# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

Katedra fyziky Obor: Fyzikální technika



# BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Kalibrace proudového režimu systému měření hustoty neutronového

toku

Calibration of current regime of neutron flux measurement system

Vypracoval: Zdeněk Preclík Vedoucí práce: doc. Ing. Martin Kropík CSc.

Praha, 2015



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE **FAKULTA JADERNÁ A FYZIKÁLNĚ INŽENÝRSKÁ** PRAHA 1 - STARÉ MĚSTO, BŘEHOVÁ 7 - PSČ 115 19



Katedra: fyziky

Akademický rok: 2014/15

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Posluchač: Zdeněk Preclík

Obor: Fyzikální technika

Název práce: Kalibrace proudového režimu systému měření hustoty neutronového toku

*Název práce:* Calibration of current regime of neutron flux measurement system *(anglicky)* 

Osnova:

- 1. Seznamte se se systémem ochran a regulace školního reaktoru VR-1.
- 2. Prostudujte systém měření hustoty neutronového toku, zvláštní pozornost věnujte kanálu provozního měření výkonu a proudovému režimu štěpné komory.
- 3. Podrobně studujte algoritmus výpočtu proudu v systému s logaritmickým zesilovačem.
- 4. Navrhněte metodiku kalibrace proudového systému kanálu provozního měření výkonu s využitím moderní instrumentace.
- 5. Realizujte automatizovaný systém pro provádění kalibrace.
- 6. Výsledky diskutujte v závěru bakalářské práce.

#### Doporučená literatura:

[1] Požadavky Státního úřadu pro jadernou bezpečnost na výzkumná jaderná zařízení pro zajištění jaderné bezpečnosti, radiační ochrany, fyzické ochrany a havarijní připravenosti, Bezpečnostní návod SÚJB, 2004

[2] M. Kropík: Inovace systému ochran a řízení školního reaktoru VR 1, článek v časopisu Bezpečnost jaderné energie, 5-6/2014

[3] Systém provozního měření výkonu, dataPartner s.r.o., České Budějovice, 2007

[4] Převodník pro neutronovou komoru, dataPartner s.r.o., České Budějovice, 2008

[5] V. Haasz a kolektiv, Číslicové měřicí systémy, vydavatelství ČVUT, Praha, 2000

[6] Firemní dokumentace Agilent Technologies k měřicím přístrojům a software

Jméno a pracoviště vedoucího bakalářské práce:

doc. Ing. Martin Kropík, CSc., FJFI ČVUT

Do bakalářské práce se vkládá zadání a dále na stranu předcházející obsahu abstrakt a klíčová slova. Součástí zadání bakalářské práce je její uložení na webové stránky katedry fyziky a zaslání abstraktu a klíčových slov ve formátu WORD na e-mailovou adresu katedry fyziky: kf@fjfi.cvut.cz

Datum zadání bakalářské práce: 16.10.2014

Termín odevzdání bakalářské práce: 07.07.2015

Děkan Vedoucí katedry

#### V Praze dne 16.10.2014

#### Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd...) uvedené v přiloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti použití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne..... Podpis.....

Abstrakt: V této práci je zpracována problematika kalibrace systému určenému k měření hustoty toku neutronů v proudové oblasti. Teoretická část se zabývá systémem ochran a regulace školního reaktoru VR-1, načež je pozornost soustředěna na systém měření hustoty neutronového toku, zejména pak na kanál provozního měření výkonu a proudový režim štěpné komory. Vzhledem k cíli práce, jímž je navržení a realizace kalibrace, je třeba rovněž se seznámit se principem, na jehož základě pracuje logaritmický zesilovač, a způsobem, jímž je v systému s logaritmickým zesilovačem vypočítáván proud. Na teoretickou část navazující část praktická spočívá v již zmíněném návrhu kalibrace a její řešení pomocí softwaru VEE.

Klíčová slova: kalibrace, logaritmický zesilovač, neutronová komora, proudový režim, VEE

Abstract: In this work is processed the problematics of calibration of a neutron flux measurement system. Its theoretical section is dealing with a security and regulations system of the reactor VR-1, with a special focus on a neutron flux density measurement system, especially the issue of the power measurement channel and the current regime of a chamber. In view of the goal of the work, which is draft and realization of a calibration, it is necessary to know the principle of the work of a logarithmic amplifier as well as the principle of the current counting using logarithmic amplifier. Theoretical section is following by practical part which is dealing with a draft of a calibration and its realization using VEE software.

Key words calibration, logarithmic amplifier, neutron chamber, current regime, VEE

#### Seznam zkratek:

- *HK* havarijní kanály
- MK měřící kanály
- $NVO\quad$ nezávislá výkonová ochrana
- PMV provozní měření výkonu
- RMS root mean square
- SMU source/measure unit
- $SO\check{R}$  systém ochran a řízení
- *VEE* Visual Engineering Environment

**Poděkování:** Děkuji panu docentovi Kropíkovi za užitečné rady, které mi pomohly při práci, a za jeho mimořádnou trpělivost.

# Obsah

1	l Úvod							
2 Požadavky SÚJB na ochranný a řídicí systém								
3	Syst	Systém ochran a řízení VR-1						
	3.1	Původní SOŘ $\ldots$	16					
	3.2	Důvody inovace SOŘ	17					
	3.3	Inovovaný SOŘ $\ldots$	18					
		3.3.1 Ochranný systém	18					
		3.3.2 Řídicí systém	20					
		3.3.3 Absorpční tyče	20					
		3.3.4 Rozhraní člověk-stroj	21					
		3.3.5 Systém zálohovaného napájení	21					
	3.4	Shrnutí	22					
4	Pro	vozní měření výkonu	<b>24</b>					
	4.1	Úvod do struktury systému	24					
		4.1.1 Struktura kanálu PMV	24					
	4.2	Úvod - impulzní režim, Campbellův režim a proudový režim	26					
		4.2.1 Impulzní režim	26					
		4.2.2 Campbellův režim	29					
		4.2.3 Proudový režim	29					
	4.3	Postup výpočtu hodnot výkonu	32					
		4.3.1 Postup výpočtu hodnot výkonu v impulzním kanálu	32					
		4.3.2 Postup výpočtu hodnot výkonu v Campbellově kanálu	33					
		4.3.3 Výpočet výkonu v proudovém kanálu	35					
<b>5</b>	Kal	ibrace logaritmického proudového měření	37					
	5.1	Způsob kalibrace	37					
	5.2	Aparatura pro kalibraci	37					
	5.3	Technické vybavení kalibrace	38					

6	Záv	ěr		56
		5.4.2	Software pro kalibraci	46
		5.4.1	Agilent VEE	41
	5.4	Progra	mové vybavení systému kalibrace	40
		5.3.3	Převodník FIBRE/RS232	40
		5.3.2	Generátor B2902A	39
		5.3.1	Převodník pro neutronovou komoru N708	38

# Kapitola 1

# Úvod

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout adekvátní postup kalibrace proudového systému kanálu provozního měření výkonu a především vyvinout systém, který by tuto kalibraci následně prováděl automatizovaně. Z předchozí věty je zřejmé, že aby toto bylo možné realizovat, je třeba poměrně dobře znát podstatu fungování zařízení, pro nějž tento postup a systém bude navrhován. Nejprve proto bude prostudován systém ochran a regulace reaktoru VR-1. Následně proběhne seznámení se se systémem měření hustoty neutronového toku, a to se zaměřením na pro tuto práci klíčový *kanál provozního měření výkonu* (dále v práci pro tento termín bude často používána zkratka PMV) a na proudový režim štěpné komory. V souvislosti s vytyčenými úkoly bude rovněž velmi precizně prostudován princip výpočtu proudu v systému s logaritmickým zesilovačem. Poté co toto bude provedeno, již nic nebude bránit v cestě zaměřit se na realizaci úkolů praktických, jimiž jsou, jak již bylo naznačeno na začátku této kapitoly, navržení postupu kalibrace a jeho následné převedení do reálného programu, jehož pomocí bude tato kalibrace prováděna automaticky.

# Kapitola 2

# Požadavky SÚJB na ochranný a řídicí systém

Slovní spojení 'školní jaderný reaktor' může v někom evokovat dojem, že se jedná o méněcenné zařízení ve srovnání s jadernými reaktory v běžném slova smyslu; je to však představa mylná. I přes milé slovo "skolní" v názvu se jedné o plnohodnotné jaderné zařízení, čemuž odpovídá i vybavení, kterým musí disponovat.

Ve světle výše řečeného je namístě nejprve zmínit rozdíly mezi jednotlivými výzkumnými jadernými zařízeními a specifikovat jejich podstatu.

Výzkumným jaderným zařízením jsou experimentální výzkumné reaktory a kritické soubory, jakož i jejich další experimentální zařízení, uskutečňující ve svých aktivních zónách řízenou štěpnou řetězovou reakci [1].

- Kritickým souborem se rozumí reaktor s omezením maximálně dosažitelného přebytku reaktivity, a to na hodnotu 0,7  $\beta$ ef. Účelem kritického souboru je realizace základních fyzikálních experimentů, k jejichž provedení není třeba vysoké zásoby reaktivity.
- Experimentální reaktor se vedle univerzálnosti konstrukčního řešení aktivní zóny vyznačuje malým výkonem. Narozdíl od reaktoru výzkumného zde není vyžadováno nucené chlazení. Další charakteristika experimentálního reaktoru spočívá v tom, že hustota neutronového toku nepřevyšuje v normálním provozu  $10^{13}$  neutronů $\cdot m^{-2}s^{-1}$ . Hlavním smyslem experimentálního reaktoru je realizace experimentálních aktivit souvisejících s reaktorovou fyzikou.
- V případě reaktoru výzkumného je nutné, jak již bylo naznačeno výše, nuceně odvádět teplo. Je vybaven experimentálním zařízením a přístroji určenými k realizaci vědeckých a technických aktivit výzkumné povahy. Hodnota nejvyššího tepelného výkonu výzkumného reaktoru je 50 MWt.

Nyní se vraťme ke konkrétním požadavkům, které musí vybavení reaktoru, o němž pojednává tento text, splňovat. Toto vybavení zahrnuje:

- Systém řízení a ochrany
- Spojovací systém
- Systém dozimetrické kontroly
- Neutronový zdroj.

Pokud to vyžadují provozní a experimentální podmínky, musí mít navíc reaktor kompenzační systém, jež je součástí výše zmíněného systému řízení a ochrany.

Co se týče systému řízení a ochrany, tak přístroje, z nichž se skládá, musejí zajišťovat sledování, měření, registrování a zabezpečení dálkového ručního i automatického ovládání. Umístění a řešení dalších zařízení, jako jsou ovladače nebo sdělovače, musí být koncipováno tak, aby byl obsluze zajištěn stálý a dostatečný přísun informací týkajících se stavu výzkumného zařízení, a zároveň aby měla obsluha možnost v případě potřeby zasáhnout. Dále je třeba, aby byly systémem řízení a ochrany zprostředkovávány signály a informace ohledně odchylek provozních parametrů a procesů od přípustných mezí. V případě, že nastanou havarijní podmínky, přístroje musí být schopny získávat informace:

- o okamžitém stavu zařízení, které umožní provést příslušná ochranná opatření
- záznam základních informací o průběhu havárie
- potřebné k monitorování a charakterizování případného šíření radioaktivních látek a záření do okolí

Aby bylo možné na relevantní úrovni provádět kontrolu a řízení časového průběhu štěpné řetězové reakce, je třeba, aby systém ochrany a řízení disponoval následujícími zařízeními:

- přinejmenším třemi na sobě nezávislými měřícími kanály vyhodnocujícími výkon, a to tak, aby údaje minimálně ze dvou volitelných kanálů byly zobrazovány a signál z minimálně jednoho volitelného kanálu byl registrován adekvátním způsobem. Údaje z jednotlivých kanálů lze využít za účelem automatického řízení výkonu. Co se týče signálů binárních, které vznikly srovnáním údajů o výkonu se zadanými hodnotami, tak ty by měly být použity k ochranným a signalizačním účelům.
- přinejmenším třemi na sobě nezávislými kanály schopnými měřit rychlost změny výkonu. I zde je třeba, aby údaje minimálně dvou z nich byly zobrazovány a minimálně z jednoho volitelného kanálu musí být registrován signál adekvátním způsobem. Údaje z jednotlivých kanálu lze využít za účelem automatického řízení výkonu. Co se týče signálů binárních, které vznikly srovnáním údajů o výkonu se zadanými hodnotami, tak ty by měly být použity k ochranným a signalizačním účelům.

