů (10 mm/s, 30 Hz) je tato metoda srovnatelná s tradičními metodami. Očekává se využití této metody pro použití u pohybových zařízení bez měřicí cívky a bez PID regulátoru či u piezoelektrických pohybových zařízení. Výsledky této části byly již vydány v článku v impaktovaném časopise [39]. Práce se dále zabývá i dalšími metodami linearizace (linearizací pomocí modulace referenčního signálu a dodatečnou linearizací) a porovnává je. Linearizace pomocí sinové funkce tedy z porovnávaných metod poskytuje nejlepší výsledky, za ní následuje modulace referenčního signálu. Metoda dodatečné linearizace poskytuje sice horší výsledky než dvě dříve zmíněné metody, nicméně pořád je lepší než nevyužití žádné linearizační metody.

Seznam použitých zdrojů

- [1] Mössbauer, R. L.: Kernresonanzfluoreszenz von Gammastrahlung in Ir¹⁹¹. *Zeitschrift für Physik*, díl 151(2), 1958: s. 124–143, ISSN 14346001, doi:<10.1007/BF01344210>.
- [2] Mössbauer, R. L.: Recoilless nuclear resonance absorption of gamma radiation. *Nobel Lectures: Physics 1942 - 1962*, díl 4(1), 1964: s. 584–201.
URL <http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1961/mossbauer-lecture.pdf>
- [3] Pechoušek, J.; Vůjtek, M.; Novák, P.; aj.: *Číslicové měřicí systémy pro aplikovanou fyziku*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2012, ISBN 978-80-244-3136-9, 200 s.
- [4] Pechoušek, J.: *Využití techniky virtuální instrumentace při vývoji měřicích systémů pro jadernou fyziku se zaměřením na realizaci Mössbauerova spektrometru*. Habilitační práce, Univerzita Palackého, 2014.
- [5] Šťastný, J.: *FPGA prakticky*. BEN - technická literatura, 2011, ISBN 978-80-7300-261-9.
- [6] Kohout, P.: *Optimalizace řízení sestavy lineárního motoru s PID regulátorem pohybu u Mössbauerova spektrometru*. Diplomová práce, Univerzita Palackého, 2014.
- [7] Miroslav Mašláň: Mössbauerova spektroskopie. *Vydavatelství Univerzity Palackého v Olomouci*, 1993: str. 43.
- [8] Lipka, J.: Mössbauer Spectroscopy in Mineralogy and Geology. In *Mössbauer Spectroscopy in Materials Science*, Dordrecht: Springer Netherlands, 1999, s. 97–106, doi:<10.1007/978-94-011-4548-0_10>.
URL <http://link.springer.com/10.1007/978-94-011-4548-0_10>
- [9] Klingelhöfer, G.: Athena MIMOS II Mössbauer spectrometer investigation. *Journal of Geophysical Research*, díl 108(E12), 2003: str. 8067, ISSN 0148-0227, doi:<10.1029/2003JE002138>.
URL <<http://doi.wiley.com/10.1029/2003JE002138>>
- [10] Wagner, F. E.; Kyek, A.: Mössbauer spectroscopy in archaeology: Introduction and experimental considerations. *Hyperfine Interactions*, díl 154(1-4), 2004: s. 5–33.
- [11] Vandegrift, G.; Fultz, B.: The Mössbauer effect explained. *American Journal of Physics*, díl 66(7), jul 1998: s. 593–596, ISSN 0002-9505, doi:<10.1119/1.18911>.
URL <[http://www.wright.edu/~sim\\$guy.vandegrift/shortCV/Papers/Mossbauer.pdf](http://www.wright.edu/~sim$guy.vandegrift/shortCV/Papers/Mossbauer.pdf)>
<http://aapt.scitation.org/doi/10.1119/1.18911>
- [12] Kevin MacDow: Mössbauer Spectroscopy. *Chemistry LibreTexts*, 2015.
URL <https://chem.libretexts.org/Core/Physical_and_Theoretical_Chemistry/Spectroscopy/Mössbauer_Spectroscopy>
- [13] Evdokimov, V. A.; Mashlan, M.; Zak, D.; aj.: Mini and micro transducers for Mössbauer spectroscopy. *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, B*, díl 95(2), 1995: s. 278–280, ISSN 0168583X, doi:<10.1016/0168-583X(94)00611-3>.
- [14] Pechousek, J.; Jancik, D.; Evdokimov, V.; aj.: Velocity driving system for an in-field Mössbauer spectrometer. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, díl 267(5), mar 2009: s. 846–848, ISSN 0168583X, doi:<10.1016/j.nimb.2009.01.033>.
URL <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168583X09001815>>

- [15] Veiga, A.; Mayosky, M. A.; Martínez, N.; aj.: Smooth driving of Mössbauer electromechanical transducers. *Hyperfine Interact*, díl 202, 2011: s. 107–115, doi:<10.1007/s10751-011-0342-4>. URL <<https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs10751-011-0342-4.pdf>>
- [16] Kocher, C. W.: Hydraulic Constant-Velocity Transducer for Mössbauer Effect Measurements. *Review of Scientific Instruments*, díl 36(7), jul 1965: s. 1018–1022, ISSN 0034-6748, doi:<10.1063/1.1719749>. URL <<http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.1719749>>
- [17] Ognjanov, N.; Tsankov, L.; Ivanov, P.: An electrostatic RF modulator for Mössbauer gamma-rays. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, díl 204(2-3), jan 1983: s. 621–623, ISSN 0167-5087, doi:<10.1016/0167-5087(83)90096-0>. URL <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0167508783900960?via%3Dihub>>
- [18] Sakai, N.: A new Mössbauer transducer using piezoelectric bimorph actuators. *Hyperfine Interactions*, díl 42(1-4), feb 1988: s. 1165–1168, ISSN 0304-3843, doi:<10.1007/BF02395598>. URL <<http://link.springer.com/10.1007/BF02395598>>
- [19] Ikonen, E.; Seppa, H.; Potzel, W.; aj.: DC-SQUID based displacement sensor for a Mossbauer redshift experiment. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, díl 40(2), apr 1991: s. 196–199, ISSN 0018-9456, doi:<10.1109/TIM.1990.1032914>. URL <<http://ieeexplore.ieee.org/document/1032914/>>
- [20] Klingelhöfer, G.; Bernhardt, B.; Foh, J.; aj.: The Miniaturized Mössbauer Spectrometer MIMOS II for Extraterrestrial and Outdoor Terrestrial Applications : A Status Report. (May 2002), 2009: s. 371–379.
- [21] Kholmetskii, A.; Mashlan, M.; Chudakov, V.; aj.: A Mössbauer spectrometer with nonlinear velocity signal. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, díl 84(1), jan 1994: s. 120–121, ISSN 0168-583X, doi:<10.1016/0168-583X(94)95714-2>. URL <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0168583X94957142>>
- [22] Mashlan, M.; Kholmetskii, A.: Mössbauer spectrometer with resonant detector. *Nuclear Instruments and ...*, díl 243(1), jan 2006: s. 241–246, ISSN 0168583X, doi:<10.1016/j.nimb.2005.07.208>. URL <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168583X05014242http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168583X05014242>>
- [23] Wit, H.; Hoeksema, G.; Niesen, L.; aj.: A multi-purpose velocity transducer for Mössbauer spectrometers. *Nuclear Instruments and Methods*, díl 141(3), mar 1977: s. 515–518, ISSN 0029-554X, doi:<10.1016/0029-554X(77)90646-2>. URL <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0029554X77906462?via%3Dihub>>
- [24] El Nimr, M. K.; Kamel, M. M.; Amer, M. A.; aj.: A detailed design of a lab-built modulator driver for a mossbauer spectrometer. *Instrumentation Science and Technology*, díl 41(6), nov 2013: s. 638–650, ISSN 10739149, doi:<10.1080/10739149.2013.828302>. URL <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10739149.2013.828302>>

- [25] Velásquez, A. A.; Carmona, A.; Velásquez, D.; aj.: Design and construction of an electromechanical velocity modulator for Mössbauer spectroscopy. *Hyperfine Interactions*, díl 202(1-3), nov 2011: s. 63–71, ISSN 0304-3843, doi:<10.1007/s10751-011-0339-z>. URL <<http://link.springer.com/10.1007/s10751-011-0339-z>>
- [26] Seberini, M.: A constant velocity Mossbauer drive. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, díl 21(7), jul 1988: s. 641–647, ISSN 0022-3735, doi:<10.1088/0022-3735/21/7/002>. URL <<http://stacks.iop.org/0022-3735/21/i=7/a=002?key=crossref.47e5a739280edaeaa1d7ba8a3c672bf0>>
- [27] Riesenman, R.; Steger, J.; Kostiner, E.: Cosine effect in Mössbauer spectroscopy involving a source of non-zero radius. *Nuclear Instruments and Methods*, díl 72(1), 1969: s. 109–110, ISSN 0029-554X, doi:<10.1016/0029-554X(69)90275-4>. URL <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0029554X69902754>>
- [28] Balátě, J.: *Automatické řízení*. Praha: BEN technická literatura, první vydání, 2003, ISBN 80-7300-020-2, 664 s.
- [29] Pechousek, J.; Mashlan, M.; Frydrych, J.; aj.: Improving detector signal processing with pulse height analysis in Mössbauer spectrometers. *Hyperfine Interactions*, díl 175(1-3), mar 2007: s. 1–8, ISSN 03043843, doi:<10.1007/s10751-008-9580-5>. URL <<http://link.springer.com/10.1007/s10751-008-9580-5>>
- [30] Navařík, J.; Novák, P.; Pechoušek, J.; aj.: Precise compact system for ionizing radiation detection and signal processing with advanced components integration and electronic control. *Journal of Electrical Engineering*, díl 66(4), 2015: s. 220–225, ISSN 13353632, doi:<10.2478/jee-2015-0035>. URL <<https://www.degruyter.com/downloadpdf/j/jee.2015.66.issue-4/jee-2015-0035/jee-2015-0035.pdf>>
- [31] Ruegg, F. C.; Spijkerman, J. J.; DeVoe, J. R.: Drift-Free Mössbauer Spectrometer. *Review of Scientific Instruments*, díl 36(3), mar 1965: s. 356–359, ISSN 0034-6748, doi:<10.1063/1.1719570>. URL <<http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.1719570>>
- [32] Kwater, M.: Laser calibration of the Mössbauer spectrometer velocity : Improvements in design. díl 116, 1998: s. 53–66.
- [33] Preston, R. S.; McDowell, W. P.: Time-mode operation of a Mössbauer spectrometer without precision control of the drive waveform. *Nuclear Instruments and Methods*, díl 81(2), may 1970: s. 285–290, ISSN 0029-554X, doi:<10.1016/0029-554X(70)90560-4>. URL <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0029554X70905604?via%3Dihub>>
- [34] Piekoszewki, J.; Sawicki, A.; Michalski, M.: Time mode type Mössbauer spectrometer. *Nuclear Instruments and Methods*, díl 48(2), mar 1967: s. 349–350, ISSN 0029-554X, doi:<10.1016/0029-554X(67)90344-8>. URL <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0029554X67903448?via%3Dihub>>
- [35] Kohout, P.; Kouřil, L.; Navařík, J.; aj.: Optimized linear motor and digital PID controller setup used in Mössbauer spectrometer. *AIP Conference Proceedings*, díl 501(10), 2014, doi:<10.1063/1.4898610>.

