

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ V LIBERCI
nositelka Řádu práce

Fakulta strojní

Obr. 23-40-5

**Automatizované systémy řízení výrobních procesů
ve strojírenství**

KATEDRA TECHNICKÉ KYBERNETIKY

**Numeričká simulace typických paruch vybraných zařízení
jaderné elektrárny**

Autor : Jiří R a n e š

Vedoucí práce : Ing. Zdeněk D u ř t

Konzultant : Ing. Zdeněk D u ř t (VŠST Liberec)

KTK ASŘ SP 058

Obsah práce a příloh :

Počet stran	: 81
Počet příloh a tabulek	: 12
Počet obrázků	: 16
Počet výkresů	: 0
Počet modelů a jiných příloh	: 0

Vysoká škola: **VŠST Liberec**
Katedra: **technické kybernetiky**

Fakulta: **strojní**
Školní rok: **1982/83**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

pro **s. Jiřího R a m e š e**
obor **23-40-8 Automatizované systémy řízení výrobních procesů**
ve strojírenství

Vedoucí katedry Vám ve smyslu nařízení vlády ČSSR č. 90/1980 Sb., o státních závěrečných zkouškách a státních rigorózních zkouškách, určuje tuto diplomovou práci:

Název tématu: **Numerická simulace typických poruch vybraných**
zařízení jaderné elektrárny

Zásady pro vypracování:

- 1) Prostudovat funkci a vzájemné vazby jednotlivých zařízení primárního okruhu jaderné elektrárny.
- 2) Prostudovat možnosti numerické simulace provozu dílčích zařízení na číslicovém počítači EC 1033.
- 3) Sledovat dynamiku technologických procesů na číslic.počítači.

Autorské právo se řídí směrnicemi
MŠK pro státní záv. zkoušky č.j. 31
727/62-11/2 ze dne 12. července
1962-Věstník MŠK č. 11, sešit 24 ze
dne 31. 8. 1962 19 out. z č. 115/53 Sb.

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ
Ústřední knihovna
LIBEREC 1, STUDENTSKÁ 5
PSČ 461 17

Rozsah grafických prací:

Rozsah průvodní zprávy: 50 stran

Seznam odborné literatury:

1. Mišák J., Klepáč J.: PUMCO: Výpočetní program pro hydrodynamiku primárního okruhu VVER při výpadku cirkulačních čerpadel; výzk.zpráva VÚJE 22/80, Jaslovské Bohunice
2. Nevřiva P.: Simulace řídicích systémů na číslicovém počítači; SNTL Praha, 1975

Vedoucí diplomové práce: Ing. Zdeněk D u ř t

Datum zadání diplomové práce: 7.10.1982

Termín odevzdání diplomové práce: 27.5.1983

L. S.


Doc.Ing.Ján Alaxin, CSc.

.....
Vedoucí katedry


Doc.RNDr Bohuslav Stříž, CSc.

.....
Děkan

v Liberci dne 5.10. 1982

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci dne 27. května 1983



O B S A H

Seznam použitých symbolů a zkratk	6
1 ÚVOD	10
2 JADERNÉ ELEKTRÁRNY	15
2.1 Jaderné elektrárny s reaktory VVER	16
2.1.1 Popis činnosti jaderné elektrárny VVER	16
2.1.2 Primární okruh jaderné elektrárny s reaktorem VVER 440	18
2.1.3 Hlavní technické údaje reaktoru VVER 440	20
3 MATEMATICKÝ MODEL PRIMÁRNÍHO OKRUHU	22
3.1 Dynamika primárního okruhu	22
3.2 Matematický model PO	25
3.2.1 Tlaková ztráta v reaktoru	25
3.2.2 Tlakové ztráty ve smyčkách	26
3.2.3 Tlakové ztráty na armaturách	26
3.2.4 Hydrostatické tlakové rozdíly	28
3.2.5 Tlakový přírůstek na čerpadle	28
3.2.6 Tlakový rozdíl na reaktoru	32
3.2.7 Sestavení matematického modelu PO	33
3.2.8 Matematický model pro výpadek všech HCČ	35
3.2.9 Universální matematický model	36
3.3 Hodnoty pro počítačový model	40
4 POČÍTAČOVÝ MODEL	41
4.1 Získání aproximačních vztahů	41
4.1.1 Aproximace charakteristiky čerpadla	42
4.1.2 Hustota chladiva	44
4.1.3 Ztrátový koeficient armatury	45
4.2 Sestavení simulačního modelu	45
4.2.1 Struktura programu v jazyce CSMP	46
4.2.2 Struktura simulátoru	46
4.2.3 Popis programu pro simulaci výpadku 1-5 HCČ	47
4.2.4 Program pro simulaci výpadku všech HCČ	48
4.2.5 Universální počítačový model	49
4.2.6 Model nezávislých smyček	49

5	EXPERIMENTY NA MODELECH	51
5.1	Postup při experimentování	51
5.1.1	Výpadek jednoho až pěti HCČ	51
5.1.2	Experimenty s modelem výpadku všech HCČ	52
5.1.3	Experimenty s universálním modelem	53
5.1.4	Experimenty na modelu s nezávislými smyčkami	54
5.2	Zvláštnosti při realizaci experimentů	54
6	VÝSLEDKY EXPERIMENTŮ	57
6.1	Zpracování výsledků experimentů	57
6.1.1	Výpadek jednoho až pěti HCČ	57
6.1.2	Výpadek všech HCČ	67
6.1.3	Universální model	67
6.1.3.1	Výpadek jednoho až šesti HCČ	67
6.1.3.2	Následovný rozběh čerpadel	68
6.1.3.3	Uzavření sekčních armatur	70
6.2	Porovnání experimentálních a vypočtených výsledků	71
7	SROVNÁNÍ S ANALOGOVÝM MODELEM	74
7.1	Srovnání realizace modelů	74
7.2	Srovnání výsledků modelů	77
7.3	Porovnání modelů	77
8	ZÁVĚR	79
	Seznam použité literatury	80