Je přitom přípustné, aby výše uvedené požadavky byly sloučeny tak, že měřící kanál měří jak výkon, tak i rychlost jeho změny.

Systém ochrany a řízení musí mít ochranný systém schopný identifikovat abnormální podmínky a automaticky spustit zařízení, která provedou odstavení reaktoru. Dále tento systém musí mít ochrannou funkci nadřazenou funkcím ostatním, jakož i činnostem systému ochrany a řízení a činnostem obsluhy, které musí navíc být umožněno, aby kdykoli tuto ochrannou funkci použila bez ohledu na ostatní podmínky. Možnost spuštění této ochranné funkce obsluhou musí být zajištěna nejméně ze dvou míst.

Dále musí být ochranný systém koncipován tak, aby triviální porucha vedla k odstavení reaktoru, v žádném případě však ke ztrátě ochranné funkce systému, dále musí být zajištěno, aby selhání libovolné součástky nebo kanálu nesnížilo počet příslušných součástek respektive kanálů na jeden, a pokud se to přesto stane, musí dojít k odstavení reaktoru. Dále koncepce ochranného systému musí umožňovat zkoušku výše uvedených funkcí kanálů v průběhu provozu; vedle toho musí být umožněno provedení zkoušky funkce společných obvodů přinejmenším za situace, kdy je odstavený reaktor.

Dále systém ochran a řízení, respektive jeho obvody musejí v libovolné provozní fázi zpracovávat (v logice dva ze tří) logické signály k odstavení reaktoru, a to alespoň tří na sobě nezávislých kanálů měření výkonu a nejméně tří na sobě nezávislých kanálů měřících rychlost jeho změny.

Součástí ochranného systému by měly být také na ostatních sekcích *SOŘ* nezávislý systém omezující nejvyšší povolený výkon. Struktura tohoto subsystému by měla být analogická struktuře kanálů měření výkonu.

Reaktor dále musí být vybaven dozornou, která umožňuje bezpečnou a spolehlivou kontrolu jakož i ovládání v normálním a abnormálním provozu a v havarijních podmínkách.

Dále musí být reaktor vybaven nouzovým zdrojem energie pro případ celkové ztráty napájení. Tento zdroj energie musí být schopen zajistit spolehlivou kontrolu zastavení reaktoru a vedle toho musí být schopen provádět odvod zbytkového tepla a kontrolovat průběh tohoto odvodu.

Dalším požadavkem je, že jakmile uplyne doba vyžadovaná projektem, je realizováno bezpečné odstavení reaktoru. Přestože není nutné, aby zálohové napájení bylo bezpauzové, dojde-li k pauze, její doba by neměla překročit dobu nezbytně nutnou pro přepnutí.

Další důležitou oblastí, na níž jsou kladeny požadavky, je oblast kontroly funkční činnosti. Podstatou toho je prověrka kontroly nastavení, kterou musí být systém řízení a ochrany schopen vykonávat spolu s prověrkou kontroly stavu zařízení důležitých pro bezpečnost. K její realizace má dojít před každým zahájením uvádění reaktoru do kritického režimu, jež je úspěšným vyústěním prověrky podmíněno. Prověrka může být realizována manuálně nebo automaticky, zabezpečena však musí být pomocí technických prostředků zabraňujících jejich obejití obsluhou.

Dále je třeba zmínit neutronový zdroj, výlučně jehož pomocí je realizováno uvádění experimentálního reaktoru a kritického souboru do kritického stavu, což platí rovněž pro výzkumný reaktor v případě, že signály neutronových čidel nejsou dostatečné. Koncepce neutronového zdroje musí splňovat následující kritéria:

- Již při množství paliva a moderátoru v aktivní zóně (včetně reflektoru) odpovídajícím dvěma třetinám kritického množství, musejí neutronová čidla v pracovní poloze neutronového zdroje dávat systému řízení a ochrany dostatečný signál.
- Změní-li se reaktivita, musí k ní být změna signálu neutronových čidel dostatečně citlivá
- Signály musejí v odpovídající míře vyjadřovat výkon reaktoru a průběh jeho změn v závislosti na čase

Telekomunikační spojení dozorny s ostatními prostory zařízení musí být koncipováno tak, aby do co nejvyšší míry byla omezena pravděpodobnost chybných manipulací ze strany obsluhy.

Dále je třeba uvést požadavky týkající se řešení aktivní zóny reaktoru v souvislosti s reaktivitou a jejími změnami:

- Řešení aktivní zóny reaktoru musí být koncipováno tak, aby byla možná realizace spolehlivých a přesných změn reaktivity odpovídajících hodnotám provozně uvolnitelného přebytku reaktivity a nejvyšší povolené rychlosti její změny.
- Koncepce systému pro změnu reaktivity musí být taková, aby byla možná přesná a spolehlivá kontrola změny parametru zapříčiňujícího změnu reaktivity. Takovým parametrem je například poloha regulačního orgánu atd.
- Dále musí být zabezpečeno, aby provozně uvolnitelný přebytek reaktivity nepřekročil hodnotu 0,7  $\beta$ ef, a to při jakýchkoli změnách v reaktoru. V případě, že by k překročení uvedené hodnoty došlo, musí následovat bezpečnostní neboli havarijní signál.
- Rychlost kladných změn reaktivity nesmí překročit hodnotu 0,1  $\beta$ ef/s.
- Je nutné zabezpečit, aby kladnou změnu reaktivity nebylo možné realizovat současně pomocí dvou nezávislých způsobů, jako například zvětšováním množství moderátoru v reaktoru probíhajícím současně s vytahováním absorpční tyče.
- Není-li reaktor zastaven, povolené změny reaktivity musejí být prováděny vzdáleně a musejí být přesně sledovatelné a vratné.
- Manipulovat se zařízením, jež je významné z hlediska bezpečnosti, a provádět v aktivní zóně změny nekontrolované a neovládané systémem ochrany a řízení, přichází v úvahu jen

tehdy, je-li hodnota podkritičnosti aktivní zóny minimálně 3  $\beta$ ef a nacházejí-li se výkonné prvky ochranného systému v maximu jejich účinnosti.

Výkonné prvky ochranného systému musejí disponovat schopností zasáhnout takovou rychlostí, aby bylo zajištěno, že během maximálně 2 sekund bude zavedena záporná reaktivita o hodnotě 75 % nejvyššího dosažitelného přebytku reaktivity a během maximálně čtyř sekund bude zavedena záporná reaktivita o hodnotě 150 % maximálně dosažitelného přebytku reaktivity.

Výkonné prvky ochranného systému musejí být koncipovány tak, aby jejich účinnost i bez nejúčinnější skupiny byla oproti nejvýše dosažitelnému přebytku reaktivity přinejmenším o 50 %vyšší.

Možnost přesvědčit se o tom, zda se podařilo splnit výše uvedené bezpečnostní požadavky, se naskytne v následující kapitole.

# Kapitola 3

# Systém ochran a řízení VR-1

Pojem systém ochran a řízení, zkráceně *SOŘ*, se v následujícím textu vyskytuje v souvislosti se školním reaktorem VR-1 provozovaným na Katedře jaderných reaktorů FJFI ČVUT v Praze [2]. Proto nyní budou uvedeny některé parametry zmíněného reaktoru.

Skolní reaktor VR-1, který byl vybudován v průběhu 80. let, je reaktorem bazénového typu o nulovém výkonu [3]. Bližší informace ohledně technických parametrů reaktoru jsou uvedeny v Tabulce 1. K dosažení kritického stavu došlo poprvé 2. prosince 1990.

Jmenovitý výkon	1 kW (tepelný), krátkodobě 5 kW		
Palivo	typ IRT-4M, obohacení pod 20% $^{235}\mathrm{U}$ (dovoz z Ruska)		
Reaktorové nádoby (bazény)	vyrobeny z nerezového materiálu		
průměr nádob	2300 mm		
výška nádob	4720 mm		
tloušťka stěn	15 mm		
tloušťka dna	20 mm		
Stínění reaktoru	nad AZ: voda (cca 3000 mm); boční: voda (cca 850 mm)		
Teplota v reaktoru	pracovní c ca 20 °C, dle teploty okolí		
Chlazení aktivní zóny	přirozenou konvekcí		
Tlak	atmosférický		

Tabulka 1: základní technické údaje reaktoru VR-1.

Z názvu reaktoru lze vytušit jeden z jeho hlavních účelů, jímž je výuka studentů. Vedle toho je využíván k výzkumu a k přípravě budoucích operátorů jaderných elektráren.

Jak bylo uvedeno výše, reaktor VR-1 byl postaven zhruba před 30 lety. Vzhledem k rychlosti, jakou se vyvíjejí technologie, je na místě otázka, jak se původní systém ochran lišil od toho současného.

#### 3.1 Původní SOŘ

Původní *SOR* bylo vyvíjeno v téže době jako sám reaktor, k jeho nasazení do provozu došlo v roce 1991 a jeho nejdéle používané části sloužily až do roku 2007. Skládal se z ochranného systému, řídícího systému a rozhraní člověk-stroj.

Jedinou bezpečnostní akcí, k níž dochází v případě školního reaktoru VR-1, je přerušení napájení regulačním tyčím způsobující jejich pád do aktivní zóny, v důsledku čehož dojde k zastavení štěpné řetězové reakce. Vzhledem k zanedbatelně nízkému maximálnímu výkonu VR-1 a minimálnímu množství štěpných produktů v jeho aktivní zóně, není třeba zabývat se odvodem zbytkového tepla z ní. Ochranný systém původního *SOŘ* vyhodnocoval 3 bezpečnostní parametry, jimiž byly výkon reaktoru, rychlost jeho změny a odchylka od zadaného výkonu vyjadřující procentuální rozdíl mezi skutečným a zadaným (nastaveným) výkonem reaktoru. Hodnoty byly systémem porovnávány s bezpečnostními limity a v případě jejich překročení byl vygenerován bezpečnostní signál, následně vyhodnocován v havarijních obvodech.

Ochranný systém sestával ze dvou subsystémů, jimiž byly měřící kanály a havarijní kanály. První jmenované sloužily k plnorozsahovému měření výkonu reaktoru (respektive hustoty neutronového toku), výpočtu rychlosti změny výkonu a odchylky od uvedeného výkonu. Havarijní kanály rovněž zjišťovaly výkon a rychlost jeho změny, avšak jen v nejvyšších dvou dekádách výkonového rozsahu reaktoru. Zatímco *MK* používaly ke svému účelu štěpnou komoru a v případě nízkých výkonů pracovaly v impulzním, v případě vyšších výkonů pak v proudovém režimu, havarijním kanálům k měření výkonu pomáhaly bórové komory pracující výhradně v režimu impulzním.

Co se týče systému řídícího, tak jeho jádrem byla trojice zálohovaných komunikačních kanálů zajišťujících výpočet průměrných hodnot výkonu, rychlosti jeho změny a odchylky od zadaného výkonu na základě dat z MK. Dále byly řídícím systémem zajišťovány bezpečnostní funkce. Reaktor byl řízen operátorem prostřednictvím rozhraní člověk-stroj, jehož základem byl periferní kanál - počítač řídící rozhraní člověk-stroj, dále tlačítka pro ovládání reaktoru, indikátory pro zobrazování důležitých provozních stavů a liniový zapisovač průběžně zaznamenávající výkon a rychlost jeho změny a tím vytvářející dokumentaci provozu reaktoru. Pokud jde o technické řešení původního SOR, tak jeho základ tvořily mikropočítače sběrnicové konstrukce SAPI-1, jež byly doplněny obvody pro zpracování signálů z neutronových komor.