- URL <<https://doi.org/10.1063/1.4898610http://aip.scitation.org/toc/apc/1622/1>>
- [36] Pechousek, J.; Prochazka, R.; Mashlan, M.; aj.: Digital proportional-integral-derivative velocity controller of a Mössbauer spectrometer. *Measurement Science and Technology*, díl 20(1), jan 2009: str. 017001, ISSN 0957-0233, doi:<10.1088/0957-0233/20/1/017001>.
URL <<http://stacks.iop.org/0957-0233/20/i=1/a=017001?key=crossref.61ff9fcc843c966076719b2f49ddb08f>>
- [37] Zekhtser, M. Y.; Revyakin, A. S.; Sarychev, D. A.: Self-adjusting control system of the electrodynamic velocity transducer for Mössbauer spectrometer. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, díl 381, 2016: s. 45–51, ISSN 0168583X, doi:<10.1016/j.nimb.2016.05.019>.
URL <https://ac.els-cdn.com/S0168583X16302233/1-s2.0-S0168583X16302233-main.pdf?_tid=e780d64e-9f71-11e7-b10e-00000aab0f6b&acdnat=1506069902_634a2c53e49e6f0a55b6ec0111b226a9>
- [38] Kankeleit, E.: Feedback in Electromechanical Drive Systems. In *Mössbauer effect Methodology*, Boston, MA, U.S.A.: Springer US, 1965, str. 47.
- [39] Kohout, P.; Frank, T.; Pechousek, J.; aj.: Mössbauer spectra linearity improvement by sine velocity waveform followed by linearization process. *Measurement Science and Technology*, díl 29(5), may 2018: str. 057001, ISSN 0957-0233, doi:<10.1088/1361-6501/aaacf0>.
URL <<http://stacks.iop.org/0957-0233/29/i=5/a=057001?key=crossref.f8ce6bb81e61517b15c07ca03be1be08>>
- [40] National Instruments: National Instruments and the Automotive Industry - National Instruments.
URL <<http://www.ni.com/f/solutions/62/8459/en/>>
- [41] Losito, R.; Masi, A.: CERN Uses NI LabVIEW Software and PXI Hardware to Control World's Largest Particle Accelerator - Solutions - National Instruments.
URL <<http://sine.ni.com/cs/app/doc/p/id/cs-10795#>>
- [42] Masi, A.; Losito, R.: LHC Collimators Low Level Control System. *IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE*, díl 55(1), 2008: str. 333, doi:<10.1109/TNS.2007.914206>.
URL <<http://cds.cern.ch/record/1110972/files/04448506.pdf>>
- [43] Plackett, R.; Horswell, I.; Gimenez, E. N.; aj.: Merlin: a fast versatile readout system for Medipix3. *14 th INTERNATIONAL WORKSHOP ON RADIATION IMAGING DETECTORS*, 2012: s. 1–5, doi:<10.1088/1748-0221/8/01/C01038>.
URL <<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/8/01/C01038/pdf>>
- [44] Marini, A.: H4DAQ: a modern and versatile data-acquisition package for calorimeter prototypes test-beams. *Journal of Instrumentation*, díl 13(02), feb 2018: s. C02042–C02042, ISSN 1748-0221, doi:<10.1088/1748-0221/13/02/C02042>.
URL <<http://stacks.iop.org/1748-0221/13/i=02/a=C02042?key=crossref.9a92232e87e67f52b354124db5de82c2>>
- [45] Motycak, S.; Rodin, A. M.; Novoselov, A. S.; aj.: A New Beam Diagnostic System for the MASHA Setup 1. *Physics of Particles and Nuclei Letters*, díl 13(5), 2016: s. 586–590, doi:<10.1134/S1547477116050356>.
URL <<https://link.springer.com/content/pdf/10.1134%2FS1547477116050356.pdf>>

- [46] Novoselov, A. S.; Rodin, A. M.; Motycak, S.; aj.: Data Acquisition System for the Social Plane Detector of the Mass Separator MASHA 1. *Physics of Particles and Nuclei Letters*, díl 13(5), 2016: s. 595–597, doi:<10.1134/S154747711605037X>. URL <<https://link.springer.com/content/pdf/10.1134%2FS154747711605037X.pdf>>
- [47] Vedeneev, V. Y.; Rodin, A. M.; Krupa, L.; aj.: The current status of the MASHA setup. 2016: s. 16–19, doi:<10.1007/s10751-017-1395-9>. URL <<https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2FS10751-017-1395-9.pdf>>
- [48] National Instruments: SpaceX - Los Angeles CA - Discussion Forums - National Instruments. URL <<https://forums.ni.com/t5/Archived-Job-Openings/SpaceX-Los-Angeles-CA/td-p/1269944>>
- [49] Pechousek, J.; Jancik, D.; Frydrych, J.; aj.: Setup of Mössbauer Spectrometers at RCPTM. *Mössbauer Spectroscopy in Materials Science - 2012*, díl 1489(1), 2012: s. 186–193, ISSN 0094-243X, doi:<10.1063/1.4759489>.
- [50] Pechoušek, J.: *Mössbauerův spektrometr jako virtuální měřicí přístroj v modulárním systému PXI*. Dizertační práce, Univerzita Palackého, 2006.
- [51] Frydrych, J.: *Konstrukce mössbauerovského spektrometru s detekcí konverzních elektronů a konverzního rentgenového záření a jeho aplikace se zaměřením na studium depozice hematitových fotokatalytických vrstev Olomouc 2011*. Dizertační práce, Univerzita Palackého, 2011.
- [52] Hien, D. S.; Senzaki, T.: Development of a fast 12-bit ADC for a nuclear spectroscopy system. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, díl 457(1-2), 2001: s. 356–360.
- [53] Warburton, W. K.; Grudberg, P. M.: Current trends in developing digital signal processing electronics for semiconductor detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, díl 568(1), nov 2006: s. 350–358, ISSN 01689002, doi:<10.1016/j.nima.2006.07.021>. URL <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168900206012745>>
- [54] Pullia, a.; Geraci, A.; Ripamonti, G.: Quasi-optimum γ and X spectroscopy based on real-time digital techniques. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, díl 439(2-3), 2000: s. 378–384.
- [55] Mihailescu, L. C.; Borella, A.; Massimi, C.; aj.: Investigations for the use of the fast digitizers with C6 D6 detectors for radiative capture measurements at GELINA. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, díl 600(2), mar 2009: s. 453–459, ISSN 01689002, doi:<10.1016/j.nima.2008.11.119>. URL <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S016890020801632X>>
- [56] Alberto, D.; Bussa, M.; Falletti, E.: Digital filtering for noise reduction in nuclear detectors. *Nuclear Instruments and ...*, díl 594(3), sep 2008: s. 382–388, ISSN 01689002, doi:<10.1016/j.nima.2008.06.032>. URL <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168900208009029http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900208009029>>
- [57] Riboldi, S.; Geraci, A.; Gatti, E.; aj.: A new digital auto-tracking pole-zero compensation technique for high-resolution spectroscopy. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, díl 481(1-3), 2002: s. 475–490.

- [58] Bardelli, L.; Poggi, G.: Digital-sampling systems in high-resolution and wide dynamic-range energy measurements: Finite time window, baseline effects, and experimental tests. *Nuclear Instruments and Methods in Physics ...*, díl 560(2), may 2006: s. 524–538, ISSN 01689002, doi:<10.1016/j.nima.2005.12.250>.
URL <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168900206000829>
<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900206000829>>
- [59] Streun, M.; Brandenburg, G.; Larue, H.; aj.: Coincidence detection by digital processing of free-running sampled pulses. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, díl 487(3), 2002: s. 530–534.
- [60] Monzó, J. M.; Lerche, C. W.; Martínez, J. D.; aj.: Analysis of time resolution in a dual head LSO + PSPMT PET system using low pass filter interpolation and digital constant fraction discriminator techniques. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, díl 604(1-2), jun 2009: s. 347–350, ISSN 01689002, doi:<10.1016/j.nima.2009.01.062>.
URL <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168900209001909>>
- [61] Bardelli, L.; Poggi, G.; Bini, M.; aj.: An efficient method for timing synchronization between many digital sampling channels. *Nuclear Instruments and Methods ...*, díl 572(2), mar 2007: s. 882–892, ISSN 01689002, doi:<10.1016/j.nima.2006.11.069>.
URL <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168900206023928>
<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900206023928>>
- [62] Andrianiaina, H.; Rongen, H.; Andriambololona, R.; aj.: (MIMCA) using universal FPGA board. *International journal of innovative research in science, engineering and technology*, díl 4(3), 2015: s. 1431–1440, <1503.02454>.
URL <<https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1503/1503.02454.pdf>>
- [63] Lanh, D.; Son, P. N.; Son, N. A.: In-house development of an FPGA-based MCA8K for gamma-ray spectrometer. *SpringerPlus*, díl 3(1), 2014: str. 665, ISSN 21931801, doi:<10.1186/2193-1801-3-665>.
URL <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25485201>
<<http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=PMC4237682>>
- [64] Blumers, M.; Bernhardt, B.; Lechner, P.; aj.: The miniaturised Mössbauer spectrometer MI-MOS IIA: Increased sensitivity and new capability for elemental analysis. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, díl 624(2), dec 2010: s. 277–281, ISSN 01689002, doi:<10.1016/j.nima.2010.04.007>.
URL <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168900210008004>>
- [65] National Instruments: CompactRIO Systems - National Instruments. 2018.
URL <<http://www.ni.com/en-us/shop/compactrio.html>>
- [66] National Instruments: NI cRIO-9038 User Manual. 2018.
URL <http://www.ni.com/pdf/manuals/375696c_03.pdf>
- [67] National Instruments: NI cRIO-9038 Specifications. 2018.
URL <http://www.ni.com/pdf/manuals/375696b_02.pdf>
- [68] National Instruments: NI 9223 Datasheet. 2016.
URL <http://www.ni.com/pdf/manuals/374223a_02.pdf>

- [69] National Instruments: NI 9263 Datasheet. 2018.
URL <http://www.ni.com/pdf/manuals/373781b_02.pdf>
- [70] National Instruments: NI 9402 Datasheet. 2018.
URL <http://www.ni.com/pdf/manuals/374614a_02.pdf>
- [71] National Instruments: *NI PCI-5114 Specifications*. Austin, Texas, USA: National Instruments, 2017, 18 s.
URL <<http://www.ni.com/pdf/manuals/374177a.pdf>>
- [72] Jakub Navařík: *Mössbauerův spektrometr jako autonomní měřicí přístroj*. Dizertační práce, Univerzita Palackého, 2015.
URL <https://theses.cz/id/wdgrjz/Dizertan_prce_ar.pdf>
- [73] Vůjtek, M.; Kubínek, R.; Mašláň, M.: *Nanoskopie*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, první vydání, 2012, ISBN 9788024431024, 124 s.
- [74] Keyence: *Vysokorychlostní laserový CCD snímač posunu s vysokou přesností Řada LK-G Příručka uživatele*. Ósaka, Japonsko: Keyence Corporation, 2015, 176 s.
- [75] Žák, D.: *Mössbauer Spectrometer - the analytic instrument for laboratory and industry*. Dizertační práce, Univerzita Palackého, 1997.
- [76] Mašláň, M.; Cholmeckij, A.; Jevdokimov, V.; aj.: A Driving system for Mössbauer spectrometer. *Acta UPO Physica*, díl 111(32), 1993: s. 9–17.
- [77] Černý, A.: *Modul řízení pohybového zařízení Mössbauerova spektrometru s digitální PID regulací*. Diplomová práce, Univerzita Palackého, 2011.
URL <https://theses.cz/id/c2hnmt/diplomov_prce.pdf>
- [78] National Instruments: Genetic Algorithm Code - Discussion Forums - National Instruments. 2010.
URL <<https://forums.ni.com/t5/Example-Program-Drafts/Genetic-Algorithm-Code/ta-p/3490759>>
- [79] Frank, T.: *Modul linearizace rychlostní osy Mössbauerova spektrometru*. Bakalářská práce, Univerzita Palackého, 2004.
- [80] Belozerski, G.: *MÖSSBAUER EFFECT AND STUDIES OF SURFACE*. Amsterdam: Elsevier, 1993, ISBN 044489943X, 457 s.
URL <[https://www.kfki.hu/\\$\sim\\$mixhp/lib/belozerski.htm](https://www.kfki.hu/\simmixhp/lib/belozerski.htm)<http://usbook.ru/Mössbauer-studies-of-surface-layers--or--cGuennadi-N-Belozerski/8/gahcci>>



PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA
UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI

KATEDRA
EXPERIMENTÁLNÍ FYZIKY

Autoreferát k dizertační
práci

Mössbauerova spektroskopie
s pokročilou modulací energie
záření gama

Autor	Mgr. Pavel Kohout
Vedoucí práce	doc. RNDr. Jiří Pechoušek, Ph.D.
Konzultant	prof. RNDr. Miroslav Mašláň, CSc.
Studijní obor	Aplikovaná fyzika
Forma studia	Prezenční
Rok	2018

PROHLÁŠENÍ AUTORA

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

V Olomouci dne
podpis

Student | Mgr. Pavel Kohout
Katedra experimentální fyziky
Univerzita Palackého v Olomouci
Česká republika

Vedoucí | doc. RNDr. Jiří Pechoušek, Ph.D.
Katedra experimentální fyziky
Univerzita Palackého v Olomouci
Česká republika

Opponent | doc. Mgr. Jaroslav Kohout, Dr.
Katedra fyziky nízkých teplot
Matematicko-fyzikální fakulta, Univerzita Karlova
Česká republika

Opponent | Ing. Oldřich Schneeweiss, DrSc.
Ústav fyziky materiálů
Akademie věd České republiky
Česká republika

Datum a místo obhajoby dizertační práce:

.....
.....

Abstrakt

Cílem této práce je vývoj sestavy Mössbauerova spektrometru s inteligentní modulací energie na zařízení CompactRIO firmy National Instruments™ a jeho integrovaném FPGA poli. První část práce se zabývá vývojem spektrometrické aplikace běžící na zařízení CompactRIO, která provádí generování referenčního signálu, PID regulaci, sběr signálu z detektoru a registraci spektra. Druhá část se zabývá vývojem nové linearizační metody zlepšující linearitu rychlostní osy Mössbauerových spektrometrů a jejím srovnáním s klasickým měřením využívajícím trojúhelníkový signál a dalšími linearizačními metodami

Abstract

The aim of this work development of Mössbauer spectrometer setup based on National Instruments' CompactRIO industrial modular computer with integrated FPGA. Part of the work is focused on development of spectrometer application, which generates the reference signal, PID regulation, detector data acquisition and building the spectrum. Second part deals with development of novel linearization method and investigating the quality of resulted linearized spectra comparing them with those obtained using traditional triangular velocity signal and also other linearization methods.