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

symbol v		význam
textu	programu	
PO	-	primární okruh
HČČ	-	hlavní cirkulační čerpadlo
PG	-	parogenerátor
AZ	-	aktivní zóna
W_e	-	watt elektrického výkonu
ω	-	úhlová rychlost rotorů čerpadel
ω_0	OØ	nominální úhlová rychlost
ω_{ref}	OREF	referentní úhlová rychlost
ω_{sync}	OSYNC	synchronní úhlová rychlost
V	OVREF	úhlová rychlost rotoru vypadlého čerpadla
P	OPREF	úhlová rychlost rotoru pracujícího čerpadla
-	OV	úhlová rychlost rotoru vypadlého čerpadla, vyjádřená v jednotkách OREF
-	OP	úhlová rychlost rotoru pracujícího čerpadla, vyjádřená v jednotkách OREF
Q	-	objemový průtok
Q_0	QØ	nominální objemový průtok smyčkou
Q_{ref}	QREF	referentní objemový průtok
QV	QVREF	objemový průtok vypadlou smyčkou
QP	QPREF	objemový průtok pracující smyčkou
Q_r	QRREF	objemový průtok reaktorem
Q_s	-	objemový průtok smyčkou
-	QV	objemový průtok vypadlou smyčkou, vyjádřený v jednotkách QREF
-	QP	objemový průtok pracující smyčkou, vyjádřený v jednotkách QREF
ω_{BR}	OBR	prahová úhlová rychlost

symbol v		význam
textu	programu	
P	P	počet smyček s pracujícím HCČ
V	V	počet smyček s vypadlým HCČ
Δp_c	DAPC	přírůstek tlaku na čerpadle
Δp_s	DAPS	tlaková ztráta ve smyčce
Δp_r	DAPR	tlaková ztráta v reaktoru
Δp_a	DAPA	tlaková ztráta na armaturách
$\Delta p_{(p_2-p_1)}$	PDELTA	rozdíel tlaku na reaktoru
Δp_{hc}	DAPH	hydrostatický tlakový rozdíl ve smyčce
Δp_{hr}	DAPHR	hydrostatický tlakový rozdíl v reaktoru
H	-	výtlačná výška čerpadla
H_{ref}	HREF	referenční výtlačná výška čerpadla
-	H	výtlačná výška čerpadla, vyjádřená v jednotkách HREF
g	G	gravitační tíhové zrychlení
ρ	-	hustota chladiva
ρ_0	RO0	hustota chladiva při 0°C
ρ_1	RO1	hustota chladiva na výstupu z reaktoru
ρ_2	RO2	hustota chladiva na vstupu do reaktoru
$\bar{\rho}$	ROST	průměrná hustota chladiva
AR	AR	výpočtový průřez reaktoru
AS	AS	výpočtový průřez potrubí PO
γ	GAMA	záporná hodnota koeficientu objemové roztažnosti
$(\frac{L}{A})_s^{-1}$	S	geometrie PO
$(\frac{L}{A})_r^{-1}$	R	geometrie reaktoru
I	I	moment setrvačnosti rotujících částí čerpadla

symbol v textu programu	význam
h_2 H2	výška vstupního hrdla reaktoru
h_1 H1	výška výstupního hrdla reaktoru
h_{AZ} HAZ	průměrná výška aktivní zóny
h_{PG} HPG	průměrná výška parogenerátoru
ξ_s XIS	celkový ztrátový koeficient v potrubí
ξ_r XIR	celkový ztrátový koeficient v reaktoru
ξ_a XIA	ztrátový koeficient na armatuře
$\xi_{z/D}$ ZA	poměrný zdvih šoupěte armatury
T_E TE	elektrický moment
T_{E0} -	nominální elektrický moment
T_{Emax} TEM	elektrický moment při maximálním skluzu
T_F TF	třecí moment
T_{F0} TFO	nominální třecí moment
T_{BR} TBR	prahový třecí moment
T_H TH	hydraulický moment
T_{H0} -	nominální hydraulický moment
T_{Href} THREF	referenční hydraulický moment
η_{el} -	elektrická účinnost motoru
η_{hyd} -	hydraulická účinnost čerpadla
P_p -	příkon elektromotoru
P_v -	výkon elektromotoru
p -	počet pólových dvojic
f -	síťová frekvence
s S	skluz elektromotoru
s_0 -	nominální skluz elektromotoru
s_m SM	maximální skluz elektromotoru
τ_{AU} TAU	čas opětovného rozběhu čerpadla

symbol v		
textu	programu	význam
CA	CA	časová konstanta rychlosti spouštění šoupětě armatury
t	TIME	čas
AP	-	analogový počítač
ČP	-	číslicový počítač
UFM	-	universální funkční měnič
Sj	-	strojová jednotka

index v		
textu	programu	význam
P	P	v pracující smyčce
V	V	ve vypadlé smyčce
1	1	ve výstupní větvi
2	2	ve vstupní větvi