SOR bylo napájeno dvěma zálohovanými systémy - 220 V <sub>st</sub> (počítače s příslušenstvím) a 48  $V_{ss}$  (pohony regulačních tyčí a havarijní obvody). Systém 220 V <sub>st</sub> tvořila baterie NiCd akumulátorů se střídačem Tyristat, v případě jehož selhání došlo k automatickému připojení systému napájení ke standardnímu síťovému rozvodu, avšak bez možnosti zálohování. Pro realizaci systému 48  $V_{ss}$  sloužily akumulátory s nabíječkou.

#### 3.2 Důvody inovace SOŘ

Navzdory spolehlivému a bezpečnému provozu reaktoru VR-1 zajišťovanému po řadu let původním SOŘ odkryly zkušenosti některé nedostatky. Mezi těmi vážnými je třeba zmínit mechanické provedení původního SOŘ: vzhledem k umístění systému nacházejícímu se v rozvaděči na stěně dozorny byl přístupný pouze z přední strany, a tím pádem všechny jednotky bylo třeba konstruovat jako výklopné, což kráčelo ruku v ruce s mimořádnou námahou kabelových spojů s konektory a s tím spojeným častým přerušením vodičů. Další problém představovala údržba: některé náhradní díly nebyly dostupné a ty, které byly skladem, vinou jejich stárnutí vykazovaly tytéž problémy jako dlouho používané součástky v zařízení.

Z hlediska softwaru pak byl problém například v tom, že byl použit jazyk symbolických adres (assembler), což se ukázalo jako komplikace pro pozdější údržbu a také pro licencování systému.

Dále kvůli redundanci řídícího systému byly výrazně zvýšeny nároky na vnitrosystémovou komunikaci, když například docházelo k situacím, kdy jeden komunikační kanál vyhodnotil čas, v němž došlo ke stisknutí tlačítka, jinak, než ho vyhodnotily kanály ostatní. Proto s sebou inovovaný SOŘ přinesl změnu - řídící systém realizovaný pouze jedním kanálem (počítačem). Dále je namístě zmínit, že v případě výpadku sítě nebyl systém zálohového napájení 220 V odolný vůči jednoduché poruše střídače Tyristat. V důsledku toho byl stanoven cíl vybudovat nový SOŘ, který odstraní nedostatky toho původního a bude pracovat na základě moderní přístrojové a součástkové základny, v důsledku čehož bude zajištěn provoz a údržba nového SOŘ na dobu minimálně 10 let.

Aby terminologie používaná v novém SOR lépe odpovídala funkcím daných částí, došlo ke změnám některých názvů: pro původní pojem měřicí kanály byl zaveden pojem kanály provozního měření výkonu; pro původní pojem havarijní kanály byl zaveden pojem kanály nezávislé výkonové ochrany; pro původní pojem havarijní obvody byl zaveden pojem bezpečnostní obvody a konečně pro dřívější pojem komunikační kanály byl zaveden pojem řídicí systém.

Inovace začala v roce 2001, kdy bylo nahrazeno původní rozhraní člověk-stroj. O rok později byly inovovány bezpečnostní obvody s jakostními bezpečnostními relé a také systém pohonů regulačních tyčí. V následujících letech pak byly inovovány rovněž řídicí systém, nezávislá výkonová ochrana a v roce 2007 bylo celé SOŘ přesunuto do místnosti disponující výrazně lepší prostorovou dispozicí a s ní spojeným oboustranným přístupem k rozvaděčům SOŘ. O tři roky později pak bylo instalováno nové programové vybavení rozhraní člověk-stroj a také došlo k vytvoření serveru pro zaznamenávání historie provozu reaktoru.



Obrázek 3.1: Schéma inovovaného systému ochran a řízení školního reaktoru VR-1

#### 3.3 Inovovaný SOŘ

Zásadní rozdíl, jímž se struktura inovovaného SOŘ liší od struktury původního systému, je to, že řídící systém již není redundantní; pro řízení tyčí je použita sběrnice Profibus; komunikaci mezi řídícím systémem a rozhraním člověk-stroj zajišťuje počítačová síť Ethernet; pro systémovou komunikaci je použita sériová asynchronní komunikace založená na vláknové optice mezi systémy nezávislé výkonové ochrany, provozního měření výkonu a řídícím systémem. Z hlediska vlivu na jadernou bezpečnost lze SOŘ rozdělit na tři základní části, jimiž jsou ochranný systém, řídící systém a rozhraní člověk-stroj.

Schéma SOŘ je znázorněno na obrázku 3.1.

#### 3.3.1 Ochranný systém

Z hlediska jaderné bezpečnosti lze za nejdůležitější systém SOŘ považovat ochranný systém jaderného reaktoru. Tvoří jej 4 kanály provozního měření výkonu a 4 kanály nezávislé výkonové ochrany. V režimu měření se však nacházejí nejvýše tři kanály provozního měření výkonu, respektive nezávislé výkonové ochrany, jejichž bezpečnostní signály jsou vyhodnocovány v logice "dva ze tří", přičemž čtvrtý kanál má rozpojené bezpečnostní relé a nachází se v režimu "záloha". Přepnutím tohoto kanálu do režimu "měření"může být nahrazen jeden z původně aktivních kanálů v případě jeho výpadku.

Bezpečnostní řetězec zajišťuje, aby se 4 kanály provozního měření výkonu, respektive nezávislé výkonové ochrany nemohly současně nacházet v režimu "měření". Dojde-li k tomu, bezpečnostní řetězec se rozpojí a dojde k odstavení reaktoru.

#### 3.3.1.1 Kanály provozního měření výkonu

Podstatu kanálů provozního měření výkonu tvoří průmyslová PC, jež jsou doplněna obvody zpracovávajícími signály z komor, dále iniciace bezpečnostní akce, respektive řízení bezpečnostních signálů a komunikace v SOŘ. Činnost PMV spočívá ve zpracování signálů ze širokopásmových nekompenzovaných štěpných komor PMVK typu RJI300 s ohledem na výkon reaktoru v Campbellovském, proudovém a impulzním režimu. Dále kanály PMV vyhodnocují okamžitý výkon reaktoru a rychlost jeho změny; tyto hodnoty porovnají s bezpečnostními limity a překročí-li je, pak kanály PMV rozpojí svá bezpečnostní relé, čímž dojde k aktivaci bezpečnostního řetězce rozhodujícího o bezpečnostním odstavení reaktoru. Vedle toho kanály PMV předávají provozní data na individuální displeje jednotlivých kanálů a řídícímu systému.

#### 3.3.1.2 Kanály nezávislé výkonové ochrany

Na rozdíl od kanálů PMV, které zaznamenávají výkon reaktoru v celém výkonovém rozsahu, kanály nezávislé výkonové ochrany určují výkon a jeho změnu jen přibližně v posledních 20 procentech rozsahu. Stav reaktoru monitorují pomocí bórových komor NVOK a signály z nich získané vyhodnocují v impulzním režimu. Podobně jako kanály PMV, rovněž kanály NVO při překročení bezpečnostních hranic aktivují bezpečnostní řetězec rozpojením svých bezpečnostních relé. Kromě řídícího systému jsou data kanálů NVO předávána rovněž na jejich individuální displeje a řídícímu systému.

#### 3.3.1.3 Bezpečnostní řetězec

Účelem výše zmíněného bezpečnostního řetězce, který je tvořen reléovým systémem sestávajícím z kvalitních bezpečnostních relé, je vyhodnocení logiky "dva ze tří" pro bezpečnostní signály zprostředkované kanály NVO a PMV. Vedle toho řetězec vyhodnocuje bezpečnostní signál z řídícího počítače v logice "jeden z jednoho". Pokud dojde k aktivaci "dvou ze tří" PMV, respektive NVO, případně jakéhokoli bezpečnostního signálu řídícího počítače, rozpojením bezpečnostního řetězce dojde k přerušení napájení magnetů regulačních tyčí, které následně spadnou do svých dolních koncových poloh, a tím pádem se zastaví štěpná řetězová reakce.

#### 3.3.1.4 Bezpečnostní a varovné úrovně

Rozhodování systému ochran a řízení o bezpečném provozu školního jaderného reaktoru je založeno na vyhodnocování bezpečnostných proměnných, jimiž jsou: výkon, rychlost jeho změny a velikost odchylky od zadaného výkonu. V případě překročení bezpečnostních limitů těmito hodnotami SOŘ realizuje odstavení reaktoru pádem absorpčních tyčí do aktivní zóny.

Hodnoty bezpečnostních limitů jsou implicitně nastaveny po spuštění SOR, obsluha reaktoru však může limity zpřísnit. Vedle překročení limitů zmíněných bezpečnostních proměnných je dalším důvodem pro odstavení reaktoru řada provozních, respektive poruchových stavů SOŘ, které jsou vyhodnocovány řídícím systémem reaktoru. V SOŘ jsou nastaveny ještě další limity, přísnější než limity bezpečnostní. Smyslem těchto limitů (tzv. varovných úrovní) je prostřednictvím aktivace varovných signálů upozornit operátora na blížící se dosažení bezpečnostních limitů a z toho plynoucí odstavení reaktoru. Operátor v návaznosti na to podnikne odpovídající kroky, aby byly obnoveny standardní provozní stavy. Při dosažení varovných úrovní nelze zvyšovat polohy regulačních tyčí ani zadaný výkon.

#### 3.3.2 Řídicí systém

Funkci tří komunikačních počítačů z původního SOR v tom aktuálním zastává jeden průmyslový počítač. Data z kanálů PMV a NVO jsou předána řídicímu systému, jež následně vyhodnotí stav reaktoru a pokud dojde k překročení bezpečnostních limitů, je reaktor odstaven. Vedle toho řídicí systém provádí výpočet středních hodnot výkonu a rychlosti jeho změny; tyto hodnoty jsou následně předány rozhraní člověk-stroj.

Prostřednictvím příkazů z rozhraní člověk-stroj ovládá řídicí systém hodnotu zadaného výkonu, provádí výpočet odchylky od zadaného výkonu a v případě, kdy je tato hodnota vyšší než hodnota bezpečnostní, je reaktor odstaven. Dále řídicí systém rozhoduje o důvěryhodnosti dat mezi jednotlivými kanály PMV a NVO tím, že testuje jejich odchylky, na základě čehož také řídí konfiguraci kanálů PMV a NVO.

Prostřednictvím řídicího systému je zajištěna funkce automatického regulátoru výkonu reaktoru a rovněž ovládání polohy absorpčních tyčí. Příkazy, které řídicí systém dostává od rozhraní člověk-stroj, vykonává tehdy, jsou-li pro jejich vykonání splněny podmínky.

#### 3.3.3 Absorpční tyče

Absorpční tyče, jichž může být v reaktoru 5 až 7 (v závislosti na konfiguraci aktivní zóny), řídí štěpnou řetězovou reakci. Jejich polohy jsou zajišťovány pomocí krokových motorů. Všechny absorpční tyče mají stejnou konstrukci, nicméně na základě připojení k SOŘ se mezi sebou liší funkcemi, které rozlišujeme tři: bezpečnostní, experimentální a řídicí.

Tři bezpečnostní tyče (B1 až B3) jsou při standardním provozu drženy v horních koncových

polohách, po odpojení magnetů od napájení dojde k uvolnění všech tyčí (nejen bezpečnostních) do aktivní zóny a následně i k zastavení štěpné řetězové reakce. Tyče experimentální, jejichž počet od 0 do 2 se může lišit dle konfigurace aktivní zóny, jsou ve standardním režimu vysunuty do předem nastavených horních koncových poloh, kde zůstávají během celé doby provozu. Jejich úkolem je zajišťovat kompenzaci vlivu experimentálních zařízení v reaktoru na reaktivitu. Jak již jejich název napovídá, účel tyčí řídících (R1 a R2) spočívá v řízení - a to nejen štěpné reakce, nýbrž i výkonu reaktoru.

#### 3.3.4 Rozhraní člověk-stroj

Rozhraní člověk-stroj - prostředek, pomocí něhož řídí operátor jaderný reaktor - je tvořeno dvěma monitory pro alfanumerickou komunikaci a grafické zobrazení dat, počítačem, tiskárny, tlačítek, indikátorů a individuálních displejů určených ke sledování hodnot z jednotlivých kanálů PMV a NVO.