Obsah

Úvod	5
1. Teoretická část	6
1.1. Mössbauerova spektroskopie	6
2. Použité přístroje a software	7
2.1. Virtuální instrumentace	7
2.2. FPGA – programovatelná hradlová pole	8
2.3. Systémy NI RIO	8
2.3.1. Systém NI CompactRIO	8
2.4. Scintilační detektor se zesilovačem a jednonábovým analyzáto- rem	9
2.5. Pohybové zařízení	10
2.5.1. Výkonový zesilovač referenčního a měřeného sig- nálu rychlosti	12
3. Vývoj spektrometru s pokročilým řízením pohybu na platformě CompactRIO	13
3.1. Program na FPGA	13
3.1.1. Virtuální generátor rychlosti	15
3.1.2. PID regulátor	16
3.1.3. Automatické ladění PID parametrů	17
3.1.4. Detekce signálu a tvorba Mössbauerova spektra	18
3.2. Program běžící na operačním systému reálného času	20
4. Rozšiřující režimy spektrometru	23
4.1. Využití sinusového průběhu rychlosti ke zlepšení linearity spektra	23
4.1.1. Porovnání metody	26
4.2. Linearizace modulací referenčního signálu pomocí sig- nálu chyby měřeného laserovým vibrometrem	30
4.3. Opravy nelinearity dodatečnou korekcí	30
4.4. Porovnání všech výše uvedených metod	33
Závěr	37
Seznam použitých zdrojů	38

Úvod

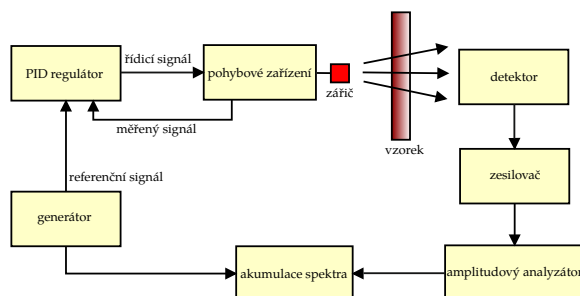
V Roce 1958 objevil německý fyzik Rudolf Ludwig Mössbauer v oblasti jaderné fyziky jev bezodrazové rezonanční absorpce a emise záření gama v pevných látkách [1], který byl posléze nazván po něm a za který v roce 1961 obdržel Nobelovu cenu za fyziku [2]. Spektroskopie založená na tomto jevu se následně stala metodou rozšířenou do mnoha vědních disciplín. Na přelomu 20. a 21. století se v oblasti vývoje měřicích a testovacích systémů začíná využívat technika virtuální instrumentace, která umožňuje nahradit dříve složité analogové obvody počítačovými technologiemi [3,4]. 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 například přes internet. Další technologie, která se objevila na sklonku 20. století [5] a v posledních letech nabývá na významu, jsou programovatelná hradlová pole, která díky své konfigurovatelnosti, determinismu a rychlosti nalezla široké uplatnění v mnoha oborech, kde je potřeba velkého výpočetního výkonu – tedy i v jaderné fyzice. Tato práce si klade za cíl spojit výše uvedené technologie a vyvinout Mössbauerův spektrometr s pokročilou modulací energie záření gama. Práce navazuje na autorovu diplomovou práci [6], která se zabývala optimalizací řízení sestavy lineárního motoru s PID regulátorem pohybu u Mössbauerova spektrometru.

1. Teoretická část

1.1. Mössbauerova spektroskopie

Mössbauerova spektroskopie je spektroskopická metoda, která využívá Mössbauerova jevu. Mössbauerův jev je proces bezodrazové 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 [7].

K experimentálnímu pozorování Mössbauerova jevu se v praxi využívá modulace 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. Typická konfigurace Mössbauerova spektrometru pro měření v transmisní geometrii je zobrazena na obrázku 1.



Obrázek 1 | Schéma Mössbauerova spektrometru pro měření v transmisní geometrii.

Generátor generuje referenční signál rychlosti pohybu zářiče, ten jde přes PID regulátor, do pohybového zařízení. Rychlost pohybového zařízení je měřena pomocí elektromagnetické indukce a sledována PID regulátorem. Pohybové zařízení moduluje pohybem zářiče energii vyzařovaného záření. Záření pak prochází přes vzorek, záření o rezonanční energii je pohlceno a nerezonanční záření projde beze změny a dopadá na detektor. Signál z detektoru je následně zesílen zesilovačem. Am-

plitudový 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 otevírány jednotlivé kanály, do kterých je akumulováno spektrum.

2. Použité přístroje a software

K vývoji Mössbauerova spektrometru s pokročilou modulací energie gama záření byly využity měřicí karty a průmyslový počítač od firmy National InstrumentsTM. National InstrumentsTM je celosvětově působící firma se sídlem v Austinu (Texas, 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 Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci a v Regionálním centru pokročilých technologií a materiálů byla zařízení a software od firmy National InstrumentsTM mnohokrát využita, viz např. [8–11].

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, 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]. 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].

2.2. FPGA – programovatelná hradlová pole

FPGA je zkratkou anglického Field Programmable Gate Array – což česky znamená programovatelné hradlové pole. Jedná se o nejnižší úroveň elektroniky. FPGA na rozdíl od procesoru nemůžeme dynamicky programovat, ale hradla se musí předem nastavit do požadované „polohy“. Na druhou stranu se však FPGA vyznačuje velkou rychlostí a determinismem. Díky tomu se využívá všude, kde je potřeba obrovského výpočetního výkonu od experimentů v jaderné fyzice po tzv. těžbu bitcoinů. K programování FPGA polí bývají nejčastěji využívány jazyky Verilog a VHDL. Zkratka VHDL znamená VHSIC Hardware Description Language, kde VHSIC je zkratka z Very-High-Speed Integrated Circuit. Výraz VHDL se pak dá do češtiny přeložit jako jazyk pro popis velmi rychlých integrovaných obvodů [5]. V této práci je program určený pro FPGA pole programován v LabVIEW™, nicméně následně je pomocí překladače přeložen do jazyka VHDL.

2.3. Systémy NI RIO

Firma National Instruments™ nabízí mnoho modulárních systémů – od systémů jako PXI (PCI eXtensions for Instrumentation) po systémy RIO. RIO je zkratka znamenající Reconfigurable I/O (input/output), což se dá přeložit jako systém s nastavitelnými vstupy a výstupy. Jedná se o malé počítače, vyznačující se především svou jednoduchostí, a které jsou určeny především pro automatizaci v průmyslu ale i ve vědeckých experimentech. Jednodeskový systém sBRIO (Single-Board RIO) byl již dříve využit pro vývoj systému pro PID regulaci a je popsán detailněji v [6] a [12]. V této práci byl využit podobný systém s názvem CompactRIO.

2.3.1. Systém NI CompactRIO

CompactRIO je řada modulárních systémů firmy National Instruments™. Jeho název je složeninou slov compact – značící jeho malé rozměry (narozdíl od jiných systémů jako například PXI) a RIO vysvětlené výše. Jedná se o programovatelný vestavěný (embedded) systém,

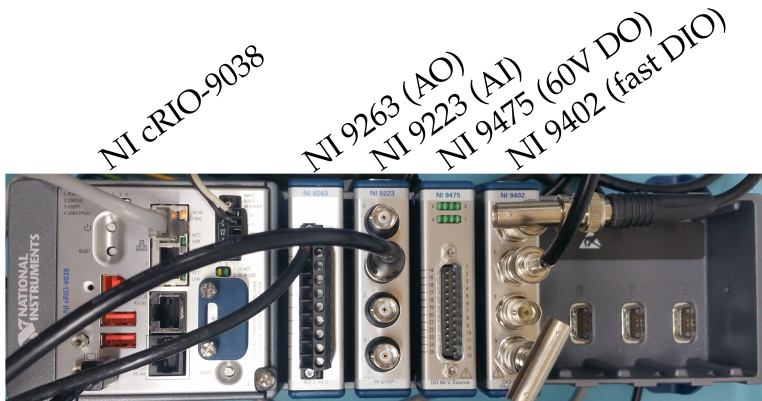
který se skládá z real-time procesoru, uživatelsky programovatelného hradlového pole FPGA a vestavěných digitálních a analogových vstupů a výstupů a periferních konektorů jako je USB, RS-232, RS-485, CAN či Ethernet [13].

Systém CompactRIO je modulární a je možno do něj přidávat a měnit různé moduly podle našich požadavků. Konstrukce systému CompactRIO je robustní a vhodná pro průmysl – systém je zapouzdřen a poskytuje krytí proti vlhkosti a prachu. Přídavné moduly se napevno připevňují na šasi. Programování probíhá na několika úrovních – nejkritičtější část programu běží na FPGA. FPGA umožňuje běh programů, které jsou deterministické a také masivní paralelizaci programového kódu. Méně kritické systémy běží na real-time části, která využívá operačních systémů reálného času a jsou tedy taktéž deterministické. Ovládací aplikace běží na vzdáleném osobním počítači. Na obrázku ?? je zobrazeno schéma architektury – real-time část je s FPGA propojena sběrnicí PCI a přímo na FPGA jsou rozšiřující karty s analogovými či digitálními vstupy a výstupy.

V této práci bude pro realizaci PID vazby a následně celého Mössbaue-rova spektrometru využita sestava CompactRIO sestávající z kontroléru NI cRIO-9038, karty analogových vstupů NI 9223, karty analogových výstupů NI 9263, karty digitálních vstupů a výstupů NI 9402. V zařízení CompactRIO je přítomna i karta digitálních výstupů NI 9475, která dokáže generovat napětí až 60 V, ale která nebyla v následující práci využita. Použité zařízení CompactRIO včetně I/O modulů je zobrazeno na obrázku 2. Jednotlivá zařízení, ze kterých se sestává sestava CompactRIO, budou detailněji popsána níže.

2.4. Scintilační detektor se zesilovačem a jednocanálovým analyzátozem

Pro detekci záření gama byl využit scintilační detektor s integrovaným zesilovačem a jednocanálovým analyzátozem blíže popsáný v [14]. Detektor využívá scintilační krystal NaI:Tl o tloušťce 0,15 mm a fotonásobič R6095 od firmy Hamamatsu. Detektor dále obsahuje integrovaný zdroj vysokého napětí, zesilovač signálu a jednocanálový analyzátor realizovaný pomocí dvou operačních zesilovačů a zpožďovací linky. Nastavování jednocanálového analyzátoru, stejně jako nastavení zesílení signálu a nastavení napájecího napětí fotonásobiče je realizováno



Obrázek 2 | CompactRIO sestava – kontrolér NI cRIO-9038 a čtyři I/O moduly.

nastavováním digitálních potenciometrů. Ty jsou nastavovány přes mikrokontrolér PIC16F819, který zajišťuje i komunikaci s počítačem přes rozhraní I²C. V počítači je prostřednictvím aplikace napsané v LabVIEW™ zprostředkována mnohakanálová analýza pomocí postupného skenování signálu jednonálovým analyzátozem [14, 15]. Výstupem z detektoru může být jak analogový signál, tak logické impulzy o napětí 5 V, odpovídající platným detekcím z okna energií vybraných amplitudovým diskriminátorem. Díky použití detektoru s integrovaným jednonálovým analyzátozem bylo možné zásadně zjednodušit vyvíjený spektrometr. Ten nemusí hledat platné detekce v analogovém signálu. Další výhodou spočívá v tom, že je možno využít pouze digitálních vstupů, což je i ekonomicky výhodnější, neboť karty s analogovými vstupy se srovnatelnou vzorkovací frekvencí bývají několikanásobně dražší. Použitá karta digitálních vstupů a výstupů NI 9402 sice nevyužívá TTL logiku (5 V) jako použitý detektor, ale LVTTTL logiku (3,3 V), nicméně je tolerantní i na 5 V.

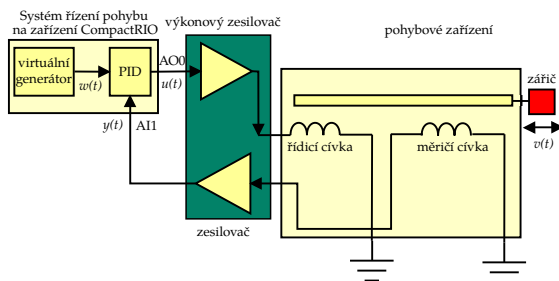
2.5. Pohybové zařízení

V experimentální části bylo použito pohybové zařízení pro Mössbauevovy spektrometry vycházející z [16]. Použité pohybové zařízení je zob-

razeno na obrázku 3. Schéma vnitřního zapojení použitého pohybového zařízení a jeho připojení k systému řízení rychlosti je zobrazeno na obrázku 4.



Obrázek 3 Použité pohybové zařízení (bez pouzdra a s namontovaným zářičem).