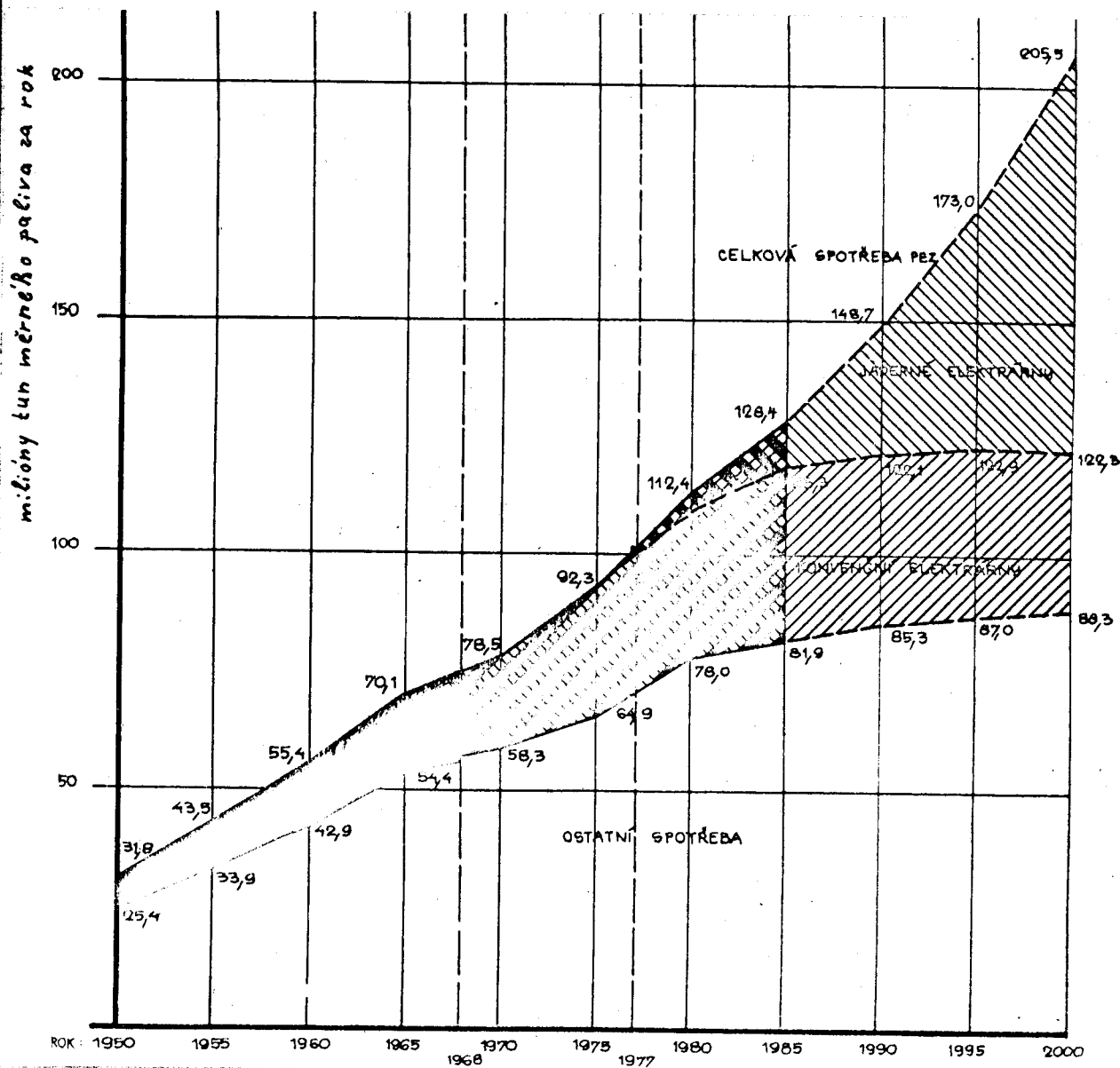
1 Ú V O D

Žijeme ve vyspělé socialistické společnosti s vysoce rozvinutou průmyslovou výrobou. Jedním z hlavních úkolů našeho národního hospodářství je zajistit dostatečné zdroje energie jak pro průmysl a hospodářství vůbec, tak i pro spotřebu v domácnostech, kulturních zařízeních atd. Zejména vysoké požadavky jsou kladeny na výrobu elektrické energie /obr.1/.

K zajištění těchto rostoucích potřeb elektrické energie musíme budovat její zdroje. Jelikož perspektiva je v jaderné energetice, věnuje naše společnost velkou pozornost právě této oblasti / obr.2/.

Pro jadernou energetiku hovoří hlediska ekonomická, ekologická i hlediska ochrany zdraví lidí. Pro názornost několik čísel: i když jsou náklady na výstavbu jaderných elektráren o 30% až 50% vyšší než u klasických tepelných elektráren, přesto jsou náklady na výrobu elektrické energie v jaderných elektrárnách nižší. Jeden kilogram jaderného paliva se vyrovná asi dvaceti tunám černého uhlí, čímž podstatně klesají náklady na dopravu a rovněž zajištění přísunu paliva za obtížných klimatických podmínek je mnohem snadnější. Na Evropu ročně spadne asi 150 mil. tun škodlivin, obsahujících prachové částice, kysličník uhličitý, kysličník siřičitý a další toxické látky. Tvorbu těchto škodlivin může jaderná energetika podstatným způsobem omezit. Co se týče radiačních dávek z jaderných elektráren, bylo prokázáno, že jsou mnohem menší než dávky obdržené radiologickým vyšetřením a dokonce ještě

menší než dávka, obdržená pravidelným denním několikahodinovým sledováním televize. K získání bližších údajů lze doporučit literaturu [1] a [2].



Obr.1 Orientační diagram vývoje spotřeby prvotních energetických zdrojů v ČSSR do roku 2000.

