

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA JADERNÁ A FYZIKÁLNĚ INŽENÝRSKÁ

Katedra fyziky

**Přenosný spektrometr pro měření aktivity radonu ve  
vzduchu. Měření aktivity radonu pro potřeby  
experimentů Picasso a NEMO.**

diplomová práce

Viktor Bočarov

Vedoucí DP: doc. Ing. Ivan Štekl, CSc.  
Konzultanti: Ing. Jan Jakůbek, PhD.  
doc. Ing. Martin Kropík, CSc.

Praha, 2005



## Poděkování

Na tomto místě chci poděkovat zaměstnancům Ústavu technické a experimentální fyziky ČVUT, bez jejichž pomoci by realizace mé diplomové práce nebyla možná. Děkuji zejména prof. Ing. Z. Janoutovi, CSc. za poskytnutí cenných informací a materiálů potřebných pro zpracování částí 2 a 3, Ing. J. Jakůbkovi, PhD. za rady vztahující se k elektronice spektrometru a Ing. S. Pospíšilovi, DrSc. za poskytnutí zázemí a finančních prostředků nezbytných k vývoji spektrometru.

Nakonec děkuji svému vedoucímu, doc. Ing. I. Šteklovi, CSc., který mi vypracování této diplomové práce nabídl a umožnil mi přístup do podzemní laboratoře Fréjus ve Francii.

# Obsah

Úvod	4
<b>1 Experiment NEMO 3</b>	<b>5</b>
<b>2 Základní charakteristiky radonu</b>	<b>7</b>
2.1 Fyzikální vlastnosti . . . . .	7
2.2 Spektrometrické a dozimetrické vlastnosti . . . . .	7
2.3 Měření koncentrace radonu . . . . .	11
2.3.1 Filtrační metoda . . . . .	11
2.3.2 Elektrostatická metoda . . . . .	11
<b>3 Spektrometrie záření alfa</b>	<b>14</b>
3.1 Vlastnosti záření alfa . . . . .	14
3.2 Detektory pro alfa spektrometrii . . . . .	15
3.2.1 Křemíkový detektor s povrchovou bariérou . . . . .	15
3.3 Zpracování signálu z detektoru . . . . .	16
3.3.1 Vstupní zesilovač . . . . .	16
3.3.2 Digitalizace impulsu . . . . .	18
<b>4 Návrh spektrometru</b>	<b>20</b>
4.1 Koncepce přístroje . . . . .	20
4.2 Blokové schéma . . . . .	21
4.3 Signálový procesor (DSP) . . . . .	22
4.3.1 Popis procesoru ADSP-21992 . . . . .	22
4.4 Komparátor . . . . .	28
4.5 Zdroj předpětí pro detektor . . . . .	29
4.6 Externí paměti . . . . .	30
4.6.1 Paměť řídicího programu . . . . .	31
4.6.2 Paměť spekter . . . . .	31
4.7 Rozhraní USB . . . . .	31
4.7.1 Stručný popis USB . . . . .	32
4.7.2 USB řadič Cypress SX2 . . . . .	34
4.8 Hodiny reálného času . . . . .	35
4.9 Zdroje napájecích napětí . . . . .	35
<b>5 Testovací prototyp</b>	<b>39</b>
5.1 Vývojová sada k ADSP-21992 . . . . .	39
5.2 Vývojová sada k SX2 . . . . .	40
5.3 Realizace prototypu . . . . .	40
<b>6 Programové vybavení spektrometru</b>	<b>43</b>
6.1 Struktura řídicího programu . . . . .	43
6.2 Popis podprogramů . . . . .	44
6.2.1 Inicializační rutina . . . . .	44
6.2.2 Rutina přerušování od komparátoru . . . . .	44

6.2.3	Rutina přerušení interního časovače . . . . .	45
6.2.4	Dispečer měření . . . . .	45
6.2.5	Ovladač rozhraní EZ-USB . . . . .	46
6.3	Obslužný program pro PC . . . . .	50
<b>7</b>	<b>Měření provedená na prototypu</b>	<b>52</b>
<b>8</b>	<b>Testování zařízení pro odstraňování Rn ze vzduchu</b>	<b>57</b>
<b>9</b>	<b>Měření průchodu radonu prototypem subdetektoru Picasso</b>	<b>63</b>
	<b>Závěr</b>	<b>65</b>
	<b>Dodatek A – Schéma napájení procesoru</b>	<b>69</b>
	<b>Dodatek B – Hodnoty součástek</b>	<b>70</b>

## Úvod

Experimenty v oblasti jaderné a částicové fyziky jsou prakticky od svých prvopočátků spjaty s přístrojovým vybavením, stojícím na samé hranici technických možností doby, v níž vznikají. Je vyžadována maximální dosažitelná citlivost, přesnost, rychlost, čistota všech použitých materiálů a v neposlední řadě odolnost vůči nejrůznějším druhům rušivých jevů. Pro experimenty zabývající se měřením velmi řídkých jevů (např. dvojitý rozpad beta) je takovým rušivým jevem radioaktivní pozadí, které je způsobováno např. přirozenou radioaktivitou použitých konstrukčních materiálů či kosmickým zářením. Možnosti odstranění pozadí způsobeného vnější radioaktivitou jsou dnes již dostatečně známy (stínění proti gama záření, stínění proti neutronům, pečlivý výběr konstrukčních materiálů apod.).

Aby byl omezen nežádoucí vliv kosmického záření, je řada experimentů umísťována do podzemních laboratoří. Významným zbytkovým zdrojem nežádoucího pozadového jaderného záření je tak v podmínkách mnoha nízkopozadových měření v podzemních laboratořích radon a jeho dceřiné produkty. Ty pak mohou kontaminovat citlivé součásti experimentální sestavy a významným způsobem ovlivnit výsledky celého měření. Proto je nezbytné neustálé monitorování jeho (byť nízké) koncentrace v prostoru experimentu a zamezení styku radonu s částmi detektoru anebo jeho odstranění ze vzduchu v okolí detektoru.

Za účelem sledování koncentrace radonu ve vzduchu byla v průběhu uplynulých více než padesáti let rozpracována řada metod a k jejich aplikaci bylo vyvinuto a sériově vyráběno nepřeberné množství přístrojů. Cílem vývoje v této oblasti však byla především ochrana obyvatel před účinky ionizujícího záření pocházejícího od radonu. Měření k takovým účelům se provádí nejčastěji buď kontinuálně po celý rok a určuje se celková dávka (např. pomocí stopových nebo elektretových detektorů), nebo orientačně jednorázově (např. filtrační metodou nebo Lucasovými scintilátory), přičemž sledované aktivity se pohybují v řádech  $\sim 100 \text{ Bq/m}^3$ . K účelům experimentální fyziky je však třeba provádět kontinuální měření a sledovat okamžité hodnoty aktivity v určitých (v porovnání s předchozími metodami krátkých) intervalech, přičemž hodnoty aktivity lze očekávat v řádech  $< \sim 1 \text{ Bq/m}^3$ . Dále je požadována maximální automatizace takového měření a snadná dostupnost jeho výsledků. K měření nízkých koncentrací radonu ve vzduchu se jako nejvhodnější jeví metoda elektrostatického sběru krátkodobých dceřiných produktů radonu, jejichž záření alfa je dále analyzováno.

Cílem této práce bylo navrhnout a sestavit spektrometr (mnohakanálový analyzátor) vyhovující požadavkům na měření nízkých koncentrací Rn ve vzduchu. Práce je rozdělena do devíti částí. V první je popsán detektor NEMO, ve druhé jsou uvedeny základní vlastnosti radonu a vysvětleny metodiky měření jeho koncentrace ve vzduchu, vhodné pro nízké aktivity. Třetí část je věnována spektrometrii alfa, ve čtvrté části je předložen elektronický návrh spektrometru. Pátá část je věnována popisu prototypu, jenž byl v rámci této práce sestaven a šestá popisuje programové vybavení přístroje. V sedmé části jsou uvedeny výsledky základních měření provedených na prototypu a v osmé části je popsán systém redukce radonu ve vzduchu instalovaný v podzemní laboratoři Fréjus v Modane (Francie). Poslední — devátá — část shrnuje výsledky měření potlačení radonu obalem prototypu detektoru Picasso [36].

# 1 Experiment NEMO 3

Experiment NEMO 3 se věnuje měření dvojitého rozpadu beta, a to jak bezneutrinového, tak i dvouneutrinového ( $0\nu\beta\beta$ ,  $2\nu\beta\beta$ ). Základní filosofií detektoru NEMO 3 je přímá detekce dvou elektronů z  $\beta\beta$  rozpadu pomocí dráhového detektoru a kalorimetru [1]. Schematický náčrt detektoru NEMO 3 je na obr. 1.

Detektor NEMO 3 má kruhový tvar a je složen ze dvou hlavních částí: *dráhový detektor* (6180 buněk pracujících v Geigerově módu) a *kalorimetr* (tvořen 1940 scintilátory), které jsou obklopeny solenoidem (magnetické pole o indukci 25 G) a stíněním proti neutronům a gama kvantům. Detektor NEMO 3 je schopen dosáhnout úrovně poločasu rozpadu  $T_{1/2} \sim 10^{25}$  let pro proces  $0\nu\beta\beta$ , což odpovídá efektivní hmotě neutrina na úrovni 0,1–0,3 eV. Dráhový detektor poskytuje informaci o dráze nabitě částice s přesností 6 mm. Kalorimetr poskytuje informaci o energii registrované částice. Jeho energetické rozlišení je v rozmezí 6–7,5 % pro elektrony s energií 1 MeV, přičemž časové rozlišení je 250 ps.

V detektoru NEMO 3 je ve dvaceti sektorech uloženo 10 kg různých  $\beta\beta$  izotopů –  $^{100}\text{Mo}$  (6914 g),  $^{82}\text{Se}$  (932 g),  $^{116}\text{Cd}$  (405 g),  $^{130}\text{Te}$  (454 g),  $^{150}\text{Nd}$  (34 g),  $^{96}\text{Zr}$  (9 g) a  $^{48}\text{Ca}$  (7 g) ve formě tenkých fólií (30–60 mg/cm<sup>2</sup>) a se stupněm obohacení 95–99 %. Ve třech sektorech jsou vloženy fólie Cu (621 g) a přirozeného Te (614 g TeO<sub>2</sub>) pro měření externího pozadí.

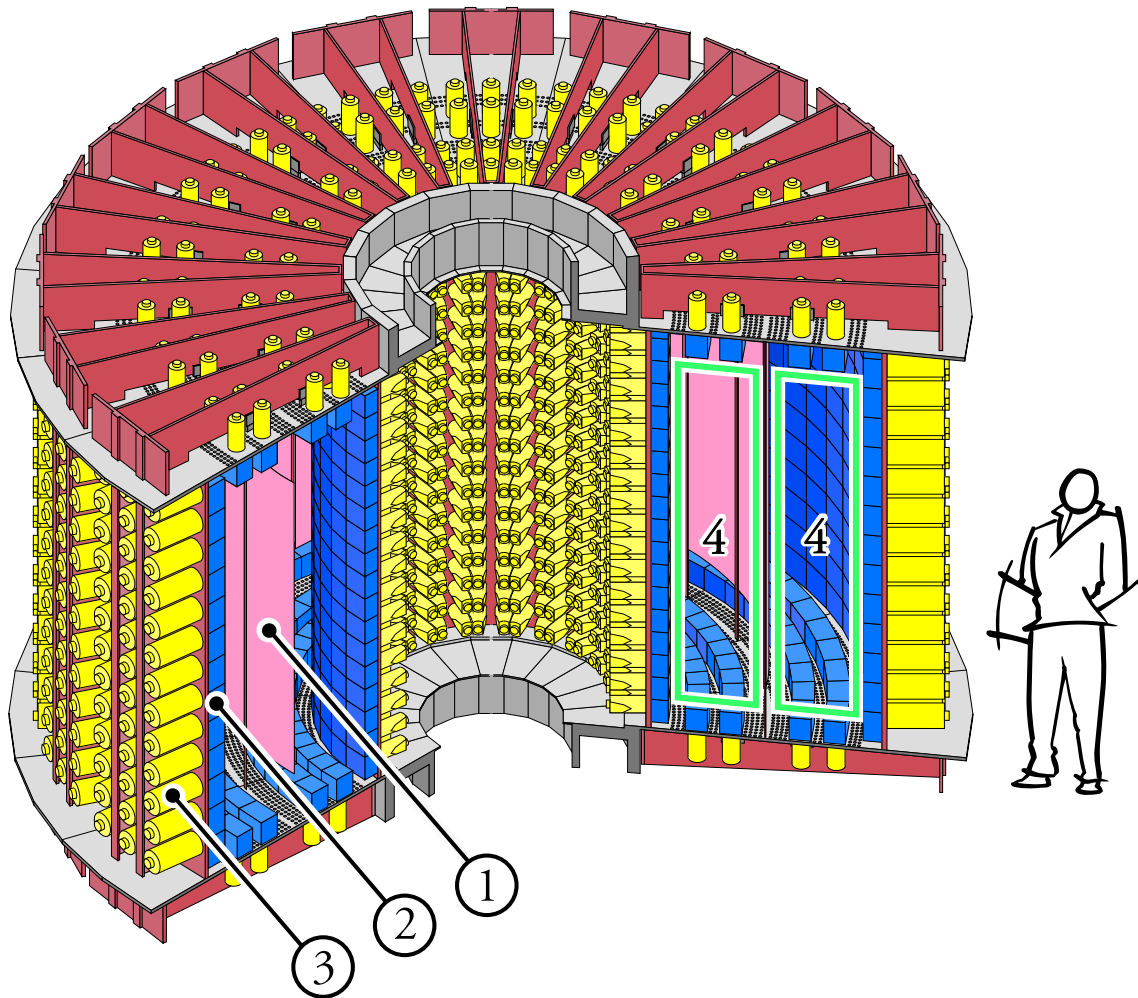
Uvnitř dráhového detektoru je magnetické pole o indukci 25 G, které umožňuje rozlišení elektronů a pozitronů ze zakřivení drah částic.

Stínění proti gama kvantům je vyrobeno z 20 cm silné, nízko radioaktivní oceli. Vnější stínění proti neutronům se skládá z nerezových tanků naplněných borovanou vodou. Detektor je umístěn v podzemní laboratoři Fréjus (4800 m vodního ekvivalentu), ve které je velmi nízký tok zbytkového kosmického záření (4,2 mionů/m<sup>2</sup>/den).

Vlastní měření  $\beta\beta$  rozpadu bylo zahájeno v únoru 2003.

Důležitým faktorem, který hraje klíčovou roli pro určení poločasu  $\beta\beta$  procesu, je úroveň pozadí. Z hlediska detektoru NEMO 3 se pozadí dělí na interní (z fólií  $\beta\beta$  vzorků) a externí. V současné době pochází nejdůležitější část externího pozadí z radonu, který může pronikat do detektoru NEMO 3. Průměrná aktivita radonu ve vzduchu v podzemní laboratoři Fréjus je 10–20 Bq/m<sup>3</sup>. Radon  $^{222}\text{Rn}$  se rozpadá dvěma navazujícími alfa rozpady na  $^{218}\text{Po}$  a  $^{214}\text{Pb}$ , který generuje beta rozpadem ( $T_{1/2} = 26,8$  min) izotop  $^{214}\text{Bi}$ . Tento izotop může vyvolávat uvnitř detektoru NEMO 3 signál podobný signálu z  $\beta\beta$  rozpadu – z tohoto důvodu se problematice radonu v experimentu věnuje velká pozornost.

# NEMO 3



Obrázek 1: Schéma detektoru NEMO 3; 1 – fólie z  $\beta\beta$  vzorků, 2 – scintilátory, 3 – fotonásobiče, 4 – dráhový detektor



## 2 Základní charakteristiky radonu

Radon je radioaktivní vzácný plyn vznikající v zemské kůře postupným rozpadem uranu. Vystupuje ve třech přirozených rozpadových řadách – uran-radiové, thoriové a aktiniové, z nichž největší význam má první vzhledem k relativně vysokému zastoupení jejích prvků v zemské kůře, vodě i atmosféře. Počátečním nuklidem každé z uvedených řad jsou  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  a  $^{235}\text{U}$ , z nichž každý má poločas rozpadu řádově  $10^9$  roků. Celkem je dnes známo 16 izotopů radonu, z nichž pro jednotlivé řady jsou dominantní  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{220}\text{Rn}$  (tzv. *thoron*) a  $^{219}\text{Rn}$  (*aktinon*).

### 2.1 Fyzikální vlastnosti

Radon je jediným přirozeně se vyskytujícím radioaktivním prvkem, jenž se za normálních podmínek nachází v plynném skupenství. Jeho bod varu je  $t_v = -62^\circ\text{C}$ . Radon je bez barvy a bez zápachu, svou elektronovou konfigurací se řadí do skupiny vzácných plynů. Omezeně se rozpouští ve vodě, mnohem lépe je rozpustný v organických rozpouštědlech (jako na př.  $\text{CS}_4$ , benzen, toluen, alkohol). Má schopnost adsorbovat na pevných materiálech, jako je aktivní uhlí, parafín, případně kůře.

Radon ze zemské kůry difunduje na povrch, přičemž se často hromadí ve volných prostorech v podzemí. Typická rychlost difúze radonu z půdy je  $2 \cdot 10^{-2} \text{ Bq}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$  [2], typická koncentrace ve volném prostředí nad povrchem země se pohybuje v intervalu od 3,7 do 37  $\text{Bq}/\text{m}^3$ . Typická koncentrace thoronu ve volném prostředí se velmi liší v závislosti na lokalitě, střední hodnota bývá 1,85  $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$  [3]. Koncentrace aktinonu bývají v porovnání s předchozími dvěma zanedbatelné, jelikož výskyt počátečního nuklidu  $^{235}\text{U}$  je asi  $140\times$  nižší než  $^{238}\text{U}$  a poločas rozpadu aktinonu jsou pouhé 4 s.

Důležitou vlastností dceřiných produktů radonu — vedle toho, že jsou radioaktivní — je jejich elektrický náboj. V důsledku emise alfa částice totiž dochází k ionizaci výsledného atomu za vzniku kladného iontu. Tyto kationty jsou přitahovány mikroskopickými částicemi přítomnými ve vzduchu a jejich prostřednictvím dochází k následnému transportu dceřiných produktů radonu a jejich usazování pak ke kontaminaci povrchů materiálů. Této vlastnosti je zároveň často využíváno k samotnému měření koncentrace radonu ve vzduchu.

### 2.2 Spektrometrické a dozimetrické vlastnosti

Rozpadové produkty radonu se dělí do dvou skupin: *krátkodobé produkty* (označované jako RaA, RaB, RaC a RaC') charakterisované poločasem rozpadu kratším než 30 minut a *dlouhodobé produkty* (RaD, RaE, RaF) – viz tab. 1.

V dozimetrii radonu se mimo běžně užívaných dozimetrických jednotek užívá ještě několik speciálních. Především je to *latentní energie alfa záření*, což je součet energií alfa

izotop	označení	energie [MeV]		poločas rozpadu
		$\alpha$	$\beta_{\max}$	
$^{222}\text{Rn}$	Rn	5,486		3,824 d
$^{218}\text{Po}$	RaA	6,000		3,05 min
$^{214}\text{Pb}$	RaB		0,690	26,8 min
$^{214}\text{Bi}$	RaC	5,500	3,270	19,8 min
$^{214}\text{Po}$	RaC'	7,680		164 $\mu\text{s}$
$^{210}\text{Pb}$	RaD		0,015	22,3 r
$^{210}\text{Bi}$	RaE	4,670	1,161	5,01 d
$^{210}\text{Po}$	RaF	5,305		138,38 d
$^{206}\text{Pb}$	Pb			stabilní

Tabulka 1: Dceřiné produkty radonu.

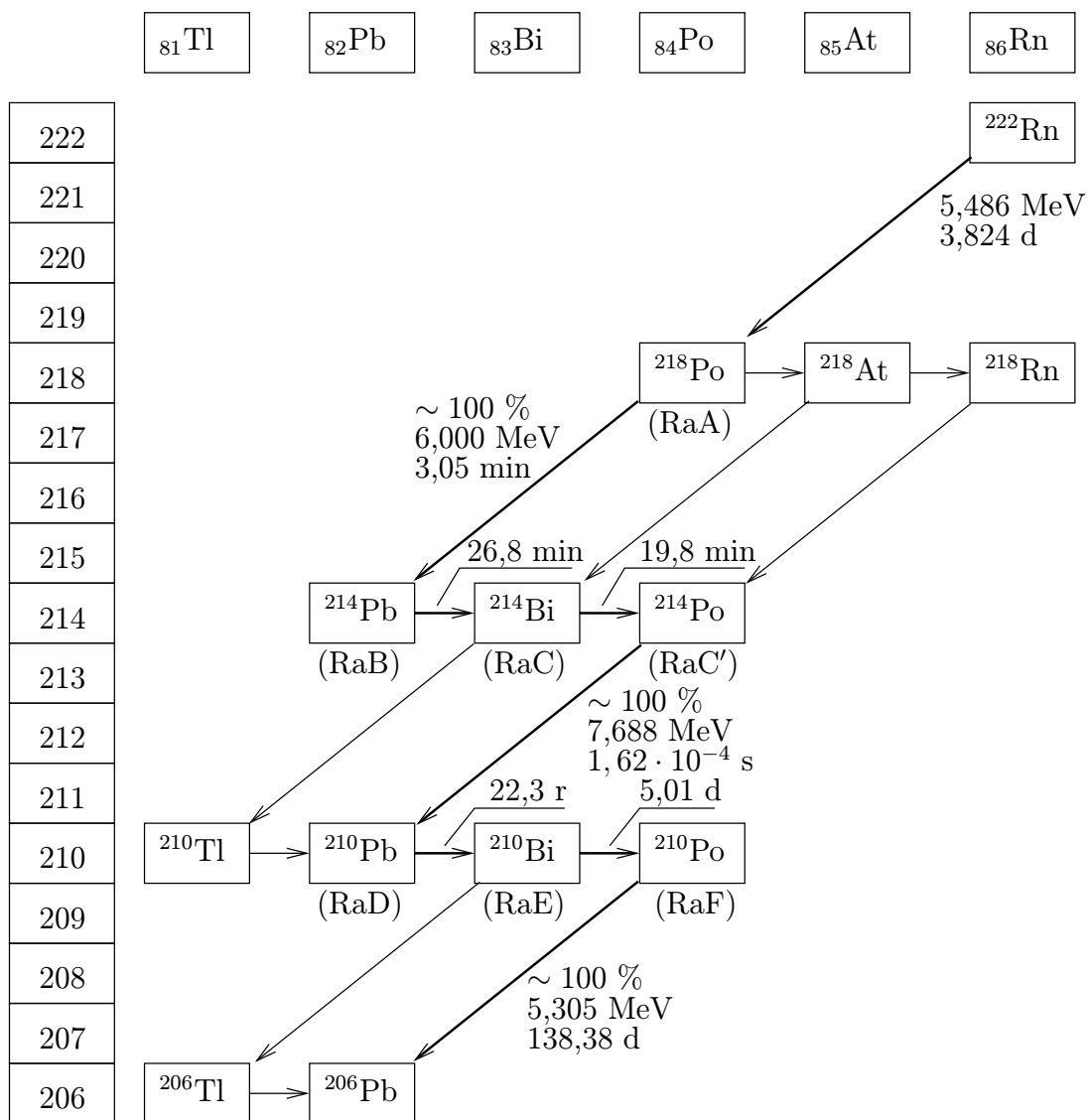
částic emitovaných během rozpadu původního atomu až do izotopu  $^{210}\text{Pb}$ . Pro radon je tato energie rovna 19,18 MeV. Dále je to *koncentrace latentní energie*, což je součet latentních energií alfa záření všech dceřiných atomů radonu přítomných v jednotkovém objemu vzduchu. Pro krátkodobé produkty nacházející se v rozpadové rovnováze s radonem o koncentraci  $3700 \text{ Bq/m}^3$  je tato hodnota rovna  $2,08 \cdot 10^{-5} \text{ J/m}^3$  a odpovídá starší jednotce 1 WL (working level) [4].