Mezi data o stavu reaktoru, která jsou rozhraní předávána řídicím systémem, patří střední výkon, rychlost změny výkonu, odchylka od zadaného výkonu a stav systému, což je soubor údajů o kanálech. Vedle toho rozhraní člověk-stroj realizuje činnosti, jež jsou mu dávány příkazem z klávesnice na pultu operátora, jsou-li tyto činnosti zároveň povoleny. Operátor komunikuje s řídicím systémem prostřednictvím klávesnice a ovládacích tlačítek. Informace o stavu SOŘ může operátor sledovat na jednom ze dvou monitorů.

K vyhodnocování experimentů, jakož i pro účely kalibrace lze použít tzv. history server zaznamenávající kompletní provozní historii SOŘ a reaktoru (například provozní data a zadávané příkazy).

Spojení rozhraní člověk-stroj s počítačem vyhodnocujícím experimenty zajišťuje jednosměrná optická linka (ve směru od rozhraní člověk-stroj k počítači - z důvodů ochrany rozhraní člověk-stroj a SOŘ před škodlivým softwarem, který by mohl putovat v opačném směru).

#### 3.3.5 Systém zálohovaného napájení

Ovládací zařízení reaktoru obstarává systém zálohovaného napájení 230  $V_{st}$  a 48  $V_{ss}$ . Zálohované napájení 230  $V_{st}$  sestává z šesti zdrojů napájení pro počítače (UPS), přičemž pomocí UPS1 až UPS4 jsou vždy napájeny jednak dvojice kanálů PMV1/NVO1 až PMV4/NVO4, jednak i jejich individuální displeje na pultu operátora. Zdroj UPS5 napájí řídicí počítač, UPS6 rozhraní člověk-stroj. Vedle těchto šesti zdrojů existuje ještě jedna - nezávislá jednotka UPS, která slouží k napájení history serveru.

Co se týče napájení 48  $V_{ss}$ , pak jeho podstatou jsou čtyři bezúdržbové do sítě zapojené akumulátory. Systém zálohovaného napájení může v závislosti na stavu nabití UPS zajišťovat standardní provoz reaktoru až po dobu 10 minut od okamžiku ztráty napětí v síti. Vedle toho je pomocí systému zálohovaného napájení po dobu 20 minut od odstavení reaktoru zajištěna signalizace dolních poloh regulačních tyčí, dále funkce provozního měření výkonu a nezávislé výkonové ochrany.

#### 3.4 Shrnutí

Předchozí řádky byly seznámením se zabezpečením provozu reaktoru, přičemž bezpečnostní požadavky uvedené v kapitole 2 byly zcela splněny. V kapitole 2 je vysloven požadavek, aby v rámci provádění kontroly a časového průběhu štěpné řetězové reakce na relevantní úrovni byl systém ochrany a řízení vybaven minimálně třemi na sobě nezávislými měřícími kanály vyhodnocujícími výkon, a dále aby byl systém ochrany vybaven přinejmenším třemi na sobě nezávislými kanály schopnými měřit rychlost změny výkonu. Přípustné přitom je, aby výše uvedené požadavky byly sloučeny tak, že měřící kanál měří jak výkon, tak rychlost jeho změny. Výše popsaný požadavek byl splněn - ochranný systém je tvořen čtyřmi kanály provozního měření výkonu a čtyřmi kanály nezávislé výkonové ochrany, přičemž v režimu měření (jakožto aktivní kanály) se nacházejí maximálně tři kanály PMV, respektive NVO, jejichž vyhodno-cování je v logice dva ze tří, zatímco čtvrtý kanál s rozpojeným bezpečnostním relé se nachází v režimu záloha, po přepnutí z nějž do režimu měření může nahradit výpadek některého z aktivních kanálů. Dojde-li k tomu, že 4 kanály PMV, respektive NVO jsou v režimu měření, dojde v důsledku rozpojení bezpečnostního řetězce k odstavení reaktoru.

Podstatou kanálů PMV jsou průmyslová PC, jež jsou doplněna o obvody určené ke zpracování signálů z komor. Komunikaci v rámci SOŘ pak zprostředkovávají signály ze štěpných komor PMVK typu RJ1300, dle výkonu reaktoru v impulzním, Campbellovském a proudovém režimu, zjišťují jeho výkon a rychlost jeho změny v celém výkonovém rozsahu reaktoru, načež srovnávají zaznamenané hodnoty s hodnotami bezpečnostními, a dojde-li k jejich překročení, je rozpojením bezpečnostních relé aktivován bezpečnostní řetězec rozhodující v logice dva ze tří o odstavení reaktoru, čímž je splněn další požadavek uvedený v kapitole 2, na jehož základě je třeba, aby SOŘ disponoval systémem schopným identifikovat abnormální podmínky a automaticky spustit zařízení, která provedou odstavení reaktoru.

Kanály NVO provádějí snímání stavu reaktoru, k čemuž používají bórové komory NVOK typ SNM-12. Dále provádějí vyhodnocování signálů z komor v impulzním režimu a provádí měření výkonu pouze v posledních dvou dekádách výkonového rozsahu. Vedle toho vyhodnocují výkon, jakož i rychlost jeho změny a rovněž provádí porovnávání s bezpečnostními hodnotami, po jejichž překročení rozpojením bezpečnostních relé dojde k aktivaci bezpečnostního řetězce.

Další požadavek je, že obvody SOŘ musejí v libovolné provozní fázi zpracovávat v logice dva ze tří logické signály k odstavení reaktoru, a to alespoň tří na sobě nezávislých kanálů měření výkonu a nejméně tří na sobě nezávislých kanálů měřících rychlost jeho změny. Tento požadavek je splněn následovně: bezpečnostní řetězec SOŘ je tvořen reléovým systémem. Vyhodnocuje logiku dva ze tří ve vztahu k bezpečnostním signálům z PMV, respektive NVO, jakož i bezpečnostnímu signálu z počítače. Dojde-li k aktivaci dvou ze tří PMV, respektive NVO, je bezpečnostní řetězec rozpojen, čímž se přeruší napájení magnetů regulačních tyčí, které spadnou do svých dolních poloh, a zastaví tak štěpnou řetězovou reakci.

Reaktor disponuje systémem řízení a ochrany, spojovacím systémem, systémem dozimetrické kontroly a neutronovým zdrojem.

Přístroje SOŘ umožňují sledování, měření a registraci dálkového ručního i automatického ovládání, které hraje významnou roli pro zajištění jaderné bezpečnosti během provozu reaktoru. Přístrojové vybavení poskytuje vedle informací týkajících se okamžitého stavu výzkumného jaderného zařízení, na základě kterých lze provést odpovídající ochranná opatření, i informace o průběhu havárie včetně jejich záznamu a rovněž informace, které charakterizují případné šíření radioaktivních látek a záření do okolí reaktoru.

## Kapitola 4

## Provozní měření výkonu

#### 4.1 Úvod do struktury systému

Jak již bylo naznačeno výše, měření výkonu reaktoru VR-1 je založeno na měření neutronovým tokem. Systém ochran a řízení, jež je vybaven čtyřmi PMV kanály, používá štěpné komory operující buď v impulzním, nebo proudovém režimu v závislosti na výkonu reaktoru (při nižších hodnotách je použit impulzní režim, pro vyšší hodnoty je využívám režim proudový) [4]. Kanály PMV vyhodnocují signál z komory a stanovují na jeho základě výkon reaktoru. Ten je vyjadřován nikoli ve wattech, nýbrž ve speciálních jednotkách, jimiž jsou impulzy za sekundu. Důvodem je skutečnost, že nelze měřit přímo tepelný výkon reaktoru - maximální výkon reaktoru (5 kW) nemůže relevantní měrou ohřát 17  $m^3$  vody v tanku. Hodnota odpovídající výkonu jednoho kW je 10<sup>8</sup> impulzů za vteřinu, na základě porovnání s hustotou neutronového toku a tepelným výkonem reaktoru LVR-15 v ÚJV Řež.

Na obrázku 4.2 je znázorněno schéma digitální části kanálu PMV.

#### 4.1.1 Struktura kanálu PMV

Kanál ochrany kanálu PMV ze signálu emitovaného komorou PMV vypočítá výkon reaktoru a rychlost jeho změny. Tento kanál se skládá z analogové a digitální části.

#### 4.1.1.1 Analogová část

Analogová část prostřednictvím impulzního, proudového nebo Campbellova režimu poskytuje signál úměrný výkonu neutronového toku v reaktoru. Schéma této sekce lze spatřit na obrázku 4.1. Zde vidíme zdroj vysokého napětí, jež přes pracovní odpor komory vede do místa, kde je pomocí kapacitoru docíleno toho, aby přes něj prošel pouze střídavý proud, nikoli vysokonapěťový proud stejnosměrný. Dále je zde předzesilovač, odkud se přes zesilovač a diskriminátor dostáváme k výstupu impulzního režimu.

Vrátíme-li se k předzesilovači, druhá varianta vede přes horní a dolní propusť, RMS do



Obrázek 4.1: Schéma analogové sekce kanálu PMV

převodníku U/f, pomocí něhož je napětí převedeno na kmitočet pro výstup Campbellova režimu.

A konečně, na obrázku vidíme rovněž již zmíněnou neutronovou komoru, logaritmický zesilovač (z důvodu velkého rozsah hodnot, o čemž bude podrobněji řeč níže), za nímž následuje opět převodník napětí/kmitočet a výstup proudového režimu.

#### 4.1.1.2 Digitální část

Podstatu digitální části kanálu PMV tvoří zejména vysoce kvalitní průmyslové PC disponující odpovídajícím hardwarem tvořeným vstupní jednotkou určenou pro čtení dat z analogové sekce, dále jednotku kontrolní určenou k dozoru nad hardwarem a softwarem kanálu PMV, dále jednotku komunikační tvořenou optickým vláknem - ta je určena pro komunikaci s řídicím systémem a dále jednotkou kontroly lokálního displeje. Schéma digitální části je znázorněno na obrázku 4.2 [3].



Obrázek 4.2: Schéma digitální sekce kanálu PMV

# 4.2 Úvod - impulzní režim, Campbellův režim a proudový režim

#### 4.2.1 Impulzní režim

Impulzní režim nachází uplatnění při nižších hodnotách výkonu reaktoru, obvykle do  $5 \cdot 10^4$ impulzů/s. Impulz z komory je zesílen a diskriminován za účelem toho, aby byla zajištěna separace neutronových impulzů od šumu a gamy. Nastavení odpovídající úrovně diskriminace zajišťuje digitálně analogový převodník. Úložiště hodnoty diskriminace je ve "flash" paměti počítače kanálu PMV. Následně dojde ke spočítání neutronových impulzů, hodnota jejichž počtu je každou desetinu sekundy poslána digitální části kanálu PMV, který z ní následně spočítá výkon reaktoru. Na obrázku 4.3 je znázorněno schéma impulzního režimu kanálu PMV. Na tomto obrázku vidíme relé, které provádí přepínání testovacích impulzů nebo signálu z neutronové komory. Za ním následuje kaskáda zesilovačů, důvodem jejíž přítomnosti v zařízení je zachování šířky pásma. Pod relé a kaskádou zesilovačů, pak můžeme spatřit diskriminátor, jež porovnává zesílený signál z komory s nastavenou hodnotou diskriminace - je-li větší, znamená to, že se jedná o neutron.



Obrázek 4.3: Blokové schéma - impulzní režim



Obrázek 4.4: Blokové schéma - Campbellův režim

#### 4.2.2 Campbellův režim

Campbellův režim kanálu PMV je podobně jako režim proudový, o němž bude řeč níže, používám pro měření výkonu v rozsahu odpovídajícím oblasti  $5 \cdot 10^4$  až  $5 \cdot 10^8$  impulzů/s, s bezpečnostní rezervou do  $5 \cdot 10^9$  impulzů/s. Podstatou Campbellova režimu je vyhodnocování proudového šumu neutronové komory. V souvislosti s tím je na místě zmínit skutečnost, že výkon reaktoru, respektive neutronový tok, je úměrný čtverci tzv. RMS (root mean square) signálu proudového šumu. Přes velký rozsah - 5 dekád - právě díky kvadratické závislosti tento rozsah nepředstavuje žádný problém.