VARIANTA I

345 TWh / ROK 2000

5000 MW / 1985 - 12000 MW / 1990

TYP REAKTORŮ VVER-440; VVER-1000; BN-1000

ZPRACOVÁNO DLE ÚVAH ZNÁMÝCH K 10.12.1969,
AKTUALISOVANÝCH K BŘEZNU 1970

LEGENDA



VVER-440

VVER-1000

BN-1000

I, II, III

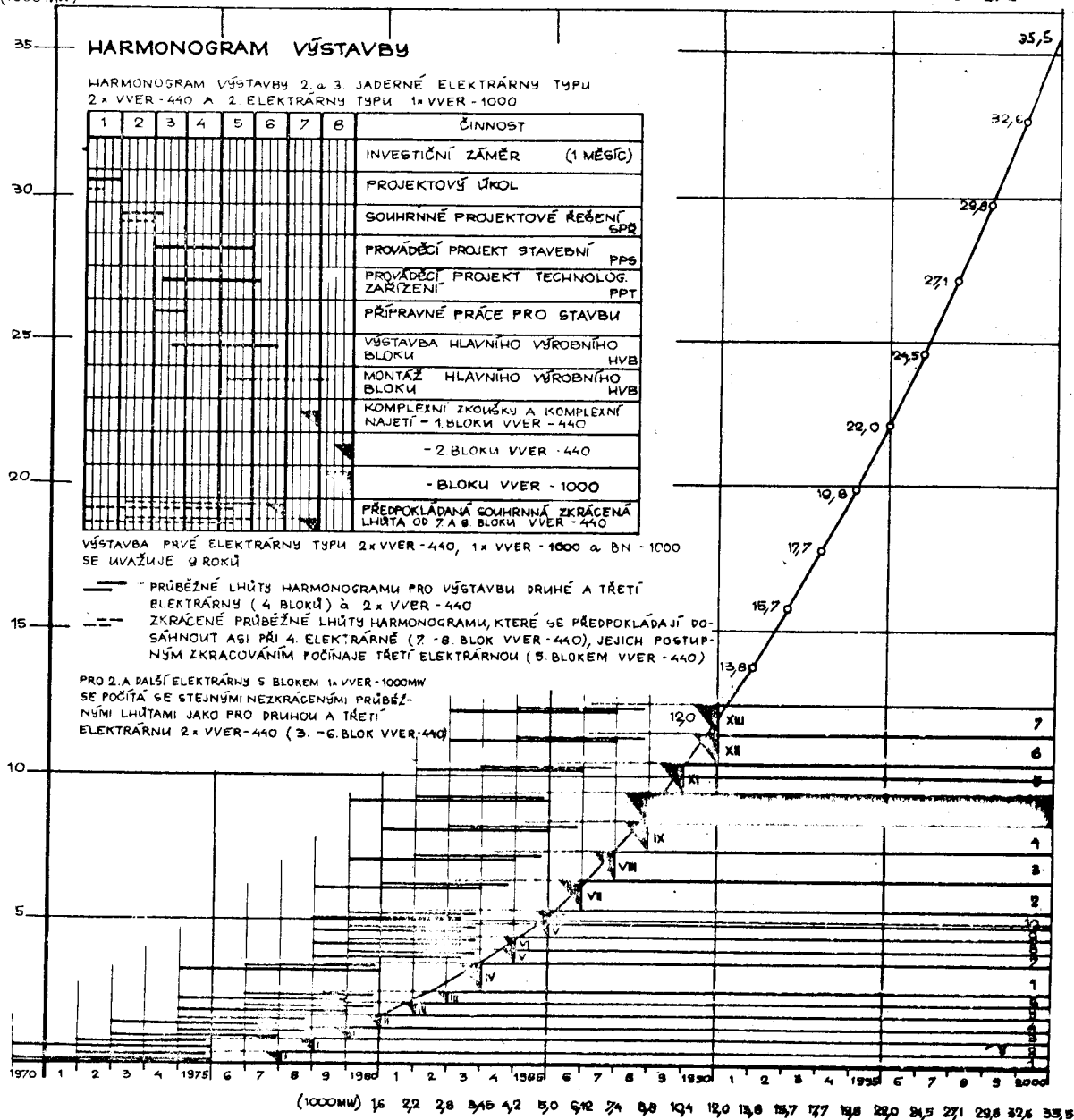
STAVENIŠTĚ

1, 2, 3

PORADÍ UVÁDĚNÍ DO PROVOZU

BLOKU PŘÍSLUŠNÉHO TYPU

(1000 MW)



Obr.2 Model výstavby jaderných elektráren v ČSSR do r.2000

Všechna tato fakta vedla k bouřlivému rozvoji jaderné energetiky v posledních dvaceti až třiceti letech. Jak uvádí [2], k roku 1975 dosáhl výkon jaderných reaktorů 92 MW_e, pracovalo 200 reaktorů v devatenácti zemích. Podle zprávy MAAE (Mezinárodní agentura pro atomovou energii) bylo v polovině roku 1979 v provozu 226 reaktorů s celkovým výkonem 117 GW_e, ve stadiu výstavby bylo 230 reaktorů s plánovaným celkovým výkonem více jak 210 GW_e a plán počítal s výstavbou 193 reaktorů s výkonem 138 GW_e /tab.1/. Rychle rostl i jednotkový výkon reaktorů. Zatím co v šedesátých letech dosahoval 0,2 - 0,4 GW_e, v sedmdesátých letech se již pohyboval okolo 1,0 - 1,3 GW_e.