Koncentraci latentní energie směsi dceřiných produktů je možno také vyjádřit pomocí ekvivalentní rovnovážné koncentrace radonu. *Ekvivalentní rovnovážná koncentrace* nerovnovážné směsi krátkodobých dceřiných produktů je objemová aktivita směsi radonu v radioaktivní rovnováze s jeho dceřinými produkty, která by měla stejnou koncentraci latentní energie jako zkoumaná nerovnovážná směs. Pro ekvivalentní rovnovážnou koncentraci směsi krátkodobých produktů radonu  $C_{\text{eq}}$  platí [2]:

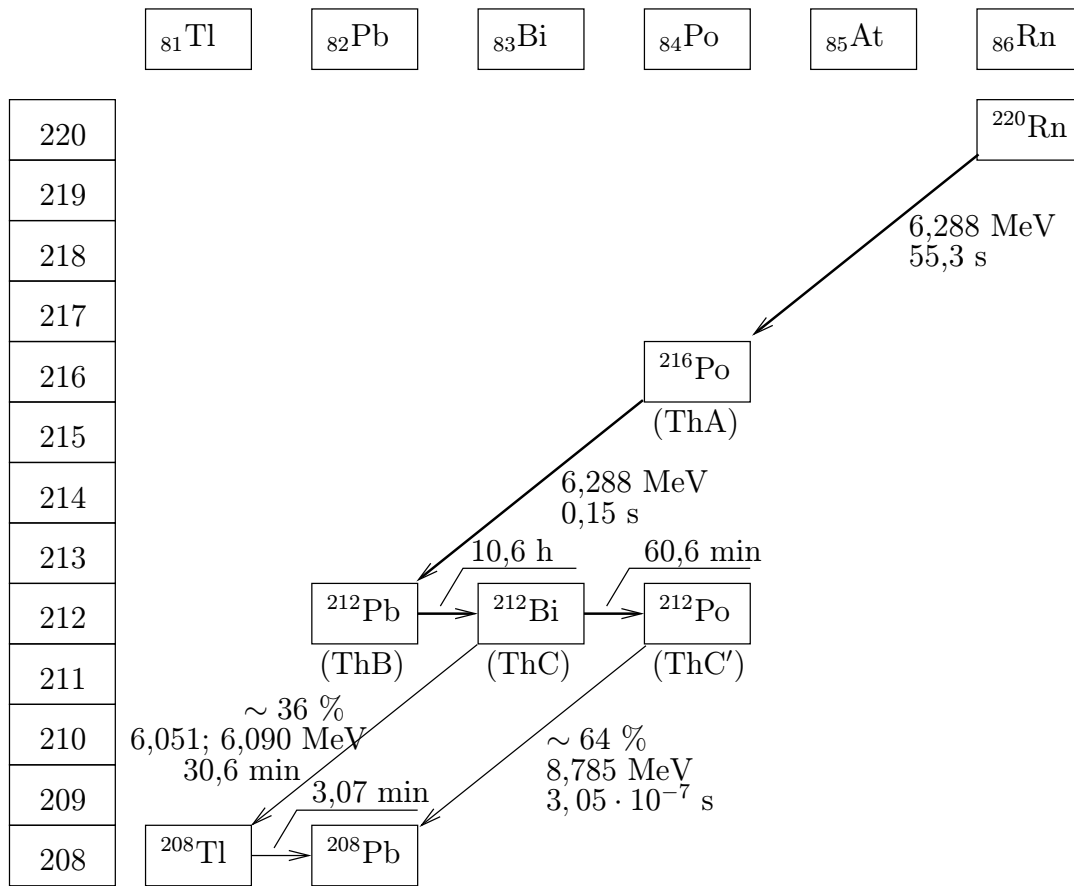
$$C_{\text{eq}} = 0,105C_{\text{RaA}} + 0,516C_{\text{RaB}} + 0,379C_{\text{RaC}} + 6 \cdot 10^{-8}C_{\text{RaC}'} \quad [\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}] \quad (1)$$

Směs dceřiných produktů radonu lze charakterisovat *rovnovážným faktorem*  $F$ , který je definován jako poměr ekvivalentní rovnovážné koncentrace  $C_{\text{eq}}$  k přítomné měrné aktivitě radonu  $C_0$ :

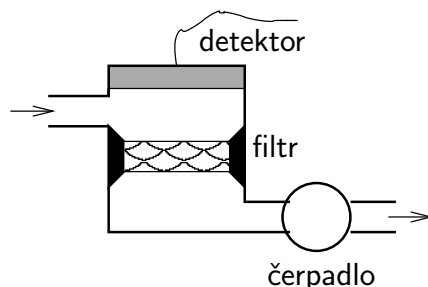
$$F = \frac{C_{\text{eq}}}{C_0} \quad (2)$$



Obrázek 2: Rozpadové schéma radonu.



Obrázek 3: Rozpadové schéma thoronu.



Obrázek 4: Filtrační metoda.

## 2.3 Měření koncentrace radonu

K určování množství radonu obsaženého v různých materiálech byla vypracována řada metod. Vzhledem k přísné kontrole radiační čistoty materiálů a tekutin užívaných pro současné experimenty částicové fyziky je hlavním možným zdrojem znečištění produkty radonu v podzemních laboratořích vzduch. Z běžně používaných známých metod určování koncentrace radonu ve vzduchu se pro účely nízkopozadových laboratoří jeví jako nejvhodnější dvě – *metoda elektrostatická* a *metoda filtrační*.

### 2.3.1 Filtrační metoda

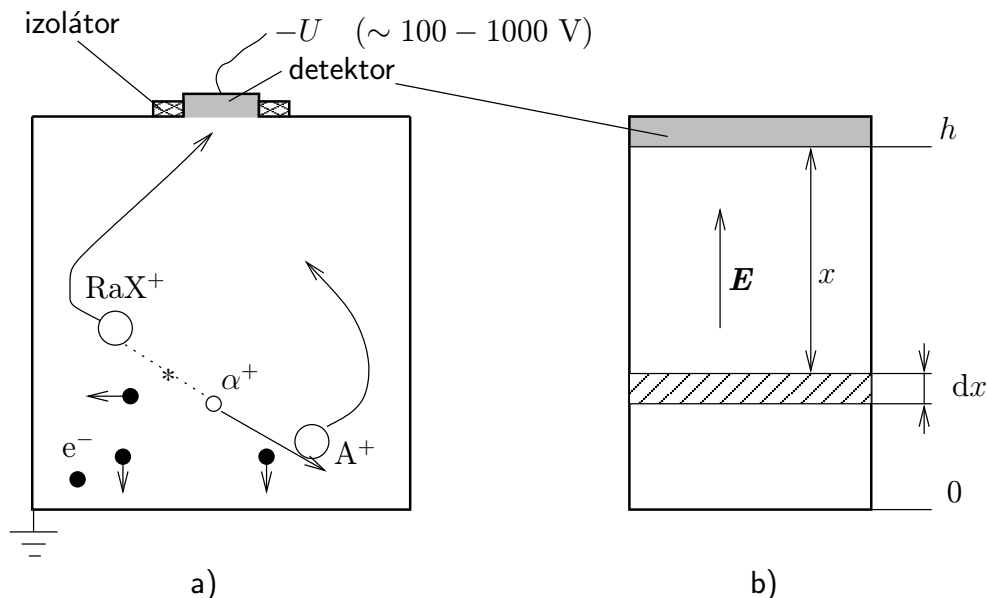
Filtrační metoda je založena na čerpání definovaného množství vzduchu skrz filtr, na němž se zachycují dceřiné produkty radonu, a následné analýze alfa záření vystupujícího z filtru pomocí polovodičového detektoru. Přesnost této metody je dána efektivitou filtru, detektoru a množstvím přefiltrovaného vzduchu. Aktivita filtru je analyzována v pravidelných intervalech během čerpání. Odchyšky výsledků měření od skutečných hodnot jsou pak dány změnami teploty a tlaku analyzovaného vzduchu, případně kolísáním čerpací rychlosti aparatury [5]. Uspořádání jednotlivých prvků pro kontinuální měření je zachyceno na obr. 4.

Vzduch procházející přes filtr obsahuje rovnovážnou směs radonu a jeho dceřiných produktů<sup>1</sup>. Dceřiné produkty ulpívají na filtru a rozpadají se. Filtr tak představuje vzorek rovnovážné směsi nacházející se ve zkoumaném vzduchu a spektrometrickým měřením se stanoví zastoupení dceřiných produktů, na jehož základě lze vypočítat např. ekvivalentní objemovou aktivitu radonu.

### 2.3.2 Elektrostatická metoda

Tato metoda využívá faktu, že některé dceřiné produkty radonu (a thoronu) vznikají ve formě kationtů. Nabízí se tedy možnost tyto nabitě atomy sbírat pomocí elektrického pole na zápornou elektrodu a spektrometricky zpracovávat. Tento sběr může probíhat buď přirozeně difúzí okolního vzduchu do nádoby, v níž je vytvořeno elektrické pole, nebo nucenou cirkulací pomocí čerpadla, podobně jako u filtrační metody. Sběr může probíhat přímo na vstupní okénko detektoru, sloužící jako anoda. Tento způsob poskytuje nejvyšší možnou účinnost detekce, navíc v prakticky čisté  $2\pi$ -geometrii. V elektrickém poli

<sup>1</sup>To platí přesně pouze v případě, že se koncentrace radonu ve vzduchu s časem nemění.



Obrázek 5: Hlavní procesy při elektrostatičtém sběru dceřiných produktů radonu.

probíhá sběr pouze některých dceřiných produktů, konkrétně RaA a RaB, které vznikají ve formě pozitivních iontů a mají dostatečnou mobilitu, což znamená, že aktivita těchto vzorků se nedá interpretovat ve smyslu ekvivalentní objemové aktivity radonu.

Depozici atomů RaA, resp. ThA (neutrálních i v podobě iontů) ze vzduchu na povrch pevných látek lze popsat pomocí dvou současně probíhajících procesů:

- náhodná difúze, již podléhají jak neutrální atomy, tak ionty,
- drift určitým směrem způsobený přítomností elektrického pole, jemuž podléhají pouze ionty. Relativní zastoupení pohybu tímto způsobem závisí na parametru  $E/p$  – tzv. *energii pole*, ukazující kolik energie je předáno iontům mezi dvěma za sebou následujícími srážkami s ostatními atomy plynu.

Oba tyto procesy jsou složité a jsou popsány jen kvalitativně [12].

K odvození počtu iontů RaA sebraného z nádoby s aplikovaným elektrickým polem o intenzitě  $E$  učiníme několik předpokladů (obr. 5; odvození převzato z [4]):

- homogenní a konstantní zastoupení atomů radonu v objemu nádoby,
- atomy RaA jsou v rozpadové rovnováze s radonem – uvažujeme konstantní počet  $N_0$  iontů RaA v nádobě,
- driftová rychlost závisí na intenzitě elektrického pole lineárně, t.j.  $v_d = K.E$  kde  $K$  je pohyblivost iontů RaA ve vzduchu,
- neutralizace iontů RaA během driftu a prostorové náboje vzniklé brzděním alfa částic ve vzduchu nejsou uvažovány.

Dále uvažujeme geometrii tak, jak je zachycena na obr. 5b. Ve vrstvě  $dx$  je za těchto předpokladů přítomno  $\frac{N_0}{h} dx$  iontů RaA, kde  $h$  je výška nádoby. Ionty RaA obsažené ve vrstvě  $dx$  zanikají jedním z následujících procesů:

1. Jádro iontu se rozpadne během driftu ve směru elektrického pole. Alfa částice vzniklá tímto rozpadem — v případě, že dopadne na detektor — je registrována ve spojité části spektra vlivem předchozího brzdění ve vzduchu.
2. Iont RaA letící driftovou rychlostí  $v_d = K.E$  dospěje až na vstupní okénko detektoru, kde se posléze rozpadne. Alfa částice z tohoto rozpadu je registrována s 50% pravděpodobností ( $2\pi$ -geometrie), a to v píku RaA.

Míra zastoupení těchto dvou procesů je dána dobou života iontů, přičemž limitní hodnotu představuje  $t_{\text{lim}} = \frac{x}{v_d}$ . Ionty s větší dobou života než  $t_{\text{lim}}$  dosáhnou detektoru před svým zánikem. Počet iontů RaA sebraný z vrstvy  $dx$  nacházející se ve vzdálenosti  $x$  od vstupního okénka detektoru homogenním elektrickým polem vytvářeným napětím  $U (= h.E)$  je dán rozpadovým zákonem:

$$dN = \frac{N_0}{h} e^{-\frac{t}{\tau}} dx = \frac{N_0}{h} e^{-\frac{1}{\tau} \frac{x}{v_d}} dx = \frac{N_0}{h} e^{-\frac{1}{\tau} \frac{xh}{KU}} dx \quad , \quad (3)$$

kde  $\tau$  je střední doba života iontů RaA a  $t$  je čas. Integrováním (3) přes výšku nádoby získáme celkový počet sebraných iontů:

$$N = \int_0^h \frac{N_0}{h} e^{-\frac{1}{\tau} \frac{xh}{KU}} dx = \frac{N_0}{h^2} \tau KU \left[ 1 - \exp\left(-\frac{1}{\tau} \frac{h^2}{KU}\right) \right] \quad (4)$$

V případě, že v nádobě vytvoříme slabé elektrické pole, bude podíl driftu vlivem tohoto pole poměrně nízký a exponenta v (4) může být zanedbána. Za těchto podmínek je účinnost sběru  $N/N_0$  lineárně závislá na pohyblivosti  $K$ , resp. napětí  $U$ :

$$\frac{N}{N_0} = \frac{KU\tau}{h^2} \quad (5)$$

Přesný analytický model elektrostatické metody se započítáním všech jevů, jež se při sběru vyskytnou, je prakticky vyloučen. Kromě iontů RaA je v objemu přítomno ještě nepoměrně větší množství iontů ostatních neradioaktivních prvků přítomných ve vzduchu, zejména kationtů dusíku a kyslíku, vzniklých ionizací průletem alfa částice, a dále volných elektronů majících tentýž původ. Přítomnost těchto volných nábojů dále přispívá k nežádoucí neutralizaci driftujících kationtů RaA (obr. 5a). Znalost pohyblivosti a dob života krátkodobých rozpadových produktů radonu (a případně i thoronu) je důležitá pro stanovení účinnosti detekce elektrostatické metody. Tyto parametry jsou však závislé na fyzikálních vlastnostech zkoumaného vzorku vzduchu a s časem dochází k jejich změnám. Tato problematika je diskutována např. v článku [13], jehož autoři prováděli měření s  $\text{RaA}^+$ . Bylo zjištěno, že střední doba života těchto iontů není funkcí koncentrace výchozího nuklidu pro hustoty vzduchu v rozsahu 3 až 20 g/m<sup>3</sup> a koncentrace výchozího nuklidu menší, než 3,0 · 10<sup>4</sup> Bq/m<sup>3</sup>. Pro hustotu 0,8 g/m<sup>3</sup> je tato doba rovna 2,4 s, pro 14 g/m<sup>3</sup> pak 0,9 s.

### 3 Spektrometrie záření alfa

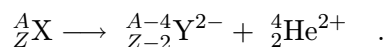
K určování množství dceřiných produktů radonu ve vzduchu byla zvolena detekce alfa částic vznikajících při rozpadu některých těchto produktů, a to především z těchto důvodů:

- k detekci lze použít malý, relativně levný křemíkový detektor
- tento detektor lze napájet nízkým napětím ( $\sim 10$  V) a pracuje při pokojové teplotě
- dále takovýto detektor vykazuje zanedbatelnou citlivost na záření gama a lehké nabitě částice
- naopak detekční účinnost pro alfa částice činí prakticky 100 %.

V této části jsou proto uvedeny základní informace o záření alfa a jeho detekci.

#### 3.1 Vlastnosti záření alfa

*Záření alfa* patří do kategorie korpuskulárních záření – je tvořeno letícími jádry  ${}^4_2\text{He}$ , jež byly uvolněny z původního nestabilního jádra. Proces lze tedy schematicky zapsat jako



Alfa rozpadu podléhají především těžká jádra. Alfa nestabilní prvky s atomovým číslem nižším než 140 jsou výjimkami (konkrétně jde o  ${}^5\text{He}$ ,  ${}^5\text{Li}$ ,  ${}^8\text{Be}$ ,  ${}^{105}\text{Te}$ ,  ${}^{106}\text{Te}$ ,  ${}^{107}\text{Te}$ ,  ${}^{108}\text{I}$ ,  ${}^{110}\text{Xe}$  a  ${}^{111}\text{Xe}$ ). Typicky se energie rozpadu alfa nestabilních těžkých jader pohybují okolo 5 MeV.

Alfa částice, jakožto těžké nabitě částice, interagují v látce především s elektronovými obaly jejích atomů, což má za následek excitaci a ionisaci těchto atomů. Vzhledem k velkému rozdílu hmotností částice alfa ( $m_\alpha = 3726,2$  MeV) a elektronu ( $m_e = 0,511$  MeV) je trajektorie alfa částic přímková i v látce. Největší ionisaci alfa částice způsobuje před dosažením konce své dráhy v látce, směrem k začátku trajektorie od tohoto maxima počet iontů vytvořených alfa částicí na jednotkové dráze klesá. Velká ionizační schopnost alfa částic má mj. za následek také to, že dceřiný atom, vzniknuvší ve formě dvojnásobně záporného iontu, jak je naznačeno výše ve schématu alfa rozpadu, je průletem alfa částice z jádra skrz jeho elektronový obal okamžitě ionisován opačným směrem, takže výsledkem rozpadu je kationt. Na tomto efektu je založena metoda elektrostatického sběru dceřiných produktů radonu.

Dosah alfa částic ve vzduchu lze vypočítat pomocí empirického vztahu

$$R_\alpha^{\text{vzd}} = 0,31T^{3/2} \quad ; \quad \text{cm, MeV} \quad (T = 4 - 7 \text{ MeV}) \quad (6)$$



a přepočítat na jinou látku vztahem

$$R_\alpha = 0,56R_\alpha^{\text{vzd}} A^{1/3} \quad , \quad (7)$$

kde  $R_\alpha^{\text{vzd}}$  se dosazuje v centimetrech,  $A$  je atomové číslo látky a  $R_\alpha$  vychází v  $\text{mg}/\text{cm}^2$ . Dosah ve vzduchu za normálních podmínek se pohybuje v řádech desítek milimetrů, v pevných látkách v desítkách až stovkách mikrometrů [10].

### 3.2 Detektory pro alfa spektrometrii

Konstrukce detektorů záření alfa se podřizuje faktu, že dosah alfa částic v pevných látkách je velmi malý. Z toho zejména plyne, že:

- citlivý objem detektoru může být malý
- vstupní okénko detektoru musí být velmi tenké a mít minimální hustotu.

K samotné detekci lze použít prakticky libovolný detektor ionisujícího záření – ionisační komoru, proporcionální detektor, polovodičový detektor. . . Z praktických důvodů se jako nejvhodnější jeví použití křemíkového detektoru.

#### 3.2.1 Křemíkový detektor s povrchovou bariérou

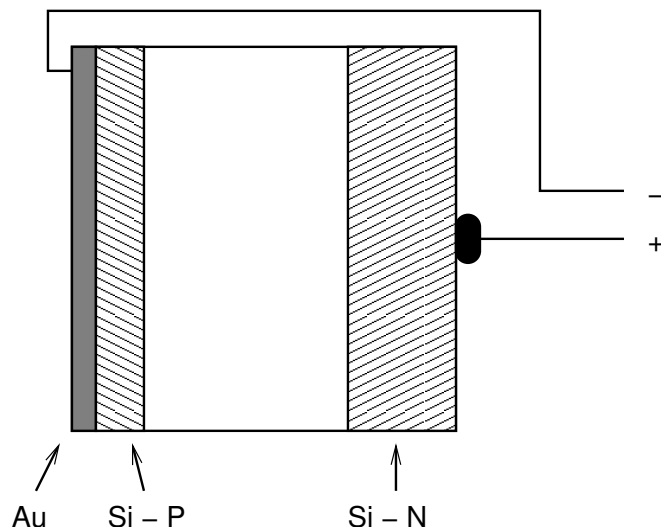
Polovodičový detektor je principiálně shodný s ionisační komorou, pouze místo ionisace plynové náplně nabitou částicí dochází k vytváření párů elektron–díra v krystalu polovodiče. K výrobě detektorů se používá křemík ( $Z = 14$ ) či germanium ( $Z = 32$ ), přičemž germanium je vhodné zejména ke spektrometrii gama díky své vyšší specifické hmotnosti, naopak u křemíku jeho nižší  $Z$  při detekci těžkých částic nevádí, oproti germaniu navíc vykazuje vyšší měrný odpor při pokojové teplotě ( $R_i^{\text{Si}} = 2,3 \cdot 10^3 \Omega\text{m}$ ,  $R_i^{\text{Ge}} = 0,47 \Omega\text{m}$ ) a proto nevyžaduje chlazení.

*Křemíkový detektor s povrchovou bariérou* (obr. 6) je konstrukčně shodný s velkoplošnou polovodičovou diodou s velmi tenkým napařeným zlatým předním kontaktem (tloušťka  $\sim 40 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ), sloužícím jako vstupní okénko, na odleptanou destičku monokrystalu křemíku typu N a se zadním ohmickým kontaktem. Leptáním křemíku se vytvoří na povrchu velmi tenká vrstva křemíku typu P a přiložením inverzního napětí se v monokrystalu Si vytvoří oblast bez prostorového náboje — *bariéra* — jež představuje citlivou oblast detektoru, jejíž hloubka závisí na velikosti přiloženého napětí.

Pronikne-li do citlivé oblasti detektoru nabitá částice a zabrzdí-li se v něm, celá její kinetická energie se spotřebuje na vytvoření párů elektron–díra (na vytvoření jednoho páru je u křemíku třeba energie 3,62 eV). Množství těchto nosičů náboje určuje velikost proudového impulsu, jenž může detektorem projít vlivem přiloženého vnějšího napětí [10].

Vlastnosti tohoto typu detektoru jsou pak nejvíce ovlivněny následujícími faktory:

- tloušťka vstupní elektrody – částice jí musí prolétnout s co možná nejmenší ztrátou kinetické energie; ohraničuje energetický rozsah zdola
- maximální napětí, které lze na detektor přiložit (tzv. *závěrné předpětí*) – určuje šířku bariéry a tím ohraničuje energetický rozsah shora; s šířkou bariéry souvisí též



Obrázek 6: Křemíkový detektor s povrchovou bariérou.

kapacita detektoru – je žádoucí, aby byla co nejmenší, jelikož negativně ovlivňuje šumové vlastnosti detektoru.

Rozlišení kvalitních detektorů tohoto typu se pohybuje okolo 12 keV při energiích alfa částic  $\sim 5$  MeV, což je pro účely spektrometrie dceřiných produktů radonu zcela vyhovující.

### 3.3 Zpracování signálu z detektoru

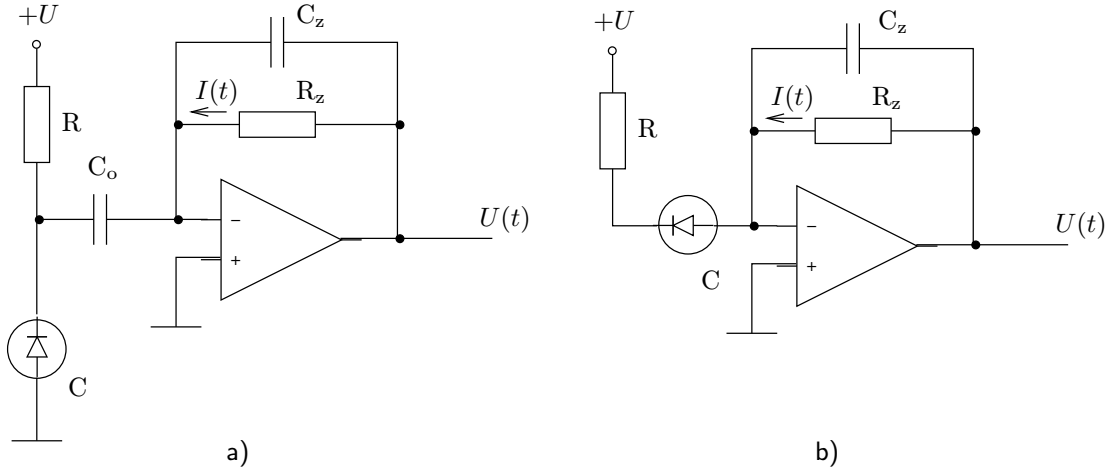
Velikost náboje uvolněného po proniknutí nabitě částice do detektoru je přímo úměrná kinetické energii částice. Působením napájecího napětí detektoru je tento náboj odveden, což je doprovázeno vznikem proudového impulsu. Úkolem vstupního zesilovače (předzesilovače) je převést takto vzniklý proudový impuls na impuls napěťový, který se dá již snadno elektronicky zpracovat.

Napěťový impuls je dále zesílen a tvarován a takto upraven je v A/D převodníku digitalizován. V této podobě je pak zpracováván počítačem spektrometru.

#### 3.3.1 Vstupní zesilovač

Vstupní zesilovač (předzesilovač) slouží k převodu náboje vzniklého v detektoru interakcí alfa částice na napěťový impuls vhodný k dalšímu zpracování. Zároveň slouží k napájení detektoru. Jeho princip je naznačen na obr. 7. Často bývá realizován ve variantě a) se střídavou vazbou z důvodu lepšího oddělení detektoru od aktivního prvku předzesilovače, umožňujícího snadnou záměnu detektoru a změnu jeho napájecího napětí, aniž by došlo ke změnám pracovního bodu zesilovače.

Detektor je napájen přes odpor  $R$ . Sběr náboje z detektoru probíhá přes oddělovací kondenzátor  $C_o$  sloužící k eliminaci stejnosměrné složky. Na invertující vstup tedy



Obrázek 7: Vstupní zesilovač – a) se střídavou vazbou; b) se stejnosměrnou vazbou.

přichází proudový impuls odpovídající vytvořenému náboji. Operační zesilovač tedy provádí převod proud/napětí.