Kvantitativně lze vyjádřit vztah hrající roli v Campbellově režimu následovně:

$$N \sim f \ (U_{RMS})^2 \tag{4.1}$$

Nákres Cambellova režimu kanálu PMV je na obrázku 4.4. Zde vidíme horní propusť (Campbell HP) a dolní propusť (Campbell LP), jejichž účelem je omezit šířku pásma pro vyhodnocení RMS, jehož obvod můžeme na nákresu spatřit pod dolní propustí a jehož výstupem je stejnosměrné napětí, které je následně převedeno převodníkem U/f (vpravo dole) na kmitočet. Frekvence je pak měřena čítačem a zaslána každou desetinu sekundy digitální sekci kanálu PMV.

#### 4.2.3 Proudový režim

Na rozdíl od impulzního režimu, jež hraje roli při hodnotách výkonu reaktoru do  $5 \cdot 10^4$  impulzů/s, režim proudový přichází na scénu při hodnotách od  $5 \cdot 10^4$  do  $5 \cdot 10^8$  impulzů/s; jeho bezpečnostní rezerva přitom zvyšuje tento rozsah až k $5 \cdot 10^9$  impulzů/s. Vzhledem k velkému rozsahu měření (pět dekád) je obtížné vytvořit tomu odpovídající lineární elektronický systém. Dříve byly používány dva stejnosměrný subsystémy, jeden z nichž operoval v rozsahu od  $5 \cdot 10^4$  do  $5 \cdot 10^7$  impulzů/s, druhý pak od  $5 \cdot 10^7$  do  $5 \cdot 10^9$  impulzů/s, přičemž bylo samozřejmě třeba, aby tyto dva subsystémy byly propojeny tak, aby umožňovaly plynulý přechod měření z jedné části rozsahu do druhé a naopak.

Nový systém používá logaritmický zesilovač k převodu hodnoty proudu na její logaritmus. Analogová logaritmická hodnota napětí odpovídající proudu je následně převedena U/f převodníkem na odpovídající frekvenci, která je měřena čítačem a každou desetinu vteřiny poslána do digitální části kanálu PMV. Platí přitom následující vztah:

$$I \sim 10^f \tag{4.2}$$

Následně je spočtena odpovídající hodnota výkonu reaktoru jakožto extrapolace rozsahu pulsů v jednotkách impulzů za sekundu (viz 4.3). Nákres proudového režimu je na obrázku 4.5, kde



Obrázek 4.5: Blokové schéma - proudový režim

vidíme logaritmický zesilovač AD8304, na nějž zprava navazuje převodník U/f, v dolní části schématu je pak zdroj testovacího proudu.

#### 4.2.3.1 Logaritmický operační zesilovač

V předchozí kapitole byl zmíněn logaritmický zesilovač, který v problematice, jíž se zabývá tato práce, představuje klíčové zařízení, a to z důvodu spočívajícího v tom, že jeho pomocí lze překlenout velký rozsah hodnot.

Logaritmické operační zesilovače jsou nelineárními obvody, jejichž výstupní napětí je úměrné logaritmu napětí vstupního [5]. Podstata většiny logaritmických zesilovačů spočívá v logaritmickém vztahu mezi napětím mezi bází a emitorem  $V_{BE}$  a proudem na kolektoru  $I_C$  v bipolárním tranzistoru (viz obrázek 4.6.



Obrázek 4.6: Schéma logaritmického operačního zesilovače

Vstupní napětí je prostřednictvím  $R_1$  převedeno na proud, jež následně teče kolektorem transistoru a tím pádem moduluje napětí  $V_{BE}$ . Operační zesilovač docílí toho, že napětí na kolektoru (při neinvertujícím vstupu) je rovno 0 V.

Platí, že proud na kolektoru je

$$I_C = I_S(e^{qV_{BE}/kT} - 1) = I_S(e^{V_{BE}/V_T} - 1) \approx I_s \cdot e^{V_{BE}/V_T}$$
(4.3)

kde  $I_S$  je saturační proud,  $q = 1, 62 \cdot 10^{-19}$  C je náboj elektronu,  $k = 1, 38 \cdot 10^{-23}$  je Boltzmanova konstanta, T absolutní teplota a  $V_T$  termální napětí. Pro pokojovou teplotu T = 300 K platí

$$I_C = I_S(e^{38,6V_{BE}} - 1) \approx I_S \cdot e^{38,6V_{BE}}$$
(4.4)

z čehož plyne, že výstupní napětí je

$$V_{OUT} = -V_{BE} = -V_T \cdot ln\left(\frac{i_C}{I_S}\right) = -\frac{V_T}{2,3} \cdot ln\left(\frac{v_i}{R_1 I_S}\right) = -0,0259 \cdot ln\left(\frac{V_{IN}}{R_I I_S}\right)$$
(4.5)

Díky logaritmické relaci vyjádřené tímto vztahem lze překlenout velký rozsah proudů, nicméně je daný vztah citlivý na změny teploty kvůli  $V_T$  a  $I_S$ , důsledkem čehož je posun a výskyt

různých chyb závisejících na teplotě. Šířka pásma systému je užší pro nižší signály v důsledku vzrůstu odporu emitoru pro malé proudy. Impedance zdroje napětí použitého v obvodu musí být malá v porovnání s  $R_1$ .

Na základě výše zmíněných úskalí spojených zejména se změnami teploty a s nimi ruku v ruce kráčejícími offsety a chybami atd. je nasnadě, že tyto základní obvody vyžadují dodatečné součástky ke zlepšení celkové práceschopnosti. Další požadavky jsou:

- zajistit ochranu báze-emitor
- již zmíněné zmírnění offsetů zaviněných změnou teploty

V praxi se používají velmi sofistikované zesilovače, jedním z nichž je AD8304, o němž již byla řeč dříve v souvislosti s nákresem na obrázku 4.5. Tento zesilovač disponuje rozsahem 160 dB (100 pA až 10 mA) [6] a je schopen pracovat při teplotách od -40 do 85 stupňů Celsia.

#### 4.3 Postup výpočtu hodnot výkonu

Hodnoty výkonu a rychlosti jeho změny jsou vypočítávány v matematickém modulu. Provádění výpočtů je realizováno chronologicky, počínaje hodnotou raw (syrová hodnota), přičemž v daném kroku se použijí korekce a výpočty, které byly získány při kroku předcházejícím [7]. Pro nás jsou klíčové parametry přepočtu proudu z frekvence, jimiž jsou konstanty  $k_{R_1}$  a  $k_{R_2}$ , o nichž bude řeč v 4.3.3.4

#### 4.3.1 Postup výpočtu hodnot výkonu v impulzním kanálu

Tento výpočet je realizován prostřednictvím čtyř na sebe navazujících kroků, přičemž platí, že nutnou podmínkou pro uskutečnění kroku je úspěšná realizace kroku předchozího. Poté co je daný krok vykonán, dojde k uložení hodnoty do samostatné paměti, v důsledku čehož je umožněno kontrolovat, zda hodnoty vypočtené v jednotlivých krocích jsou správné.

#### 4.3.1.1 Krok 1: získání raw hodnoty

Každou desetinu sekundy je PMV kartou zaslána do počítače hodnota jejího impulzního čítače. V tomto kroku je původní hodnota odečtena od hodnoty aktuální, v důsledku čehož je získána hodnota počtu impulzů za uběhlých 100 ms.

$$f_{RawIm_p} = f_{NewIm_p} - f_{OldIm_p} \tag{4.6}$$

#### 4.3.1.2 Krok 2: korekce raw hodnoty

V tomto kroku dojde s použitím lineární funkce k prvním korekcím hodnot obdržených z PMV karty. Servisní režim nabízí možnost nastavit v něm konstanty  $k_{Imp_1}$ , což je multiplikativní konstanta pro korekci 1. impulzního kanálu, a  $o_{Im_{p_1}}$ , což je aditivní konstanta pro korekci 1. impulzního kanálu.

$$f_{CorrIm_p} = k_{Im_{p_1}} \cdot f_{RawIm_p} + o_{Im_{p_1}} \tag{4.7}$$

#### 4.3.1.3 Krok 3: výpočet výkonu

Do výpočtu výkonu, který je realizován ve třetím kroku, jsou zahrnuty i hodnoty z předchozích měření. Výpočet probíhá tak, že nejprve je dle předchozí korigované hodnoty stanoveno množství hodnot, z nichž následně bude spočten výkon. Minimum je přitom 12, maximum pak 60. Ve vztahu symbol  $f_{CorrImp_1}$  představuje korigovanou raw hodnotu, jež je vypočítána v kroku 2.

$$n = 88 - 19 \cdot \log(10 \cdot f_{CorrIm_{p-1}}, n = \langle 12, 60 \rangle$$
(4.8)

Následně dojde k výpočtu výkonu jako takovému, a to na základě následujícího vztahu, přičemž servisní režim PC PMV (pozor, nikoli servisní režim N708) nabízí možnost nastavit v něm konstantu  $k_{Imp_2}$ , což je multiplikativní konstanta pro korekci 2. impulzního kanálu.

$$N_{Im_p} = k_{Im_{p_2}} \cdot \frac{\sum_{0}^{n-1} f_{CorrIm_{p-i}}}{0, 1n}$$
(4.9)

#### 4.3.1.4 Krok 4: závěrečná korekce

V tomto kroku přichází na řadu závěrečná korekce vypočítané hodnoty, na níž je následně systémem pohlíženo jako na hodnotu skutečnou. Analogicky k předchozím případům, i zde servisní režim poskytuje možnost nastavit v něm konstanty  $k_{Imp_3}$ , což je multiplikativní konstanta pro korekci 3. impulzního kanálu, a  $o_{Imp_3}$ , což je aditivní konstanta pro korekci 3. impulzního kanálu.

$$N_{FinalIm_p} = k_{Im_{p_3}} \cdot N_{Im_p} + o_{Im_{p_3}} \tag{4.10}$$

#### 4.3.2 Postup výpočtu hodnot výkonu v Campbellově kanálu

Tento výpočet je realizován prostřednictvím čtyř na sebe navazujících kroků, přičemž platí, že nutnou podmínkou pro uskutečnění kroku je úspěšná realizace kroku předchozího. Poté co je daný krok vykonán, dojde k uložení hodnoty do samostatné paměti, v důsledku čehož je umožněno kontrolovat, zda hodnoty vypočtené v jednotlivých krocích jsou správné.

#### 4.3.2.1 Krok 1: získání raw hodnoty

Každou desetinu sekundy je PMV kartou zaslána do počítače hodnota jejího Campbellova čítače. V tomto kroku je původní hodnota odečtena od hodnoty aktuální, v důsledku čehož je získána hodnota počtu impulzů za uběhlých 100 ms.

$$f_{RawCamp} = f_{NewCamp} - f_{OldCamp} \tag{4.11}$$

#### 4.3.2.2 Krok 2: sečtení posledních 10 raw hodnot

Sečtením posledních deseti raw hodnot v kroku 2 je získána hodnota čítače za 1 sekundu

$$f_{SumCamp} = \sum_{0}^{9} f_{RawCamp-i} \tag{4.12}$$

#### 4.3.2.3 Krok 3: korekce sečtené hodnoty

V tomto kroku dojde s použitím lineární funkce ke korekci hodnoty obdržené v kroku 2. Servisní režim nabízí možnost nastavit v něm konstanty  $k_{Camp_1}$ , což je multiplikativní konstanta pro korekci 1. Campbellova kanálu, a  $o_{Camp_1}$ , což je aditivní konstanta pro korekci 1. Campbellova kanálu.

$$f_{CorrCamp} = k_{Camp_1} \cdot f_{SumCamp} + o_{Camp_1} \tag{4.13}$$

#### 4.3.2.4 Krok 4: výpočet výkonu

K výpočtu výkonu je použito následujícího vztahu. Servisní režim nabízí možnost nastavit v něm konstanty  $k_{Camp_2}$ , což je multiplikativní konstanta pro výpočet Campbellova kanálu,  $o_{Camp_2-lin}$ , což je lineární konstanta pro výpočet výkonu v Campbellově kanálu, a  $o_{Camp_2-Sq}$ , což je kvadratická konstanta pro výpočet výkonu v Campbellově kanálu.

$$N_{Camp} = k_{Camp_2} \cdot \frac{\sum_{0}^{9} (f_{CorrCamp-i} + o_{Camp_2 - Sq})^2}{10} + 0_{Camp_2 - Lin}$$
(4.14)

#### 4.3.2.5 Krok 5: závěrečná korekce

V tomto kroku přichází na řadu závěrečná korekce vypočítané hodnoty, na níž je následně systémem pohlíženo jako na hodnotu skutečnou. I zde servisní režim poskytuje možnost nastavit v něm konstanty  $k_{Camp_3}$ , což je multiplikativní konstanta pro korekci 3. Campbellova kanálu, a  $o_{Camp_3}$ , což je aditivní konstanta pro korekci 3. Campbellova kanálu.

$$N_{FinalCamp} = k_{Camp_3} \cdot N_{Camp} + o_{Camp_3} \tag{4.15}$$

#### 4.3.3 Výpočet výkonu v proudovém kanálu

Výpočet výkonu v proudovém kanálu probíhá v šesti po sobě následujících krocích. Hodnota získaná v průběhu jednoho kroku je po jeho vykonání uložena do samostatného paměťového prostoru, díky čemuž lze provádět kontrolu správnosti vypočtených hodnot v jednotlivých krocích. Platí přitom, že není-li jeden krok vykonán úspěšně, k realizaci dalšího kroku již nedojde.