ROK	VÝKON VŠECH ELEKTRÁREN GW _e	VÝKON JADERNÝCH ELEKTRÁREN GW _e	PODÍL JE
1978	1900	110	5,8%
1980	2100	170	8,0%
1985	2700-3000	300-350	11,7-12,0%
1990	3300-3700	475-600	14,0-16,2%
2000	5500-6600	1100-1700	20,0-26,0%

Tab.1 Přehled o celosvětovém vývoji jaderné energetiky

Důležitou se v souvislosti s rychlým rozvojem jaderné energetiky stala otázka bezpečnosti provozu a ochrany zdraví a životů lidí, zejména pak obsluhujícího personálu. V této souvislosti nabývá na významu spolupráce zemí, podílejících se na rozvoji jaderné energetiky sdružených v MAAE a rovněž spolupráce socialistických zemí v rámci RVHP. Otázkám bezpečnosti provozů je věnována velká pozornost, o čemž svědčí i ta skutečnost, že naší škole byl zadán státní úkol simulovat provoz jaderné elektrárny s ohledem na možnosti sledování dynamiky technologických procesů na tomto modelu a jehož malou součástí je i tato práce.

2 J A D E R N Ě E L E K T R Á R N Y

Jaderná energetika je jedna z forem mírového využívání jaderné energie. Většina jaderných reaktorů, které byly spuštěny, pracují pro výrobu elektrické energie, pouze malá část slouží v teplárnách, výzkumných zařízeních a jinde. Bylo vyvinuto více typů jaderných reaktorů, jejichž přehled a stručný popis podává tab.2.

Reaktor	Chladivo	Označení podle MAEE
Lehkovodní	Obyčejná voda	PWR - tlakovodní reaktor
		BWR - varný reaktor
Grafitový	Kysličník uhličitý	GCR - plynem chlazený
		AGR - zdokonalený plynem chlazený reaktor
	Hélium	HTGR - vysokoteplotní chlazený plynem
Těžkovodní	Obyčejná voda	LWGR - grafitový s tlakovými kanály chlazený (RBMK) lehkou vodou
	Těžká voda	PHWR - těžkovodní chlazený a moderovaný (CANDU) těžkou vodou
	Obyčejná voda	HWLWR - těžkovodní chlazený lehkou vodou

Tab.2 Typy jaderných reaktorů

Snaha o pokrytí roztoucích potřeb elektrické energie vedla v ČSSR k rozhodnutí realizovat u nás elektrárny s reaktory VVER (mezinárodní označení PWR) 440 sovětské produkce, které jsou provozně ověřené a ekonomicky výhodné.

2.1 Jaderné elektrárny s reaktory VVER

Po zkušenostech, získaných provozem demonstrační jaderné elektrárny A-1 v Jaslovských Bohunicích bylo přikročeno k realizaci bloku V-1 v těsné blízkosti bloku A-1 ve smyslu mezivládní dohody z dubna 1970 mezi ČSSR a SSSR. Zároveň bylo rozhodnuto usnesením vlády ČSSR 197/75 do této lokality umístit další blok V-2 s některými změnami, vedoucími ke zvýšení bezpečnosti provozu této jaderné elektrárny [3]. V současné době je v plném proudu výstavba jaderné elektrárny s reaktory VVER 440 v Dukovanech a v Mochovci, ale zároveň se plánuje již výstavba prvních reaktorů VVER 1000, neboť stavba reaktorů s nižším výkonem se dnes již ukazuje být neekonomická.

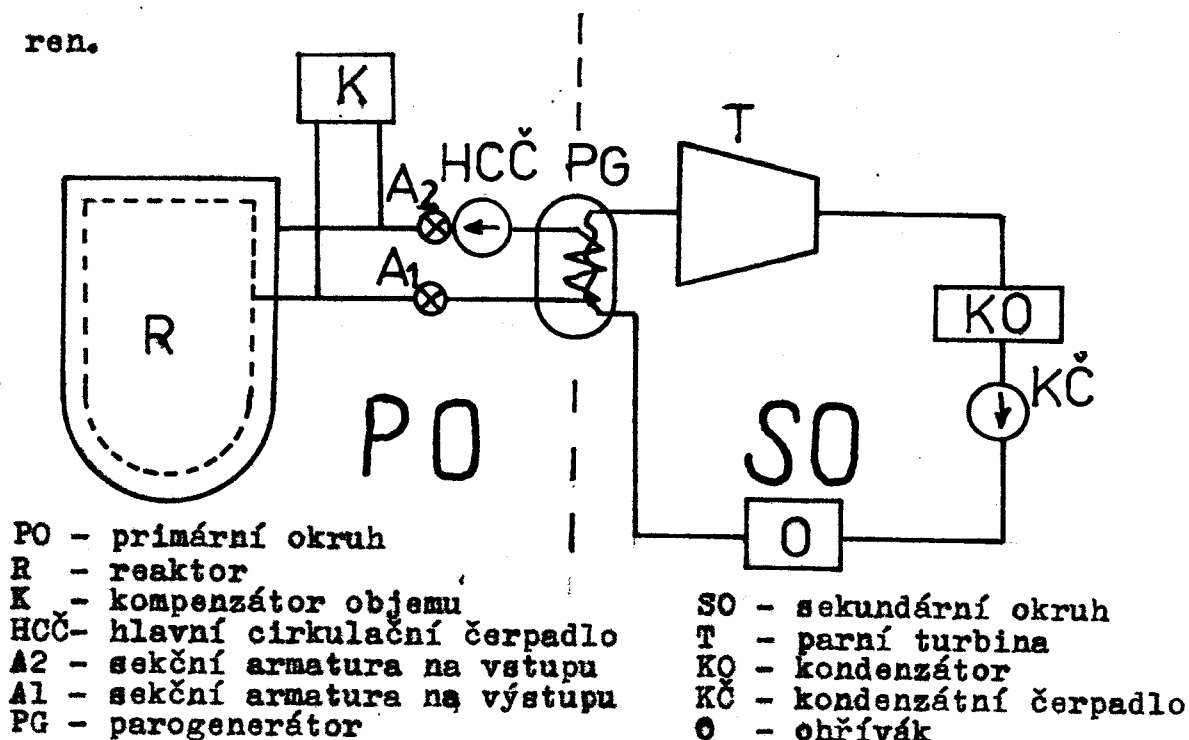
Zjednodušené blokové schéma jaderné elektrárny je na obr.3.