Interakcí alfa částice s detektorem vzniká náboj  $Q_0$ , který dává vzniknout vybíjecímu proudu  $I(t)$ . Odpozem  $R_z$  proteče tento proud a na výstupu operačního zesilovače se objeví napětí  $U(t) = R_z \cdot I(t)$ . Náboj  $Q_0$  je úměrný energii alfa částice, proto platí:

$$E_\alpha \approx Q_0 = \int_0^\infty \frac{dQ(t)}{dt} dt = \int_0^\infty I(t) dt = \frac{1}{R_z} \int_0^\infty U(t) dt$$

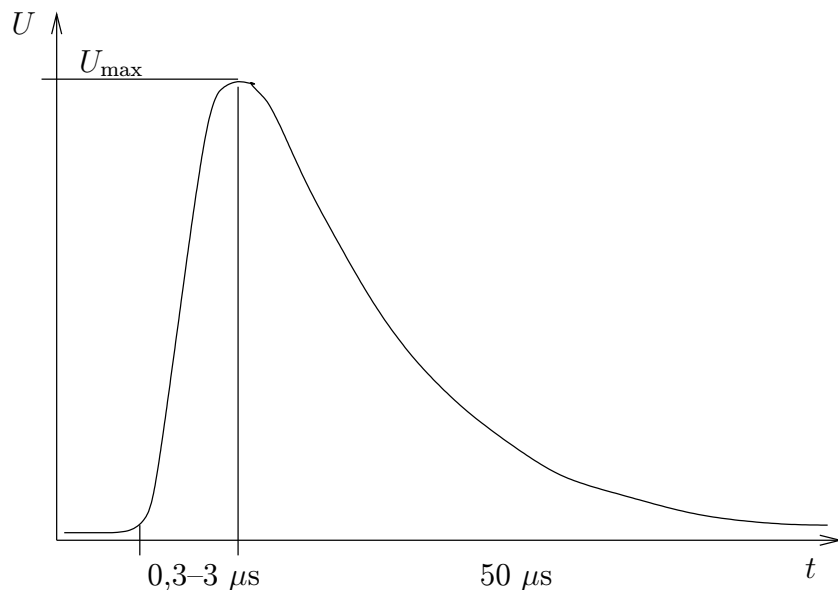
$$Q(t) = -RC \cdot I(t) \quad \Rightarrow \quad I(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = -RC \frac{dI(t)}{dt}$$

$$U(t) = R_z \cdot I(t) \quad , \quad U_0 = U(0) = R_z \cdot I(0) = R_z \frac{dQ}{dt}(0)$$

$$U(t) = -RC \frac{dU(t)}{dt} \quad \Rightarrow \quad U(t) = U_0 \cdot \exp\left(-\frac{t}{RC}\right)$$

$R$  je odpor, přes který se vybíjí detektor (jeho převážná část je tvořena reaktancí oddělovacího kondenzátoru  $C_o$ ) a  $C$  je vlastní kapacita detektoru. Vzhledem k parametrům polovodičových detektorů vychází časová konstanta  $RC$  velmi malá ( $< 1$  ns). Pokud by rychlost operačního zesilovače nebyla dostačující k sledování tak rychlé změny a docházelo k zakmitávání, je možné jej tlumit vhodnou volbou kondenzátoru  $C_z$ . To umožňuje upřednostnit operační zesilovač s vyšším odstupem signálu od šumu i v případě, že jeho rychlost (t.j. doba potřebná ke stabilizaci) není vyhovující. Tato doba potřebná ke stabilizaci je závislá na tranzitním kmitočtu a na rychlosti přeběhu daného operačního zesilovače.

Varianta využívající stejnosměrné vazby detektoru na předzesilovač (obr. 7b) sice neumožňuje tak pohodlnou záměnu detektoru a jeho pracovních podmínek, ale oproti střídavé vazbě disponuje lepšími šumovými vlastnostmi vzhledem k absenci oddělovacího kondenzátoru, jenž u střídavé vazby zvětšuje rozptylovou kapacitu vzhledem k zemi.



Obrázek 8: Průběh napětí v předzesilovači po zachycení částice v detektoru.

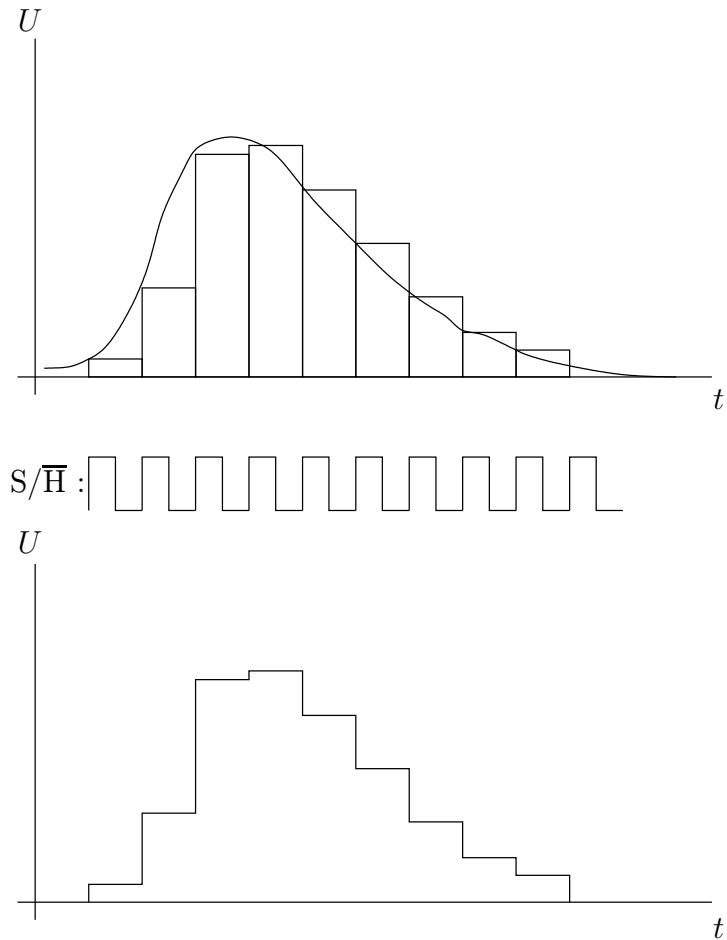
### 3.3.2 Digitalizace impulsu

Po průchodu signálu přes předzesilovač má na výstupu impuls tvar vyobrazený na obr. 8. Ten bývá obvykle ještě tvarován do gaussovské podoby, v níž je náběžná strana hladší a je méně strmá, sestup je naopak rychlejší a celý impuls je symetrický, ale není to bezpodmínečně nutné (např. ve spektrometru [15] tvarovací obvod není implementován).

Pro spektrometrii je nejdůležitějším parametrem impulsu jeho amplituda, jež je přímo úměrná energii alfa částice. Dalším krokem tedy obvykle bývá převedení její hodnoty do digitální podoby A/D převodníkem. K realizaci tohoto kroku jsou však potřebné další dva obvody. První z nich slouží k vyhodnocení události dosažení maximální amplitudy impulsu, která je podkladem pro druhý obvod – obvod „sample-and-hold“ – jehož výstup sleduje hodnotu napětí přítomného na jeho vstupu až do okamžiku události maxima vyhodnocené prvním obvodem, kdy výstup přestane sledovat vstup a poskytuje napětí o velikosti vstupního napětí v okamžiku průchodu signálu maximem. Toto napětí je na výstupu drženo po dobu nutnou k provedení analogově–číslicového převodu, po jejímž uplynutí je obvod „sample-and-hold“ přepnut zpět do sledovacího režimu.

Jinou možností, využívanou až v poslední době vzhledem k vyšším nárokům kladeným na rychlost A/D převodníku, je digitalizace celého impulsu, nejen jeho maximální amplitudy. Tím se jednak zjednodušuje řešení spektrometru (obvod detekce maxima již není potřebný a obvod „sample-and-hold“ je součástí vzorkovacích A/D převodníků určených k těmto účelům), jednak se zvyšuje jeho flexibilita – celé zpracování signálu probíhá v digitální formě v počítači spektrometru, jehož činnost je řízena programem, který je možno snadno modifikovat.

K realizaci této metody zpracování signálu je nutné provést digitalizaci impulsu dostatečně velkým množstvím vzorků (desítky až stovky), což vyžaduje použití rychlého A/D převodníku i mikropočítače. Pro co nejmenší zkreslení amplitudy impulsu je



Obrázek 9: Digitální podoba impulsu.

nutné digitalizovat především jeho náběžnou hranu dostatečně vysokým počtem vzorků. Uvažujeme-li nejkratší dobu náběžné hrany 300 ns [15], pak je nutno vzorkovat nejméně každých 150 ns, tedy rychlostí cca 7 MSPS<sup>2</sup>. Při délce impulsu 50  $\mu$ s je tedy zajištěno pokrytí cca 350 vzorky. V případě uvažovaného netvarovaného impulsu je pro spektrometrické účely relevantních jen několik prvních vzorků, jež pokrývají část s maximem; zbylá část impulsu může být např. využita k detekci impulsu, jenž byl detektorem zpracován ještě před vybitím RC článku na jeho výstupu.

<sup>2</sup>MSPS = MegaSamples Per Second

## 4 Návrh spektrometru

V této části bude popsán návrh elektroniky celého spektrometru s výjimkou vstupního zesilovače, jehož vývoj nebyl součástí zadání.

### 4.1 Koncepce přístroje

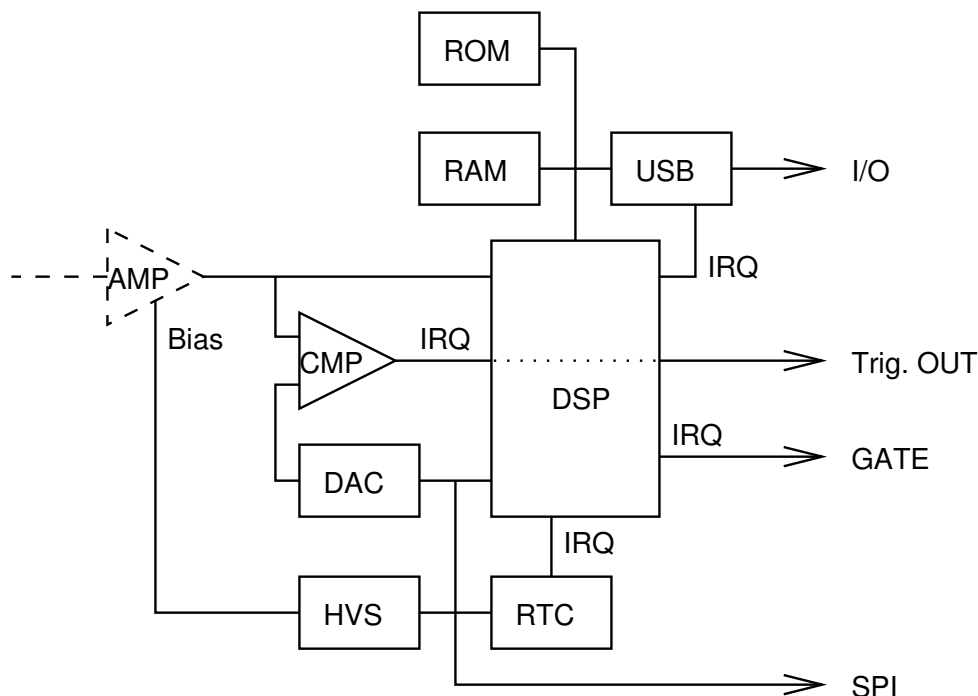
Cílem této práce bylo vyvinout spektrometr, který má splňovat následující kritéria:

- hlavním úkolem je kontinuální měření spekter za účelem stanovení koncentrace radonu ve vzduchu v podzemních laboratořích elektrostatickou metodou
- přístroj má být použitelný i pro jiná laboratorní měření podobného typu
- řízení sběru dat má být přístroj schopen provádět automaticky
- přístroj má být kompaktní, s minimálním počtem ovládacích prvků
- nastavení a přenos dat má probíhat pomocí rozhraní USB (Universal Serial Bus)
- pořizovací náklady by měly být co nejnižší.

Pro realizaci byla zvolena koncepce založená na plně digitálním zpracování signálu založená na procesoru DSP (Digital Signal Processor). Většina funkcionality je tímto způsobem přenesena z hardwarové na softwarovou úroveň, čímž je minimalizována potřeba budoucích hardwarových úprav při zachování dostatečného prostoru pro další vývoj spektrometru.

Z důvodů zvýšení flexibility nezahrnuje předkládaný návrh spektrometru žádný typ zesilovače nebo tvarovače. Návrh počítá s tím, že zesilovač bude možné do spektrometru přidat ve formě modulu, pro nějž bude vyhrazen konektor, případně využít standardní spektroskopický zesilovač. Důvodem je závislost tohoto segmentu spektrometrického řetězce na použitém detektoru. Pro účely měření koncentrace radonu elektrostatickou metodou se předpokládá montáž spektrometru přímo na Si-detektor umístěný ve sběrné nádobě, proto bude výhodné předzesilovač (případně včetně základního tvarovacího obvodu) situovat do spektrometru.

Za komunikační rozhraní byla zvolena univerzální sériová sběrnice (USB) ve verzi 2.0, jež umožňuje komunikační rychlost 480 Mbps (efektivně cca 420 Mbps; Mbps – Megabits per second), čímž bude v případě potřeby umožněn přenos dat ze vzorkovacího A/D převodníku do vnějšího počítače v reálném čase. Výhodou tohoto typu rozhraní je fakt, že jsou jím v současné době standardně vybavovány všechny typy počítačů PC, ale též „kapesní počítače“ (PDA – Personal Digital Assistant).



Obrázek 10: Blokové schéma spektrometru; AMP – vstupní zesilovač, CMP – komparátor, DAC – D/A převodník, HVS – zdroj předpětí (bias) Si-detektoru, IRQ – vstup požadavku přerušení, RAM – paměť spekter, ROM – paměť programu, RTC – hodiny reálného času, USB – univerzální sériové rozhraní.

Mezi další vstupy a výstupy navrhovaného spektrometru patří GATE a TRIGGER OUT, umožňující spolupráci s jinými přístroji<sup>3</sup>. Signál TRIGGER OUT je spektrometrem generován podle potřeby řídicího programu, GATE je vstup obvykle předurčený k logickému součinu s interním signálem z komparátoru, na jehož základě je vyhodnoceno, je-li přicházející impuls relevantní. Pro účely dalších blíže nespecifikovaných rozšíření se dále počítá s vyvedením sériové periferní sběrnice.

Jelikož spektrometr má provádět dlouhodobá autonomní měření, byly do jeho návrhu zakompomovány i hodiny reálného času (RTC – Real Time Clock), umožňující přechod přístroje do klidového režimu a jeho opětovnou aktivaci v okamžiku, kdy má být zahájeno měření.

## 4.2 Blokové schéma

Obr. 10 znázorňuje konečnou verzi návrhu. Vstup spektrometru (případně výstup zesilovače AMP – naznačen čárkovaně) je veden přímo do A/D převodníku, obsaženého v procesoru DSP. Mimo to je signál veden na jeden ze vstupů napěťového komparátoru CMP, jenž slouží ke generování přerušování signalizující, že došlo k překročení prahové hodnoty signálu. K nastavení této hodnoty slouží D/A převodník (DAC – Digital to

<sup>3</sup>Např. pro účely koincidenčního měření

Analog Convertor) ovládaný procesorem.

Jelikož má přístroj sloužit především k měření alfa spekter pomocí křemíkového detektoru, jenž k optimální funkci vyžaduje předpětí několika desítek voltů (Bias), je počítáno i se zdrojem tohoto vyššího napětí (HVS – High Voltage Supply), jehož velikost je nastavována softwarově z procesoru.

Hlavním úkolem hodin reálného času (RTC) je probouzet procesor před započítím měření, pokud byl přepnut do klidového stavu.

Ke komunikaci s externím počítačem slouží rozhraní USB, realizované řadičem, jenž je k procesoru připojen přes jeho paměťovou sběrnici.

Prostřednictvím této paměťové sběrnice jsou připojeny i paměť ROM, která uchovává řídicí program spektrometru (firmware), jenž je po zapnutí zaveden do interní paměti RAM procesoru, a paměť RAM, která slouží k ukládání spekter.

Ústřední součástí je signálový procesor (DSP) se zabudovaným A/D převodníkem. Ten prostřednictvím řídicího programu koordinuje činnost všech ostatních součástí spektrometru, provádí vzorkování a vyhodnocování signálu, organizuje spektra v paměti, řídí měření a komunikaci přes USB.

### 4.3 Signálový procesor (DSP)

Za účelem aplikace technologie plně digitálního zpracování signálu je spektrometr vybaven *digitálním signálovým procesorem* – DSP.

Z technologického hlediska je DSP univerzálním procesorem, jehož architektura je optimalizována pro rychlé provádění aritmetických operací v pevné desetinné čárce<sup>4</sup> a pro maticové operace. Výpočetní logika nabízí širší možnosti než u běžných CPU (k dosažení paralelismu při výpočtech) a adresovací logika je přizpůsobena rychlému sekvenčnímu přístupu k datům v paměti.

Jedno z hlavních kritérií výběru vhodného typu DSP bylo, je-li přímo na čipu spolu s procesorem integrován i A/D převodník a je-li dostatečně rychlý k vzorkování signálu z detektoru. Tím je dosaženo snížení celkového počtu součástek a zjednodušení řídicího programu spektrometru. Po prostudování sortimentu výrobců DSP byl jako nejvhodnější typ shledán procesor ADSP-21992 vyráběný firmou Analog Devices<sup>5</sup>.

#### 4.3.1 Popis procesoru ADSP-21992

Vnitřní struktura použitého procesoru je naznačena na obr. 11. ADSP-21992 [20] je 16-bitový DSP s aritmetikou v pevné desetinné čárce s výkonem až 160 MIPS. Spolu s jádrem je na čipu integrováno 48 KW paměti RAM<sup>6</sup>, rozdělené na paměť dat (16K×16 bitů) a paměť programu (32K×24 bitů). Program je do paměti RAM zaveden z vnější

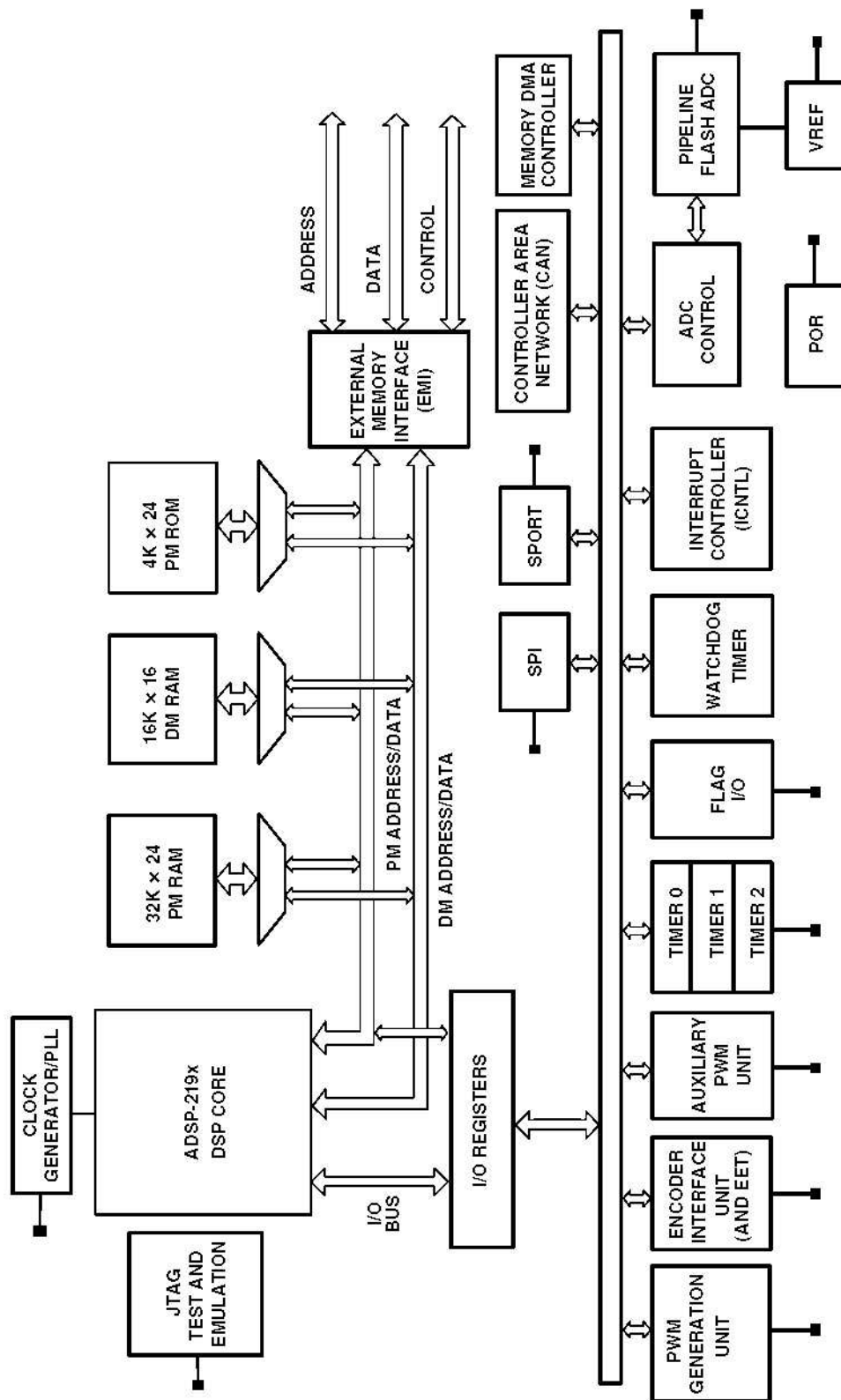
---

<sup>4</sup>Tento fakt ovšem použití DSP nijak neomezuje. Jednak je pro zpracování signálů použití pevné desetinné čárky vyhovující, jednak je přesto možné provádět i výpočty v plovoucí čárce – instrukce k implementaci plovoucí čárky bývají také k dispozici (normalizace, denormalizace mantisa–exponent apod.), ale všechny ostatní aritmetické instrukce probíhají v pevné čárce. Kromě toho jsou však na trhu k dispozici i DSP s aritmetikou v plovoucí čárce. Jejich cena je samozřejmě vyšší a poměr *výpočetní výkon/elektrický příkon* horší.

<sup>5</sup>Tento typ disponoval nejrychlejším A/D převodníkem.

<sup>6</sup>KW = KiloWord; v podmínkách popisovaného procesoru se jedním *slovem* rozumí v případě dat 16 a v případě programu 24 bitů





Obrázek 11: Struktura procesoru ADSP-2192 [20].

paměti ROM (řešené jako paměť typu Flash) pomocí zaváděcí rutiny umístěné ve vnitřní paměti ROM procesoru. Režimů zavádění (Boot–Modes) má procesor k dispozici více a jejich volba se provádí pomocí pinů BMODE0-2. Další popis procesoru bude zaměřen na vlastnosti, jež se uplatňují v konstrukci spektrometru.

Další součástí procesoru je *rozhraní vnějších pamětí* – EMI (External Memory Interface). Rozhraní je vybaveno i logikou pro výběr paměťového obvodu a umožňuje připojení až 8 MB vnější paměti. To je zajištěno 20 bitů širokou adresovou a 16 bitů širokou datovou sběrnicí spolu se signály  $\overline{MS0}$ – $\overline{MS3}$  výběru paměťového obvodu, signálem  $\overline{IOMS}$  indikující požadavek přístupu k vnějšímu zařízení a signály  $\overline{RD}$ ,  $\overline{WR}$ . Fyzický adresový prostor se tedy dělí do čtyř bank, z nichž každá může být konfigurována zvlášť jako paměť programu či dat. Aby bylo možné k procesoru připojit i pomalejší paměťové obvody, nabízí EMI možnost konfigurace časování zvlášť pro každou banku – je možné nastavit taktovací kmitočet rozhraní (max. 80 MHz), různý počet prázdných čtecích anebo zápisových cyklů, případně realizovat sběrnicí s potvrzáním dokončení operací (využitím vstupu  $\overline{ACK}$ ) aj. . . Při adresaci periferního zařízení signálem  $\overline{IOMS}$  je platných jen dolních 18 bitů adresy a k zařízení je přistupováno jako k paměti dat.

K zajištění rychlých přesunů bloků dat je procesor vybaven *řadičem přímého přístupu do paměti* – DMA (Direct Memory Access). Ten je možné využít k datovým přesunům typu:

- paměť  $\longleftrightarrow$  paměť (resp. paměťově mapovaný V/V)
- paměť  $\longleftrightarrow$  univerzální sériový port (SPORT)
- paměť  $\longleftrightarrow$  sériové rozhraní SPI (Serial Peripheral Interface)
- A/D převodník  $\longrightarrow$  paměť.

Procesor využívá architekturu distribuovaného DMA : každý DMA kanál má svůj řadič ; všechny tyto kanály jsou podobné – pro řízení DMA přenosů se využívá spojových seznamů deskriptorů, z nichž každý odpovídá přesunu jednoho bloku dat. K zajištění vlastního přenosu je pak využito technologie „kradení cyklů“, kdy přenos probíhá v rámci strojových cyklů vyčleněných pro V/V operace.

Ke komunikaci s periferními zařízeními je možné využít *sériové periferní rozhraní* (SPI)<sup>7</sup>. Jedná se o plně duplexní synchronní sériové rozhraní typu „řídící–podřízený“. Rozhraní je tvořeno dvěma datovými vodiči (MISO, MOSI – Master In/Slave Out, Master Out/Slave In), synchronizačním signálem (SCK – Serial Clock) a volitelně vodiči pro výběr cílového zařízení ( $\overline{SPIS}$  – Slave Select). Jednotlivá zařízení jsou ke sběrnicí připojena paralelně, výběr zařízení s nímž je třeba komunikovat je proveden signálem  $\overline{SPIS}$ , jenž je přiveden ke každému zařízení zvlášť a na straně řídicího zařízení (Master) je realizován libovolně (pomocí univerzálních paralelních výstupů, multiplexeru apod.).

---

<sup>7</sup>Procesor disponuje ještě univerzálním sériovým portem (SPORT). Ten je možné využít jak k asynchronní, tak k synchronní sériové komunikaci. Nejedná se však o UART (Universal Asynchronous Receiver–Transmitter) – ten je v případě potřeby nutné emulovat softwarově. Pro potřeby spektrometru není toto rozhraní nijak využíváno.

Komunikace je vždy zahájena a řízena řídicí stranou generováním synchronizačních impulsů. Maximální komunikační rychlost je na straně popisovaného procesoru omezena na 20 Mbps.

Dalším ve spektrometru používaným zařízením procesoru ADSP-21992 je *příznakový V/V port* – Flag I/O Peripheral Unit (FIO). Jedná se o 16 nezávislých vstupů/výstupů PF0-15 (Programmable Flag). Každý z nich lze naprogramovat jako vstup nebo výstup, citlivost úroveň/hrana, spojit ho s uživatelským požadavkem přerušení (viz dále). Prvních 8 vstupů je implicitně použito jako výstupy  $\overline{\text{SPISS}}$  pro účely rozhraní SPI.