#### 4.3.3.1 Krok 1: získání raw hodnoty

Tento krok spočívá v tom, že hodnoty impulzního čítače PMV karty jsou zaslány počítači každých 100 ms, přičemž v tomto kroku dojde k odečtení původní hodnoty od hodnoty aktuální, čímž se získá počet impulzů za daný časový interval - 100 ms. Platí vztah

$$f_{RawImp} = f_{NewDC} - f_{OldDC} \tag{4.16}$$

#### 4.3.3.2 Krok 2: sečtené posledních 10 raw hodnot

V tomto kroku je získána hodnota čítače za 1 sekundu pomocí sečtení posledních deseti raw hodnot z proudového kanálu. Daný proces se přitom řídí vztahem:

$$f_{SumDC} = \sum_{0}^{9} f_{RawDC-i}$$
 (4.17)

#### 4.3.3.3 Krok 3: korekce sečtené hodnoty

Ve třetím kroku je pomocí lineární funkce realizována korekce hodnoty obdržené při vykonání kroku 2.

$$f_{CorrDC} = k_{DC_1} \cdot f_{SumDC} + o_{DC_1} \tag{4.18}$$

kde  $k_{DC_1}$  představuje multiplikativní konstantu pro korekci 1 proudového kanálu a  $o_{DC_1}$  označuje aditivní konstantu pro korekci 1 proudového kanálu. Obě tyto konstanty lze nastavit v servisním režimu.

#### 4.3.3.4 Krok 4: přepočet proudu z frekvence

Komorou protéká proud, jehož hodnota odpovídá hodnotě proudového čítače, jež je zasílána PMV kartou počítači. V kroku 4 je realizováno převedení hodnoty čítače na hodnotu proudu, přičemž konstanty vystupující v následujícím vztahu  $k_{R_1}$  a  $k_{R_2}$  lze měnit prostřednictvím servisního rozhraní.

$$I_{DC} = k_{R_1} \cdot 10^{k_{R_2} \cdot f_{CorrDC}} \tag{4.19}$$

kde  $k_{R_1}$  a  $k_{R_2}$  jsou konstantami pro přepočet frekvence na proud v proudovém kanálu, jež je možno nastavit prostřednictvím servisního rozhraní. Jak již bylo naznačeno výše, tyto konstanty jsou pro nás klíčové. Je třeba zdůraznit, že přítomnost tvaru  $k_{R_2} \cdot f_{CorrDC}$  v mocnině s sebou evidentně nese mimořádně vysokou náchylnost ke vzniku výrazné odchylky.

#### 4.3.3.5 Krok 5: výpočet výkonu

Vztah hrající klíčovou roli při výpočtu výkonu v užším slova smyslu je:

$$N_{DC} = k_{DC_2} \cdot \frac{\sum_{0}^{9} I_{DC}}{10} + o_{DC_2} \tag{4.20}$$

kde  $k_{DC_2}$  a  $o_{DC_2}$  jsou konstanty pro výpočet výkonu v proudovém kanálu nastavitelné v servisním režimu.

#### 4.3.3.6 Krok 6: Závěrečná korekce

Zde přichází na scénu závěrečná korekce vypočtené hodnoty, z čehož vzejde hodnota, na níž je následně systémem pohlíženo jako na skutečnou hodnotu výkonu proudového kanálu. Platí vztah:

$$N_{FinalDC} = k_{DC_3} \cdot N_{DC} + o_{DC_3} \tag{4.21}$$

Klíčovými konstantami jsou pro nás konstanty  $k_{R_1}$  a  $k_{R_2}$ , které hrají nenahraditelnou roli při výpočtu hodnoty proudu, jak je patrné ze vztahu 4.19.

# Kapitola 5

# Kalibrace logaritmického proudového měření

#### 5.1 Způsob kalibrace

Při kalibraci jsou klíčové konstanty  $k_{R_1}$  a  $k_{R_2}$ , o nichž již byla řeč výše, zejména v 4.3.3.4, kde byla zdůrazněna skutečnost, že výskyt v mocnině představuje v případě nepřesného určení riziko velké odchylky.

Způsob, jakým je nyní kalibrace prováděna, je dvoubodový - pro 50 nA a 1 mA. Dříve byla prováděna kalibrace vícebodová [8], ale empirické výsledky se ukázaly být prakticky shodnými s těmi, jež byly zaznamenány prostřednictvím kalibrace dvoubodové. Proto dostala dvoubodová kalibrace přednost před pracnou kalibrací vícebodovou.

Co se týče proudového zdroje, bylo empiricky ověřeno [8], že než používat zdroj vestavěný, vyplatí se více externí zdroj, jímž je generátor B2902A, o němž bude řeč dále a který nahradil generátor HP3245A.

#### 5.2 Aparatura pro kalibraci

Zapojení aparatury je znázorněno na obrázku 5.1.

Na tomto nákresu je znázorněno zapojení při kalibraci. Pomocí počítače je prostřednictvím USB generátor, na jehož místě je v praxi zapojena neutronová komora, nastaven na určité hodnoty proudu. V převodníku N708 následně proběhne kalibrace, jejímž výstupem jsou konstanty  $k_{R_1}$  a  $k_{R_2}$ . Ty jsou následně předány počítači pomocí vláknové optiky, respektive RS232. Co se týče "Power supply", toto zařízení plní úlohu čistě zdroje pro provoz převodníku N708.



Obrázek 5.1: Nákres aparatury

#### 5.3 Technické vybavení kalibrace

#### 5.3.1 Převodník pro neutronovou komoru N708

Převodník N708 byl navržen tak, aby vyhovoval požadavkům pro systém PMV jaderného reaktoru VR-1 [9]. Jeho účelem je zpracovávat analogový signál ze širokopásmové neutronové štěpné komory a převádět jej na digitální data měření reaktoru v impulzním, Campbellově a proudovém režimu. Data přenáší pomocí vláknové optiky s asynchronní sériovou komunikací

V testovacím režimu je převodník ovládán pomocí příkazů; pro ilustraci je na obrázku 5.2 uvedena sekvence příkazů pro kalibraci a její kontrolu. Příkaz WDO(n,d) nastavuje analogový vstup [10], konkrétně v případě obrázku 5.2 je prostřednictvím tohoto příkazu vnitřní testovací generátor; WCG nastavuje proud, v případě obrázku 5.2 je nastaven proud na vnitřním generátoru na hodnotu 50 nA; WCAL provede kalibraci pro 50 nA; poté je nastaven proud na 1mA, což je opět následováno kalibrací pro příslušnou hodnotu. Příkaz SS pak provede zápis dat do systému a příkaz WDO provede připojení vstupního konektoru (standardně signál z komory). Na obrázku 5.2 chybí v části "kontrola"nultá položka, jíž by měl být znovu příkaz WDO 4 1, jehož pomocí dojde k připojení generátoru.

V části "kontrola" na obrázku 5.2 se kromě již výše zmíněných příkazů vyskytuje příkaz RFCU, který zjistí kmitočet, jež by měl být 50000, následuje příkaz RCU, který vrací proud. I část "kontrola" by měla správně o jednu položku delší, a sice za devátým příkazem by měl následovat příkaz WDO 4 0.

Kromě příkazů, které byly výše popsány v souvislosti s obrázkem 5.2, uveď me například ještě příkaz RCAL(n), jež vrací kalibrační koeficienty analogového vstupu n.

kalibrace	1 2 3 4 5 6 7	wdo 4 1 wcg .00000005 wcal 22 .00000005 wcg .001 wcal 22 .001 ss wdo 4 0		
kontrola	1	wcg .00000001		
	2	rfcu	50000	
	3	rcu	.0000001	
	4	wcg .000001		
	5	rfcu	70000	
	6	rcu	.000001	
	7	wcg .001		
	8	rfcu	100000	
	9	rcu	.001	

Obrázek 5.2: Přepočet frekvence na proud

#### 5.3.2 Generátor B2902A

Agilent B2902A (viz obrázek 5.3) představuje tzv. SMU, což je zkratka označující "source/measure unit" [11], tedy zařízení, jež slouží jako zdroj napětí nebo proudu, případně napětí nebo proud měří. Patří společně s dalšími zařízeními, jimiž jsou B2901A, B2911A a B2912A, patří do série B2900. Od některých generátorů z této série se však liší například tím, že podporuje konfiguraci 2 kanálů.

Minimální rozlišení generátoru B2902A jakožto zdroje napětí, respektive proudu, je 1  $\mu$ V, respektive 1 pA. Přesnost při měření je pak 100 nV, respektive 10 fA, benefitem čehož je skutečnost, že díky této přesnosti lze dané zařízení použít k měřením velmi nízkých hodnot. Nejvyšší výstup je ±210 V, ±3 A DC/ ±10,5 A impulzní. Dále jej lze použít jako generátor harmonického průběhu, a to od hodnot intervalu 20  $\mu$ s. Velmi významnou předností, která je klíčová zejména z hlediska naší práce, je skutečnost, že software generátoru B2902A umožňuje řídit měření vzdáleně pomocí počítače. Další předností generátoru B2902A je schopnost rozmítání.

Chyba měření generátoru na rozsahu 100 nA je  $\pm (0,06\% + 100)$  pA. Při kalibraci pro 5 nA tato chyba může představovat až 2 %, což je hodně.

V souvislosti s podstatou naší práce je třeba zdůraznit to, co již bylo naznačeno výše, a sice že je bezpředmětné uvádět údaje týkající se ovládání generátoru standardní cestou - tedy prostřednictvím ovládacího panelu, a to z toho důvodu, že v naší práci jsou veškeré úkony spojené s činností generátoru B2902A prováděny počítačem pomocí příkazů zadávaných softwarem. Přesto alespoň ilustrativně zmiňme způsob, jakým se hodnoty zobrazují na displeji

ovládacího panelu, k čemuž nám poslouží obrázek 5.4, kde je znázorněno rozložení jednotlivých zobrazovaných údajů:

- 1. číslo kanálu
- 2. data z posledního měření
- 3. HC (high capacitance mode indicator)
- 4. indikátor statusu (remote sensing 4 wire connection)
- 5. volba napětí/proud
- 6. volba průběhu výstupu zdroje DC, impulzní, pilový. DC přitom není indikován nijak
- 7. nastavená hodnota výstupu zdroje
- 8. limitní hodnota proudu

B2900 dále umožňuje řadu funkcí, například impulzní výstup, výstup pilového signálu (sweep output), další různé formy periodického výstupu, testování nejvyšších hodnot, matematické výrazy a grafické zpracování. Z předchozí věty je zřejmé, že B2900 může být použit k účelu poskytovat stejnosměrný zdroj napětí/proudu, dále zdroj pilového napětí/proudu, dále může plnit funkci multimetru. Srovnání parametrů generátoru B2902A s ostatními přístroji série B2900 nabízí tabulka na obrázku 5.5.