2.1.1 Popis činnosti jaderné elektrárny VVER

Úkolem jaderné elektrárny je zajistit co nejekonomičtější výrobu elektrické energie. Jelikož účinnost reaktorů roste s jednotkovým výkonem, je snahou konstruktérů a techniků konstruovat reaktory s výkonem 1 GW_e a více.

Jako paliva je použit přírodní, mírně obohacený uran,

protože umožňuje použít jednodušší a provozně spolehlivější zařízení, než je tomu u jiných typů jaderných elektráren.



Obr.3 Zjednodušené schema jaderné elektrárny

Celou jadernou elektrárnu je možno rozdělit do dvou základních funkčních celků, a to primárního okruhu a sekundárního okruhu (viz obr.3). Typické pro jaderné elektrárny je použití lehké vody jako moderátoru, chladiva i teplotnosného média (označení VVER je ze sovětského Vodo-Vodjanoj Eněrgetičeskij Reaktor). Dvouokruhový systém si vynutilo použití tlakové vody k ochlazování reaktoru. Společným místem obou okruhů je parogenerátor, v němž vzniká sytá pára pro pohon turbíny generátoru. Elektrárna má pomocné alternátory, které jsou umístěny na společném hřídeli s hlavními generátory a slouží k pokrytí vlastní spotřeby elektrárny.

V případě havarie (převýšení toku neutronů, pokles periody reaktoru, snížení průtoku chladiva, po př. jeho tlaku, převýšení rychlosti poklesu tlaku chladiva či celkové selhání všech částí energetického systému) dojde automaticky k havarijnímu zastavení reakce. To se provádí rychlým zasunutím všech řídících tyčí do aktivní zóny. Při tom je zajištěno dochlazování aktivní zóny a nouzové napájení důležitých spotřebičů elektrickou energií získanou z vlastní pomocné elektrárny.

2.1.2 Primární okruh jaderné elektrárny s reaktorem VVER 440

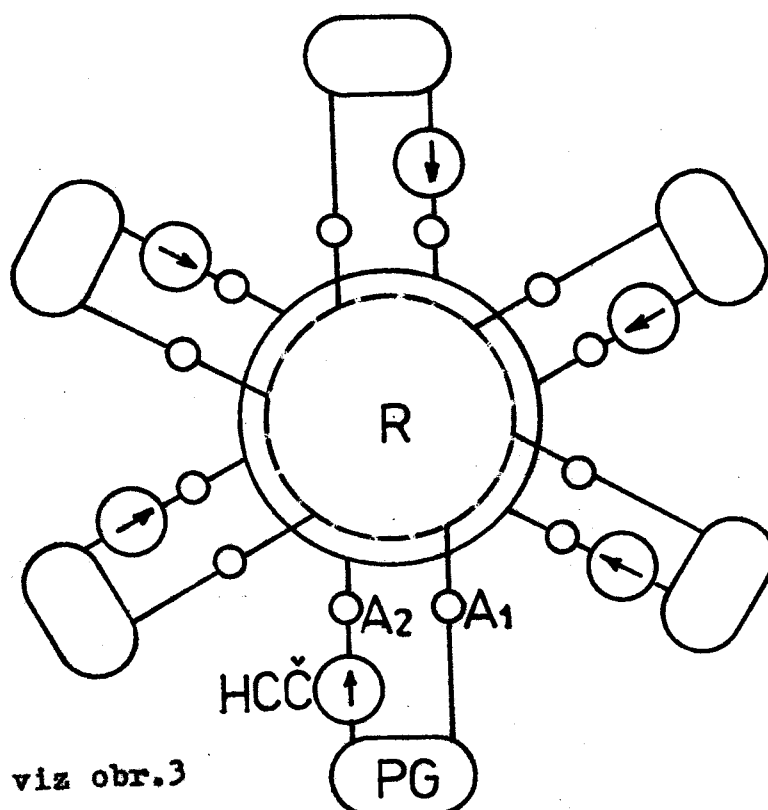
Primární okruh jaderné elektrárny s reaktorem typu VVER je ta část jaderné elektrárny, v níž se bezprostředně uskutečňuje proces přeměny jaderné energie obsažené v jaderném palivu v energii tepelnou a transport této energie prostřednictvím chladiva do parogenerátorů, v němž získanou tepelnou energii opět odevzdá. Primární okruh je schematicky naznačen na obr.4.

Hlavními částmi primárního okruhu jsou:

- reaktor
- parogenerátor
- hlavní cirkulační čerpadlo
- sekční armatury
- příslušné potrubí

K primárnímu okruhu je připojen kompenzátor objemu, jehož úkolem je vyrovnávat tlakové rozdíly a udržovat tlak chladiva v mezích provozních hodnot. Kompenzátor není v obr.4

zakreslen a popis jeho činnosti není náplní této práce.