Klíčovým zařízením integrovaným na procesoru je *analogově-číslíkový převodník* (A/D převodník, ADC – Analog to digital Converter), pracující rychlostí 20 MSPS s přesností 14 bitů. Jedná se o šestistupňový linkový (zřetězený) A/D převodník<sup>8</sup>, jehož princip je následující:

Celá procedura A/D převodu je rozdělena mezi šest zřetězených bloků, z nichž každý je tvořen jedním komparačním A/D převodníkem, dvěma vzorkovacími obvody („sample-and-hold“ – dvěma proto, aby bylo možno simultánně zpracovávat dva vstupní kanály) a číslicově-analogovým (D/A) převodníkem. Signál je veden na vstup prvního bloku řetězce, kde jsou získány nejvýznamnější dva bity výsledku. Tyto dva bity jsou vedeny do přidruženého D/A převodníku a získané napětí je odečteno od napětí udržovaného vzorkovacím obvodem tohoto bloku. Výsledné napětí je vedeno do dalšího bloku řetězce, kde jsou takto získány další dva bity atd.

Nejrychlejší metodou A/D převodu je metoda komparační, v níž je signál digitalizován v jediném cyklu přivedením na řetězec komparátorů (pro  $n$ -bitovou přesnost je třeba  $2^n - 1$  komparátorů). Pro 14-bitovou přesnost by bylo tedy třeba 16383 komparátorů. Použitý linkový převodník obsahuje 5 dvoubitových a 1 čtyřbitový komparační převodník, tj. 30 komparátorů, přičemž rychlost převodu je oproti jednomu 14-bitovému komparačnímu převodníku  $6 \times$  nižší, čímž tato metoda představuje velmi výhodný kompromis mezi nákladným ale rychlým komparačním a pomalým ale levným postupným A/D převodem.

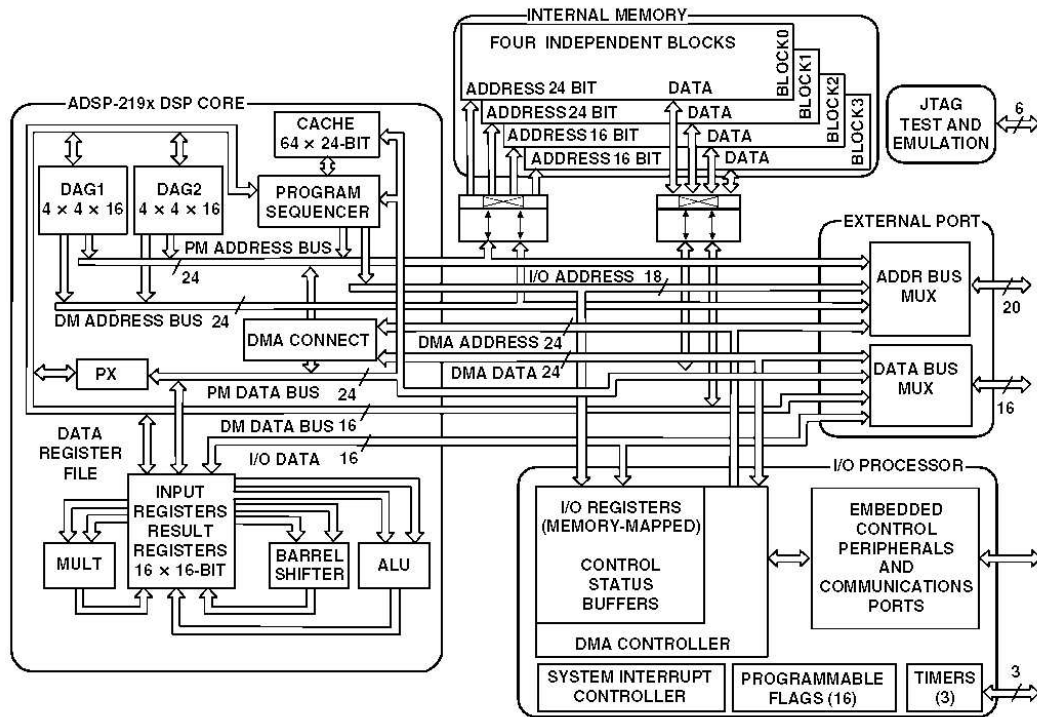
K zajištění rychlé odezvy spektrometru je využíván poměrně propracovaný *řadič přerušení* – Peripheral Interrupt Controller. Jeho úkolem je koordinovat zpracování až dvanácti různých požadavků přerušení z celkem 32 možných zdrojů přerušení. Tato funkce je zajištěna prioritní tabulkou tvořenou osmi 16-bitovými registry IPR0-7 (Interrupt Priority Register), v každém z nichž jsou pro každý zdroj vyhrazeny 4 bity umožňující přiřazení priority 0-15 (0 je nejvyšší priorita). Uživatelsky přiřadit lze 12 priorit, 4 jsou trvale přiřazeny pro účely jádra procesoru. Kromě toho lze každé přerušení nezávisle zakázat či povolit, případně lze instrukcí DIS INT zakázat všechna přerušení a instrukcí ENA INT obnovit stav před provedením instrukce DIS INT.

### Jádro procesoru

Procesor ADSP-21992 je vystavěn okolo jádra ADSP-219x, charakterizující celou rodinu DSP procesorů. To obsahuje (viz obr. 12):

---

<sup>8</sup>6-Stage Pipelined Flash ADC



Obrázek 12: Struktura jádra ADSP-219x, systému vnitřních pamětí, rozhraní vnějších pamětí (EMI) a V/V procesor [20].

- adresovou sběrnici pro datovou paměť (24 bitů)
- adresovou sběrnici pro paměť programu (24 bitů)
- datovou sběrnici pro datovou paměť (16 bitů)
- datovou sběrnici pro paměť programu (24 bitů)
- 2× generátor adres datové paměti (DAG1, DAG2 – Data Address Generator)
- aritmeticko-logickou jednotku (ALU – Arithmetic-Logic Unit)
- násobičku (Multiplier/Accumulator – MAC, na obr. 12 značen MULT)
- jednotku aritmetických a logických posunů (Barrel Shifter)
- instrukční řadič (Program Sequencer)
- 2 identické sady datových registrů (základní a „čárkované“).

Jádro je založeno na hybridní von Neumannově-Svobodově koncepci. Programový a datový adresový prostor jsou sice odděleny z hlediska sběrnic, není však omezeno ukládání dat do paměti programu. Řadič externí paměti (EMI) pak rozdíl mezi datovou

a programovou paměť ještě více stírá. Instrukční sada obsahuje jak instrukce pro přístup k datům uloženým v datovém prostoru, tak pro přístup k datům v programovém prostoru. Výhoda této koncepce spočívá v tom, že lze v jediném strojovém cyklu adresovat najednou dvě místa v paměti – jedno v datové a jedno v programové oblasti (pokud je prostřednictvím EMI adresována externí paměť, k paralelnímu přístupu samozřejmě nedochází).

*Interní adresové sběrnice* jsou 24-bitové – každá adresa se skládá ze dvou částí: stránky (8 bitů) a offsetu ve stránce (16 bitů). Při adresaci programové paměti je adresa stránky uchovávána v registru IJPG spravovaném řadičem programu, pro adresaci datové paměti jsou využívány jednotky DAG – registry DMPG1, DMPG2. Adresa zařízení ve V/V prostoru je logicky členěna na stránku (8 bitů – registr IOPG) a 10-bitovou adresu v rámci stránky.

*Jednotky DAG* jsou určeny k nepřímé adresaci 16-bitových dat (při přímé adresaci je adresa součástí instrukce). Základními režimy nepřímé adresace jsou:

- Premodify, no increment:  $(\text{index} + \text{modifier}) \leftarrow \text{data}$
- Postmodify with increment:  $(\text{index}) \leftarrow \text{data}; \text{index} = \text{index} + \text{modifier}$
- Circular buffer:  $(\text{index}) \leftarrow \text{data}; \text{index} = \text{index} + \text{modifier}, \text{index} > \text{length} ? \text{index} = \text{base}$

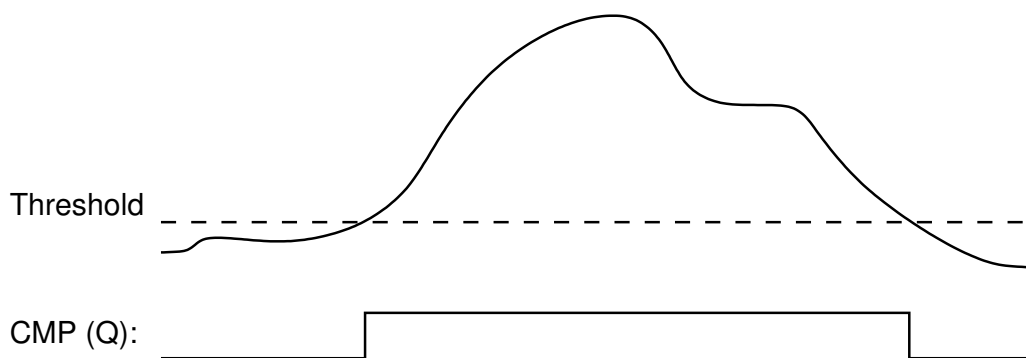
*ALU* zajišťuje základní početní operace – součet, rozdíl, logické operace a dělení. Disponuje sadou standardních příznaků a lze ji přepnout do režimu saturace – tento režim je výhodný pro výpočty v desetinné čárce. V tomto režimu při přetečení zůstává v registru uchovávaným výsledek operace maximální hodnota<sup>9</sup>. Většinu operací ALU a ostatních výpočetních jednotek lze provádět také podmíněně v závislosti na stavu příznaků (IF *podmínka operace*).

*Jednotka MAC* slouží k provádění operací typu  $A = B + C * D$ , včetně volitelného automatického zaokrouhlení výsledku.

*Shifter* je určen k aritmetickým (násobení/dělení deseti) a logickým posuvům a k normalizacím a denormalizacím desetinných čísel (převod čísla v pevné desetinné čárce na plovoucí a naopak). Jeho registr pro uschovávání výsledku má rozsah 40 bitů (všechny ostatní datové registry procesoru jsou 16-bitové).

*Instrukční řadič* umožňuje provádění nepodmíněných i podmíněných skoků a volání podprogramů, koordinuje cykly (řešené jako DO *adresa UNTIL podmínka*), koordinuje paralelně probíhající operace (výpočty v různých výpočetních jednotkách mohou probíhat současně v rámci jednoho strojového cyklu), umožňuje volitelně provádět výpočet paralelně s vyhodnocováním instrukce podmíněného či nepodmíněného větvení programu, kdy je procesor nucen provádět úpravu fronty předvybraných instrukcí nebo

<sup>9</sup>V normálním režimu provedení operace  $A = \max_A + 1$  způsobí nastavení příznaku přetečení a v A bude hodnota  $\min_A$ , v saturovaném režimu zůstane v A hodnota  $\max_A$ .



Obrázek 13: Výstup z komparátoru v závislosti na vstupním signálu.

vkládat prázdné cykly.

K zajištění rychlého přepnutí kontextu z režimu hlavního programu do režimu obsluhy přerušení jsou k dispozici dvě sady datových registrů.

Instrukce procesoru jsou 24-bitové a s výjimkou skoků všechny trvají jeden strojový cyklus.

Taktovací kmitočet procesoru je získáván ve vnitřním obvodu PLL (Phase-Locked Loop, fázový závěs). Základní kmitočet je do procesoru přiváděn buď z externího nebo z vnitřního TTL generátoru stabilizovaného externím krystalovým výbrusem. Tento signál je dále násoben nebo dělen v PLL, jehož nastavení se provádí softwarově. Maximální výsledný taktovací kmitočet by neměl překročit hodnotu 160 MHz.

Procesor využívá více kmitočtů, odvozených od taktovacího. Základní jsou dva – kmitočet jádra procesoru a kmitočet periferních zařízení (včetně řadiče externí paměti EMI). V periferních zařízeních je tento druhý kmitočet dle potřeby dále dělen.

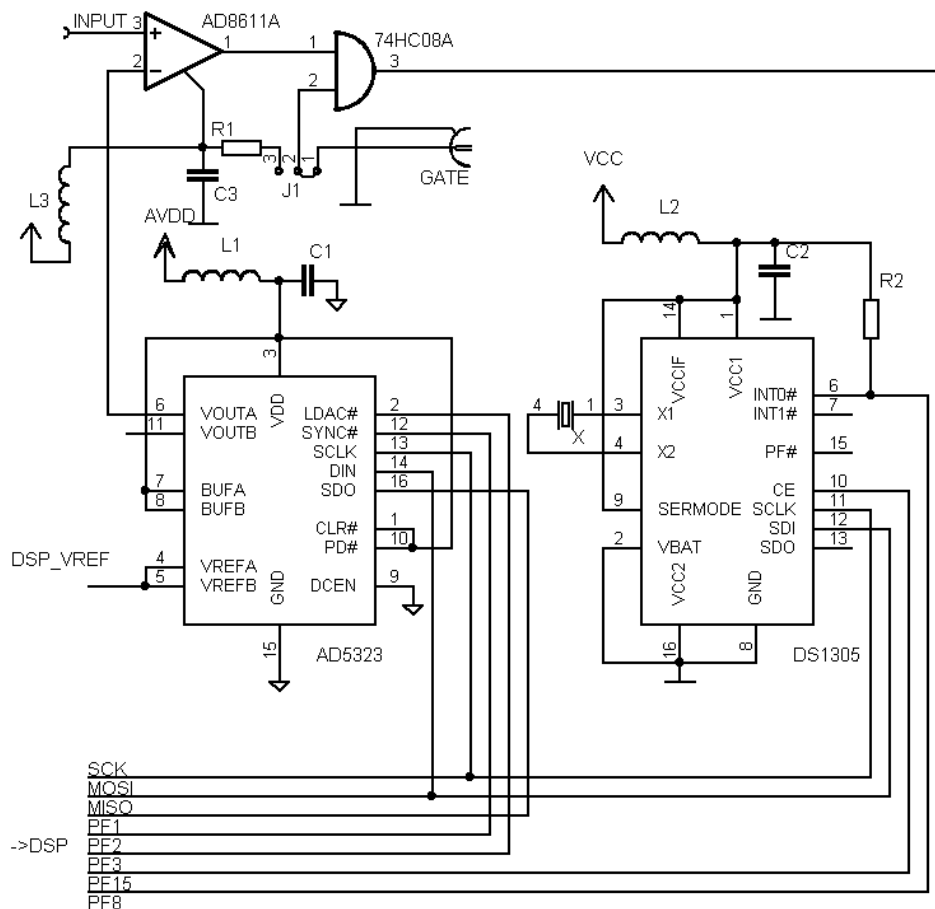
K napájení procesor vyžaduje dvojí napětí – obvody jádra a další složky vyžadují napětí 2,5 V, pro komunikaci s okolím je užívána 3,3 V TTL logika. Průměrná hodnota příkonu procesoru činí zhruba 800 mW.

#### 4.4 Komparátor

Úkolem komparátoru je pomocí přerušení uvědomit procesor, že vstupní signál překročil prahovou úroveň (viz obr. 13). Zdrojem porovnávacího napětí je D/A převodník, který je k procesoru připojen pomocí rozhraní SPI.

Za komparátor byl vybrán typ AD8611 firmy Analog Devices [21], jenž pracuje se zpožděním 4 ns, s maximálním vstupním kmitočtem 100 MHz (sinus) a k jehož činnosti je možné použít nesymetrické napájecí napětí v rozsahu 3 až 5 V. Příznivý je také jeho příkon, který je menší než 30 mW.

Jedním z požadavků bylo, aby byl spektrometr schopen generovat signál „Trigger“, tj. aby měl řídicí program schopnost signalizovat externímu zařízení přicházející impuls, a aby byl vybaven vstupem „Gate“, tj. aby bylo možné blokovat zpracování impulsu



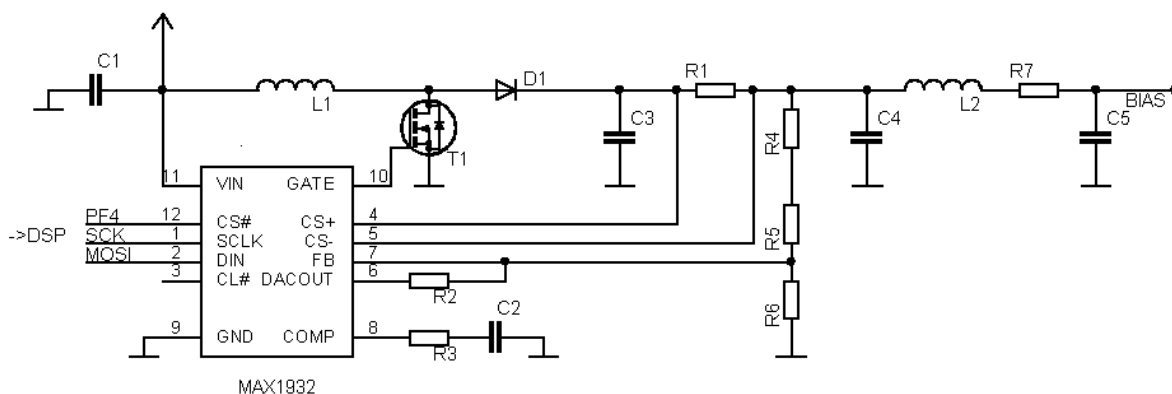
Obrázek 14: Komparátor a vstup GATE, D/A převodník, hodiny reálného času (viz dále).

přicházejícího na vstup na základě vnějšího podnětu. Z důvodů co nejrychlejší odezvy je vstup GATE veden, spolu s výstupem komparátoru, na hradlo typu AND, jehož výstup je zaveden na port FIO procesoru (viz obr. 14). V případě, že vstup GATE není využíván, je odpovídající vstup hradla pomocí propojky (jumperu) trvale udržován na úrovni H (log. „1“). Signál Trig. OUT může být generován na základě blíže nespecifikovatelných okolností souvisejících s konkrétní úlohou, jeho zdrojem je tedy řídicí program spektrometru a je řešen pomocí portu FIO na procesoru.

Jako D/A převodník, sloužící za zdroj prahového napětí, byl vybrán typ AD5323 [22] téhož výrobce. Jedná se o 12-bitový převodník s externím zdrojem referenčního napětí (je použit referenční výstup A/D převodníku na procesoru), dvěma výstupy, dobou ustálení  $8 \mu\text{s}$  a příkonem  $2,5 \text{ mW}$ .

#### 4.5 Zdroj předpětí pro detektor

Detektor je napájen prostřednictvím předzesilovače. Ačkoliv předzesilovač není součástí spektrometru, je pro účely napájení křemíkového detektoru na desce spektrometru na-



Obrázek 15: Zapojení DC–DC měniče k získávání předpětí pro detektor.

vržen zdroj předpětí (max. 90 V). Důvodem tohoto řešení je co největší zjednodušení obvodu předzesilovače (na desce předzesilovače by byl zdroj předpětí významným zdrojem rušení) a zjednodušení ovládání tohoto zdroje – ovládání předpětí není závislé na konkrétním předzesilovači a nebude tedy nutné upravovat firmware spektrometru při výměně modulu předzesilovače.

K získání napětí několika desítek voltů je využit DC–DC měnič založený na technologii PWM (pulsně–šířkové modulace). Jedná se o obvod MAX1932 firmy Maxim [23], ovládaný pomocí rozhraní SPI, vyvinutý k napájení lavinových fotodiód optických přijímačů. Obvod používá konstantní kmitočet 300 kHz, výstupní napětí může být v rozsahu 5 až 90 V. Výstupní napětí je možné volit hodnotami 1 až 255 (0 obvod vypíná). Schéma zapojení zdroje je na obr. 15.

Výstupní proud je sledován pomocí vstupů CS+ a CS– měřením napětí na odporu R1. V případě překročení horní meze (2 V na 820 Ω) je aktivován omezovač výstupního napětí. Rozsah výstupních napětí je nastaven odpory R4, R5, přičemž platí:

$$(R4 + R5) = (V_{\max} - V_{\min}) \cdot (R2/1,25)$$

Hodnota nejmenšího výstupního napětí je dána odporem R6:

$$R6 = 1,25 \cdot (R4 + R5)/V_{\min}$$

## 4.6 Externí paměti

Kromě pamětí integrovaných přímo v procesoru jsou pro činnost spektrometru nezbytné také vnější paměti – jednak paměť typu ROM, v níž je uložen řídicí program spektrometru, jednak typu RAM, jež slouží k ukládání spekter. K použitému procesoru je možno přímo připojit až 8 MB paměti prostřednictvím jeho rozhraní EMI. Ve spektrometru však není celý tento prostor využit, a to ze dvou důvodů. Aby byl umožněn běh programu na nevyšší možné rychlosti, je nutné jeho kód nejprve zavést (bootovat) do rychlé vnitřní paměti RAM procesoru. Její velikost však činí 96 KB, proto nemá smysl spektrometr



vybavovat větší paměti ROM než je velikost této paměti<sup>10</sup>. Druhým důvodem je fakt, že použití velkých pamětí RAM výrazně zvyšuje energetické nároky celého přístroje – při jejich výběru je tedy nutný určitý kompromis. Schéma zapojení pamětí spektrometru je na obr. 16.

#### 4.6.1 Paměť řídicího programu

Vzhledem k různorodosti možných aplikací spektrometru by nebylo vhodné přístroj vybavovat skutečnou pamětí ROM. Místo toho se nabízí použití jiného druhu stálé, leč přeprogramovatelné paměti. Tomuto požadavku nejlépe vyhovují paměti typu EE/Flash – elektricky mazatelné, programovatelné bez nutnosti vyjmutí z obvodu a čitelné jako běžné paměti ROM. Do spektrometru byl vybrán typ AT49BV001, který na trh dodává firma Atmel [24]. Paměť je organizována jako 128K×8 bitů, přičemž výrobce garantuje životnost nejméně 10000 zápisových cyklů. Jelikož k paměti se přistupuje jen při inicializaci spektrometru, jsou její proudové nároky zanedbatelné (50  $\mu$ A v neaktivním stavu)<sup>11</sup>. Aby bylo možné v případě potřeby paměť přeprogramovat i mimo spektrometr (např. pokud by došlo k vložení nefunkčního programu), bylo zvoleno její umístění v patici PLCC.

#### 4.6.2 Paměť spekter

Jak již bylo řečeno, externí paměť RAM představuje paměť pro ukládání spekter. Po zvážení faktorů jako je kapacita, energetické nároky a rychlost byla jako vhodná varianta vybrána paměť RAM typu CY7C1061BV33 z produkce firmy Cypress Semiconductors [25]. Jedná se o asynchronní statickou paměť RAM s vnitřní organizací 1M×16 bitů (tedy 2 MB), s přístupovou dobou 12 ns (vyrábějí se i rychlejší varianty, pro použití procesor však tato rychlost plně vyhovuje). Při napájecím napětí 3,3 V v pohotovostním režimu činí její příkon okolo 1 W, ovšem pokud obvod není adresován ( $\overline{CE}=H$ ), automaticky se přepne do klidového režimu s odběrem 100 mW. Poměrně vysoký příkon v aktivním režimu nepředstavuje vysokou zátěž, jelikož k paměti se přistupuje jen za účelem inkrementace hodnoty ve spektru nebo při přenosu spekter do vnějšího počítače.

Kapacita paměti byla zvolena tak, aby umožňovala uchovávání dostatečně velkého počtu spekter, aby nebyl její odběr proudu příliš velký a zároveň aby fyzicky zabírala na desce plošného spoje co nejméně místa.

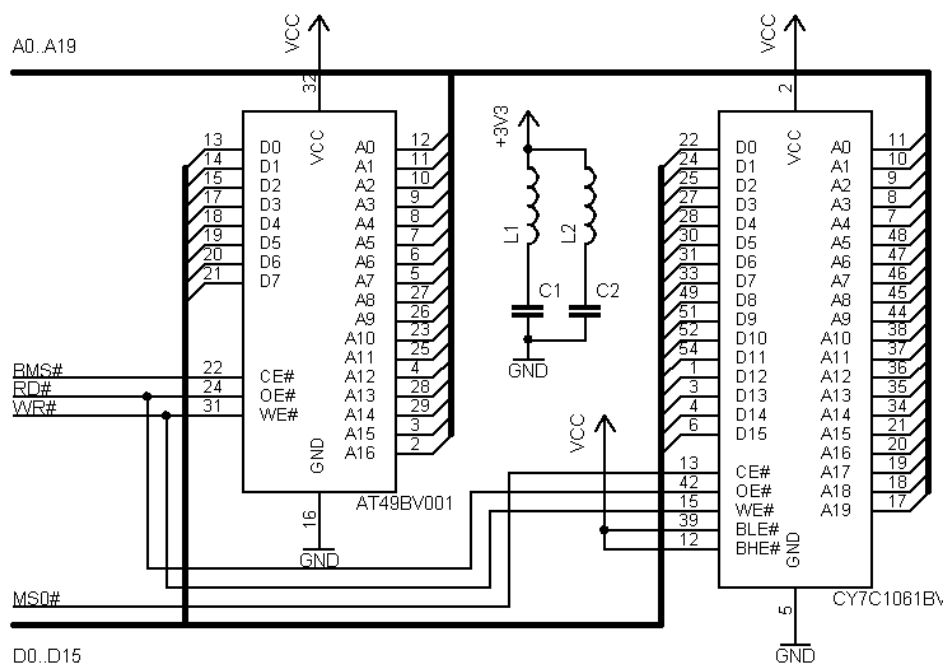
### 4.7 Rozhraní USB

K propojení spektrometru s počítačem byla zvolena sběrnice USB, jež se během posledních let etablovala jako standard k připojování externích periferních zařízení k počítačům typu PC (i jiným).

---

<sup>10</sup>Protože je obvyklé, že se paměti vyrábějí v kapacitách odpovídajících mocninám čísla 2, je žádoucí použití typu s kapacitou 128 KB.

<sup>11</sup>Pro uschování programu nevyužitelných 32 KB je samozřejmě možné využít jako paměť dat, jež zůstanou zachována i při úplném odpojení spektrometru od napájení (včetně zálohování) – např. k uložení konfigurace přístroje. Pro přístup k této paměti je však nutné použití speciální obslužné rutiny, jelikož bootovací paměť není po dokončení inicializace procesoru implicitně zpřístupněna.