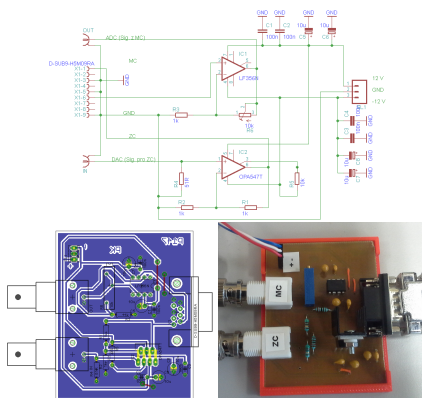
Obrázek 4 Blokové schéma pohybového zařízení a jeho zapojení ($w(t)$ – referenční signál, $v(t)$ – rychlost pohybu, $y(t)$ – signál z měřicí cívky, $u(t)$ – signál přivedený na řídicí cívku – řídicí signál), AI1 je analogový vstup zařízení CompactRIO a AO0 analogový výstup.

Použité pohybové zařízení se skládá ze dvou pevně spojených cívek – jedné řídicí a druhé měřicí. Cívky jsou umístěny uvnitř permanentních magnetů a po přivedení elektrického proudu na řídicí cívku dojde k rozpoohybování 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 – *AIO* (Analog Input 0) je využit na vstup referenčního signálu rychlosti do PID vazby.

2.5.1. Výkonový zesilovač referenčního a měřeného signálu rychlosti

Zařízení CompactRIO je schopno dodávat svými analogovými výstupy proud 1 mA [17]. To je zejména pro velká elektrodynamická zařízení nedostatečné. Aby je bylo možné obsluhovat pomocí zařízení CompactRIO, byla vyvinuta sestava zesilovačů. Byly použity operační zesilovače v neinvertujícím zapojení. Zesilovač zadávacího signálu je proudový zesilovač OPA547T od firmy Texas Instruments, u kterého bylo nastaveno napěťové zesílení v poměru 1:1. Druhý zesilovač LF356N (rovněž od firmy Texas Instruments) zesiluje signál z měřicí cívky jednou až desetkrát (v závislosti na nastavení trimru). Na napájení zesilovačů jsou přítomny tantalové a keramické kondenzátory na odstranění šumů. Schéma zapojení je zobrazeno na obrázku 5 nahoře. Návrh desky plošných spojů a fyzická realizace jsou zobrazeny na obrázku 5 dole.



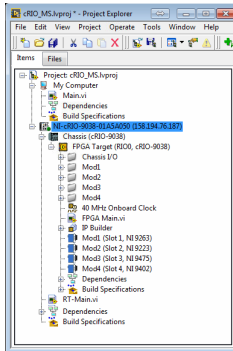
Obrázek 5 | Navržený zesilovač – nahoře schéma, vlevo dole návrh desky plošných spojů a vpravo dole fyzická realizace.

3. Vývoj spektrometru s pokročilým řízením pohybu na platformě CompactRIO

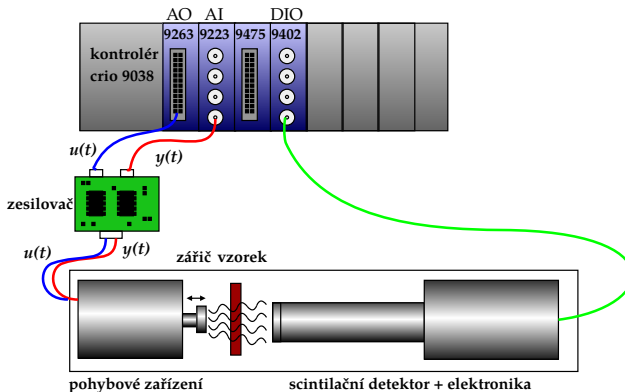
Zařízení firmy National Instruments™ byla programována v prostředí LabVIEW™ 2015 s FPGA toolkitem verze 15.5, Real-Time toolkitem verze 15.5, PID Control toolkitem verze 15.5 a ovladači NI-RIO verze 15.5. Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, při programování zařízení CompactRIO jsou tři možnosti, kde mohou být spouštěny naprogramované VI. Na obrázku 6 je zobrazen LabVIEW™ projekt vyvinutého Mössbauerova spektrometru. Soubor Main.vi je ovládací část aplikace, která je umístěna ve vzdáleném počítači. Soubor FPGA-Main.vi je umístěn na FPGA poli zařízení CompactRIO a soubor RT-Main.vi je umístěn ve flash paměti zařízení CompactRIO a je spouštěn na real-time procesoru. V projektu jsou též vidět připojené moduly analogových a digitálních vstupů a výstupů či 40 MHz oscilátor řídící jednotlivé „ticky“ FPGA pole a rovněž vzorkování analogových vstupů a výstupů. V *Builds specifications* je také nastaveno automatické spouštění VI uložených v zařízení CompactRIO. Schéma zapojení jednotlivých částí spektrometru je zobrazeno na obrázku 7. Nahore je zařízení CompactRIO, z karty analogových výstupů NI 9263 vede koaxiální kabel do desky zesilovače. Odtud pak proudově zesílený signál vede do pohybového zařízení umístěného ve spektrometrické lavici, kde způsobí pohyb zářiče. Pohybem se indukují v měřicí cívice proud, ten je veden zase koaxiálním kabelem do zesilovače a pak do karty analogových vstupů. Naproti pohybového zařízení je umístěn držák vzorků a za ním scintilační detektor s integrovaným zdrojem vysokého napětí, zesilovačem signálu a amplitudovým diskriminátorem. Amplitudově diskriminovaný signál je poté přiveden do karty rychlých digitálních vstupů a výstupů NI 9402.

3.1. Program na FPGA

Na FPGA se v LabVIEW™ programuje odlišně než na PC, jsou k dispozici jen některá předpřipravená VI (například tzv. expresní funkce nejsou k dispozici vůbec) a složitost naprogramovaného VI je omezena počtem hradel v FPGA. Naprogramované VI se kompiluje do VHDL kódu a následně optimalizuje a jeho kompilace trvá často i desítky minut (v závislosti na tom jak složitý je naprogramovaný kód). Na obrázku

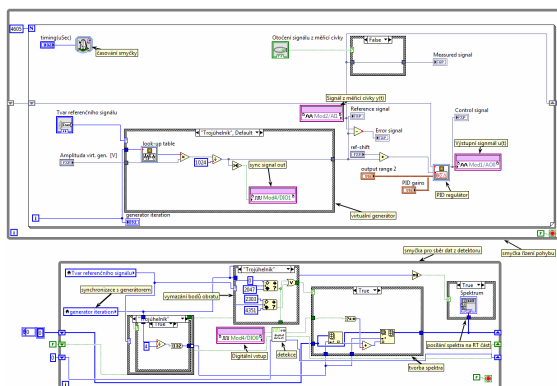


Obrázek 6 | LabVIEW™ projekt Mössbauerova spektrometru.



Obrázek 7 | Schéma zapojení jednotlivých částí spektrometru.

8 je zobrazen blokový diagram vyvinutého spektrometru. Zdrojový kód se skládá ze dvou *while* smyček. Horní smyčka je systém řízení rychlosti. Uprostřed ní je virtuální generátor rychlosti (a) tvořený *case* strukturou ovládanou rozbalovací nabídkou typu *enum*, která umožňuje vybrat tvar generovaného signálu. Vpravo od virtuálního generátoru se nachází PID regulátor (b). Dole pod smyčkou pro řízení pohybu paralelně běží smyčka sběr dat z detektoru a přenášení jedné periody spektra z FPGA na RT. Synchronizace obou smyček je zajištěna pomocí lokální proměnné s názvem *generator iteration*.

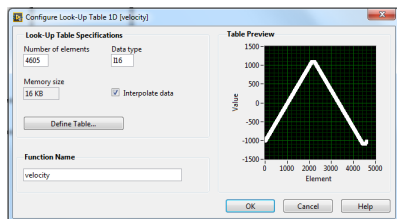


Obrázek 8 | Blokový diagram programu na FPGA části zařízení CompactRIO.

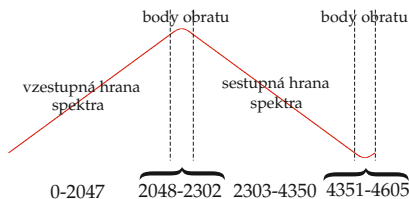
3.1.1. Virtuální generátor rychlosti

První částí spektrometru je virtuální generátor, který generuje referenční signál rychlosti. VI virtuálního generátoru je zobrazeno na obrázku 8. Hlavní částí virtuálního generátoru je *look-up* tabulka, ve které je uložen tvar referenčního signálu – trojúhelník se sinovým průběhem v bodech obratu rychlosti, viz obrázek 9. Tento tvar se již dříve osvědčil pro svou vyšší linearitu oproti jednoduchému trojúhelníku (viz např. [18–21]). Referenční signál je tvořen 4605 body. VI generátor dokáže další body interpolovat (viz zatržítko *Interpolate data* na obrázku 9). Na obrázku 10 je zobrazeno schéma referenčního signálu rychlosti ve tvaru trojúhelníku se sinovým průběhem v bodech obratu rychlosti. Body 0 – 2047 jsou vzestupná hrana spektra, body 2048 – 2302 jsou horní body obratu, 2303 – 4350 jsou sestupná hrana spektra a 4351 – 4605 jsou dolní body obratu. V bodech obratu, kde je průběh referenčního signálu sinový, neprobíhá měření spektra. *Case strukturou* je možné též vybrat tvar generovaného signálu. Dalšími módy jsou pila, sinus a režim konstantní rychlosti. Sinový režim je vhodný zejména pro linearizaci s využitím sinového průběhu rychlosti, viz dále v kapitole 4.1. V případě alternativních signálů rychlosti dochází k záznamu spektra po celou dobu. Na digitální výstup zařízení CompactRIO je přiveden synchronizační signál, využívaný zejména v průběhu vývoje pro synchronizaci čítání

spektra pomocí externího čítacího zařízení (měřicí karty a virtuálního Mössbauerova spektrometru běžícího na osobním počítači). Nyní je čítání spektra a generování signálu synchronizováno virtuálním synchronizačním signálem, který je ze smyčky generátoru přenášen do smyčky detektoru pomocí lokální proměnné, nicméně synchronizační signál byl ponechán pro případnou synchronizaci jiných externích zařízení.



Obrázek 9 VI Look-up tabulka a uvnitř nahraný referenční signál rychlosti – trojúhelník se sinovým průběhem v bodech obratu rychlosti.



Obrázek 10 Referenční signál rychlosti se sinovým průběhem v bodech obratu rychlosti pohybového zařízení. Body 0 – 2047 jsou vzestupná hrana spektra, body 2048 – 2302 jsou horní body obratu rychlosti, 2303 – 4350 jsou sestupná hrana spektra a 4351 – 4605 jsou dolní body obratu rychlosti.

3.1.2. PID regulátor

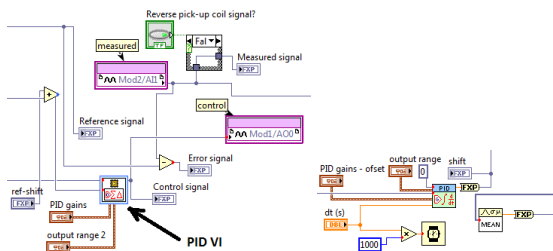
Důležitou část systému řízení rychlosti je PID regulátor. Ve spektrometru byl využit dříve vyvinutý digitální PID regulátor blíže popsany v [12]. PID regulátor je virtuální a je implementován v FPGA poli (viz ob-

rázek 11 vlevo). Součástí spektrometru je i druhý PID regulátor, který reguluje stejnosměrnou složku (tzv. drift), ten je umístěn na real-time části zařízení CompactRIO (viz obrázek 11 vpravo). Stejnosměrná složka se může v pohybovém systému objevit při umístění Mössbauerova spektrometru v externím magnetickém poli, zejména při jeho zapínání a vypínání. Rovněž je výhodné mít stejnosměrnou složku nulovou, jelikož negeneruje žádný pohyb ale jen teplo (což může být nevýhodné při použití kryostatů atd.)

Vzorkovací perioda T je rovna $10 \mu\text{s}$ – jelikož použité analogové výstupy mají vzorkovací periodu 100 kS/s (analogové vstupy jsou rychlejší a mají vzorkování 1 MS/s , ale musejí při PID regulaci „čekat“ na analogové výstupy). Vzhledem k tomu, že jeden kanál spektra měřeného při rychlosti 30 Hz , které má nesložené 1024 bodů, má délku

$$\frac{1}{30 \text{ Hz} \cdot 1024} = \frac{33, \overline{3} \text{ ms}}{1024} = 32,55 \mu\text{s}, \quad (1)$$

tak je tato vzorkovací perioda více než $3 \times$ kratší než čas shromažďování jednoho kanálu, tudíž za dobu po jakou se shromažďuje jeden kanál spektra dojde k opravě rychlosti pohybového zařízení celkem $3 \times$.



Obrázek 11 VI PID regulátoru nacházející se na FPGA (vlevo) a VI druhého PID regulátoru hlídajícího ofset, který se nachází na real-time části zařízení CompactRIO (vpravo).