#### 5.3.3 Převodník FIBRE/RS232

Převodník FIBRE/RS232, který byl vyvinut na Katedře jaderných reaktorů, plní pomocí vláknové optiky funkci propojení sériového asynchronního portu PC (com 1) s jednotkou N708. Je zobrazen na obrázcích 5.6 vpravo a 5.7 v popředí.

#### 5.4 Programové vybavení systému kalibrace

K účelům návrhu kalibrace a jeho realizace, který spočívá v ovládání aparatury znázorněné na obrázku 5.1, respektive 5.11 pomocí PC, bylo zvoleno vývojové prostředí Agilent VEE, jehož specifika budou podrobněji rozebrána níže. Nyní bude uvedeno pouze to, že jednou z jeho nejvýznamnějších předností je skutečnost, že umí ovládat celou řadu rozhraní, a to například USB, RS232, GPIB, Ethernet.

Pomocí VEE bude vyvinut software, jehož pomocí budou nastavovány hodnoty na generátoru, prováděna kalibrace a také testy. Výsledné hodnoty pak budou vypisovány na alfanumerický displej programu vyvinutého ve VEE a současně do textového souboru.



Obrázek 5.3: generátor Agilent B2902A



Obrázek 5.4: Displej generátoru B2902A

#### 5.4.1 Agilent VEE

Agilent VEE (Visual Engineering Environment) je grafické programovací prostředí pro realizaci automatizace testování [12], měření a analýzy dat, jež je využíváno v mnoha rozmanitých

		Effective set and measure value					
Model No.	Number of SMU channels	Mini resol	imum lution	Maximum current	Maximum voltage		
		Set	Measure				
B2901A	1	1 pA,	0.1 pA, 0.1 μV	DC: ± 3.03 A	± 210 V		
B2902A	2	Ιμν		Pulse: $\pm 10.5 \text{ A}$			
B2911A	1	0.01 pA, 0.1 μV					
B2912A	2						

#### Obrázek 5.5: Agilent B2900 Series



Obrázek 5.6: Převodník FIBRE/RS232

odvětvích vědy a techniky. Agilent VEE patří mezi tzv. grafické programovací jazyky. Jeho smyslem je umožnit uživateli tvorbu aplikacích určených k provádění testů, respektive měření [13]. Přínosy tohoto programu jsou zejména zvýšení produktivity tvorby dané aplikace, přičemž uživatelé uvádějí časovou úsporu až 80 % ve srovnání s obvyklými způsoby tvorby aplikací. Další pozitivum představuje skutečnost, že VEE disponuje širokým rozsahem vestavěných aplikací



Obrázek 5.7: Převodník FIBRE/RS232

obsahující například verifikaci designu, kalibraci, získávání dat atd. Dále VEE používá panelové ovladače, jakož i ovladače VXI*plug & play*, ovladače ODAS, přímý vstup a výstup u standardních rozhraní a dále importované knihovny rozličných distributorů.

Tvorba programu jako taková probíhá tak, že z výběru na horní liště jsou vybírány objekty, jež jsou přetaženy prostřednictvím polohovacího zařízení (myší) na pracovní ploch, kde jsou následně odpovídajícím způsobem spojeny. Výsledek tvorby je "data flow" diagramem. Na obrázku 5.8 je znázorněn program psaný jazykem ANSI C, vytvářející 10 náhodných čísel od 0 do 1, nejvyšší z nichž následně vybere a položku s maximální hodnotou zobrazí. Na obrázku 5.9 je pak znázorněn týž program vytvořený ve VEE.

Stavebními kameny VEE jsou prvky nazývající se objekty. Ty disponují rozličnými funkcemi, jako jsou operace týkající se vstupu a výstupu, analýzy a zobrazování. Formát zobrazení, v němž se nachází program znázorněný na obrázku 5.9, se nazývá detailní náhled (detailed view). Tento formát zobrazení lze považovat za ekvivalent zdrojového kódu textového programovacího jazyka. Pro úplnost dodejme, že objekty zobrazené detailně jsou zobrazeny v režimu tzv. "open view", což umožňuje monitorovat konkrétní parametry daného objektu. Naproti tomu režim, kdy je daný objekt zobrazen pouze jako ikona popsaná odpovídajícím názvem, sice nezobrazuje detailní parametry daného objektu, na druhou stranu představuje úsporu prostoru na pracovní ploše a především tak lze docílit vyšší rychlosti běhu celého programu.

```
/* Program to find maximum element in array */
#include <math.h>
main()
ł
double num[10], max;
int i;
for (i=0; i<10, i++)
num[i] = (double) rand()/pow(2.0,15.0);
printf("%f/n",num[i];
}
max=num[0];
for {i=1;i<10;i++) {
if (num[i] >max)max=num[i];
}
printf("/nmax; %f/n",max);
}
```

Obrázek 5.8: Příklad - program psaný v jazyku ANSI C

Pohyb dat ve VEE probíhá na základě pravidel koncipovaných tak, že datový vstup je umístěn na levé straně daného objektu, datový výstup na straně pravé, řídící vstup/výstup jsou umístěny nahoře a dole, přičemž horní zdířka představuje signál pro spuštění daného objektu objektem předchozím, k jehož dolní zdířce je "náš" aktuální objekt připojen, analogicky pak výše popsané situaci, je-li k dolní zdířce daného objektu připojen objekt jiný, pak touto cestou rovněž dochází k jeho spuštění.

Ve světle výše řečeného je zřejmé, že adekvátním způsobem mezi sebou propojené objekty tvoří program jako takový; data jím protékají zleva doprava. V ilustračním programu znázorněném na obrázku 5.9 je náhodné číslo přidáno do pole v kolektoru v důsledku cyklu desetkrát, následně z hodnot obsažených v poli vybere a zobrazí nejvyšší hodnotu - Max Value - a poté vypíše všechny hodnoty obsažené v poli - Array Values.

Na základě předchozích řádků je zjevné, že pojetí programování VEE přináší velkou časovou úsporu při tvorbě programů, které sestávají zejména z kontrolních komponent, zobrazují data, případně mají za účel tvorbu operačního rozhraní. To je další pozitivum VEE, kdy tvorba takovéhoto rozhraní trvá pouze několik minut. Pro účely objasnění procesu vedoucího k vytvoření



Obrázek 5.9: Příklad - program v jazyku VEE

takovéhoto rozhraní opět použijme obrázek 5.9, kde objekty, jež chceme spatřit v námi tvořeném uživatelském rozhraní, označíme a pak v horní liště zvolíme "edit" a ze seznamu políček, který se následně rozbalí, vybereme "Add to panel", načež daný objekt je zobrazen v rozhraní, kam analogickým postupem umístíme i všechny ostatní potřebné objekty - tzn. obvykle takové objekty, jež jsou potřebné ke spuštění programu, monitorování jeho průběhu a zobrazování zaznamenaných dat. Tak v případě programu z obrázku 5.9 by uživatelské rozhraní vypadalo tak, jak je znázorněno na obrázku 5.10.

VEE disponuje řadou možností, jak provádět kontrolu a komunikaci s zařízeními. Jednak prostřednictvím panelových ovladačů kompatibilních s více než 450 zařízeními od různých výrobců, dále prostřednictvím přímého vstupu/výstupu je možné poslat příkaz přes standardní rozhraní jako GPIB, GPIO, RS232 (což bylo použito v případě této práce), VXI, instrumentů založených na LAN a v neposlední řadě USB.

Na podporovaných operačních systémech VEE zprostředkovává rozhraní pro propojení komerčních aplikací jakož i testovacích programů. Jako příklad lze uvést využití VEE ke správě již existujících programů v jazycích jako je C++, C, Fortran, případně Pascal.

Vedle toho VEE umožňuje prostřednictvím řady rozhraní určeným k meziprocesové komunikaci sdílet data s komerčními aplikacemi, jako jsou například databáze.

VEE je kompatibilní k interakci s dalšími programovacími jazyky používajícími vestavěný ActiveX Automation Server. Uživatelské funkce VEE mohou volat například C/C++, Visual Basic, Visual C# [12].

8	🖬 🖻 Main	<u> </u>
	Array Values 0.7796 0.8436 0.9968 0.9997 0.6115 0.3924 0.2662 0.2973 0.8401 23.74m	
	— Max Value	
	0.9997	
	ОК	

Obrázek 5.10: Příklad - uživatelské rozhraní programu v jazyku VEE

Vývojovým prostředím podobným VEE je LabVIEW, což je akronym představující slovní spojení Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench. Jedná se o vývojové prostředí pro vizuální programování vytvořené firmou National Instruments [14]. Původně bylo Lab-VIEW vyvinuto pro Apple Macintosh v roce 1986.

V praktiku, kde probíhala měření a tvorba softwaru, jsou především přístroje vyrobené společností Hewlett Packard, jež byla původním autorem VEE [12] (později Agilent technologies, Keysight technologies), proto je k realizaci cílů této práce použito právě prostředí VEE.

#### 5.4.2 Software pro kalibraci

Při tvorbě softwaru bylo nejprve nutné vyřešit problémy technického charakteru. Prvním takovým problémem bylo to, že v aparatuře zachycené na obrázku 5.11 bylo nedopatřením nastaveno napětí nikoli požadovaných 12 voltů, nýbrž 24. Naštěstí převodník pro neutronovou komoru N708 byl vybaven pojistkou proti podobným situacím, díky čemuž nedošlo k poškození přístroje jako takového. Přestože bylo provedeno opatření spočívající v opatření pěti dalších pojistek pro případ, že by se omyl opakoval, kupodivu všechny zůstaly nevyužity.

Na nákresu na obrázku 5.1 nebylo obtížné propojit jednotlivá zařízení, v praktiku to však problém byl, poněvadž USB kabely, respektive optická vlákna byla příliš krátká, což představovalo překážku pro to, aby některé přístroje byly propojeny. Ani tím však problémy spojené s nedostatečnou délkou některých kabelů neskončily, poněvadž se stávalo, že se spoj



Obrázek 5.11: Aparatura

v důsledku velkého pnutí uvolnil, spojení se tak přerušilo a to mělo samozřejmě za následek přerušení aktuálního měření.

Co se týče softwaru v užším slova smyslu, program je spuštěn tlačítkem start, znázorněným na obrázku 5.12.

Jak bylo řečeno v Kapitole o Agilent VEE, účelem spojů vycházejících z dolní části daného objektu, je inicializovat provedení funkce obsažené v objektu, jež je touto cestou připojený k objektu původnímu. Na obrázku 5.12 je tedy patrné, že tlačítko "Start" spustí objekt "newInstrument3". Tato akce spočívá v tom, že převodníku pro neutronovou komoru je odeslán příkaz WDO 4 0, jímž je nastaven vstup 4 na konektor pro komoru. Druhý spoj od tlačítka "Start" vede k objektu s funkcí "now()" (viz obrázek 5.13).

Jejím výstupem je datum a čas, které je prostřednictvím na funkci "now()" navazujícího objektu "To String" přetransformováno do požadovaného formátu a zobrazeno na Alfanumerickém displeji. Současně je datum uloženo do textového souboru. K výběru textového souboru, kam budou výsledky ukládány, je uživatel vyzván bezprostředně po spuštění programu. Volby příslušného textového souboru je docíleno pomocí na obrázku 5.14 nacházejícího se Objektu "File Name Selection". Na obrázku 5.24 je zobrazeno, jak takový textový výstup vypadá.

Kromě data je tak nastaven zápis do textového souboru dalších hodnot, o nichž bude řeč



Obrázek 5.12: Spouštěcí část programu



Obrázek 5.13: Část programu zavádějící datum



Obrázek 5.14: Část programu zobrazující zápis do souboru

dále. Důvodem, proč je funkce "now()" propojena bezprostředně s tlačítkem "Start", je to, aby datum bylo zobrazeno jako první, a to nejen na uživatelském panelu, ale i ve výpisu uloženém v textovém souboru. Vraťme se nyní k obrázku 5.12, respektive k objektu, jímž byl odeslán převodníku příkaz WDO 4 0. Tímto objektem je spuštěn další objekt, jež čte hodnotu vrácenou převodníkem - v případě, že vše probíhá, jak má, převodník uživateli sděluje lakonické "OK". Pak je spuštěn další objekt (na obrázku 5.15 nahoře), jehož příkazy jsou adresovány pro změnu generátoru B2902A, o němž pojednává kapitola 5.3.2.