Obrázek 16: Zapojení paměti ROM (Flash) a RAM spektrometru k DSP.

#### 4.7.1 Stručný popis USB

USB (Universal Serial Bus) je sériová sběrnice, vyvinutá v první polovině 90. let původně k propojování telefonu s PC jakožto nízko- až středně rychlé rozhraní [18]. Během času se postupně zvyšovaly nároky kladené na USB směrem k vyšší rychlosti a flexibilitě. V současné době představuje USB komunikační rozhraní s širokou škálou možných aplikací, standardně podporované všemi univerzálními operačními systémy. Ve verzi 2.0 definuje tři komunikační rychlosti – 1,5 Mbps (Low Speed), 12 Mbps (Full Speed) a 480 Mbps (High Speed). Zvláště rozšíření o rychlost 480 Mbps umožňuje nasazení USB i v komunikačně náročných aplikacích, jako je např. přenos videa v reálném čase, čímž postupně vytlačuje jiná vysokorychlostní sériová rozhraní (jako je kupř. FireWire 400).

USB lze charakterisovat následujícími body [19]:

- používá jeden druh kabelů (max. délka kabelového segmentu: 5 m)
- uživatel není nucen zabývat se elektrickými detaily rozhraní (korektní zakončení, křížení vodičů. . .)
- zařízení je možno napájet z USB sběrnice (max. 500 mA při 5 V)
- zařízení propojená USB je možné připojovat a odpojovat prakticky kdykoli
- zařízení jsou ihned po připojení identifikována ovladačem USB, který zajistí aktivaci odpovídajícího ovladače zařízení
- odpadá nastavování čísla IRQ, DMA, V/V RAM

- pomocí tzv. USB hubů umožňuje hvězdicovou topologií propojení až 127 zařízení
- podporuje asynchronní i izochronní komunikaci
- zjednodušuje vývoj HW i SW (řízení toku dat, korekce chyb apod. jsou součástí protokolu a jsou obsluhovány přímo integrovanými řadiči USB bez nutnosti spolupráce se softwarem)
- všechny komponenty potřebné k realizaci USB jsou levné a snadno dostupné.

Sběrnice USB využívá koncepcce Host–Target, kde Host je vždy právě jeden (typicky jde o PC) a Target jsou jednotlivá připojovaná zařízení.

Komunikace probíhá tak, že v pravidelných časových intervalech jsou napříč celou sběrnici vysílány a přijímány datové rámce (frames)<sup>12</sup>, které obsahují různé typy a počet paketů (datové, řídicí. . .). Jakým způsobem jsou tyto pakety alokovány v jednotlivých rámcích závisí na druhu přenosu – USB protokol rozlišuje celkem čtyři druhy:

1. isochronous
2. interrupt
3. bulk
4. control.

Režim *isochronous* se používá typicky pro aplikace vyžadující zpracování dat v reálném čase a tedy synchronní komunikaci. Komunikace v tomto režimu se vyznačuje tím, že je za všech okolností zaručena garantovaná propustnost sběrnice, ovšem není garantována bezchybnost přenosu. Propustnost je zaručena tak, že v každém rámci je alokována určitá část pro tento druh komunikace a každé zařízení, jež tento režim vyžaduje.

Režim *interrupt* je podobně jako předchozí také synchronním typem komunikace. Používá se tak, že zařízení je pravidelně dotazováno, má-li k dispozici data určená k odeslání (tzv. polling). V záporném případě zařízení odpoví prázdným paketem – NAK (no acknowledge). I tento režim přenosu má v každém rámci (případně v každém  $n$ -tém rámci) vyhrazen určitý prostor. Narozdíl od izochronního režimu je však prověřována bezchybnost paketů – v případě vyskytnutí se chyby je požadavek automaticky zopakován v příštím intervalu.

Režim *control* je určen k přenosu konfiguračních a řídicích údajů. Jedná se jednak o standardní typy konfiguračních paketů souvisejících s USB, jednak o uživatelské pakety. V popisovaném spektrometru je tento druh komunikace použit k zasílání příkazů a parametrů týkajících se např. měření. Stejně jako u předchozího režimu, je i zde zaručena bezchybnost přenosu na úrovni protokolu (tzn. většinou na hardwarové úrovni), nejedná se ale už o synchronní přenosy, i když i v tomto případě je garantována určitá minimální propustnost přenosového kanálu (10 %).

Režim *bulk* je využíván pokud není podstatná pravidelnost komunikace, ale zato je vyžadována její bezchybnost. Tento režim je ve spektrometru použit k přenosu naměřených spekter – není důležité, zda přenos bude trvat 1 ms nebo 100 ms. Jelikož

<sup>12</sup>Tyto rámce jsou vysílány každou 1 ms a obsahují 12000 bitů, čímž je dána plná rychlost (full speed) sběrnice – 12 Mbps. V případě použití vysoké rychlosti (high speed) je tento rámeček rozdělen na tzv. mikrorámce, jež obsahují 60000 bitů a jsou vysílány každých 125  $\mu$ s

tento režim neklade žádné požadavky na pravidelnost, je mu v datovém rámci přidělena nejnížší priorita. Bulk přenosy jsou uskutečněny až po dokončení všech ostatních typů přenosu. Jelikož 10 % kapacity sběrnice je vyhrazeno pro řídicí pakety (control) a zbylých 90 % může být alokováno pro komunikaci typu isochronous a interrupt, může se v krajním případě sběrnice stát pro bulk režim zcela nepropustnou. Potom jsou všechny bulk přenosy odloženy až do okamžiku, kdy dojde k alespoň částečnému uvolnění přenosové kapacity.

#### 4.7.2 USB řadič Cypress SX2

Pro praktickou realizaci USB rozhraní je na trhu k dispozici řada součástek – od integrovaných transceiverů, kdy leží veškerá zodpovědnost za implementaci USB protokolu na dalších součástkách, až po mikrořadiče vybudované většinou okolo některého z populárních jader (jako x51, ARM apod.), kdy je přenos přes USB uskutečněn zapsáním dat do předem určené oblasti V/V paměti a většina ostatní činnosti spojené s obsluhou USB je uskutečněna mikrořadičem automaticky.

Jelikož procesor spektrometru — ADSP-21992 — v sobě podporu USB rozhraní nezahrnuje, je použit externí řadič – k realizaci USB rozhraní byl zvolen obvod CY7C68001 (výrobce označován jako SX2) firmy Cypress Semiconductors [26].

Řadič SX2 má v sobě integrovány všechny nezbytné komponenty pro relativně snadnou implementaci rozhraní EZ-USB<sup>13</sup> a není vázán na žádný specifický typ nadřazeného obvodu (MCU, CPU, DSP, ASIC, FPGA, ...). Základní charakteristiky řadiče jsou:

- splňuje standard USB 2.0
- pracuje na vysoké (480 Mbps) nebo plné (12 Mbps) rychlosti
- obsahuje 4 nastavitelné „koncevé body“ (endpoints, EP), což jsou struktury FIFO (First In-First Out) využívající části zabudované 4 KB paměti, jež figurují jako cílová zařízení dat k odeslání a zdroj přijatých dat; jsou označeny EP2, 4, 6, 8
- dále obsahuje 1 koncevý bod k obsluze řídicích požadavků (EP0)
- k řídicímu obvodu se připojuje standardním 8- nebo 16-bitovým rozhraním, umožňujícím jak synchronní, tak asynchronní přístup (FIFOADR0-2, FD0-15,  $\overline{RD}$ ,  $\overline{WR}$ ,  $\overline{CS}$ , IFCLK)
- vnějším 24 MHz krystalem je dán hodinový kmitočet, od něhož jsou (programovatelně) získávány další kmitočty v integrovaném PLL
- napájen 3,3 V, vstupy/výstupy tolerantní vůči 5 V
- lze napájet jak z USB, tak samostatně

---

<sup>13</sup>Specifikace USB obsahuje v podstatě jen hardwarové požadavky na sběrnici a specifikuje protokol. EZ-USB je z vývojářského hlediska ucelený soubor hardwarových a softwarových prostředků vyvinutých firmou Anchor Chips, potřebných k realizaci USB spojení mezi PC (Host) a koncevým zařízením (Target). Nabízí jednotný přístup jak na straně koncevého zařízení (sada řídicích registrů, typy požadavků přerušení atd.), tak na straně počítače (standardní ovladač všech řadičů EZ-USB).

- USB konfiguraci možno uložit do vnější EEPROM připojené pomocí sběrnice I<sup>2</sup>C (piny SCL, SDA); vyhodnocení při připojení k USB může pak proběhnout automaticky, bez intervence řídicího obvodu.

Řadič SX2 je k procesoru připojen podle schématu na obr. 17. Je využito V/V paměťového prostoru DSP, realizovaného pomocí jeho rozhraní EMI. SX2 je mapován na V/V stránku (registr IOPG) 255, výběr EP se provádí vstupy FIFOADR0–2, jež jsou propojeny s adresovými vodiči A0–A2. Vodiče A10–17 jsou v rámci V/V prostoru vyhrazeny pro číslo stránky. Dekódování požadavku přístupu k SX2 je proto provedeno tak, že je vyhodnocena přítomnost hodnoty 255 na těchto osmi linkách (provedením logického součinu osmivstupovým hradlem NAND) a aktivita signálu  $\overline{IOM\overline{S}}$ , indikujícího požadavek přístupu k perifernímu zařízení. Na základě jejich logického součtu je generován signál  $\overline{CS}$  pro SX2. Adresace registrů a dat SX2 pak probíhá nastavením registru IOPG v DSP instrukcí IOPG = 255 a následným použitím instrukce třídy IO(*adresa*) pro přístup do V/V prostoru, kde *adresa* je přímo adresou požadovaného EP.

#### 4.8 Hodiny reálného času

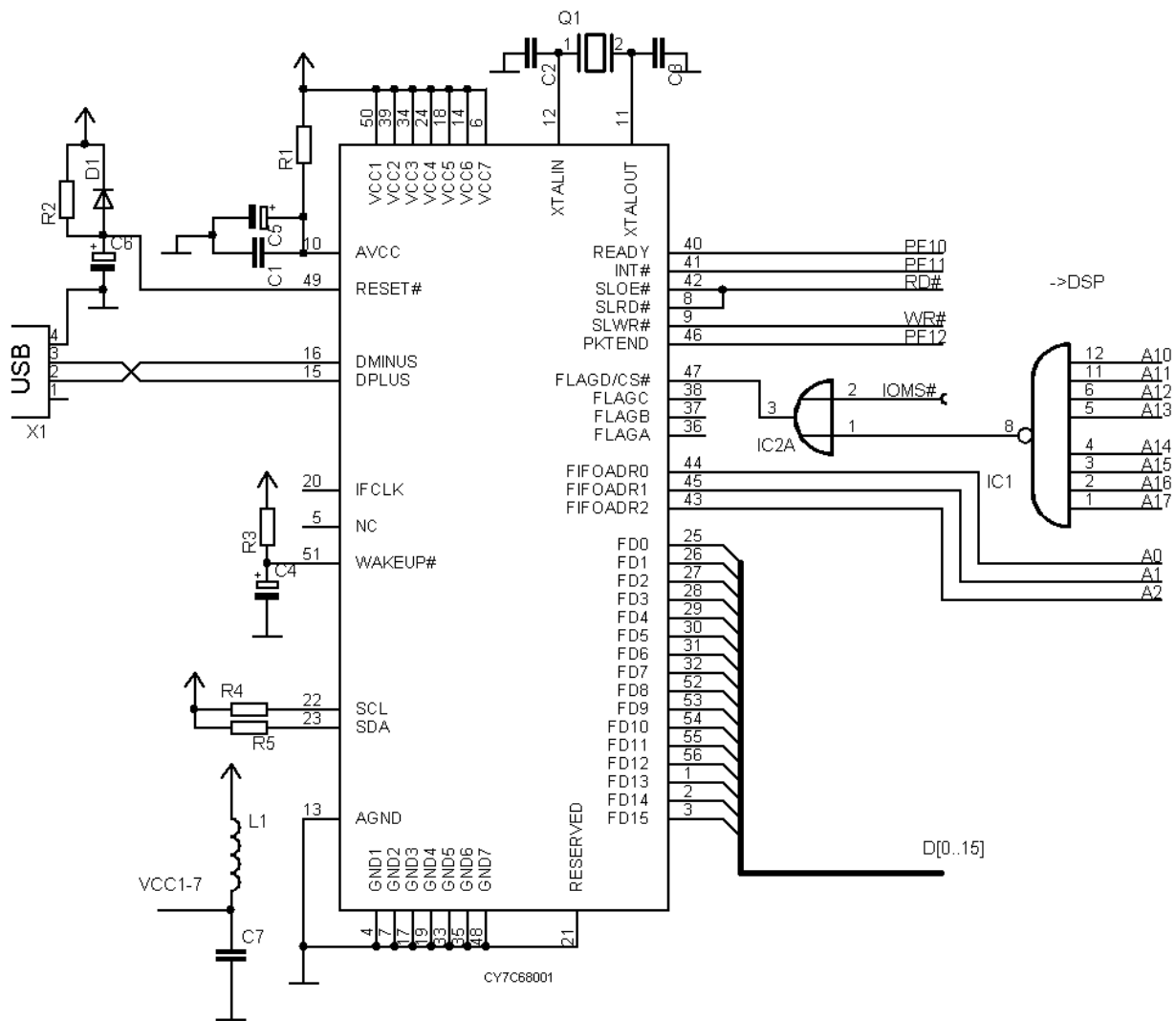
Hodiny reálného času (RTC) byly do návrhu spektrometru začleněny z toho důvodu, aby bylo možné přepnout procesor do neaktivního režimu, v němž je vypnut jeho oscilátor a jediným možným způsobem jak obnovit jeho činnost je příchod vnějšího přerušení. Pokud by nebyl vyžadován bateriový provoz, příp. pokud by nebylo vyžadováno přepínání procesoru do neaktivního režimu, ztrácí obvod RTC své opodstatnění, neboť aktuální čas může udržovat procesor zabudovanými prostředky a k měření by byl v případě absence akumulátoru nezbytný připojený počítač.

Výběr obvodu RTC se odvíjel od výše uvedených úvah. Bylo požadováno připojení pomocí rozhraní SPI, přítomnost funkce budíků s výstupem požadavku přerušení a nebyl vyžadován zabudovaný akumulátor, protože pro uskutečňování samostatných měření je nutné uchovávat obsah paměti RAM spektrometru, v níž se kromě naměřených spekter uchovávají také informace o naplánovaných měřeních, a zdroj zálohující tuto paměť tedy může napájet také RTC.

Jako vhodný typ byl vybrán obvod DS1305 firmy Dallas Semiconductor [27]. Ten uchovává čas ve formátu DD–MM–RR, HH.MM:SS, informaci o dnu v týdnu, rozpozná přestupný rok, obsahuje dva budíky s vyvedenými signály požadavku přerušení, obsahuje 96 bytů paměti RAM pro libovolné použití, hodinový kmitočet je odvozován od vnějšího krystalu 32768 kHz a je připojován sběrnicí SPI. Schéma zapojení RTC je uvedeno na str. 29.

#### 4.9 Zdroje napájecích napětí

K napájení většiny obvodů spektrometru je třeba napětí 3,3 V. Výjimkou je jádro procesoru a A/D převodník – obojí vyžaduje napětí 2,5 V. Vzhledem k tomu, že přístroj v sobě kombinuje jak číslicové, tak analogové obvody, je třeba zamezit nežádoucímu pronikání rušení z číslicové části do analogové. Proto je kromě 3,3 a 2,5 V napájení odděleno také napájení obou částí – analogová část je napájena z vlastního zdroje a má



Obrázek 17: Zapojení řadiče USB spolu s adresovým dekodérem.

vlastní zemnicí vodič, číslicová část má pro obě napětí společnou zem<sup>14</sup>.

Hlavními spotřebiči ve spektrometru jsou:

- DSP: 300 mA
- RAM: 260 mA
- USB: 200 mA.

K těmto hodnotám je třeba připočítat rezervu pro modul předzesilovače a příkon ostatních obvodů, čímž dostáváme hodnotu cca 0,9–1,1 A, jež představuje špičkový odběr spektrometru v případě aktivní vysokorychlostní komunikace USB a frekventovaného přístupu do paměti RAM (práce v paměti spekter – přenos, mazání atd.). V případě autonomního měření se odběr snižuje o 460 mA (řadič USB přepnutý do neaktivního režimu, minimální četnost přístupu do RAM), při přepnutí DSP do neaktivního režimu pak celkové proudové nároky představují cca 30 mA<sup>15</sup>.

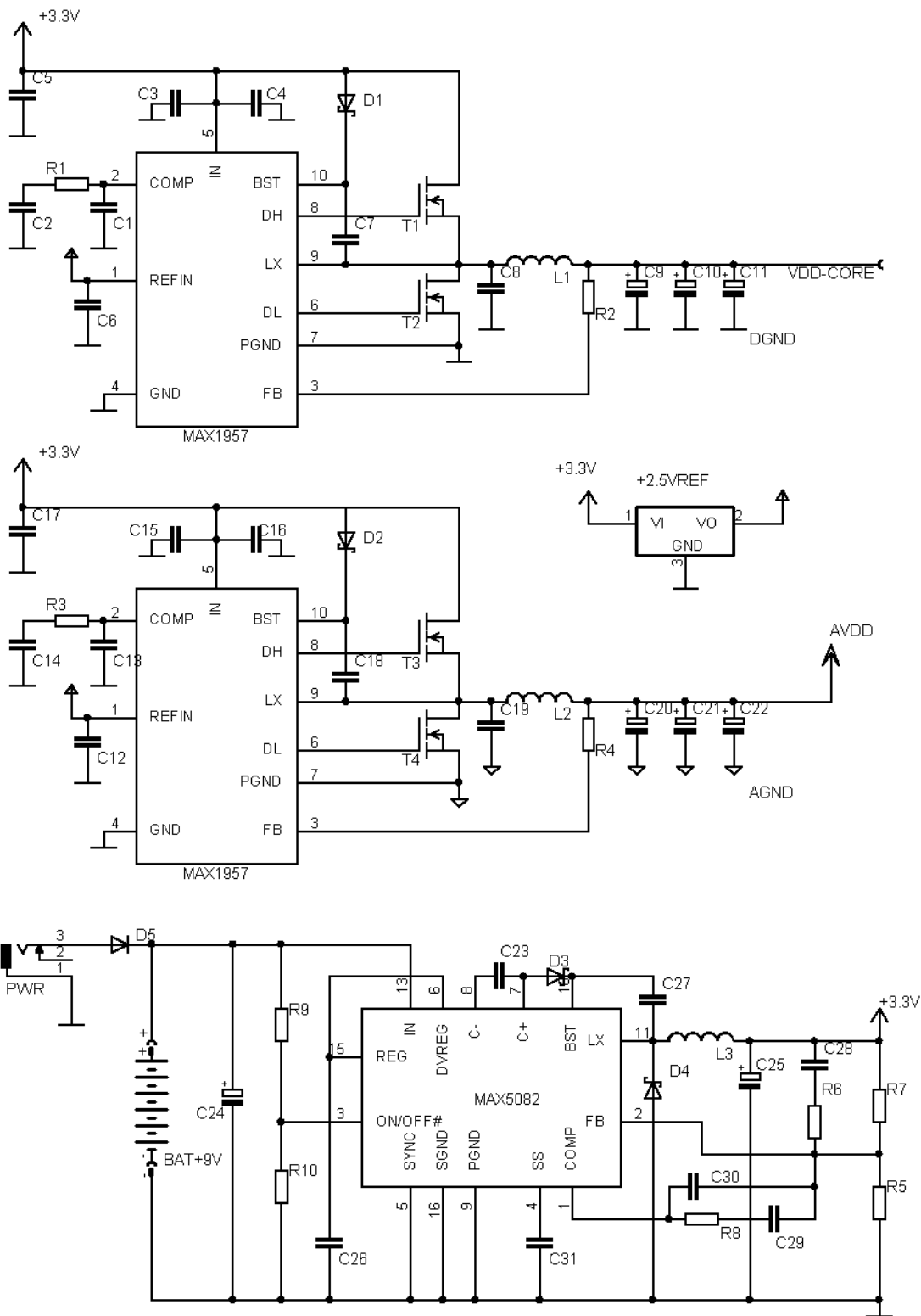
Jelikož jedním z požadavků kladených na spektrometr byla možnost provozu na baterie, byly pro konstrukci zdroje napájecích napětí vzhledem ke své vysoké účinnosti zvoleny integrované DC–DC měniče (schéma zapojení zdrojů – obr. 18).

Zdroj je koncipován na externí napětí 5–12 V, v závislosti na použitém akumulátoru (např. 9 V, jak je naznačeno ve schématu). Toto napětí je obvodem MAX5083 převedeno na 3,3 V. Jedná se o měnič typu PWM step–down firmy Maxim, který může být nastaven pro vstupní napětí v rozsahu 4,5–40 V, používá fixní spínací kmitočet 250 kHz a pracuje s účinností 84–88 % (max. výstupní proud činí 1,5 A) [28]. Výstupní napětí je jednak použito k napájení obvodů, jednak jako vstupní napětí pro další měniče, opět typu PWM step–down – MAX1957 (vyráběné firmou Maxim). Ty poskytují pro jádro procesoru a pro analogovou část napětí 2,5 V, jehož velikost je určena napětím na vstupu REFIN (k získání tohoto referenčního napětí je možné použít dělič nebo referenční zdroj, jak je tomu ve schématu). Rozsah vstupního napětí tohoto měniče je 3,0–5,5 V, spínací kmitočet 300 kHz a účinnost 86–92 % [29].

---

<sup>14</sup>Vzhledem k tomu, že v době psaní této práce nebylo ještě definitivně rozhodnuto o podobě modulu předzesilovače, nebyly navrženy další zdroje napájení pro potřeby tohoto bloku – budou-li vyžadována další napětí kromě analogových +2,5 V a číslicových +3,3 V (např. symetrické napětí, 5 V, 12 V apod.)

<sup>15</sup>Do této hodnoty nejsou započítány nároky předzesilovače, pokud by se na něj neaktivní režim nevztahoval.



Obrázek 18: Zdroje napájecích napětí.



## 5 Testovací prototyp

V předchozí kapitole byla popsána hardwarová část spektrometru. K vývoji obsluhového programu je nezbytné mít k dispozici funkční elektroniku vyvíjeného spektrometru. Vzhledem ke koncepci přístroje by se však snadno mohlo stát, že při vývoji softwaru by se ukázalo, že některé části hardware nebyly vyřešeny zcela uspokojivým způsobem a bude nutné je přepracovat. Použité technologie však takové pozdější zásahy do elektroniky velmi znesnadňují – jedná se vesměs o součástky SMD (Surface-Mounted Device – určené pro povrchovou montáž), navíc, vzhledem k použitým rychlostem a požadovaným odstupům signálu od šumu, jsou velmi citlivé na korektní provedení spojů a zemnění. To vše vylučuje použití univerzálních desek plošných spojů (DPS). Místo toho je nutné odborné navržení a výroba vícevrstvých DPS, jejichž flexibilita z hlediska vývoje elektroniky je ale silně omezená a jejich vývoj, výroba a osazení časově náročné.

Z těchto důvodů bylo zvoleno kompromisní řešení. K vývoji bylo využito vývojových sad, jež jsou k dispozici u výrobců zmiňovaných součástek. Kromě DPS, odborně navrženými výrobcem a vybavenými dalšími pro vývoj užitečnými díly, je součástí těchto sad také dokumentace a softwarové produkty usnadňující vývoj. Navzdory značnému úsilí výrobců je však rozšiřování vývojových DPS nad určitou mez vyloučeno a sestavení plně funkčního prototypu spektrometru s jejich využitím nereálné. Aby byly naplněny požadavky kladené na prototyp, tj. ověření použitelnosti zvolené koncepce a vytvoření prostředí pro vývoj programového vybavení, byly některé části, z hlediska koncepce méně důležité, zredukovány.

### 5.1 Vývojová sada k ADSP–21992

Základní komponentou prototypu spektrometru je vývojová sada ADSP–21992 EZ–KIT Lite. Ta zahrnuje DPS, obsahující:

- procesor ADSP–21992BST–160 MHz (+ TTL generátor 32 MHz)
- USB rozhraní určené k ladění programů
- D/A převodník AD5328BRU na SPI sběrnici
- konektory se vstupy/výstupy EMI, FIO, ADC, DAC
- paměť typu Flash (512K×8)
- paměť typu SRAM (64K×16)
- další (v prototypu nevyužité) součásti (PWM, CODEC, CAN, JTAG, RS–232).

Součástí je také dokumentace a omezená verze vývojového prostředí VisualDSP++ umožňující snadné ladění programů v Assembleru a v C/C++.

## 5.2 Vývojová sada k SX2

Také pro SX2 byla použita vývojová sada. Ta sestává ze dvou DPS – první je procesorová deska, jež obsahuje mikrořadič Cypress FX, paměť EEPROM, sedmisegmentový display, 4 tlačítka, konektor IDE, konektor RS-232 aj. Cypress FX je mikrořadič 8051 s integrovaným řadičem USB. Tato DPS slouží k simulaci řídicího obvodu řadiče SX2, který je možné k desce snadno připojit. Pro účely prototypu tato deska nebyla využita.

Deska SX2 je vybavena pouze řadičem CY7C68001, patící pro sériovou EEPROM a řadou indikačních LED.

Dále sada obsahuje dokumentaci, programy usnadňující vývoj zařízení s SX2, omezenou verzi prostředí  $\mu$ Vision s překladačem C pro procesory 8051 firmy Keil a ovladače EZ-USB pro systémy Microsoft Windows.