Legenda viz obr.3

Obr.4 Schema primárního okruhu JE VVER-440

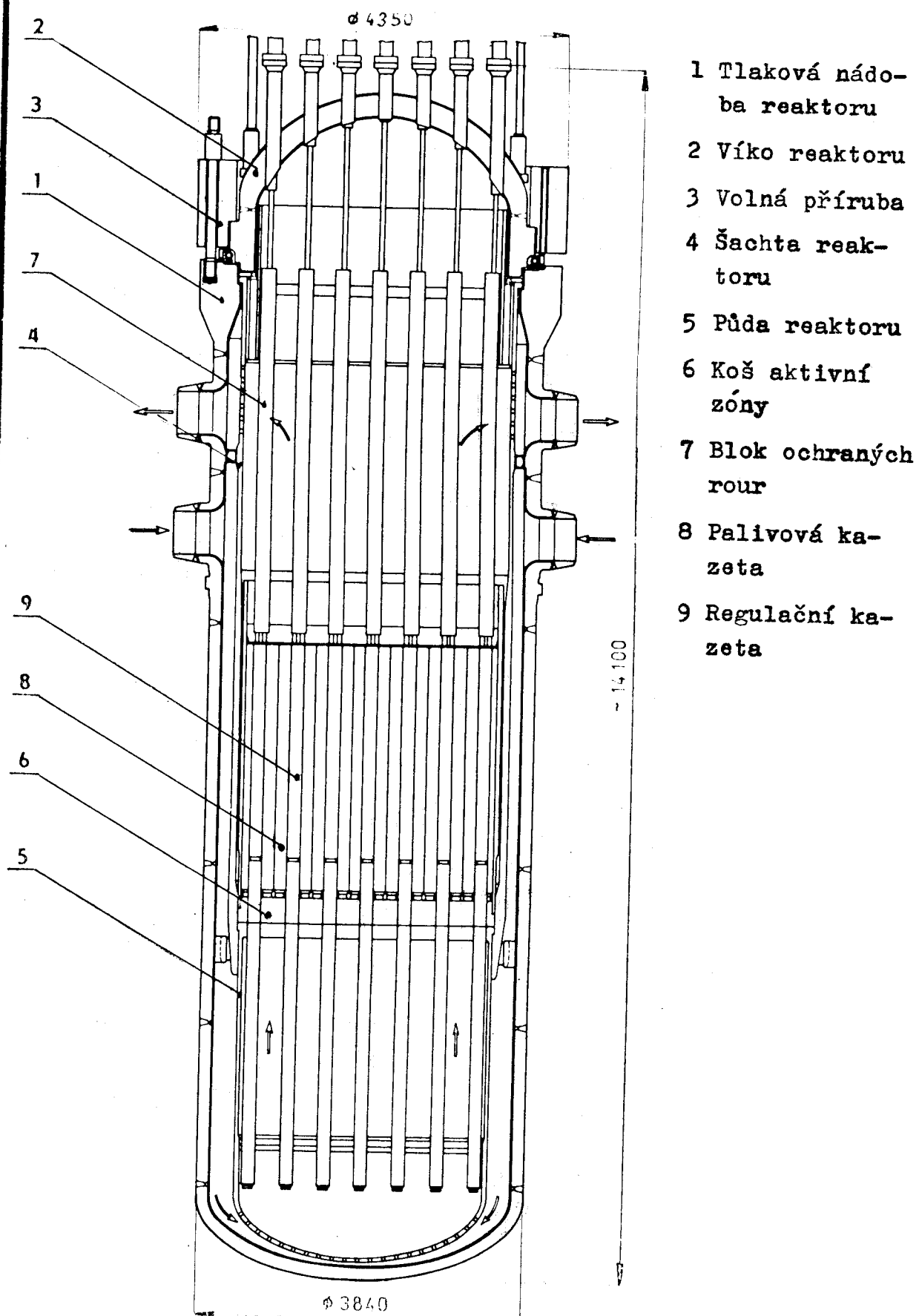
Chladivo, tlaková lehká voda, je v každé smyčce (těch je u bloku VVER 440 celkem 6) čerpáno odstředivým radiálním čerpadlem, které je poháněno asynchronním elektromotorem do šachty reaktoru. V reaktoru proudí přes dolní komoru do aktivní zóny. Po zahřátí v aktivní zóně vstupuje do horní komory, kde se rozděluje opět do jednotlivých smyček a potrubím proudí do parogenerátorů, kde se opět ochlazuje a celý cyklus se opět opakuje. Za hlavním cirkulačním čerpadlem (dále jen HCČ) ve vstupní větvi a ve výstupní větvi jsou umístěny sekční armatury, které

jsou ovládány malými elektromotory a zavírají se v případě havarie. Je použito potrubí Js 500.

Jaderný reaktor je umístěn v betonové šachtě. Je tvořen tlakovou nádobou, aktivní zónou (dále jen AZ) a vnitřní částí. Palivem je mírně obohacený kysličník uraničitý, obohacení je provedeno izotopem U^{235} . Chladiivo je zároveň moderátorem. Reaktor VVER 440 je na obr.5, šipky naznačují směr proudění chladiiva. Tolik k popisu činnosti primárního okruhu, činnosti sekundárního okruhu se tato práce nezabývá.