Zde je nastaven proud na 50 nA. U následujícího objektu se zastavme, byť na první pohled může vypadat takřka zbytečně. Není tomu tak však. Kvůli stabilizaci výstupního signálu je tímto objektem "Delay"- zpoždění 2 sekundy. V případě, že by se v programu tento objekt nevyskytoval, výstupní hodnoty by nebyly relevantní. Protože se zde však zpoždění vyskytuje, může prostřednictvím následujícího objektu, jehož příkaz je adresován znovu převodníku pro neutronovou komoru, být korektně provedena kalibrace vstupu 22, jež je následována stručnou reakcí převodníku, kterou přečte a vypíše další objekt a která zní: "NEXT". Za alfanumerickým displejem, kde se toto zobrazuje, se nachází další objekt, který je zde v rámci zvýšení uživatelské přívětivosti - na uživatelské rozhraní zobrazí text "Calibration 50 nA".

Současně s tím však pokračuje běh programu, který nastaví na generátoru B2902A proud 1 mA (obrázek 5.16), pak je program na 2 sekundy pozastaven dalším objektem "Delay" (umístěným



Obrázek 5.15: Detail programu

zde z důvodu stabilizace), a poté je provedena kalibrace pro 1 mA.

Podobně jako u kalibrace 50 nA, i sdělení uživateli o tom, že probíhá kalibrace 1 mA, je umístěno na uživatelský panel. Další objekt odešle příkaz SS, čímž uloží aktuální nastavení do N708 paměti nezávislé na napájení. Následuje objekt, který odešle převodníku příkaz RCAL, načež jsou vráceny kalibrační koeficienty analogového vstupu 22. Na obrázku 5.17 je proces zpracování této zprávy: poté co je údaj přečten, je nutno jej rozdělit jako textové pole, aby bylo možné ho uživatelsky přívětivě zobrazit na uživatelském panelu a současně uložit do textového souboru. K tomu slouží dva objekty s funkcí "strFromThru", která konstanty od sebe oddělí, a již nic nestojí v cestě tomu, aby byly objekty připojenými k funkcím "strFromThru" vypsány na alfanumerický displej, respektive uloženy do textového souboru.

Na obrázku 5.17 lze dále spatřit objekty, jež zahajují proces testování, jehož celkový mechanismus je zobrazen na obrázku 5.19.

Z pole "Real64Array" jsou pomocí cyklu "for" (lze jej spatřit na obrázku 5.18) vybírány přednastavené hodnoty proudu.



Obrázek 5.16: Detail programu - nastavení hodnoty 1 mA



Obrázek 5.17: Detail programu - zpracování konstant

Pak je provedeno testování postupně pro konkrétní hodnoty. To probíhá tak, že na generátoru je nastaven proud, pomocí příkazu RCU se zjistí hodnota proudu, která se s hodnotou přednastavenou porovná, a následně se vypočte odchylka. První část zpracování získaných hodnot je zobrazena na obrázku 5.20:



Obrázek 5.18: Detail programu - testování



Obrázek 5.19: Detail programu

funkce "asReal64(x)" převedou hodnoty do správného formátu (dosud se nacházely ve formátu String, poněvadž v tomto formátu byly vráceny příkazem RCU - to je příkaz, který změří proud), aby bylo možné s nimi provést numerickou operaci v objektu "Formula" (viz obrázek 5.21):



Obrázek 5.20: Detail programu



Obrázek 5.21: Detail programu

Vstup A bere hodnotu získanou při testování, vstup B hodnotu teoretickou, jež byla přednastavena. Následná početní operace zjistí odchylku, která je následně zapsána do textového souboru a zobrazena na displeji. Cyklus "for"z obrázku 5.19 pokračuje a do jeho skončení se postupně testují všechny hodnoty z pole "Real64Array". Co se týče procesu zobrazování testování na uživatelském panelu, respektive zápisu hodnot do souboru, to je znázorněno na obrázku 5.22, kde objekt "To String" (druhý odzdola) přijme jako vstupní hodnotu "A" aktuální



Obrázek 5.22: Detail programu

přednastavenou hodnotu z pole "Real64Array" a vypíše ji.

Proces vypsání obecně probíhá tak, že pomocí objektů "To String" jsou předem vypsány nadpisy sloupců, pod než se následně vkládají hodnoty příslušné danému sloupci (volené hodnoty, měřené hodnoty a odchylky). Při tvorbě programu bylo třeba vyrovnat se s problémem spojeným s formátováním, kdy bylo obtížné jednak docílit toho, aby jednotlivé hodnoty, respektive text byly přesně pod sebou. Docílit toho se nakonec podařilo pomocí možnosti volby šířky výpisu, která se nastavila identicky pro každou hodnotu, a díky tomu se na uživatelském panelu zobrazuje poměrně atraktivní rozhraní, jak lze posoudit na obrázku 5.23.

						· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
<b>(</b>	alibration	oflo	aarithmi	C CUR	ont mo	acuramant
<b>.</b>	Jailbration		yanunni	c cun	CHILING	
	Wed 24/ Jun/2015 1	14-10-24				
	Wed 24/04//2010	14.10.24				
· · · · L						
· · · · _				· _		
					-	
	Calibration 50 nA		Calibration 1 mA		Done	
						····
· · · ·						
				1.1		
	k R 1:1432840	e-13 k R	2 9 775957e-05			
	N_1(_1, 1, 1, 102010			1.1		
· · · ·						
	Set value [A]	Meas	ured v. [A]	Deviation	[%]	
	5.000E-009	5.29	3E-009	+5.865		
	1.200E-008	1.20	4E-008	+0.314		
	3.000E-008	2.98	7E-008	-0.442		
	1.000E-006	9.93	6E-007	-0.639		
	7.000E-006	6.96	7E-006	-0.475		
	3.200E-005	3.19	2E-005	-0.246		
	1.000E-004	1.00	0E-004	+0.026		
	3 000E-004	3.00	7E-004	+0.239		
	5.000E-004	5.01	2E-004	+0.232		
	7.000E-004	7.01	3E-004	+0 192		
	1 000E-004	1.01	0= 002	+0.000		
	1.0002-003	1.00	02-003	+0.000		
	1					
🗳						<u> </u>
	• • • • • • • • • • • • • • • • •					
	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · <u>· ·</u>	· · · · · · · · · · · · · · ·		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
	• • • • • • • • • • • • • • • • •					
	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · <u>· ·</u>	· · · · · · · · · · · · · · ·		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
	• • • • • • • • • • • • • • • • •					
· · · · · · ·	<u></u>	· · · · · <u>· ·</u>	· · · · · · · · · · · · · · ·			

Obrázek 5.23: Uživatelský panel

Wed 24/Jun/2015 14:10	:24	
konst1: 1.432840e-13	konst2: 9.775957e-05	
Set value [A]	Measured v. [A]	Deviation [%]
5.000E-009	5.293E-009	+5.865
1.200E-008	1.204E-008	+0.314
3.000E-008	2.987E-008	-0.442
1.000E-006	9.936E-007	-0.639
7.000E-006	6.967E-006	-0.475
3.200E-005	3.192E-005	-0.246
1.000E-004	1.000E-004	+0.026
3.000E-004	3.007E-004	+0.239
5.000E-004	5.012E-004	+0.232
7.000E-004	7.013E-004	+0.192
1.000E-003	1.000E-003	+0.000

Obrázek 5.24: Výsledky zobrazené v textovém souboru

# Kapitola 6

### Závěr

Jako cíl této bakalářské práce bylo vytyčeno navrhnout adekvátní postup kalibrace proudového systému kanálu provozního měření výkonu a dále vyvinout systém, pomocí kterého by tato kalibrace byla prováděna automatizovaně. Aby to bylo možné realizovat, nejprve byl prostudován systém ochran a regulace reaktoru VR-1, poté systém měření hustoty neutronového toku, přičemž obzvlášť velký důraz byl kladen na seznámení se s pro účely této práce klíčovým kanálem provozního měření výkonu a s proudovým režimem štěpné komory. Poté byla podrobně prostudována i problematika logaritmického zesilovače.

Následně bylo přistoupeno k realizaci praktické části, jíž bylo vyvinutí softwaru, který by prováděl kalibraci. Během toho bylo nutné konfrontovat se s řadou problémů, kterými byla zejména specifika programu Agilent VEE, v němž byl software vytvářen, kvůli kterým bylo například nutné některou z částí algoritmu naprogramovat velmi složitě, aby následující den víceméně náhodou vyšlo najevo, že se totéž dalo udělat velmi snadno pomocí některé z vestavěných funkcí VEE, po čemž samozřejmě následovalo další přepracování do té doby vytvořeného softwaru. Potrápit však dokázaly i zdánlivě banální, leč rafinované problémy, jako například nedostačující délka některých kabelů, jimiž byly přístroje tvořící aparaturu spojeny. Nicméně všechny překážky se podařilo překonat, a tak nyní lze říci, že úkoly, jež jsme byly stanoveny v úvodní části této práce, se splnit podařilo.

Na obrázku 5.23, respektive 5.24 lze vidět výstup na alfanumerickém displeji, respektive výstup v textovém souboru. Přesnost kalibrace lze zhodnotit následovně: v rozsahu pěti řádů činí odchylka méně než 1 %, což lze považovat za velmi uspokojivý výsledek. Je namístě rovněž se vyjádřit k prvnímu řádku výsledků z obrázků 5.23, respektive 5.24; jak bylo řečeno v 5.3.2, přesnost generátoru B2902A je  $\pm (0,06\%+100pA)$ . Při kalibraci pro 5 nA tato chyba představuje až 2 %. O takto velký přírůstek mohla být zvýšena odchylka ve zmíněném prvním řádku v důsledku nepřesnosti generátoru.

Pro účely využití na školním reaktoru VR-1 je přesnost dostatečná, poněvadž na reaktoru se proudové měření používá od cca 50 nA.

### Literatura

- Státní úřad pro jadernou bezpečnost: bezpečnostní návod; požadavky státního úřadu pro jadernou bezpečnost na výzkumná jaderná zařízení pro zajištění jaderné bezpečnosti, radiační ochrany, fyzické ochrany a havarijní připravenosti, SÚJB, duben 2004
- [2] Martin Kropík, Inovace systému ochran a řízení školního reaktoru, Bezpečnost jaderné energie 22(60), 2014 č. 5/6
- [3] Martin Kropík, Jan Rataj, Ľubomír Sklenka, Upgrade of I & C at VR-1 Training Reactor, IAEA, Vienna, Austria, May 2012
- [4] Martin Kropik, Monika Jurickova, Department of Nuclear Reactors, Calibration of New I & C at VR-1 Training Reactor, Nuclear engineering and Design, 241 (4/2011)
- [5] Log and Antilog Amplifiers, DIT, School of Electronic and Communications Engineering
- [6] Logarithmic Converter AD8304, One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.
- [7] PMV, Systém provozního měření výkonu jaderného reaktoru, Uživatelská příručka, Ing. Milan Kaše, Název projektu: 05-10-07-046-CVUT\_PROVOZNI\_MERENI\_VYKONU\_VR-1, 2007
- [8] Michal Šunka, Měření a vyhodnocování výkonu jako bezpečnostního parametru školního jaderného reaktoru VR-1, Diplomová práce, 2013
- [9] N708, Převodník pro neutronovou komoru, Uživatelská a servisní příručka, 4.5.2008
- [10] N708 Popis rozhraní příkazového řádku, 4.5.2008
- [11] Agilent B2900 Series Precision Source/Measure Unit User's Guide, Agilent technologies, Version 7.0, First edition, march 2011, Manual Part Number B2910-90010
- [12] článek o Agilent VEE, citováno z webové adresy https://en.wikipedia.org/wiki/Agilent\_VEE dne 26.6.2015

- [13] VEE Pro User's Guide, Agilent technologies, Version 7.0, Eighth edition, February 2004, Manual Part Number E2011-90011
- [14] článek o LabView, citováno z webové adresy https://en.wikipedia.org/wiki/LabVIEW dne 24.6.2015