## 5.3 Realizace prototypu

Při realizaci prototypu pomocí vývojových sad byly v maximální možné míře využity prostředky, jež tyto sady nabízejí. Proto byl pro účely konstrukce prototypu návrh poněkud upraven (viz blokové schéma na obr. 19; EZ-USB KIT – vývojová deska EZ-USB, DSP KIT – vývojová deska DSP, ext. DPS – deska, na níž byly umístěny součástky nepřítomné na žádné z vývojových desek):

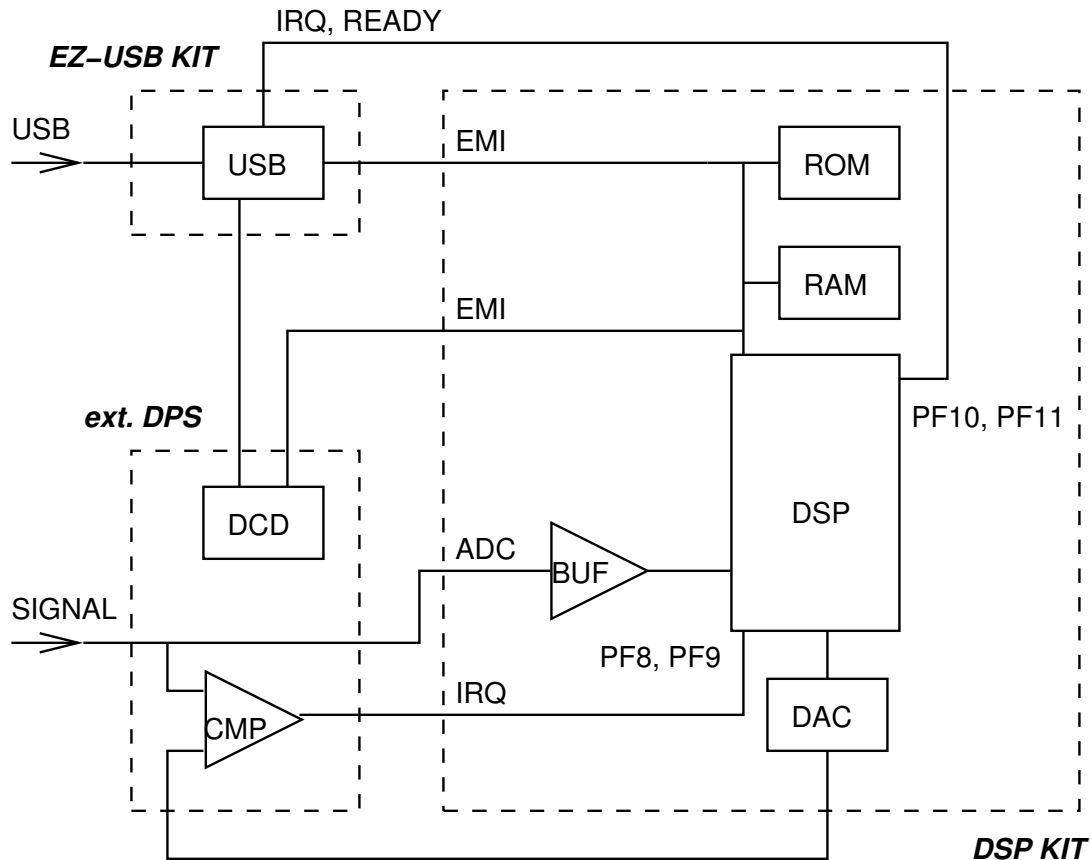
- napájecí blok – vypuštěn
- zdroj předpětí (HVS) – vypuštěn
- obvod RTC – vypuštěn
- komparátor – jiný typ
- D/A převodník – využit převodník na vývojové DPS
- vnější paměti RAM a ROM – využity paměti na vývojové DPS.

Dále bylo nutné provést drobnou úpravu vývojové DPS k ADSP-21992. Ta spočívala v odstranění dolní propusti, jíž výrobce vybavil oddělovací zesilovač (na obr. 19 označeno jako BUF) stojící před vstupem do A/D převodníku. Tento zesilovač dále upravuje a omezuje vstupní rozsah – z  $0 \dots 2$  V na  $-1 \dots +1$  V, což pro účely spektrometru představuje určitou nevýhodu, spočívající v redukci dynamického rozsahu na polovinu. Jelikož se nepočítalo s rozsáhlými měřeními na tomto prototypu, nebyl tento handicap vývojové desky odstraněn<sup>16</sup>.

Vstup signálu, komparátor a adresovací logika SX2 byla vyřešena na univerzální DPS, která se zasune do konektorů analogových vstupů a rozhraní FIO na desce procesoru. S konektorem rozhraní EMI a s deskou SX2 je propojena pomocí mnohažilových plochých kabelů.

---

<sup>16</sup>Odstranění nebo úprava oddělovacího zesilovače na vstupu by jednak vyžadovala zásah do DPS, ale také by přinesla i nevýhodu. Oddělovací zesilovač totiž zároveň slouží jako ochrana analogového vstupu před překročením rozsahu  $0 \dots 2$  V, jež by mohlo vést k trvalému poškození DSP. Navíc pro ověření funkčnosti poloviční dynamický rozsah nepředstavuje žádnou překážku a provádění přesných měření parametrů signálu nemá smysl, neboť vstup signálu do vývojové desky není možné řešit korektně (vhodné stínění a přizpůsobení) a lze tedy předpokládat výrazně horší parametry než u budoucí výrobní verze spektrometru.

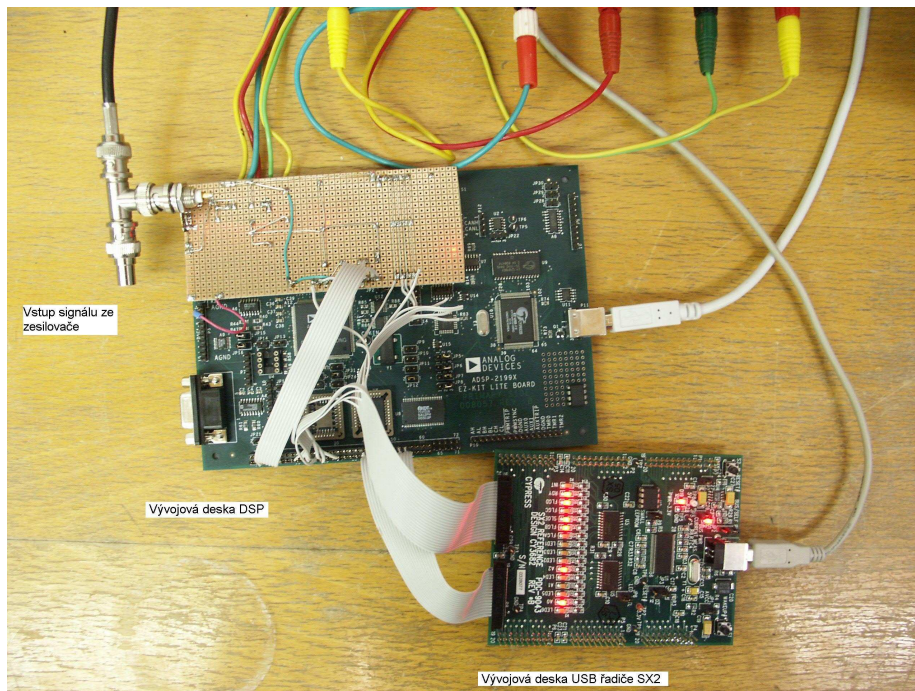


Obrázek 19: Blokové schéma prototypu spektrometru; BUF – oddělovací zesilovač, CMP – komparátor, DAC – D/A převodník, DCD – dekodér adresy řadiče EZ-USB, IRQ – vstup požadavku přerušení, RAM – paměť spekter, ROM – paměť programu, USB – univerzální sériové rozhraní, EMI – rozhraní vnějších pamětí, PFx – signály rozhraní FIO, SIGNAL – vstup signálu ze spektrometrického zesilovače, případně z generátoru funkcí.

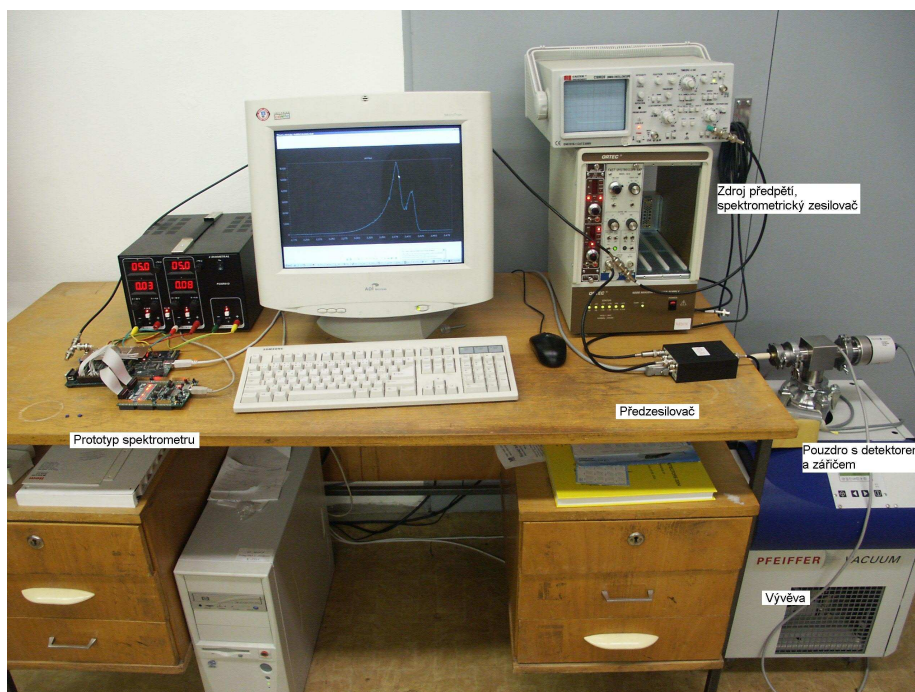
Jako komparátor byl použit lépe dostupný typ s horšími parametry a v provedení pouzdra DIL14 – TLC374. V pouzdře jsou 4 komparátory, z nichž využit je jen jeden. Odezva je 200 ns a příkon celé součástky činí 500 mW. Výstup komparátoru je veden na vstupy PF8 a PF9 rozhraní FIO. Referenční vstup komparátoru je spojen s výstupem VOUTA D/A převodníku a signál je veden z konektoru BNC na druhý vstup komparátoru a na analogový vstup desky.

K dekodování adresy řadiče SX2 byly použity TTL obvody 74HCT30 (osmivstupný NAND) a 74HCT32 (4× OR), zapojené dle schématu na obr. 17. Signály PF10, PF11 na DSP jsou propojeny s výstupy READY a  $\overline{INT}$  na SX2.

Jelikož vývojová deska pro DSP obsahuje napájecí obvody, vyžaduje jen externí zdroj o napětí  $\pm 5$  V (pro analogovou) a +5 V (pro digitální část). Deska s řadičem USB SX2 je napájena z USB sběrnice.



Obrázek 20: Prototyp spektrometru zhotovený pomocí vývojových desek.



Obrázek 21: Experimentální sestava s prototypem spektrometru.

## 6 Programové vybavení spektrometru

Vzhledem ke koncepci, na níž je konstrukce spektrometru založena, je základním úkolem obslužného programu nejen inkrementace hodnoty na adrese kanálu, ale i vyhledání píku, případně sofistikovanější zpracování digitalizovaného signálu. Základním prostředím, v němž byla vyvinuta základní verze obslužného programu (firmware) spektrometru, je VisualDSP++. To umožňuje vývoj programů pro DSP Analog Devices v Assembleru, C, C++, případně ve všech třech jazycích dohromady. Používaná verze je však typu „Lite“, což v praxi znamená omezení velikosti programového kódu na 8 KW (= 24 KB, tj. asi 8000 instrukcí).

VisualDSP++ je aplikací pro MS Windows, jež v sobě zahrnuje integrované vývojové a ladicí prostředí (IDDE), překladače výše uvedených jazyků, spojovací program (linker), optimalizační program (profiler), utility pro tvorbu výsledného kódu (splitter, loader), simulátor a standardní knihovny jazyků C a C++ spolu s některými dalšími funkcemi užitečnými speciálně v aplikacích s DSP.

Jednou z nejužitečnějších vlastností VisualDSP++ je to, že pomocí USB<sup>17</sup> je prostředí propojeno s vývojovou deskou, což umožňuje jednak pohodlné nahrávání programů do DSP, ale především velmi usnadňuje ladění – je možné trasovat program běžící přímo v DSP a sledovat či zasahovat do jednotlivých registrů a částí paměti v DSP v podstatě přímo za běhu programu.

### 6.1 Struktura řídicího programu

Základní verze řídicího programu spektrometru byla napsána v Assembleru. Důvodem je omezení velikosti kódu generovaného pomocí VisualDSP++ a nutnost co nejrychlejšího zpracování přerušení od komparátoru (vzhledem k tomu, že časově kritická rutina je z celého programu jen jedna, není vyloučen pozdější přepis ostatních částí do C).

Při návrhu byla snaha držet se zásady, aby k reakci na asynchronní události (z hlediska jejich obsluhy v programu) byl využit mechanismus přerušení. V praxi jsou obsluhována 3 přerušení:

1. komparátor (USR0)
2. interní časovač (USR1)
3. řadič USB (USR2).

Řadič přerušení procesoru ADSP-21992 rozlišuje prioritu jednotlivých požadavků – s rostoucím číslem přerušení typu USRx klesá jeho priorita.

Dalšími moduly programu jsou:

---

<sup>17</sup>Toto USB však nijak nesouvisí s USB rozhraním spektrometru, realizovaným pomocí externího řadiče SX2.

- StartUp (inicializace všech součástí spektrometru po zapnutí)
- SPIdrv (ovladač rozhraní SPI)
- USBdrv (ovladač rozhraní USB)
- MsrMan (organizace měření).

## 6.2 Popis podprogramů

### 6.2.1 Inicializační rutina

Úkolem této rutiny je provést nastavení všech registrů procesoru a ostatních zařízení a připravit tak spektrometr k práci. Provádí se:

- nastavení PLL procesoru (zdroj taktovacích signálů)
- nastavení rozhraní EMI
- nastavení řadiče IRQ
- nastavení rozhraní FIO
- nastavení interního časovače
- nastavení DAC
- nastavení rozhraní USB.

### 6.2.2 Rutina přerušeni od komparátoru

Obslužná rutina přerušeni od komparátoru (USR0) má nejvyšší prioritu a příjem tohoto přerušeni je povolen jen v průběhu měření. Úkolem tohoto podprogramu je detekovat pík a provést přičtení jedničky v odpovídajícím místě spektra.

Detektor píku je součástí obslužné rutiny přerušeni USR0 (komparátor). Toto přerušeni má nejvyšší prioritu a je generováno komparátorem v okamžiku, kdy amplituda signálu překročí hodnotu nastavenou D/A převodníkem. Po provedení nezbytných kroků (jako přepnutí sady registrů, potvrzení přijetí IRQ apod.) rutina provede navzorkování signálu, které je ukončeno při klesnutí amplitudy signálu pod prahovou úroveň (PF9 → L):

:

```

iopg = ADC_Page;           // zařízení = A/D převodník
ccode = 0x0b;              // podmínka SWCOND = nenulovost PF9
                             // (na PF9 je výstup z komparátoru)
SamplePeak:                // vzorkování
    ax0 = io(ADC_XTRA0);    // AX0 <- hodnota navzorkovaná ADC
    dm(i0, m0) = ax0;      // buffer[I0++] <- AX0
    if swcond jump SamplePeak; // opakovat dokud PF9 = H

```

⋮

Po navzorkování píku je proveden převod z tvaru  $\pm 1\frac{1}{4}$  bitů + out-of-range-bit na 12 bitů bez znaménka a je nalezeno maximum:

⋮

```
    cntr = ar;                // délka píku (počet vzorků)
  do Search until ce;        // while (CNTR-- != 0) {
    ax0 = dm(i0 += m0);      // AX0 <- buffer[IO++]
    ar = tglbit 15 of ax0;    // AR <- (unsigned) AX0
    sr = lshift ar by -4(lo); // SR <- AR << 4
    ar = ax1;
    af = ax1 - sr0;
    if lt ar = pass sr0;     // if (AX1 < SR)
Search: ax1 = ar;           // AX1 <- SR
                                // }
⋮
```

Obslužná rutina tohoto přerušení musí zahájit vzorkování co nejdříve (aby nedošlo ke ztrátě informace o náběhu impulsu) a vzorkovat co nejrychleji – použitý algoritmus zajišťuje nejvyšší možnou rychlost (převod probíhá každých 50 ns, instrukce trvá ve většině případů 6,25 ns). Jelikož zpracování navzorkovaného impulsu už není časově tak kritické, nabízí se možnost stávající úsek kódu nahradit např. funkcí v C, jež může maximum hledat nějakou pokročilejší metodou (interpolace, gaussovský fit, dekonvoluce dvou složených impulsů apod.).

### 6.2.3 Rutina přerušení interního časovače

Obslužná rutina přerušení od interního časovače (USR1) má za úkol:

- odměřovat dobu nabírání spektra
- zastupovat chybějící obvod RTC.

Nabírání spektra je zahájeno tak, že do globální proměnné MSR\_TIMER je zapsán počet sekund. Podprogram časovače otestuje nenulovost této proměnné a v kladném případě povolí obsluhu přerušení USR0 (komparátor) a každou sekundu sníží hodnotu proměnné MSR\_TIMER o jedničku. Při dosažení nuly je přerušení USR0 opět zakázáno. Proměnná MSR\_TIMER tedy vždy uchovává čas zbývající do konce měření v sekundách a jejím nastavením na nulu může řídicí program měření kdykoliv přerušit.

Protože prototyp neobsahuje obvod RTC, je tato funkce částečně nahrazena softwarově – podprogram hodin zajišťuje uchovávání aktuálního data a času.

### 6.2.4 Dispečer měření

Úkolem tohoto podprogramu je automaticky spouštět nabírání spekter. Harmonogram a detaily jednotlivých měření (rozlišení, doba, práh, název, další poznámky) jsou do spektrometru zavedeny z počítače pomocí USB. Dispečer pak porovnává aktuální čas s časem prvního požadavku v seznamu a v případě shody vybere úsek paměti RAM,

do níž bude spektrum zapsáno, nastaví práh (funkcí SetThrd), MSR\_TIMER (případně další proměnné) a vyřadí požadavek ze seznamu. Dispečer měření základní verze řídicího programu obsahuje v redukované variantě, protože kvůli omezené kapacitě paměti na vývojové desce ztrácí funkce pro organizaci více měření své opodstatnění. Příkazy z USB, na něž dispečer měření (modul MsrMan) reaguje, zahrnují (ve stávající verzi řídicího programu jsou implementovány jen funkce označené hvězdičkou):

- AddReq – zařazení požadavku na měření do seznamu
- DelReq – odstranění požadavku ze seznamu
- CatReq – výpis seznamu
- GetSpect (\*) – přenos spektra ze spektrometru; funkce předá obsah paměti se spektrem řadiči USB (voláním služby USB\_EPx\_Write řadiče EZ-USB)
- DelSpect (\*) – odstranění spektra; funkce vynuluje obsah paměti spektra
- GetTimer/SetTimer (\*) – zjištění/nastavení obsahu proměnné MSR\_TIMER (čas do konce měření)
- GetThreshold/SetThreshold (\*) – zjištění/nastavení prahového napětí.

Tyto příkazy jsou obsluhovány z nekonečné smyčky hlavního programu, jejímž jediným úkolem je přijímat příkazy z USB a na jejich základě volat odpovídající funkce řídicího programu.

### 6.2.5 Ovladač rozhraní EZ-USB

Ovladač EZ-USB zajišťuje obsluhu událostí pocházejících od obvodu SX2 a obsahuje funkce umožňující snadnou práci s USB, jako je posílání/příjem dat přes datové EP, reakce na požadavky přicházející na EP0 apod.

#### EZ-USB SX2 z hlediska softwaru

Jak již bylo uvedeno v popisu obvodu SX2, z hlediska programátora poskytuje SX2 4 datové koncové body (EP2, 4, 6, 8) a jeden příkazový – EP0. Pro EP2-8 jsou v SX2 vyhrazeny 4 KB vyrovnávací paměti, která může být mezi jednotlivé EP různě rozdělena. Platí, že EP2 a 6 mohou být nastaveny s dvojitým, trojitým nebo čtyřnásobným bufferem, zatímco EP4 a 8 mohou mít jen dvojnásobný buffer (četnost bufferu je jeho kapacita v paketech). Velikost paměti vyhrazené pro EP0 je 64 bytů. Velikost paketů rozhraní EP2-8 se v případě plné rychlosti nastavuje obvykle na 64 bytů, v případě vysoké rychlosti na 512 nebo 1024 bytů.

Při aktivaci SX2 je obvodem zkontrolována přítomnost paměti EEPROM s konfigurací. Podle jejího obsahu pak inicializace pokračuje třemi různými způsoby:

1. paměť je nalezena a obsahuje platnou konfiguraci (první byte má hodnotu 0xC4) – její obsah je načten do SX2, obvod se přihlásí na USB sběrnici a generuje přerušení ENUMOK



2. paměť je nalezena a obsahuje jen identifikační čísla VID, PID a DID (Vendor, Product, Device ID) – je použita implicitní konfigurace uložená v ROM uvnitř SX2, dále vše probíhá stejně jako v předchozím bodě
3. paměť není nalezena nebo má neplatný obsah – SX2 čeká na zaslání konfigurace z procesoru; po jejím přijetí probíhá vše jako v bodě 1.

Konfigurace obsahuje popisovače zařízení, rozhraní, koncových bodů (typ ISO–INT–BULK, IN/OUT, velikost paketu), požadavky na napájení (SELF/BUS powered) aj. (podrobnosti – viz specifikaci USB [18]), celkem asi 0,5 KB dat. Řadič SX2 obsahuje 51 registrů, pomocí nichž se konfiguruje další parametry, charakteristické pro SX2, a dále slouží k práci s EP0.

K řídicím účelům SX2 používá signály  $\overline{\text{INT}}$ , READY, PKTEND, FLAGA, FLAGB, FLAGC a FLAGD. FLAGD je nastaven jako  $\overline{\text{CS}}$ , ostatní signály FLAGx nejsou využity – je možné je naprogramovat k indikaci stavu vyrovnávacích pamětí. PKTEND je vstup, jímž může dát procesor řadiči signál, aby odeslal (neúplný) paket, který má v bufferu. Funkce zajišťované signály FLAGx a PKTEND mají své ekvivalenty na úrovni registrů SX2, a proto nejsou pro správnou funkci rozhraní nezbytně nutné. Signál READY slouží k indikaci připravenosti rozhraní EP0 zpracovat příkaz nebo data, ostatní EP analogický signál nepotřebují. Signálem  $\overline{\text{INT}}$  SX2 generuje přerušování, což mj. znamená, že při adresaci rozhraní EP0 na něm bude připraven 1 byte — ISB, *Interrupt Status Byte* — k přečtení. Z jeho obsahu je procesor informován, o jaký typ přerušování z osmi možných se jedná.

Kromě signálu READY se rozhraní EP0 liší od ostatních EP také tím, že je vždy pouze 8-bitové – při komunikaci s ním jsou využity jen vodiče FD0–7. Práce s EP0 probíhá tak, že je zapsán byte obsahující informaci o typu požadavku (zápis/čtení) a jeho charakteru (zda se jedná o byte obsahující adresu registru nebo data, jež jsou přenášena po nibblech<sup>18</sup>). Při USB komunikaci je pak EP0 využíván pro přenosy typu *control*. Pakety tohoto typu se dělí na:

1. standardní požadavky, jež zpracovává SX2 automaticky
2. standardní požadavky, jež SX2 automaticky zpracovat nedokáže
3. uživatelsky definované požadavky (Vendor/Class Requests).

Při příchodu požadavku typu 2 nebo 3 je generováno přerušování SETUP, načež je paket přenesen do procesoru obslužnou rutinou přerušování prostřednictvím SX2 registrů EP0BUF, SETUP a EP0BC (adresy 0x31–0x33).

Požadavky transakcí typu control se skládají z jedné až tří částí. Formát první — tzv. *setup stage* — je uveden v tab. 2. Podle potřeby následují *data-stage* a *status-stage*. Setup-stage je využívána k odesílání řídicích příkazů pro spektrometr z obslužného programu pro PC, přičemž případná odpověď ze spektrometru (pokud se nejednalo o příkaz k vyslání velkého množství dat) je vrácena v data-stage.

---

<sup>18</sup>Nibble = 4 bity

ofset	označení	velikost [B]	obsah	popis
0	RequestType	1	bitová mapa	<p>charakter požadavku</p> <p>bit 7 směr toku dat 0 = host to device 1 = device to host</p> <p>6–5 typ 0 = Standard 1 = Class 2 = Vendor 3 = Reserved</p> <p>4–0 příjemce 0 = Device 1 = Interface 2 = Endpoint 3 = Other 4–31 = Reserved</p>
1	Request	1	hodnota	číslo požadavku
2	Value	2	hodnota	pole o velikosti 1 slova jehož význam závisí na konkrétním požadavku
4	Index	2	index/ofset	pole o velikosti 1 slova jehož význam závisí na konkrétním požadavku; typicky se používá k předávání indexu nebo relativního posunutí
6	Length	2	počet	počet bytů které je nutné přenést, vyžaduje-li požadavek data-stage

Tabulka 2: Formát setup-stage paketu při transakci typu *control*.

## Ovladač USB

Ovladač se skládá ze dvou částí – obslužné rutiny přerušeni a sady funkcí, zajišťující vlastní komunikaci s jednotlivými EP.

Obslužná rutina přerušeni z EP0 přečte ISB a podle něj nastaví proměnné, které slouží jako příznaky pro ostatní rutiny pracující s SX2. Rozhraní ovladače je pak tvořeno funkcemi USB\_Write\_Register, USB\_Read\_Register, USB\_EPx\_Write a USB\_EPx\_Read.