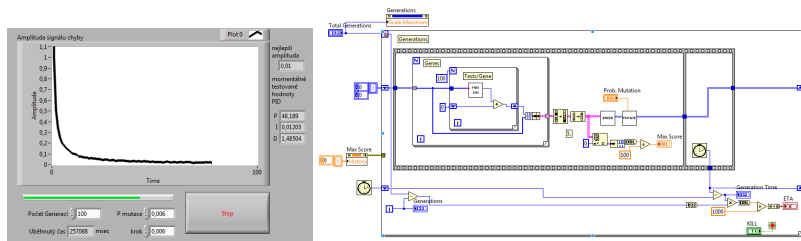
3.1.3. Automatické ladění PID parametrů

Na real-time části je rovněž umístěn evoluční algoritmus, který dokáže sám najít parametry P, I a D. Použitý evoluční algoritmus vychází z příkladu z fóra National Instruments™, který byl původně určen pro

řízení autonomních robotů [22]. Tento algoritmus je po úpravách aplikovatelný i na jiné situace, které na základě vyhodnocování informací na vstupu hledají optimální parametry na výstupu. Zde pracuje následně – začíná od P, I a D parametrů [0; 0; 0]. Následně dojde k tzv. mutaci – parametry P, I a D jsou pozměněny, je k nim s určitou pravděpodobností přičteno malé číslo. Jednotlivé mutace jsou posouzeny porovnáním parametrů chybového signálu (sleduje se zejména amplituda signálu chyby) a je ponechána pouze ta generace, která nejlépe vyhovuje (má nejmenší chybu) a ta následně pokračuje algoritmem a je zase zmuťována atd. Otestování jedné generace trvá několik desítek sekund (je třeba počítat s časem nutným na ustálení PID regulátoru), projití celého samoladícího algoritmu pak trvá desítky minut (v závislosti na nastaveném kroku a pravděpodobnosti mutací). To je sice doba delší, než za jakou ladění PID zvládne zaškolený člověk, nicméně i tak může značně zjednodušit práci. Na obrázku 12 vlevo se nachází čelní panel a blokový diagram subVI (podprogram), které řídí hledání optimálních PID parametrů. Uprostřed je na grafu vidět průběh ladění – s každou generací se zmenšuje amplituda signálu chyby. Vpravo od grafu je aktuální amplituda signálu chyby a aktuální PID parametry. Dole pod grafem se nachází ovládací prvky na nastavování parametrů evolučního algoritmu, ovládající velikost kroku, pravděpodobnost mutace a počet generací. U použitého pohybového zařízení nalezne evoluční algoritmus optimální parametry PID regulátoru [42; 0,01171875; 1,1015625]. Velice podobné hodnoty byly nalezeny i pomocí ručního ladění. Tyto hodnoty jsou naprosto odlišné od hodnot získaných v [12], kde byly u pohybového zařízení stejného typu nalezeny hodnoty [6; 1,5; 6,5]. PID parametry závisí na elektromagnetických a dynamických vlastnostech pohybového zařízení jako vinutí použitých cívek (počet závitů, překřížení...), vycentrování cívek v dutině magnetu, tuhost pružin, na kterých je umístěna pohyblivá část, hmotnost použitého zářiče či délka použitého převodního kabelu, který spojuje PID regulátor a pohybové zařízení.

3.1.4. Detekce signálu a tvorba Mössbauerova spektra

Detekce signálu probíhá pomocí scintilačního detektoru s integrovaným jednonábovým analyzátozem [14, 15]. Jednonábový analyzátor je pomocí programu napsanému v LabVIEW™ využit k mnohakanálové analýze a nastaven na vhodný interval kanálů, který odpovídá požadované energii gama fotonů. Na výstupu z jednonábového ana-

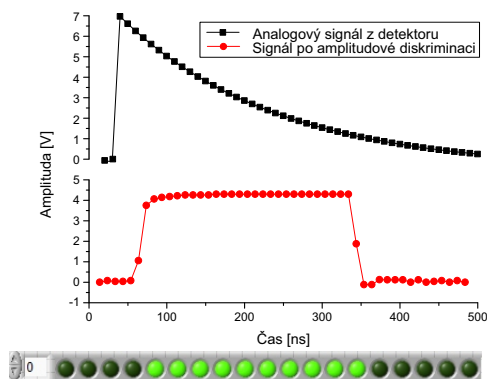


Obrázek 12 Čelní panel a blokový diagram subVI s evolučním algoritmem, který řídí automatické ladění PID parametrů.

lyzátoru získáme pulzy o délce kolem 300 ns a amplitudě 5 V. Signál z detektoru (nyní již pouze logické pulzy) je následně snímán pomocí digitálního vstupu na měřicí kartě NI 9402. Dále je ještě v rámci FPGA vytvořeno pole bitů, které značí detekce za jednu periodu – kladný bit značí že byl detekován platný impulz, který odpovídá detekci gama fotonu ve zvoleném intervalu energií. Nulový bit značí že nebyl detekován žádný impulz. Toto řešení bylo vybráno kvůli šetření kapacity FPGA – ukládání dat do FPGA je velmi náročné na množství použitých logických hradel. Ze stejných důvodů bylo využito pole bitů a ne pole čísel. Toto pole je následně přeneseno na real-time část systému CompactRIO, kde dochází k převodu na pole s 0 a 1 a následnému sčítání těchto polí ze všech period. Součtové pole pak představuje Mössbauerovo spektrum. Ze spektra jsou následně vymazány části představující body obratu (viz obrázek 10 v sekci 3.1.1) a zbytek kanálů je sečten tak, aby v nesložném spektru bylo 1024 kanálů, případně je ponechán tak jak je – jelikož je plánováno další zpracování jako linearizace, popsána dále v kapitole 4.1.

Na obrázku 13 je zobrazen jeden impulz z detektoru před a po amplitudové diskriminaci. Pod ním je ve stejném měřítku znázorněno, jak je signál digitalizován a reprezentován v zařízení CompacRIO za použití pole booleovských diodových indikátorů. Jak je vidět, pulz tvoří 10 „svítících LEDek“ (10 bitů s logickou hodnotou „1“), které mají délku $33, \bar{3}$ ns, což je dáno vzorkovací periodou digitálního vstupu. To pak odpovídá délce pulzu

$$10 \cdot 33, \bar{3} \text{ ns} \doteq 333 \text{ ns} \approx 300 \text{ ns.} \quad (2)$$



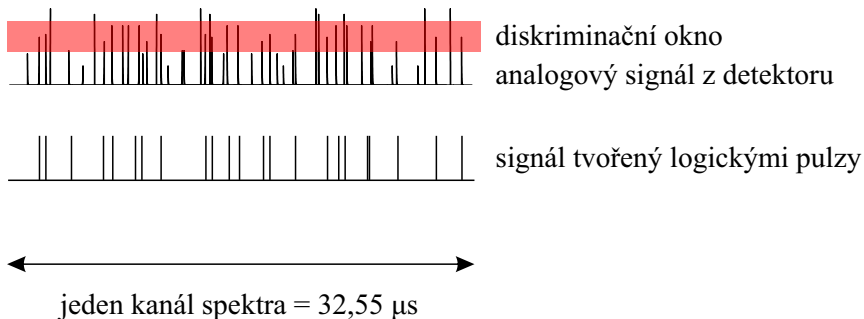
Obrázek 13 Jeden impuls z detektoru a pod ním pulz po amplitudové diskriminaci. Dole pulz digitalizovaný jako pole bitů, zobrazený pomocí pole diodových indikátorů.

To, že si délky pulzů nasnímaných vysokorychlostním digitizérem a digitálním vstupem přesně neodpovídají je dáno hlavně vzorkováním signálu – pokud hrana pulzu padne doprostřed vzorku, tak může být ze signálu jak logická „0“, tak logická „1“. Dalším důvodem je, že logický pulz není dokonale čtvercový. Karta používá tzv. LVTTTL (low-voltage transistor-transistor-logic) logiku a je tolerantní na 5 V. Za logickou „0“ je považován signál mezi 0,0 V a 0,8 V a za logickou „1“ signál mezi 2,2 V a 5,5 V. Signál ale krátce probíhá i tzv. zakázanou oblastí, kde není definováno jestli je signál logická „0“ nebo „1“.

Na obrázku 14 je zobrazena ukázka signálu z detektoru a princip amplitudové diskriminace – červený pruh znázorňuje diskriminační okno. Dole pod ním je signál, který prošel amplitudovou diskriminací. Délka ukázkového úseku signálu z detektoru odpovídá jednomu kanálu spektra majícího 1024 bodů v nesložené podobě měřeného při 30 Hz.

3.2. Program běžící na operačním systému reálného času

Uprostřed blokového diagramu programu na real-time části na obrázku 15 se nachází blok, který slouží pro přenášení všech proměnných mezi FPGA a real-time částí. Kromě přenosu jednotlivých period spektra program také umožňuje ovládání parametrů PID regulátoru. Dále

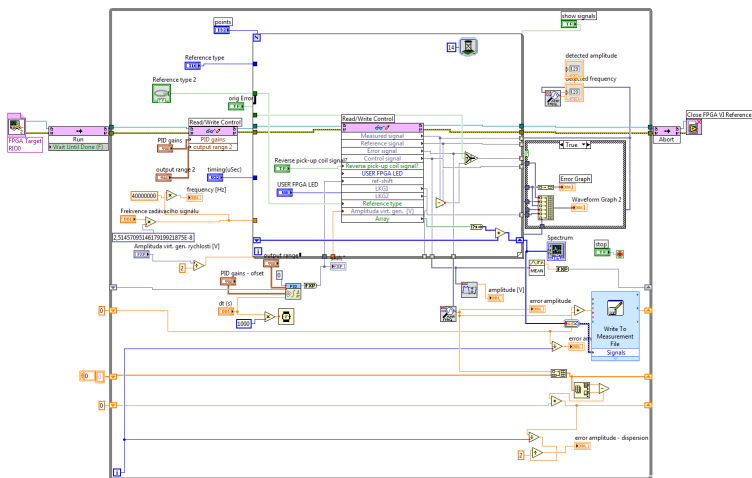


Obrázek 14 Ukázka signálu z detektoru a princip amplitudové diskriminace. Délka signálu odpovídá jednomu kanálu spektra, které má v nesložené podobě 1024 kanálů a pro frekvenci zadávacího signálu 30 Hz.

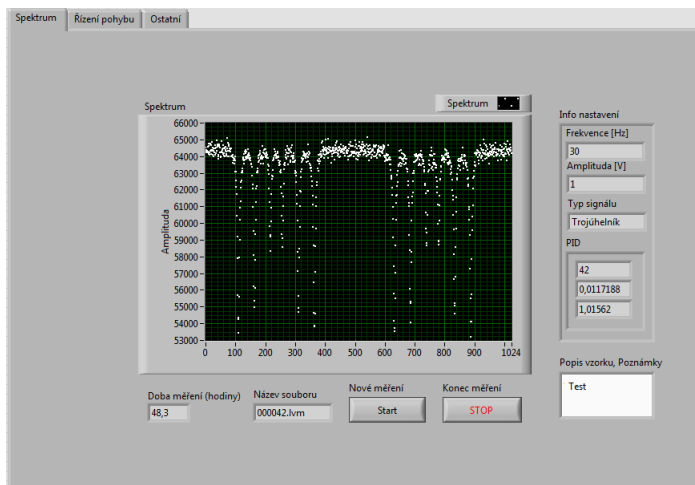
se zde nachází kód určený k porovnávání kvality PID regulace a také druhý PID regulátor, který hlídá drift rychlostní osy. A rovněž část, která z pole bitů, které reprezentuje jednu periodu spektra, skládá spektrum. Čelní panel využívá systému záložek. Na obrázku 16 je zobrazena první záložka, která ukazuje Mössbauerovo spektrum. Pod spektrem jsou ovládací prvky na spuštění a zastavení načítání spektra. Vedle spektra jsou informace o nastavení spektrometru, které se společně s dobou měření (zobrazena pod spektrem) zapíší do *.ini souboru, který má stejné jméno jako spektrum, to má ale koncovku *.lvm. Oba tyto soubory mají název, který odpovídá číslu spektra a ukládají se do interní paměti zařízení CompactRIO, do složky /home/lvuser/natinst/LabVIEW Data. Odtud se dají získat přes protokol SMB (ve Windows přístupné v *Místa v síti*, pokud se počítač nachází ve stejné síti), nebo lze spektrum uložit do počítače pomocí tlačítka *uložit spektrum*. Soubor se spektrem i soubor *.ini jsou prostým textovým souborem s ASCII kódováním a lze je otevřít v jakémkoliv textovém editoru. Díky tomu lze spektrum

jednoduše exportovat do tabulkového editoru či do fitovacího softwaru. Soubor se spektrem obsahuje jen sloupec s počty detekovaných impulzů a má formát, jaký je obvyklý i u jiných Mössbauerových spektrometrů.