Obsluha jednotlivých požadavků je pak zajišťována v rámci nekonečné smyčky hlavního programu, přičemž obsluhovány jsou jen požadavky typu Vendor, ostatní jsou odloženy (*stall*):

```
:
StallRequest:
    ax1 = SX2REG_SETUP;
    ax0 = 0xff;                // vymazání požadavku z SX2:
    call USB_Write_Register;   // SX2 reg. SETUP <- 0xFF
WaitCommand:                  // čekání na Vendor Request
    ar = dm(GOT_SETUP);
    ar = pass ar;
    if eq jump WaitCommand;    // if (got_setup == FALSE) čekat
    ar = FALSE;                // SX2 přijal paket "control"
    dm(GOT_SETUP) = ar;        // got_setup <- FALSE
    ax1 = SX2REG_SETUP;        // načtení setup-stage paketu
    l0 = 0;
    i0 = USB_SETUP;
    cntr = 8;                  // celkem 8 bytů
    do ReadSetup until ce;     // while (CNTR != 0) {
        call USB_Read_Register; // AX0 <- obsah SX2 reg. SETUP
        dm(i0 += 1) = ax0;      // usb_setup[I0++] <- AX0
ReadSetup: nop;                // }
    ax1 = dm(USB_SETUP);
    ax0 = 0x60;
    ar = ax1 and ax0;
    ar = ar - 0x40;            // if ((usb_setup[0] & 0x60) != 0x40)
    if ne jump StallRequest;   // není to Vendor Req => stall
:
:
```

Následující úsek kódu je příkladem obsluhy požadavku nastavení hodnoty prahového napětí (registr MX0 obsahuje pole Value, MX1 pak Length; podrobnosti – viz tab. 2):

```
Set_Threshold:
    ar = pass mx1;
    if ne jump StallRequest;   // if (setup_length != 0) => chyba
    ax1 = mx0;
    call SetThrd;              // threshold <- setup_value
    iopg = USB_Interface_Page; // zařízení = řadič USB (SX2)
    ax1 = SX2REG_EPOBC;
```

```

ax0 = 0; // potvrzení požadavku, 0 bytů zpět:
call USB_Write_Register; // SX2 reg. EPOBC <- 0
jump WaitCommand; // čekat na další příkaz

```

### 6.3 Obslužný program pro PC

Se spektrometrem je možné z PC komunikovat prostřednictvím obslužného programu, který je postupně vyvíjen pro MS Windows pomocí VisualC++. Tento program využívá služeb ovladače EZ-USB pro Windows, který dodává firma Cypress ke svým obvodům zdarma (soubor EZUSB.SYS). Pokud je ovladač zaveden, je po připojení SX2 k USB vytvořen speciální soubor ezusb-0 (pokud je na sběrnici přítomen jen jeden řadič SX2) zastupující spektrometr ve Windows. Komunikace pak probíhá pomocí standardního rozhraní Windows pro práci se zařízeními – pomocí funkcí CreateFile() a DeviceIoControl(). Inicializace se provádí otevřením speciálního souboru „ezusb-0“:

```

#include "ezusbsys.h"

HANDLE ezusb;

int main()
{
    (...)

    ezusb = CreateFile("\\\\.\\ezusb-0",
                      GENERIC_WRITE,
                      FILE_SHARE_WRITE,
                      NULL,
                      OPEN_EXISTING,
                      0,
                      NULL);

    (...)
}

```

Požadavek k odeslání spektra ze spektrometru do počítače je uskutečněn následovně:

```

VENDOR_OR_CLASS_REQUEST_CONTROL vrequest;

(...)

vrequest.direction = 1; // směr požadavku: zařízení -> počítač */
vrequest.requestType = 2; // typ požadavku: Vendor Request */
vrequest.receipient = 0; // požadavek vyřizuje: spektrometr */
vrequest.request = VREQ_GET_SPECT; // název požadavku */

if (!DeviceIoControl(ezusb,
                    IOCTL_EZUSB_VENDOR_OR_CLASS_REQUEST,
                    &vrequest,

```

```
        sizeof(VENDOR_OR_CLASS_REQUEST_CONTROL),
        &spect_size,
        sizeof(short),
        &nBytes,
        NULL) || nBytes != 2) {
    (...obsluha chyby...)
}
```

Aby bylo možné testovat funkčnost USB rozhraní, byl vytvořen jednoduchý obslužný program pro Windows. V budoucnosti se předpokládá vývoj pokročilejší verze programu srovnatelné s profesionálním software. Vývoj takového programu ovšem výrazně překračuje rámec této diplomové práce.

## 7 Měření provedená na prototypu

Na prototypu byla provedena některá předběžná měření spíše kvalitativního charakteru, neboť — jak již bylo uvedeno — při jeho konstrukci bylo třeba přikročit k dílčím změnám, které se sice netýkají podstaty funkce spektrometru, ale mají negativní vliv na kvalitu signálu vstupujícího do A/D převodníku. Kvůli úspoře paměti RAM byla všechna měření provedena při rozlišení A/D převodníku na úrovni 12 bitů, tj. 4096 kanálů, přičemž signál o napětí 0 V odpovídá zhruba polovině tohoto rozsahu, tj. asi 2048. kanálů<sup>19</sup>. Vstup prototypu vyžaduje signál v intervalu 0 až +1 V. Pro všechna spektrometrická měření byla použita následující sestava:

- Si detektor s povrchovou bariérou + kombinovaný zářič (<sup>241</sup>Am, <sup>239</sup>Pu, <sup>244</sup>Cm) umístěný ve vakuu
- zdroj předpětí detektoru: Ortec 660 nastavený na +45 V
- předzesilovač: výrobce Pevot
- spektroskopický zesilovač: Canberra 2024
- spektroskopický A/D převodník: Canberra 8701 (rozlišení 13 bitů).

K měření elektrických parametrů byl použit generátor funkcí Agilent 33250A.

Na obr. 22 jsou uvedeny průběhy impulsů alfa částic po zesílení a gaussovském vytvarování na 0,5 – 1,0 – 2,0  $\mu$ s tak, jak byly navzorkovány spektrometrem (rozdílná napětí začátků a konců impulsů jsou způsobena vysokou hysterezí komparátoru, který byl použit v prototypu).

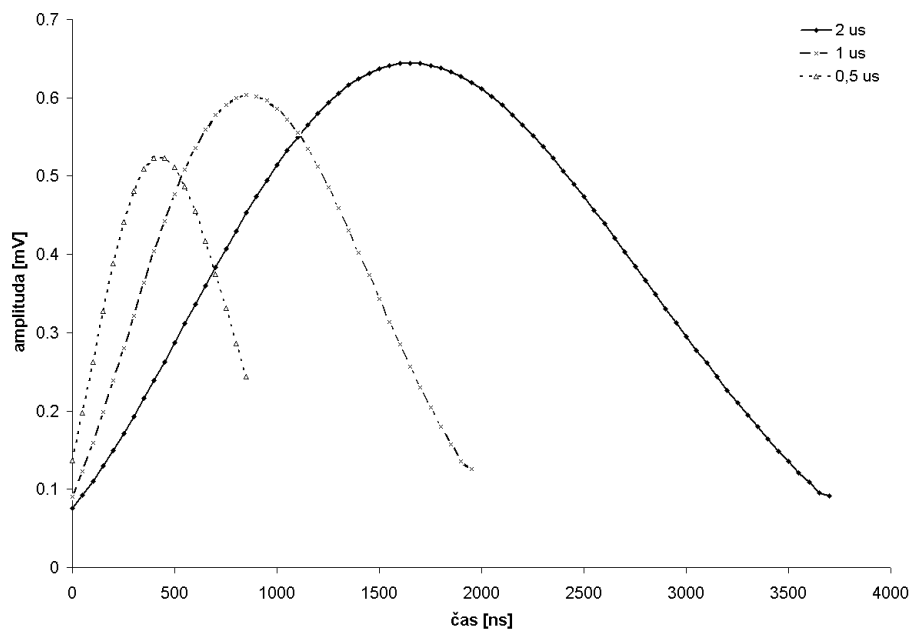
Pro posouzení linearitu a šumových vlastností bylo provedeno následující měření:

Pomocí generátoru funkcí byl na vstup prototypu přiveden sinusový signál o kmitočtu 2 kHz, jehož napětí bylo po desetisekundových intervalech zvyšováno od 50 do 1050 mV po konstantních krocích. Z grafu na obr. 23 je patrná minimální odchylka od lineární závislosti napětí změřeného spektrometrem na přesném napětí generátoru funkcí. Průměrná velikost této odchylky činí 6 mV, hodnoty se pohybovaly v rozsahu od 2 do 20 mV.

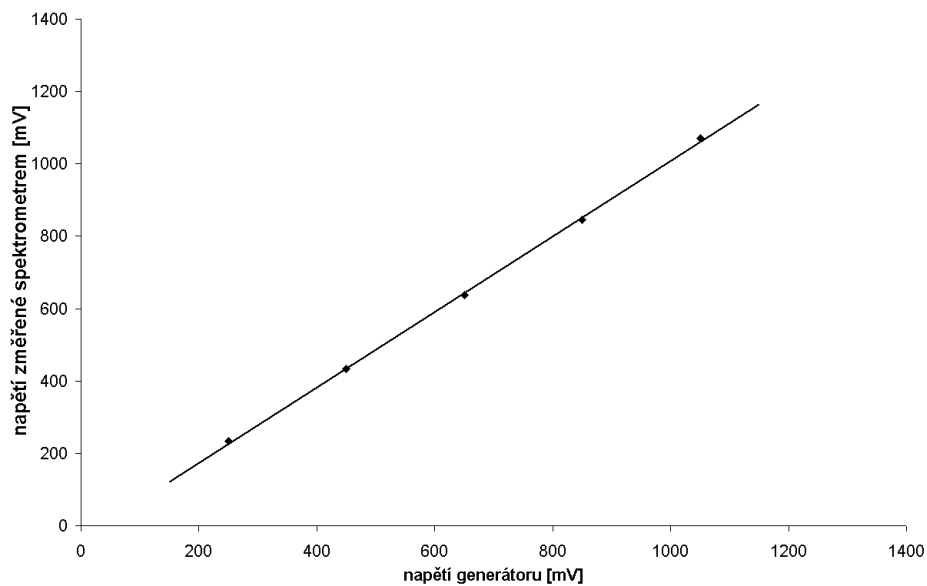
K posouzení šumu byla zpracována závislost středních kvadratických odchylek píků získaných postupem popsáním výše na velikosti napětí generátoru funkcí. Graf této závislosti je uveden na obr. 24. Velikost středních kvadratických odchylek naměřených píků závisí na amplitudě šumu nasuperponovaného na užitečný signál. Velikost odchylek roste úměrně s rostoucí amplitudou signálu na vstupu od 0,6 do 1,1 mV.

---

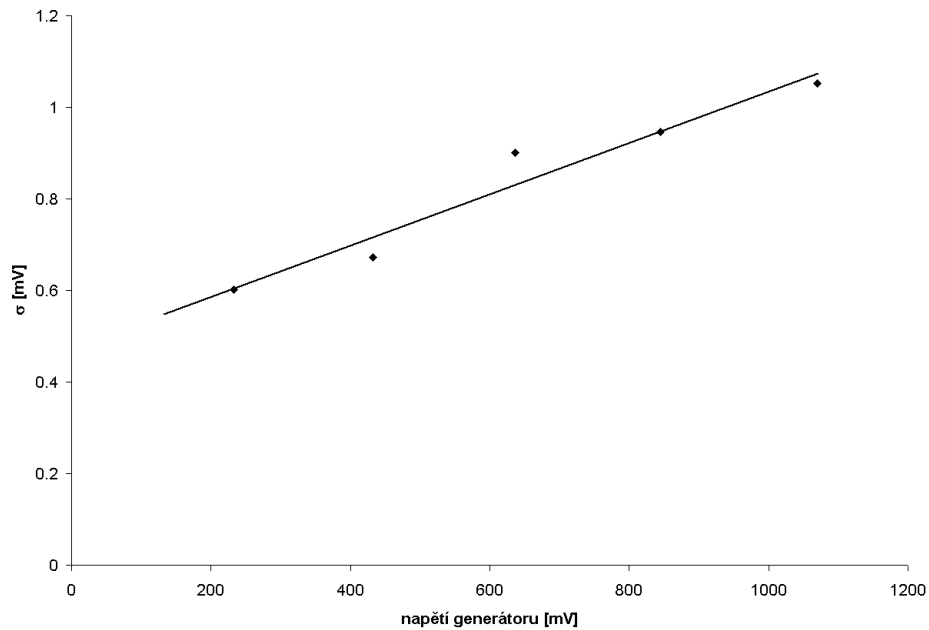
<sup>19</sup>Tato hodnota je přibližná z důvodu vždy přítomné odchylky napětí na trase D/A – komparátor – A/D.



Obrázek 22: Tvary píků s gaussovským tvarováním navzorkované spektrometrem; tvarování nastaveno na  $0,5 \mu s$ ,  $1 \mu s$  a  $2 \mu s$ .



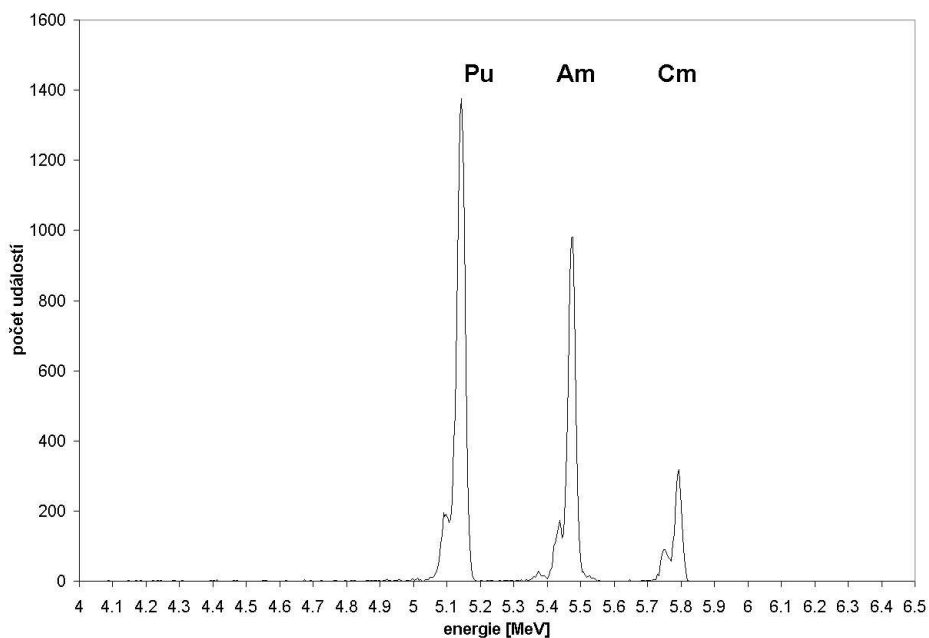
Obrázek 23: Závislost napětí změřeného spektrometrem na přesném napětí z generátoru.



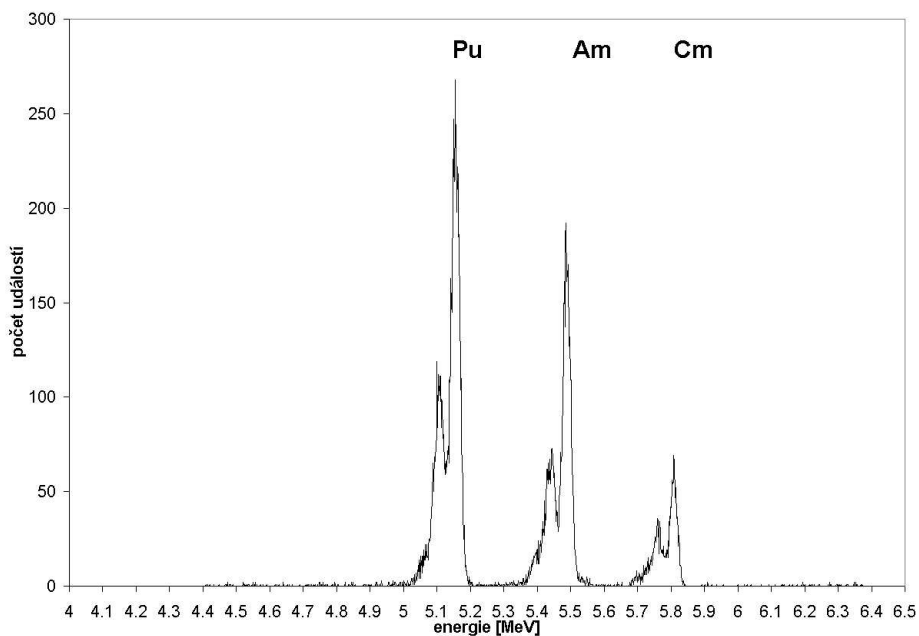
Obrázek 24: Závislost šumu na vstupním napětí.

Spektrum zářiče naměřené pomocí prototypu spektrometru je uvedeno na obr. 25 (údaje o spektrálních čarách – viz tab. 4). Spektrum získané pomocí spektroskopického A/D převodníku je uvedeno na obr. 26. Doba měření byla u obou shodná – 300 s, tvarování bylo nastaveno na  $1 \mu\text{s}$ . Pro snadnou orientaci byly naměřené údaje zpracovány do tab. 3.





Obrázek 25: Alfa spektrum kombinovaného zářiče změřené na spektrometrické trase detektor – předzesilovač Pevot – zesilovač Canberra 2024 – prototyp spektrometru; rozlišení: 12 bitů.



Obrázek 26: Alfa spektrum kombinovaného zářiče změřené na spektrometrické trase detektor – předzesilovač Pevot – zesilovač Canberra 2024 – A/D převodník Canberra 8701; rozlišení: 13 bitů.

zářič	tabulková data	prototyp		Canberra 8701	
	$\mu$ [MeV]	$\mu$ [MeV]	FWHM [keV]	$\mu$ [MeV]	FWHM [keV]
<sup>239</sup> Pu	5,15	5,14	26	5,15	29
<sup>241</sup> Am	5,49	5,47	26	5,49	29
<sup>244</sup> Cm	5,81	5,79	21	5,81	28

Tabulka 3: Parametry píků Am, Cm, a Pu získané pomocí prototypu spektrometru a pro porovnání také pomocí spektroskopického A/D převodníku. Hodnoty se vztahují vždy k nejintenzivnější čáře zářiče.

izotop	energie čar [MeV]	zastoupení [%]
<sup>239</sup> Pu	5,1534	88,4
	5,1046	11,5
<sup>241</sup> Am	5,4857	86,0
	5,4429	12,7
	5,3890	1,3
<sup>244</sup> Cm	5,8049	76,6
	5,7629	23,3

Tabulka 4: Izotopy kombinovaného kalibračního alfa zářiče.

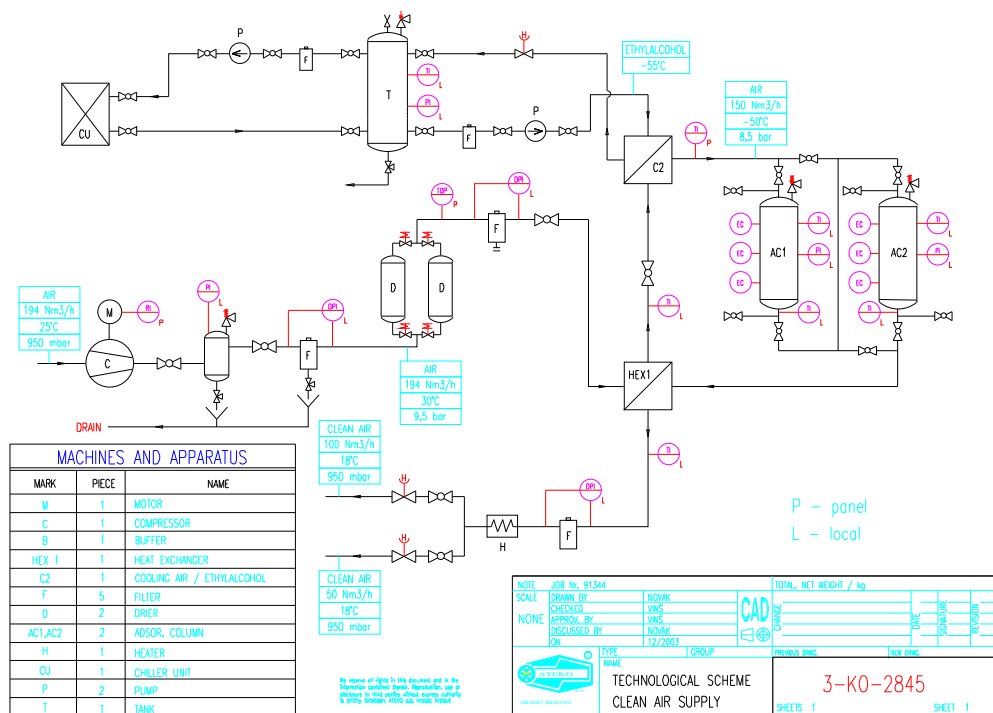


Obrázek 27: Vzduchotěsný obal detektoru NEMO 3 proti radonu.

## 8 Testování zařízení pro odstraňování Rn ze vzduchu

Jak již bylo popsáno v kapitole 1, tvoří pozadí způsobené radonem v experimentu NEMO 3 hlavní část pozadového signálu. Úroveň aktivity radonu ve vzduchu v podzemní laboratoři Fréjus je  $10\text{--}20\text{ Bq/m}^3$ . Analýza dat z detektoru NEMO 3 ukazuje, že úroveň radonu na povrchu fólií zdrojů  $\beta\beta$  rozpadu je na úrovni  $\sim 1\text{ mBq/m}^2$ . Tato úroveň  $50\times$  převyšuje vnitřní kontaminaci zdrojů izotopu  $^{214}\text{Bi}$  [30].

Z těchto důvodů bylo rozhodnuto, že je třeba podstatně snížit úroveň radonu pronikajícího do detektoru NEMO 3. Jako první krok byl detektor NEMO 3 zakryt dodatečným vzduchotěsným obalem (květen 2004) – viz obr. 27. Výsledkem bylo snížení úrovně



Obrázek 28: Technologické schéma radonového filtračního zařízení.

radonu uvnitř vzduchotěsného obalu na  $\sim 1 \text{ Bq/m}^3$ . Dalším krokem při potlačení radonubyl návrh a realizace zařízení [30] pro kontinuální odstraňování radonu ze vzduchu s výkonem  $150 \text{ m}^3/\text{hod.}$  s aktivitou výstupního vzduchu  $< 100 \text{ mBq/m}^3$ . Jako základ návrhu posloužil systém vyvinutý v rámci experimentu Superkamiokande [31]. Návrh byl upraven s použitím chlazeného vzduchu na teplotu  $-49$  až  $-55^\circ\text{C}$  a jeho výrobu zajistila firma ATEKO a.s. Technologické schéma je na obr. 28.

Hlavními součástmi protiradonového zařízení jsou kompresor, sušička (rosný bod  $-70^\circ\text{C}$ ), chladič jednotka (rozsah chlazení  $-49$  až  $-55^\circ\text{C}$ ), dva zásobníky s aktivním uhlím (celkem  $950 \text{ kg}$  aktivního uhlí) a ohříváč vzduchu na výstupu ze zařízení (viz obr. 29, 30). Zařízení funguje na principu zachycení radonu na aktivním uhlí a jeho rozpadu v objemu aktivního uhlí. Dobu zachycení radonu v objemu aktivního uhlí je možné vyjádřit jako:

$$T[\text{h}] = k \frac{m}{f} \quad ,$$

kde  $k [\text{m}^3/\text{kg}]$  je parametr závisející na teplotě vzduchu (viz tab. 5) a typu aktivního uhlí (viz tab. 6), který vyjadřuje schopnost aktivního uhlí zachytit radon,  $m [\text{kg}]$  je hmotnost aktivního uhlí a  $f [\text{m}^3/\text{hod}]$  je tok vzduchu.

Jako nejlepší pro daný účel bylo vyhodnoceno aktivní uhlí firmy Silcarbon s označením K48. Zařízení bylo uvedeno do provozu v listopadu 2004.

V rámci diplomové práce byly provedeny základní testy s antiradonovým zařízením, především základní měření aktivity radonu uvnitř vzduchotěsného obalu. K mě-



Obrázek 29: Antiradonové zařízení – zleva: kompresor, vzdušník, sušička vzduchu včetně protiprachového filtru.



Obrázek 30: Antiradonové zařízení – zleva: nádoby s aktivním uhlím, ohřívací zařízení, chladicí agregát.

$t$ [°C]	20	0	-30	-40	-50	-60
$k$ [m <sup>3</sup> /kg]	4	12	53	78	152	272

Tabulka 5: Závislost koeficientu  $k$  na teplotě.

typ akt. uhlí	C46	K48	K847
$k_{-40^\circ\text{C}}$ [m <sup>3</sup> /kg]	95	141	66

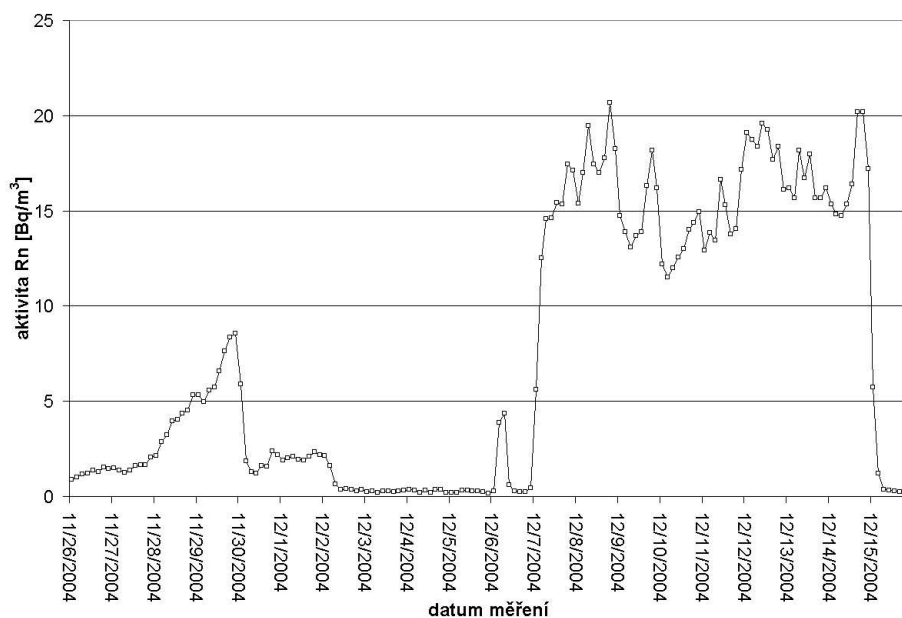
Tabulka 6: Srovnání koeficientu  $k$  pro různé typy aktivního uhlí (výrobce Silcarbon). Měření byla provedena při teplotě  $-40^\circ\text{C}$ .