Na obrázku 17 je zobrazena druhá záložka čelního panelu. Na ní je možno nastavovat parametry systému řízení rychlosti – ovládat amplitudu a frekvenci virtuálního generátoru signálu rychlosti či nastavovat parametry PID regulátorů. Stisknutím tlačítka Autotuning se otevře nové okno a zahájí se automatické ladění PID parametrů. Vpravo se nachází grafy se signály. Dolní graf zobrazuje referenční signál $w(t)$, signál rychlosti s jakou se pohybuje pohybové zařízení $y(t)$, jejich rozdíl – signál chyby $e(t)$ a řídicí signál $u(t)$. Kromě toho jsou zde zobrazeny také výstupy z laserového systému LK-G. Nahoře je zobrazen ještě jednou signál chyby $e(t)$, tentokrát ale zvětšený a rozdíl rychlostí pohybového zařízení měřených pomocí měřicí cívky pohybového zařízení a laserového systému LK-G.



Obrázek 15 Blokový diagram programu na real-time části zařízení CompactRIO.

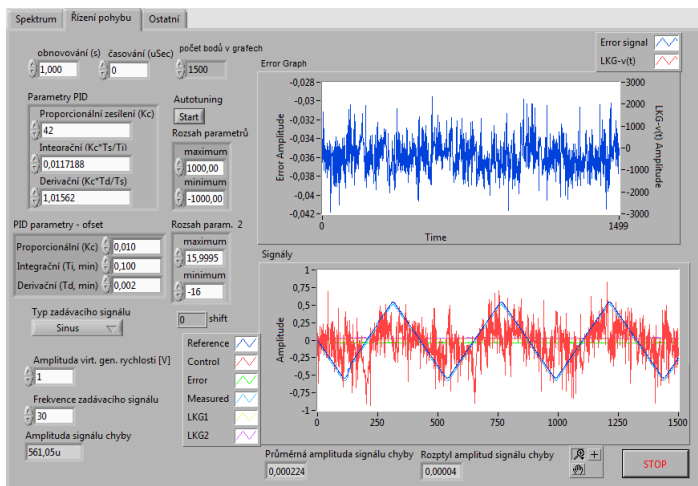


Obrázek 16 Čelní panel aplikace spektrometru, záložka se zobrazováním spektra a informací o něm, a tlačítka ke startu nového měření a jeho zastavení.

4. Rozšiřující režimy spektrometru

4.1. Využití sinusového průběhu rychlosti ke zlepšení linearity spektra

Tento režim měření využívá sinového referenčního signálu pro pohyb dopplerovského modulátoru. Na obrázku 18(a) je zobrazeno zjednodušené ilustrační schéma přiřazování detekovaných impulzů do kanálů spektra. Toto spektrum obsahuje čtyři kanály, které reprezentují stejně velké rychlostní intervaly. Na rozdíl od lineárního spektra měřeného s trojúhelníkovým referenčním signálem rychlosti jsou tyto kanály se stejně velkými rychlostními intervaly různou dobu otevřené pro čtení spektra. Kanály spektra jsou otevírány nerovnoměrně, tak aby odpovídaly průběhu rychlosti (viz obrázek 18(a)). Získaná spektra mají následně rychlostní osu modulovanou funkcí sinus. Pro zpracování a vyhodnocování spekter je tedy nutné tato spektra linearizovat. Tato linearizace je provedena normováním délek jednotlivých kanálů. Každý kanál obsahuje velké množství primárních kanálů, které odpovídají jednotli-



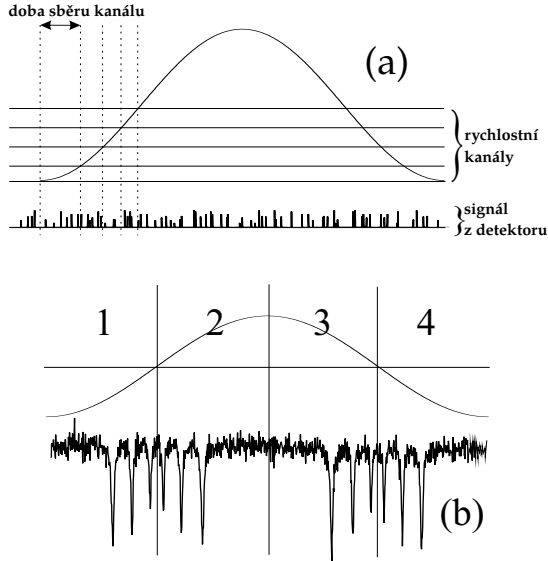
Obrázek 17 Čelní panel aplikace spektrometru, záložka zobrazující průběh rychlosti a nastavování parametrů PID regulátoru a dalších parametrů systému řízení rychlosti.

vým vzorkům signálu z detektoru. Normování je provedeno vymazáním určitého množství vzorků, tak aby byl jejich počet stejný u všech rychlostních kanálů spektra.

Spektra jsou zaznamenávána ve velmi vysokém rozlišení se statisíci či milióny primárních kanálů. Počet primárních kanálů je určen podílem vzorkovací frekvence použitého digitizéru f_s a frekvence pohybového zařízení f . Například pokud použijeme vzorkovací frekvenci 20 MS/s a frekvence pohybového zařízení je 30 Hz, pak podle rovnice (3) dostaneme 666 666 primárních kanálů

$$n = \frac{f_s}{f} = \frac{20\text{MSa/s}}{30\text{Hz}} = 6, \bar{6} \cdot 10^5. \quad (3)$$

Následně je spektrum přepočítáno a linearizováno algoritmem poprvé popsaným T. Frankem [23]. Linearizační algoritmus byl vyvinut v prostředí LabVIEW™, tak aby byl kompatibilní s použitým spektrometrem. Tento algoritmus využívá cyklometrických funkcí arkus sinus a arkus kosinus. Jelikož jsou tyto funkce nespojitě, tak musí být spektrum rozděleno do čtyř kvadrantů (viz obrázek 18(b)), které budou zpra-



Obrázek 18 Nelineární přiřazování impulzů do kanálů spektra (a) a rozdělení spektra na čtyři kvadranty (b).

covány odděleně. Dalším důvodem dělení spektra na intervaly je, že chceme získat spektrum odpovídající trojúhelníkovému průběhu rychlosti. Algoritmus dále rozdělí danou čtvrtinu spektra na malé části, které odpovídají nelineární délce jednotlivých kanálů a které jsou určeny rovnicí (4). Samotné mazání vzorků je provedeno funkcí *array subset*. To, které primární kanály ve spektru zůstanou a které budou smazány je určeno pomocí rovnic (5 – 8).

$$L = n \frac{\arcsin(\frac{1}{N})}{2\pi}, \quad (4)$$

$$I_1 = n \frac{\arccos(\frac{1}{N}i)}{2\pi}, \quad (5)$$

$$I_2 = n \frac{\arcsin(\frac{1}{N}(N-i))}{2\pi} + \frac{n}{4}, \quad (6)$$

$$I_3 = n \frac{\arccos(\frac{1}{N} i)}{2\pi} + \frac{n}{2}, \quad (7)$$

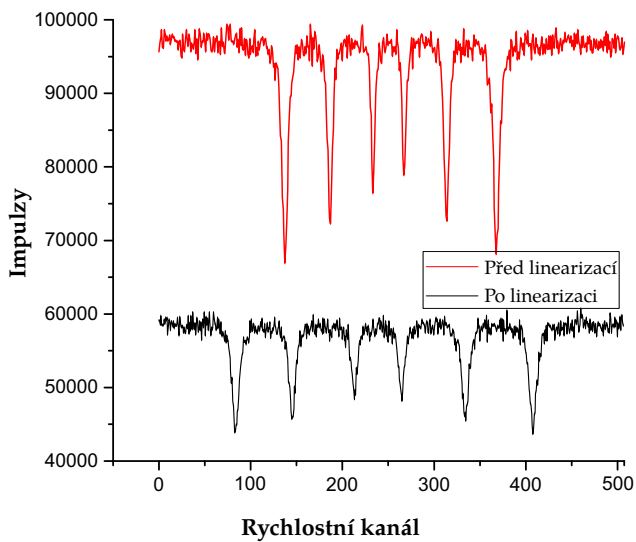
$$I_4 = n \frac{\arcsin(\frac{1}{N} (N - i))}{2\pi} + \frac{3n}{4}. \quad (8)$$

V kvadrantech 1 a 3 je spektrum přepočítáno pomocí funkce arcus kosinus s posunem $n/2$, kde n značí počet kanálů v Mössbauerově spektru. Ve kvadrantech 2 a 4 je spektrum přepočítáno pomocí funkce arcus sinus. $I_1 - I_4$ značí číslo (index) kanálu ve spektru, N je počet iterací algoritmu (a rovněž celkové číslo primárních kanálů), a i je číslo momentální iterace algoritmu (číslo momentálně řešeného primárního kanálu). Jakmile je provedena linearizace, dojde k sečtení primárních kanálů v jednotlivých kanálech a spektrum má následně 1024 kanálů (pro nesložené spektrum), aby bylo možné spektrum vyhodnocovat v běžně používaném softwaru.

4.1.1. Porovnání metody

Pro porovnání metody byl využit upravený Mössbauerův spektrometr [8] s digitálním PID kontrolérem [12], a scintilačním detektorem gama záření [14]. Kvalita spektra byla popsána parametry FWHM (Full width at half of maximum – šířka spektrální čáry v polovině maxima, respektive zde u transmisních spekter šířka v polovině minima) a nelinearita rychlostní osy [16]. Linearizační program byl naprogramován v prostředí LabVIEW™, aby byl kompatibilní s použitým spektrometrem [8]. Pro porovnání metod byla měřena spektra obohaceného vzorku $^{57}\text{Fe}_2\text{O}_3$ ve frekvenčním rozsahu 10 – 100 Hz s konstantní amplitudou signálu rychlosti 0,7 V, která na použitém spektrometru přibližně odpovídá rychlostnímu intervalu ± 12 mm/s. Pro názornost je jedno spektrum zobrazeno na obrázku 19. Nahoře je původní spektrum a dole je to samé spektrum, které prošlo linearizací. Toto spektrum bylo měřeno při frekvenci 30 Hz, která je pro daný spektrometr nejčastěji používaná.

Na obrázku 20 je zobrazena frekvenční závislost kvality kalibračních spekter obdržených při klasickém módu využívajícím trojúhelníkový referenční signál (černá) a spektra získaná při sinové rychlosti, která byla následně linearizována (červená). Pro popis kvality spekter byly využity parametry *nelinearita rychlostní osy*, která je dána rovnicí



Obrázek 19 Spektrum $^{57}\text{Fe}_2\text{O}_3$ měřené se sinovým referenčním signálem rychlostí (nahore) a to stejné spektrum, které prošlo linearizačním algoritmem (dole). Spektrum bylo měřeno při frekvenci 30 Hz a při amplitudě 0,7 V.

$$\text{non}(i) = \frac{x(i) - av(i) - b}{v(6) - v(1)}, \quad (9)$$

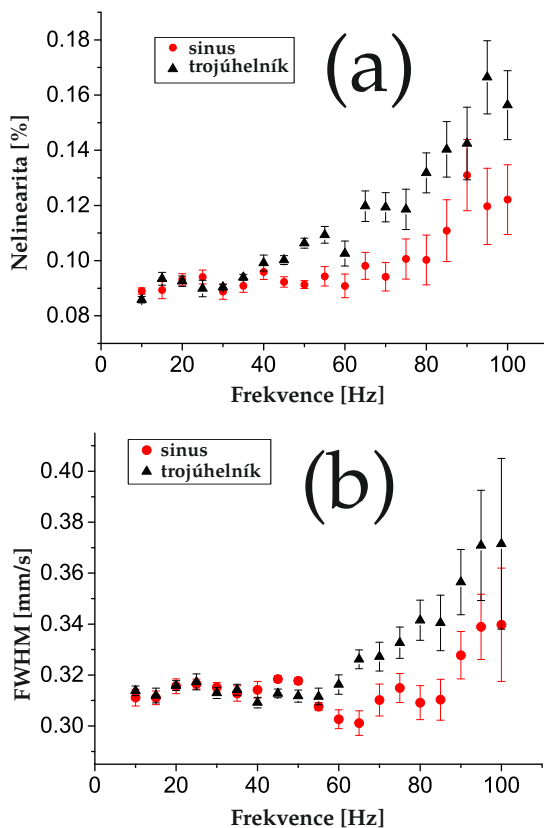
kde i ($i = 1, 2, \dots, 6$) je číslo čáry, $x(i)$ experimentální pozice čáry, $v(i)$ teoretická pozice čáry a a a b parametry z výpočtu metody nejmenších čtverců, viz [16]. V grafu je uvedena vždy průměrná nelinearita ze všech čar a tzv. errorbary ukazují rozptyl hodnot pro jednotlivé spektrální čáry.

Druhý parametr zvolený pro popis kvality spekter je šířka spektrální čáry FWHM. Obrázek 20 jasně demonstuje, že použití rychlosti se sinovým průběhem vykazuje větší stabilitu ve větším frekvenčním intervalu (až do 100 Hz). Grafy frekvenční závislosti nelinearity rychlostní osy (viz obrázek 20(a)) a šířky spektrální čáry (viz obrázek 20(b)) ukazují, že rozdíl mezi spektry roste se zvyšující se frekvencí a že použití sinového signálu dovoluje řídit pohybové zařízení s vyšší přesností na širším rychlostním intervalu.

Jak je vidět z obrázku 20, linearizovaná sinová spektra mají nelinearitu pod 0,1 % až do frekvence 80 Hz a FWHM pod 0,32 mm/s až do 85 Hz, zatímco při použití trojúhelníkového signálu vykazují parametry spektra stabilitu jen do 60 Hz. Použitý Mössbauerův spektrometr má při obvykle používané rychlosti 30 Hz garantovanou nelinearitu rychlostní osy pod 0,1 % [8]. Šířka spektrálních čar je mírně širší kvůli použití ^{57}Fe obohaceného vzorku – obohacené vzorky mají vždy širší spektrální čáry kvůli zvýšené pravděpodobnosti zpětných rázů v krystalické mřížce (ve srovnání se vzorky s přirozeným zastoupením ^{57}Fe) [24].

Vyšší hodnoty nelinearity rychlostní osy a šířky spektrálních čar ve vyšších frekvencích pravděpodobně korespondují s neoptimálním nastavením PID parametrů. Nicméně, jak ukazuje obrázek 20, sinová řídicí rychlost je méně náchylná na použitou hodnotu frekvence pohybového zařízení, což souvisí s tím, že se jedná o přirozenější pohyb a také to, že je jednodušší jej regulovat pomocí PID regulátoru. Frekvence, při níž dochází k nárůstu nelinearity a šířky čar, koresponduje s rezonanční frekvencí (viz obrázek 22). Jak bylo totiž již dříve zjištěno, PID regulátor nejlépe reguluje těsně pod rezonanční frekvencí pohybového zařízení.

Pro měření amplitudové závislosti kvality této metody nebylo možno porovnávat kvalitu spekter, jelikož vyšší amplitudy zadávacího signálu (5 V) odpovídají vyšším rychlostním intervalům (± 60 mm/s) a tudíž by nebylo možné porovnávat spektra jednoho vzorku. Byly proto porovná-



Obrázek 20 Frekvenční závislost nelinearity rychlostní osy (a) a šířky čar (b) u kalibračního vzorku $^{57}\text{Fe}_2\text{O}_3$ měřené s trojúhelníkovým referenčním signálem rychlostí a linearizovaných spekter původně měřených se sinovým referenčním signálem rychlosti.

vány amplitudy signálu chyby. Závislost amplitudy chybového signálu na použité amplitudě zadávacího signálu je zobrazena na obrázku 21(a) společně s příkladem signálu chyby při použití sinového a trojúhelníkového řídicího signálu (obrázek 21(b)). Z obrázku 21(a) jasně vyplývá, že amplituda signálu chyby je přímo úměrná amplitudě řídicího signálu, nicméně při použití sinového řídicího signálu je růst signálu chyby pozvolnější. To je mimo jiné dáno tvarem signálu chyby, který má v bodech obratu rychlosti pohybového zařízení znatelné píky při použití trojúhelníkového signálu, viz obrázek 21(b) dole. Lepší stabilita ve vyšších rychlostních intervalech může umožnit měření bez potřeby speciálních pohybových zařízení.

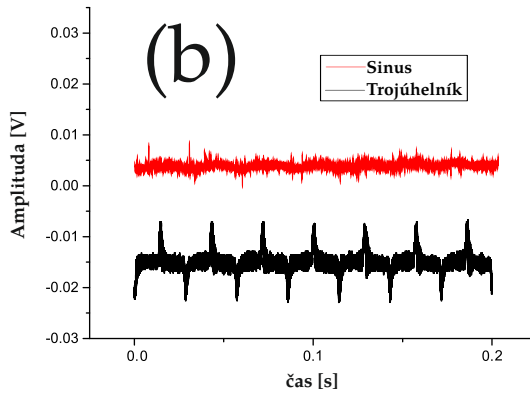
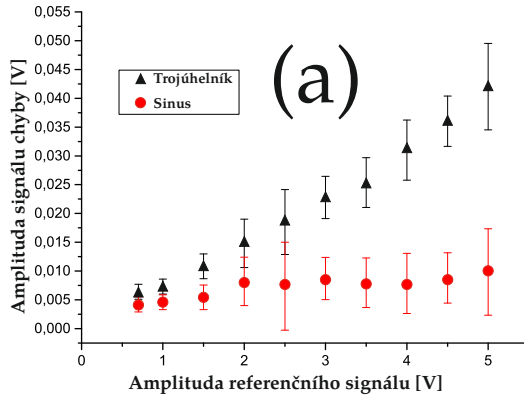
4.2. Linearizace modulací referenčního signálu pomocí signálu chyby měřeného laserovým vibrometrem

Tato kapitola se věnuje dalšímu způsobu linearizace rychlostní osy Mössbauerova spektrometru. Tento způsob linearizace rychlostní osy vychází z metody poprvé nevržené v [25]. Zde bude popsána varianta tohoto linearizačního postupu, která využívá laserový vibrometr Keyence LK-G5000. Laserový vibrometr byl použit protože na rozdíl od cívek pohybujících se v magnetickém poli není náchylný na elektromagnetické rušení. Náhodné elektromagnetické rušení v systému řízení se následně projevuje rozmazáním spektrálních čar – zvětšením jejich šířky. Laserový systém rovněž není náchylný na nehomogenity magnetického pole permanentních magnetů či vinutí cívky, které se projeví nelinearitou rychlostní osy.

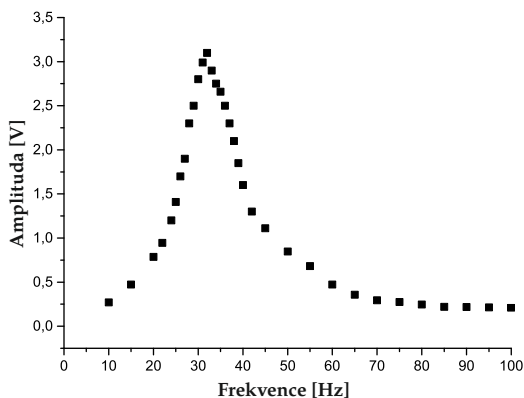
Pomocí laserového vibrometru LK-G byl měřen průběh rychlosti pohybového zařízení. Tento průběh byl zaznamenáván a následně zprůměrován. Změřený průběh rychlosti byl odečten od ideálního průběhu rychlosti (viz obrázek 23 vlevo). Tento rozdíl byl následně použit k modulaci zadávacího signálu. Signál s přidanou modulací byl následně nahrán do *look-up* tabulky virtuálního generátoru rychlosti (viz obrázek 23 vpravo).

4.3. Opravy nelinearity dodatečnou korekcí

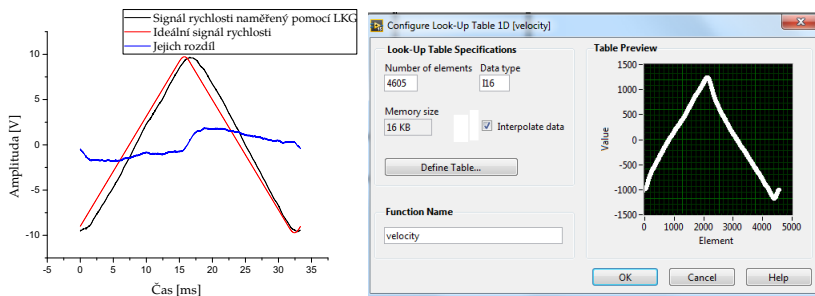
Zprůměrovaný signál chyby byl rovněž využit pro dodatečné přepočítávání spektra. Tato metoda funguje podobně jako linearizace pomocí



Obrázek 21 | Závislost amplitudy signálu chyby na amplitudě zadávaného signálu (a) a příklad signálu chyby (b).

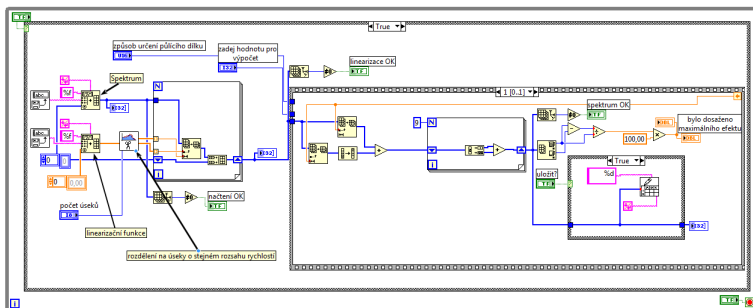


Obrázek 22 Frekvenční amplitudová charakteristika použitého pohybového zařízení.



Obrázek 23 Signál rychlosti měřený vibrometrem LK-G5000, ideální signál a jejich rozdíl (vlevo) a referenční signál modulovaný tímto rozdílem, nahraný v *look-up* tabulce virtuálního generátoru rychlosti (vpravo). Měřeno při 30 Hz a amplitudě zadávacího signálu 10 V (což odpovídá zhruba ± 120 mm/s) a při mírně rozladěných PID parametrech (pro demonstraci a lepší viditelnost rozdílů mezi signály).

sinového signálu rychlosti (viz kapitola 4.1). Spektrum je zaznamenáno ve vysokém rozlišení a přepočítáno pomocí inverzní funkce k funkci, rozdíl skutečného signálu rychlosti a ideálního průběhu. Na obrázku 24 je zobrazen blokový diagram linearizačního softwaru. Jeho funkce je následující – nejprve je načteno spektrum a linearizační funkce – naměřený průměrný signál rychlosti. Ten je rozdělen na malé intervaly, které nejsou stejně dlouhé, ale mají stejně velký rychlostní rozsah a následně jsou algoritmem ze spektra vymazávány jednotlivé body tak, aby byly dané intervaly stejně dlouhé. Dále je spektrum sečteno na 1024 bodů a případně i složeno. Omezením tohoto algoritmu je, že linearizační funkce musí být prostá na intervalech $(0; \frac{T}{2})$ a $(\frac{T}{2}; T)$, kde T je perioda signálu. Tato podmínka je většinou splněna, jelikož šum je eliminován pomocí průměrování a linearizační funkce se většinou jen málo liší od trojúhelníkového signálu.

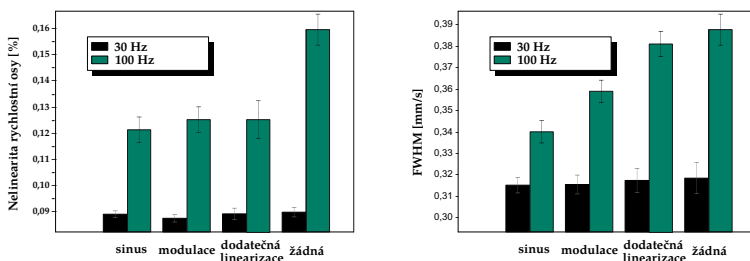


Obrázek 24 | Blokový diagram programu na dodatečnou linearizaci spektra.

4.4. Porovnání všech výše uvedených metod

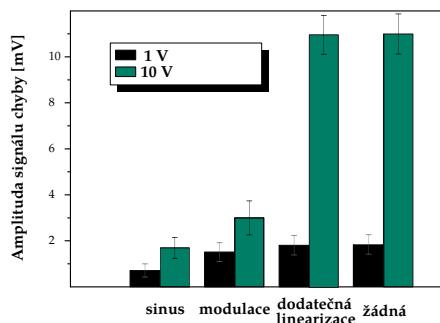
V grafech na obrázku 25 je zobrazena závislost nelinearity rychlostní osy spektra (vlevo) a šířky spektrálních (vpravo) čar kalibračních spekter obohaceného vzorku $^{57}\text{Fe}_2\text{O}_3$ při použití různých linearizačních metod. Černé sloupce jsou hodnoty pro spektra měřená při 30 Hz a zelené sloupce při 100 Hz. Z grafů plyne, že při vyšší frekvenci pohybového zařízení vykazují Mössbauerova spektra větší nelinearitu rychlostní osy. Tento nárůst nelinearity je však menší při použití dodateč-

ných metod linearizace. Všechny tři porovnávané metody mají na snížení nelinearity rychlostní osy zhruba stejný účinek. Nicméně při porovnání šířek (FWHM) spektrálních čar spekter je vidět, že linearizace sinem je zdaleka nejlepší, po něm následuje linearizace pomocí modulační referenčního signálu. Dodatečná linearizace příliš šířku spektrální čáry nesnižuje. Šířky spektrálních čar jsou širší, jelikož, jak již bylo zmíněno v sekci 4.1, byl z důvodu rychlejšího měření použit kalibrační ^{57}Fe obohacený vzorek, což způsobilo mírné rozšíření spektrálních čar [24]. Na obrázku 26 je zobrazen graf závislosti amplitudy signálu chyby na amplitudě zadávacího signálu pro různé linearizační metody. Sinus má nejnižší signál chyby, následuje modulace. Metoda dodatečné linearizace nemá na snížení signálu chyby žádný vliv, jelikož jako dodatečná metoda signál chyby vůbec neovlivňuje.