ření aktivity radonu byl použit vysoce citlivý detektor pro elektrostatickou kolekci [32], který je schopen měřit na úrovni 1 mBq/m<sup>3</sup>. Detektor je PIN fotodioda Hammamatsu 16×16 mm<sup>2</sup>.

První testovací měření probíhalo v termínu od 26. 11. do 16. 12. 2004 v podzemní laboratoři Fréjus. Aktivita radonu byla měřena v horní části vzduchotěsného obalu detektoru NEMO 3 při plné činnosti antiradonového zařízení. Výsledky měření aktivity radonu jsou na obr. 31.

V grafu jsou patrná dvě období zvýšeného obsahu Rn uvnitř obalu detektoru NEMO 3. První z nich bylo způsobeno odstraněním horní části vzduchotěsného obalu (28. 11. – 30. 11.). Během těchto měření byl přívod vzduchu z antiradonového zařízení přiveden k horní části detektoru NEMO 3. Trvale zvýšená aktivita Rn uvnitř vzduchotěsného obalu souvisela s jeho uvolňováním z elektroniky detektoru NEMO 3, která je umístěna ve spodní části detektoru NEMO 3. Z tohoto důvodu byl přívod vzduchu z antiradonového zařízení připojen právě ke spodní části detektoru NEMO 3 (2. 12. 2004). Z obr. 31 je vidět, že toto opatření dále snížilo úroveň aktivity Rn uvnitř vzduchotěsného obalu ( $< 0,3$  Bq/m<sup>3</sup>). Dne 6. 12. byla krátkodobě otevřena vrchní část vzduchotěsného obalu z důvodu vložení neutronových kalibračních zdrojů do detektoru NEMO 3. Ve dnech 7. 12. – 15. 12. 2004 byl z důvodu údržby vypnut kompresor a tudíž také celé antiradonové zařízení nefungovalo. Na obrázku 31 je vidět rychlé zvýšení a následné snížení úrovně aktivity Rn v závislosti na činnosti antiradonového zařízení.

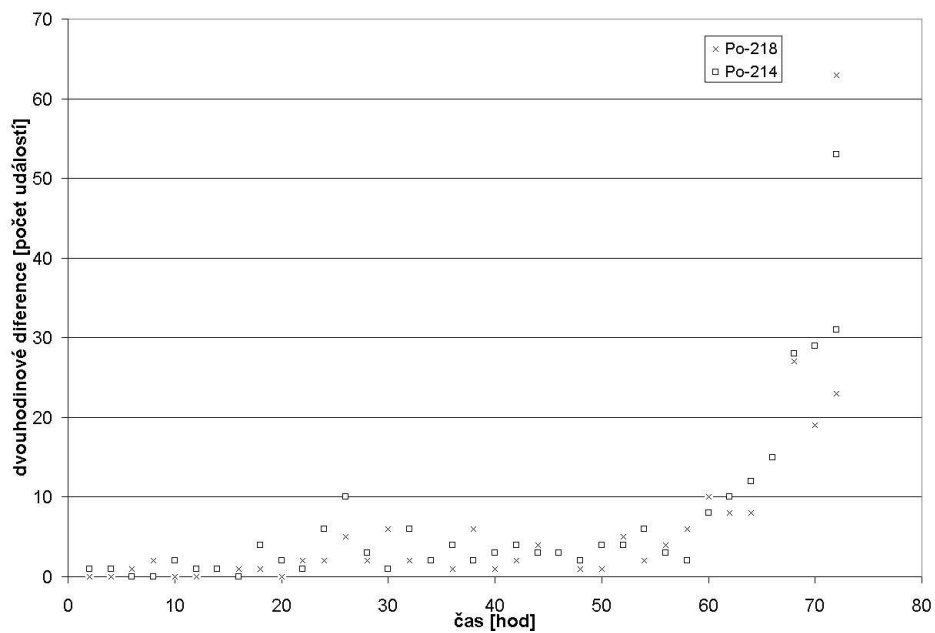
Další testování (činnost antiradonového zařízení v závislosti na teplotě vzduchu vstupujícího do aktivního uhlí) proběhlo v březnu 2005. Od prosince 2004 do začátku března 2005 pracovalo antiradonové zařízení na minimální teplotu  $-56^\circ\text{C}$ . Aktivita radonu ve výstupním vzduchu dosáhla úrovně  $\sim 10$  mBq/m<sup>3</sup>. Prvním testem bylo sledování úrovně aktivity Rn (měřené detektorem Hammamatsu [32]) při změně teploty na  $-50^\circ\text{C}$  (vyšší teplotu zařízení není schopno poskytnout). Po pěti dnech měření byla úroveň aktivity Rn nezměněná ( $\sim 10$  mBq/m<sup>3</sup>). Dalším krokem bylo úplné vypnutí chlazení, teplota vstupního vzduchu do zařízení činila cca  $20^\circ\text{C}$ . Na obr. 32 je vidět časový průběh měření aktivity radonu po vypnutí chlazení. Doba jednoho měření činila 2 hodiny. Z obrázku je zřejmé, že nárůst aktivity radonu ve výstupním vzduchu nastal po cca 60 hodinách, což dává  $k$ -faktor aktivního uhlí K48 pro teplotu  $20^\circ\text{C}$  na úrovni 20 m<sup>3</sup>/kg. Na obr. 33 je vidět časová závislost aktivity radonu ve výstupním vzduchu antiradonového zařízení po zapnutí chlazení ( $-50^\circ\text{C}$ ). Z obrázku je vidět značná časová prodleva vlivu



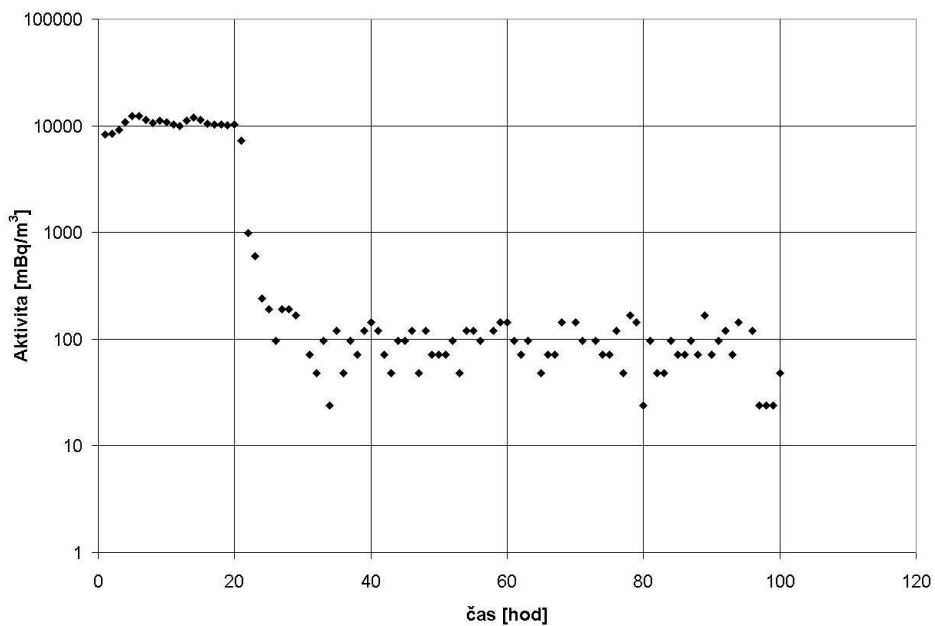
Obrázek 31: Výsledky měření aktivity Rn v horní části vzduchotěsného obalu NEMO 3. Jedno měření trvalo 3 hodiny.

antiradonového zařízení na snížení aktivity radonu na jeho výstupu.

Pro testovací měření byl používán japonský spektrometr vyvinutý v rámci experimentu Superkamiokande. Spektrometr dovoluje měření na úrovni  $\sim 10$  mBq/m<sup>3</sup>. Jeho cena je však značná ( $\sim 7000$  EUR). Podzemní laboratoř Fréjus disponuje pouze 2 ks těchto spektrometrů. Jedním z cílů nově vyvinutého spektrometru v rámci této diplomové práce je jejich využití pro rutinní měření aktivit radonu pro účely experimentu NEMO 3 a podzemní laboratoře Fréjus (např. v několika místech detektoru NEMO 3 či v několika místech podzemní laboratoře, nebo v několika místech antiradonové aparatury apod.). K tomu je potřebná kompaktní forma a nízká cena spektrometru.



Obrázek 32: Časová závislost aktivity Rn po vypnutí chlazení.



Obrázek 33: Časová závislost aktivity Rn po zapnutí chlazení.



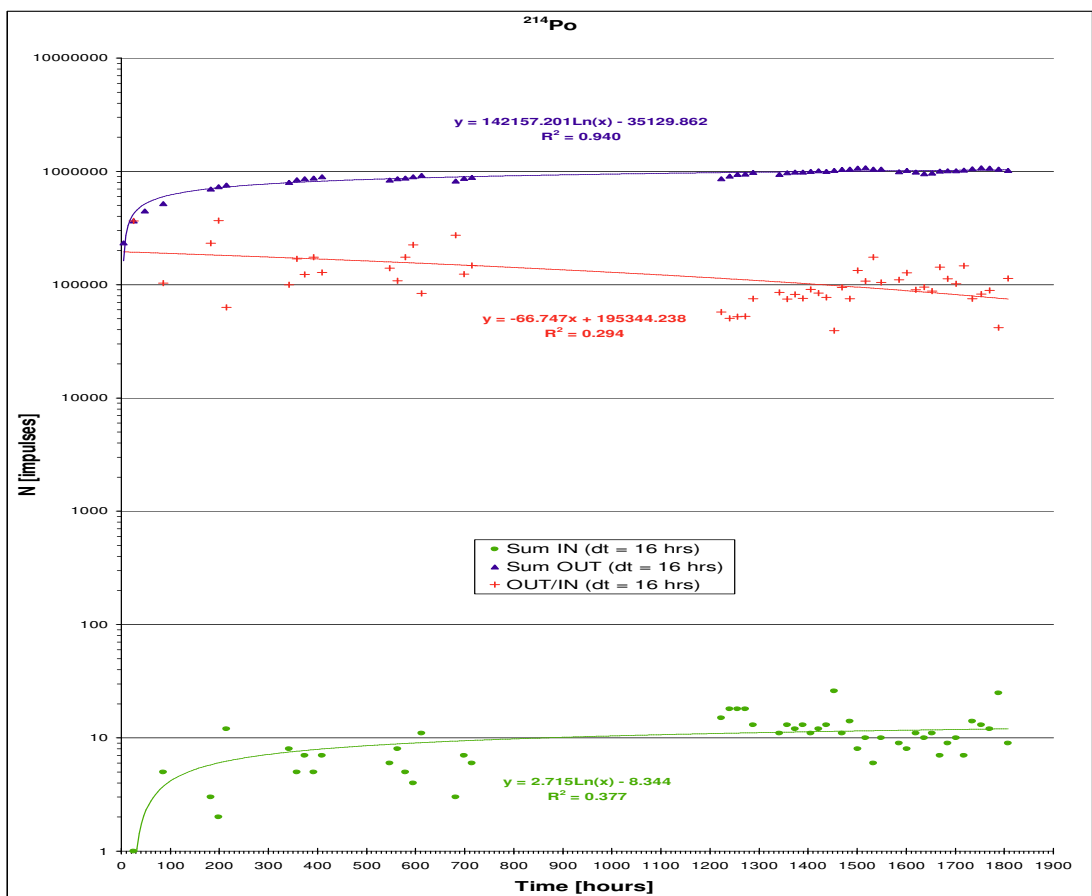
## 9 Měření průchodu radonu prototypem subdetektoru Picasso

Jedním ze zajímavých směrů bádání dnešní fyziky mikrosvěta je detekce temné hmoty. Příkladem experimentu, který se zabývá touto problematikou, je nově budovaný detektor Picasso (např. [33]). Tento detektor je umístěn v podzemní kaboratoři Sudbury–SNO. Detektor je založen na principu detekce zpětného rozptylu jader  $^{19}\text{F}$  indukovaného interakcí neutralin (jeden z kandidátů temné hmoty) s jádry. Tak jako v podobných experimentech je zde velmi důležitá problematika pozadí.

Zdroji pozadí pro detektor Picasso jsou gama záření, MIPS (Minimal Interacting Particles – minimálně interagující částice), neutrony a alfa částice z kontaminace detektoru uranem nebo thoriem. Pozadí od gama záření a MIPS se dají potlačit pomocí nastavení pracovní teploty detektoru, při níž detektor nereaguje na tyto částice. Pozadí způsobené neutrony je možné potlačit pomocí standardního neutronového externího stínění (např. borovaný polyethylen), které sníží energii neutronů pod detekční práh. Obsah uranu nebo thoria uvnitř detektoru je potlačen díky výběru konstrukčních materiálů a čištěním (filtrací) detekčního gelu.

Dalším zdrojem alfa částic je radon, který může pronikat dovnitř detektoru z vnějšího prostředí.

V rámci testování elektrostatické metody byl proveden dlouhodobý test těsnosti prototypu subdetektoru Picasso proti pronikání radonu. Uspořádání experimentu bylo velmi jednoduché, do prototypu subdetektoru byl vložen Si detektor a celý subdetektor byl umístěn do větší nádoby, ve které byl současně další Si detektor a zdroj radonu. Detekce radonu byla prováděna elektrostatickou metodou dlouhodobým měřením alfa spekter dceřiných produktů  $^{218}\text{Po}$  a  $^{214}\text{Po}$  [34]. Celková doba měření činila  $\sim 1800$  hodin. Každou hodinu bylo změřeno a uloženo jedno alfa spektrum, ve kterém byly vyhodnoceny obsahy píků  $^{218}\text{Po}$  (6,00 MeV) a  $^{214}\text{Po}$  (7,69 MeV). Na obr. 34 je časová závislost (1 bod = 16 hodin kvůli větší statistice) koeficientu potlačení radonu v subdetektoru Picasso vyjádřená jako podíl obsahu alfa píků  $^{214}\text{Po}$  měřených ve vnější nádobě a v subdetektoru Picasso. Z těchto dat byl vypočítán průměrný faktor potlačení radonu  $9 \cdot 10^4$  [36], [37], [35].



Obrázek 34: Časová závislost faktoru potlačení radonu prototypu subdetektoru Picasso (data z  $\alpha$ -píku  $^{214}\text{Po}$ ). Horní křivka je časová závislost obsahu píku  $^{214}\text{Po}$  měřená ve vnější nádobě, spodní křivka byla měřena v subdetektoru Picasso. Obsahy píků jsou udávány po dobu měření 16 hodin.

## Závěr

Diplomová práce byla zaměřena na problematiku radonu v nízkopozadových experimentech a především na vývoj kompaktního univerzálního spektrometru. Hlavní použití spektrometru se plánuje pro rutinní měření aktivit elektrostatickou metodou např. v podzemních laboratořích či pro měření difúze radonu různými konstrukčními a stínícími materiály. V rámci diplomové práce byl sestaven testovací prototyp spektrometru založený na DSP procesoru ADSP-21992, využívající ke komunikaci s PC rozhraní USB, a byla vytvořena základní verze obslužného programového vybavení spektrometru. S prototypem spektrometru byla provedena základní testovací měření (s generátorem, se zdroji alfa záření).

Další část diplomové práce je věnována testování antiradonového zařízení v podzemní laboratoři Fréjus pro potřeby experimentu NEMO 3 (dvojitý rozpad beta) a výsledkům dlouhodobého měření průchodu radonu obalem prototypu subdetektoru Picasso (detekce neutralina v podzemní laboratoři SNO).

Na diplomovou práci naváže příprava konečného návrhu desky plošných spojů, výroba spektrometru externí firmou a paralelní vývoj pokročilé verze programového vybavení. Dokončení výroby spektrometru a jeho praktické použití se předpokládá v létě 2006.

## Reference

- [1] Arnold, R. et al.: *Technical design and performance of the NEMO 3 detector*. Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 536, 79–122. 2005.
- [2] Porstendörfer, J.: *Aerosol Sci.* 25, 219, No. 2. 1994.
- [3] Мойсеев, А.А., Иванов, В.И.: *Справочник по дозиметрии и радиационной гигиене*. 336. АТОМИЗДАТ, 1974.
- [4] Kubašta, J.: *Alpha spectrometric study of the mobility of  $^{216}\text{Po}$  ions in gases*. Disertační práce. FJFI-ČVUT, Praha 1999.
- [5] Jakůbek, J., Janout, Z., Koniček, J., Kubašta, J., Pospíšil, S., Fischer, S., Jech, Č.: *Radon and Thoron Monitoring Methods*. CTU Workshop '95, Praha 1995.
- [6] Urban, M., Schmitz, J.: *Radon and Radon Daughters Metrology: Basic Aspects*. Fifth International Symposium on the Natural Radiation Environment. Report CEC EUR 14411EN, Brussels 1993.
- [7] Kotrappa, P.: *Quality assurance programme and EPA-qualifications for electret dosimeters for radon, thoron and tritium*. Friedrichshagener Fachgesprach, Berlin 1992.
- [8] Lucas, H.F., Markun, F., Rundo, J.: *Radon Grab Sampling Using an Aerosol Can*. Health Physics, 60, 443, 1991.
- [9] Koniček, J., Pospíšil, S., Janout, Z., Kubašta, J., Vobecký, M.: *Measurements of Radon in Air using Alpha Spectrometry with Ionization Chamber*. CTU Workshop '96, Praha 1996.
- [10] Janout, Z., Pospíšil, S.: *Měření dceřiných produktů radonu v ovzduší metodou pro-sávání přes filtr*. Acta Polytechnica, 16, IV, 3, ČVUT, Praha 1991.
- [11] Stachovec, K., Janout, Z., Pospíšil, S.: *Measurements of Radon Daughter Products in air by means of a Filtration Method using Alpha Spectrometry*. Acta Polytechnica, Vol. 35, 3, ČVUT, Praha 1995.
- [12] McDaniel, E.W.: *Collision Phenomena in Ionized Gases*. John Wiley & Sons Inc., New York 1964.
- [13] Afonin, A.A., Kotlyarov, A.A., Maksimov, A.Y.: *Instruments and Experimental Techniques*. vol. 46, 1, 107-110, 2003.
- [14] Šeba, J., Sabol, J., Kubálek, J.: *Jaderná elektronika*. ISBN 04-532-77. Praha: SNTL, 1977.
- [15] Jakůbek, J.: *Spektrometr ionizujícího záření řízený mikroprocesorem*. Diplomová práce. FJFI-ČVUT, Praha 1993.
- [16] Keyser, Ronald, Gedcke, Dale, Upp, Daniel, Twomey, Timothy, Bingham, Russel: *A Digital Method for Dead Time Compensation in Nuclear Spectroscopy*. Ortec, PerkinElmer Instruments, Inc., Oak Ridge 2001.

- [17] Canberra Industries: *Performance of Digital Signal Processors for Gamma Spectrometry*. Firemní literatura.
- [18] Universal Serial Bus Specification:  
<http://www.usb.org/developers/docs/usbspec.zip>
- [19] Anderson, D., Dzatko, D.: *Universal Serial Bus System Architecture*. ISBN 0-201-30975-0. USA : MindShare & Addison-Wesley, 2001.
- [20] ADSP-21992 Mixed Signal DSP datasheet:  
<http://www.analog.com/processors/processors/ADSP/dataSheets.html>
- [21] AD8611 Ultrafast 4 ns Single Supply Comparator datasheet:  
[http://www.analog.com/UploadedFiles/Data\\_Sheets/703465986AD8611\\_2\\_0.pdf](http://www.analog.com/UploadedFiles/Data_Sheets/703465986AD8611_2_0.pdf)
- [22] AD5323 Dual Rail-to-Rail 12-bit DAC datasheet:  
[http://www.analog.com/UploadedFiles/Data\\_Sheets/32944159167065AD5303\\_13\\_23\\_a.pdf](http://www.analog.com/UploadedFiles/Data_Sheets/32944159167065AD5303_13_23_a.pdf)
- [23] MAX1932 Digitally Controlled, 0.5 % Accurate Bias Supply datasheet:  
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/ds/MAX1932.pdf>
- [24] 128K×8 (1M bit), 2.7-Volt Read and 2.7-Volt Write, Bottom Boot Parametric Block Flash datasheet:  
<http://www.atmel.com/dyn/resources/prod.documents/doc1110.pdf>
- [25] 16-Mbit (1M×16) Static RAM datasheet:  
<http://www.cypress.com>
- [26] EZ-USB SX2(TM) High-Speed USB Interface Device datasheet:  
<http://www.cypress.com>
- [27] DS1305 Serial Alarm Real-Time Clock datasheet:  
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/ds/DS1305.pdf>
- [28] MAX5082 1,5 A, 40 V, MAXPower Step-Down DC-DC Converter:  
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/ds/MAX5082.pdf>
- [29] MAX1953-MAX1957 Low-Cost, High-Frequency, Current-Mode PWM Buck Controller:  
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/ds/MAX1953-MAX1957.pdf>
- [30] Štekl, I. et al.: *Radon trapping factory in the Fréjus underground laboratory*. Radon Conference, July 30, 2004.
- [31] Takeuchi, Y. et al.: . Phys. Lett. B452, 418-424. 1999.
- [32] Mitsuta, C. et al.: . Nucl. Instr. Meth. A497, 414-428. 2003.
- [33] Hamel, L.A. et al.: *A superheated droplet detector for dark matter search*. Nucl. Instr. Meth. A388, 91-99, 1997.

- [34] Janout, Z. et al.: *Determination of Radon in air using Alpha particle detector*. Collect. Czech Chem. Commun., 62, 1997.

**Publikace a vystoupení na konferencích, na nichž se podílel autor diplomové práce:**

- [35] Bočan, J., Bočarov, V., Čermák, P., Koníček, J., Pospíšil, S., Štekl, I.: *Suppression of the Radon background by a prototype Picasso emulsion container*. Proceedings of 4th European Conference on Protection against Radon at Home and at Work, ISBN 80-01-03009-1, 2004.
- [36] Štekl, I., Pospíšil, S., Čermák, P., Bočan, J., Koníček, J., Bočarov, V.: *Measurement of Radon penetrability of the Picasso emulsion container*. Picasso Note PSTR\_03\_009, 2004.
- [37] Štekl, I., Pospíšil, S., Čermák, P., Bočan, J., Koníček, J., Bočarov, V.: *Improved results of Radon penetrability of a Picasso emulsion container*. Picasso Note PSTR\_04\_012, 2004.



## Dodatek B – Hodnoty součástek

### Komparátor, DAC, RTC (str. 29)

R1	...	5K6	C1	...	M1	L1	...	600
R2	...	5K6	C2	...	M1	L2	...	600
			C3	...	M1	L3	...	600
X	...	krystal 32768 kHz						

### Zdroj předpětí pro detektor (str. 30)

R1	...	820	C1	...	1M	L1	...	100M
R2	...	27K	C2	...	220K	L2	...	330M
R3	...	20K	C3	...	470K/100 V			
R4	...	910K	C4	...	100K/100 V			
R5	...	620K	C5	...	1M/100 V			
R6	...	100K						
R7	...	10K						
D1	...	BAS21						
T1	...	BSS123						

### Externí paměti (str. 32)

C1	...	100K	L1	...	600
C2	...	100K	L2	...	600

### Řadič EZ-USB (str. 36)

R1	...	100	C1	...	100K	L2	...	7 × 600K
R2	...	100K	C2	...	22			
R3	...	100K	C3	...	22			
R4	...	2K2	C4	...	10M			
R5	...	2K2	C5	...	2M2			
			C6	...	100K			
			C7	...	7 × 100K			
Q1	...	krystal 24 MHz						
D1	...	1N4148						
IC1	...	74HC30						
IC2	...	74HC32						



### Zdroje napájecích napětí (str. 38)

R1	...	52K	C1	...	68	L1	...	600
R2	...	10K	C2	...	470	L2	...	600
R3	...	52K	C3	...	10M	L3	...	600
R4	...	10K	C4	...	4M7			
R5	...	4K02	C5	...	3 × 22M			
R6	...	187	C6	...	100K			
R7	...	6K81	C7	...	100K			
R8	...	3K01	C8	...	1500			
R9	...	1M4	C9	...	270M			
R10	...	301K	C10	...	270M			
			C11	...	270M			
			C12	...	68			
			C13	...	470			
			C14	...	10M			
			C15	...	4M7			
			C16	...	3 × 22M			
			C17	...	100K			
			C18	...	100K			
			C19	...	1500			
			C20	...	270M			
			C21	...	270M			
			C22	...	270M			
			C23	...	100K			
			C24	...	10M			
			C25	...	47M			
			C26	...	100K			
			C27	...	100K			
			C28	...	6K8			
			C29	...	22K			
			C30	...	820			
			C31	...	47K			
D1	...	CMPSH1-4						
D2	...	CMPSH1-4						
D3	...	CMPSH1-4						
D4	...	CMPSH1-4						
D5	...	1N4148						
T1	...	FDS6898A						
T2	...	FDS6898A						
T3	...	FDS6898A						
T4	...	FDS6898A						
IC1	...	74HC30						
IC2	...	74HC32						