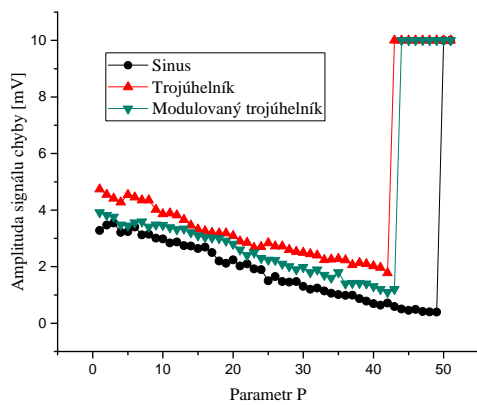
Obrázek 25 Porovnání nelinearity rychlostní osy spektra (vlevo) a šířky spektrálních (vpravo) čar kalibračních spekter obohaceného vzorku $^{57}\text{Fe}_2\text{O}_3$ při použití různých linearizačních metod. Černé sloupce jsou hodnoty pro spektra měřená při 30 Hz a zelené sloupce při 100 Hz.

Na obrázku 27 je zobrazen graf závislosti amplitudy signálu chyby pro různé módy spektrometru v závislosti na nastavení parametru P PID regulátoru. Parametr P byl vybrán protože v praxi bylo zjištěno, že nejvíce ovlivňuje kvalitu PID regulace. Parametry I a D byly fixovány na hodnotě 0 a 0. Z grafu 27 jednoznačně plyne, že pro různé zadávací signály je signál chyby různě velký a že se liší i nástup saturace, nastavení, kde PID regulátor nezvládá regulovat pohybové zařízení a místo toho jen přepíná mezi maximální a minimální hodnotou AD převodníku (zde ± 10 V). Tento stav je lehce rozpoznatelný, jelikož při něm pohybové



Obrázek 26 Porovnání amplitudy signálu chyby při použití různých linealizačních metod, černě pro amplitudu 1 V (což odpovídá cca ± 12 mm/s) a zeleně pro amplitudu 10 V (což odpovídá cca ± 120 mm/s).

zařízení začne vydávat vysokofrekvenční tón (ten vzniká v důsledku toho, že se pohybové zařízení pohybuje už při frekvencích slyšitelných lidským sluchem). Graf na obrázku 27 ukazuje, že nejmenší amplitudy signálu chyby se dá dosáhnout při použití sinového referenčního signálu rychlosti. Amplituda signálu chyby dosahuje v tomto případě pod 1 mV. K saturaci u sinu dochází pokud je parametr P nastaven na hodnotu 50 a více. Pokud je referenčním signálem modulovaný trojúhelník, tak je amplituda signálu chyby vyšší (pod 2 mV) a saturace nastupuje pokud je hodnota P nastavena kolem 44. Pro obyčejný trojúhelník (se sinovým průběhem v bodech obratu) saturace nastupuje pokud je hodnota P nastavena na více než 42 a amplituda signálu chyby o něco málo vyšší než 2 mV. Tato amplituda je nicméně dána hlavně píky v signálu chyby, které vznikají v bodech obratu rychlosti, kde se neměří. V oblastech, kde se měří spektrum, je amplituda signálu chyby menší (viz např. obrázek 21(b)).



Obrázek 27 Amplituda signálu chyby pro různé módy spektrometru v závislosti na nastavení parametru P PID regulátoru.

Závěr

První část této práce se zabývá vývojem a testováním nového typu Mössbauerova spektrometru pomocí techniky virtuální instrumentace na platformě CompactRIO. Práce se zabývá programováním aplikace určené k běhu na programovatelném hradlovém poli vestavěném do zařízení CompactRIO, a také programováním aplikace běžící na operačním systému NI Linux Real-Time OS™. Dále se zabývá digitalizací impulzů z detektoru pomocí digitálních vstupů s využitím jednonárodního analyzátoru. Velká část této práce se zabývá systémem řízení rychlosti, generováním různých tvarů řídicího signálu a PID regulací pohybu pohybového zařízení. Pro potřeby řízení pohybového zařízení byl zkonstruován zesilovač signálů. Důležitou součástí vyvinutého spektrometru je systém automatického ladění PID parametrů, který dokáže uživateli usnadnit práci. Vyvinutý spektrometr přináší díky své jednoduché konfigurovatelnosti mnoho možností, jako například snadnou implementaci pokročilých postupů na další minimalizaci nelinearity rychlostní osy. Těmto linearizačním postupům se věnuje druhá část. Práce se zaměřuje nejprve na linearizaci pomocí sinového průběhu rychlosti a následně linearizace pomocí vyvinutého algoritmu. Popsaný linearizační přístup přináší lepší stabilitu v širším frekvenčním pásmu pohybu pohybového zařízení a možnost měřit ve vyšších rychlostních intervalech za použití stejných pohybových zařízení díky snížení amplitudy chybového signálu až o 75 %. Při užití běžně využívaných parametrů (10 mm/s, 30 Hz) je tato metoda srovnatelná s tradičními metodami. Očekává se využití této metody pro použití u pohybových zařízení bez měřicí cívky a bez PID regulátoru či u piezoelektrických pohybových zařízení. Výsledky této části byly již vydány v článku v impaktovaném časopise [26]. Práce se dále zabývá i dalšími metodami linearizace (linearizací pomocí modulace referenčního signálu a dodatečnou linearizací) a porovnává je. Linearizace pomocí sinové funkce tedy z porovnávaných metod poskytuje nejlepší výsledky, za ní následuje modulace referenčního signálu. Metoda dodatečné linearizace poskytuje sice horší výsledky než dvě dříve zmíněné metody, nicméně pořád je lepší než nevyužití žádné linearizační metody.

Seznam použitých zdrojů

- [1] Mössbauer, R. L.: Kernresonanzfluoreszenz von Gammastrahlung in Ir191. *Zeitschrift für Physik*, díl 151(2), 1958: s. 124–143, ISSN 14346001, doi:<10.1007/BF01344210>.
- [2] Mössbauer, R. L.: Recoilless nuclear resonance absorption of gamma radiation. *Nobel Lectures: Physics 1942 - 1962*, díl 4(1), 1964: s. 584–201.
URL <http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1961/mossbauer-lecture.pdf>
- [3] Pechoušek, J.; Vůjtek, M.; Novák, P.; aj.: *Číslicové měřicí systémy pro aplikovanou fyziku*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2012, ISBN 978-80-244-3136-9, 200 s.
- [4] Pechoušek, J.: *Využití techniky virtuální instrumentace při vývoji měřicích systémů pro jadernou fyziku se zaměřením na realizaci Mössbauerova spektrometru*. Habilitační práce, Univerzita Palackého, 2014.
- [5] Šťastný, J.: *FPGA prakticky*. BEN - technická literatura, 2011, ISBN 978-80-7300-261-9.
- [6] Kohout, P.: *Optimalizace řízení sestavy lineárního motoru s PID regulátorem pohybu u Mössbauerova spektrometru*. Diplomová práce, Univerzita Palackého, 2014.
- [7] Miroslav Mašláň: Mössbauerova spektroskopie. *Vydavatelství Univerzity Palackého v Olomouci*, 1993: str. 43.
- [8] Pechousek, J.; Jancik, D.; Frydrych, J.; aj.: Setup of Mössbauer Spectrometers at RCPTM. *Mössbauer Spectroscopy in Materials Science - 2012*, díl 1489(1), 2012: s. 186–193, ISSN 0094-243X, doi: <10.1063/1.4759489>.
- [9] Pechousek, J.; Mashlan, M.; Frydrych, J.; aj.: Improving detector signal processing with pulse height analysis in Mössbauer spectrometers. *Hyperfine Interactions*, díl 175(1-3), mar 2007: s. 1–8, ISSN 03043843, doi:<10.1007/s10751-008-9580-5>.
URL <<http://link.springer.com/10.1007/s10751-008-9580-5>>

- [10] Pechoušek, J.: *Mössbauerův spektrometr jako virtuální měřicí přístroj v modulárním systému PXI*. Dizertační práce, Univerzita Palackého, 2006.
- [11] Frydrieh, J.: *Konstrukce mössbauerovského spektrometru s detekcí konverzních elektronů a konverzního rentgenového záření a jeho aplikace se zaměřením na studium depozice hematitových fotokatalytických vrstev Olomouc 2011*. Dizertační práce, Univerzita Palackého, 2011.
- [12] Kohout, P.; Kouřil, L.; Navařík, J.; aj.: Optimized linear motor and digital PID controller setup used in Mössbauer spectrometer. *AIP Conference Proceedings*, díl 501(10), 2014, doi:<10.1063/1.4898610>. URL <<https://doi.org/10.1063/1.4898610><http://aip.scitation.org/toc/apc/1622/1>>
- [13] National Instruments: CompactRIO Systems - National Instruments. 2018. URL <<http://www.ni.com/en-us/shop/compactrio.html>>
- [14] Navařík, J.; Novák, P.; Pechoušek, J.; aj.: Precise compact system for ionizing radiation detection and signal processing with advanced components integration and electronic control. *Journal of Electrical Engineering*, díl 66(4), 2015: s. 220–225, ISSN 13353632, doi: <10.2478/jee-2015-0035>. URL <<https://www.degruyter.com/downloadpdf/j/jee.2015.66.issue-4/jee-2015-0035/jee-2015-0035.pdf>>
- [15] Jakub Navařík: *Mössbauerův spektrometr jako autonomní měřicí přístroj*. Dizertační práce, Univerzita Palackého, 2015. URL <https://theses.cz/id/wdgrjz/Dizertan_prce_ar.pdf>
- [16] Evdokimov, V. A.; Mashlan, M.; Zak, D.; aj.: Mini and micro transducers for Mössbauer spectroscopy. *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, B*, díl 95(2), 1995: s. 278–280, ISSN 0168583X, doi: <10.1016/0168-583X(94)00611-3>.
- [17] National Instruments: NI 9263 Datasheet. 2018. URL <http://www.ni.com/pdf/manuals/373781b_02.pdf>
- [18] Žák, D.: *Mössbauer Spectrometer - the analytic instrument for laboratory and industry*. Dizertační práce, Univerzita Palackého, 1997.

- [19] Mašláň, M.; Cholmeckij, A.; Jevdokimov, V.; aj.: A Driving system for Mössbauer spectrometer. *Acta UPO Physica*, díl 111(32), 1993: s. 9–17.
- [20] Zekhtser, M. Y.; Revyakin, A. S.; Sarychev, D. A.: Self-adjusting control system of the electrodynamic velocity transducer for Mössbauer spectrometer. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, díl 381, 2016: s. 45–51, ISSN 0168583X, doi: <10.1016/j.nimb.2016.05.019>.
URL <https://ac.els-cdn.com/S0168583X16302233/1-s2.0-S0168583X16302233-main.pdf?_tid=e780d64e-9f71-11e7-b10e-00000aab0f6b&acdnat=1506069902_634a2c53e49e6f0a55b6ec0111b226a9>
- [21] Černý, A.: *Modul řízení pohybového zařízení Mössbauerova spektrometru s digitální PID regulací*. Diplomová práce, Univerzita Palackého, 2011.
URL <https://theses.cz/id/c2hnmt/diplomov_prce.pdf>
- [22] National Instruments: Genetic Algorithm Code - Discussion Forums - National Instruments. 2010.
URL <<https://forums.ni.com/t5/Example-Program-Drafts/Genetic-Algorithm-Code/ta-p/3490759>>
- [23] Frank, T.: *Modul linearizace rychlostní osy Mössbauerova spektrometru*. Bakalářská práce, Univerzita Palackého, 2004.
- [24] Belozerski, G.: *MÖSSBAUER EFFECT AND STUDIES OF SURFACE*. Amsterdam: Elsevier, 1993, ISBN 044489943X, 457 s.
URL <[https://www.kfki.hu/\\$\sim\\$mixhp/lib/belozerski.htmhttp://usbook.ru/M_ssbauer-studies-of-surface-layers--or--cGuennadi-N-Belozerski/8/gahcci](https://www.kfki.hu/\simmixhp/lib/belozerski.htmhttp://usbook.ru/M_ssbauer-studies-of-surface-layers--or--cGuennadi-N-Belozerski/8/gahcci)>
- [25] Kankeleit, E.: Feedback in Electromechanical Drive Systems. In *Mössbauer effect Methodology*, Boston, MA, U.S.A.: Springer US, 1965, str. 47.
- [26] Kohout, P.; Frank, T.; Pechousek, J.; aj.: Mössbauer spectra linearity improvement by sine velocity waveform followed by linearization

process. *Measurement Science and Technology*, díl 29(5), may 2018:
str. 057001, ISSN 0957-0233, doi:<10.1088/1361-6501/aaacf0>.
URL <[http://stacks.iop.org/0957-0233/29/i=5/a=057001?
key=crossref.f8ce6bb81e61517b15c07ca03be1be08](http://stacks.iop.org/0957-0233/29/i=5/a=057001?key=crossref.f8ce6bb81e61517b15c07ca03be1be08)>