2.1.3 Hlavní technické údaje reaktoru VVER 440

palivo	přírodní uran obohacený U^{235}
průtočné množství chladiiva	10830 kg/s
teplota chladiiva na vstupu	542 K
teplota chladiiva na výstupu	573 K
tlak chladiiva na vstupu	12,725 MPa
tlak chladiiva na výstupu	12,450 MPa
přírůstek tlaku na čerpadle	0,53 MPa
příkon pohonu čerpadla	2,26 MW
tepelný výkon reaktoru	1375 MW
elektrický výkon	440 MW
vsázka uranu	42 t
průměrná doba provozu mezi výměnami paliva	7000 hodin
počet palivových kazet	349
počet prutů v kazetě	126



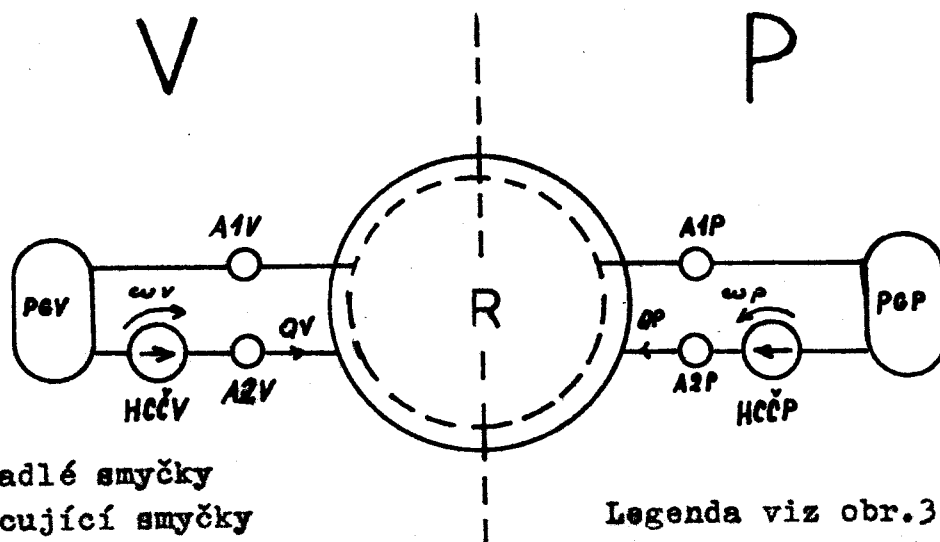
Obr.5 Reaktor VVER-440

3 MATEMATICKÝ MODEL PRIMÁRNÍHO OKRUHU

Hlavním úkolem této práce je sledovat dynamiku primárního okruhu (dále jen PO), sestavit jeho matematický model a na základě toho pak sestavit simulační model pro číslicový počítač.

3.1 Dynamika primárního okruhu

Na obr.6 je zjednodušené schema PO, na němž je možné sledovat jeho dynamiku. Hlavními dynamickými vlivy zřejmě jsou výpadky čerpadel, po přejich opětovný rozběh. Dalším dynamickým vlivem může být uzavření, ať již úplné nebo částečné, některé ze sekčních armatur. Práce je zaměřena hlavně na sledování vlivu HCČ, vliv sekčních armatur je druhotný.



V vypadlé smyčky
P pracující smyčky
 ω otáčky čerpadel
Q průtok smyčkami

Legenda viz obr.3, indexy P-pracující smyčky, V-vypadlé smyčky

Obr.6 Výpočtové schema primárního okruhu

Pracující smyčky jsou souhrně reprezentovány částí P, vypadlé částí V.

Při stacionárním provozu ($V=0$, V znamená počet vypadlých smyček) je veškerý přírůstek tlaku na čerpadle (Δp_c) spotřebován přírůstkem tlaku na vstupu a výstupu reaktoru ($p_2 - p_1$) a tlakovými ztrátami v PO (Δp_s) a v reaktoru (Δp_r); jedná se o tlakové ztráty jednak třením a jednak místní. Tlakové ztráty vznikající v parogenerátoru jsou brány souhrně jako ztráty v potrubí PO. Tlakové ztráty na armaturách jsou ztrátami místními a jsou proměnné v závislosti na zdvihu šoupěte armatury. Zanedbají-li se vlivy stlačitelnosti vody, změn tlaku v parogenerátoru, nehomogenity hustoty a přirozené cirkulace chladiva, jsou výše uvedené tlakové ztráty jedinými faktory, které ovlivňují chování PO. Vyjmenované zanedbávané vlivy lze skutečně zanedbat, pokud je v činnosti alespoň jedno HCČ. Dále se pro zjednodušení předpokládá konstantní průřez kanálů, jimiž chladicí kapalina protéká, stejné koeficienty tlakových ztrát pro oba směry proudění a dále je důležitá skutečnost, že průtoky jsou velké, takže lze zanedbat závislost třecích a místních ztrátových koeficientů na Reynoldsově čísla [7].

Pro stacionární stav lze tedy psát :

$$\Delta p_c - \Delta p_s - \Delta p_r - (p_2 - p_1) = 0 \quad (3.1.)$$

Pro stacionární stav dále platí, že rozdíl tlaků na vstupu a výstupu reaktoru se spotřebovává na tlakové ztráty v reaktoru (při respektování všech zjednodušujících předpokladů), tedy platí :

$$(p_2 - p_1) - \Delta p_r = 0 \quad (3.2.)$$

Modelové schema, uvedené na obr.6 sice danou problematiku poněkud zjednodušuje (předpokládá současné výpadky, po př.spuštění V čerpadel), ale při realizaci na počítači umožňuje podstatné zkrácení výpočtu. Tento fakt je významný zvláště ze dvou hledisek :

- 1/ klesá spotřeba strojového času počítače
- 2/ stane-li se tento model součástí modelu celé JE, bude vhodné, aby tyto časy byly co nejkratší, neboť je potřebné, aby výpočet mohl probíhat rychleji, než skutečný dynamický děj, což umožní předem předpovídat důsledky poruchy a včasným zásahem následky omezit.

V případě výpadku jednoho až pěti HCČ se začne průtok reaktorem i jednotlivými smyčkami měnit. Je tedy nutné hledat závislost mezi změnami tlaku a průtoku.

S odkazem na práci [7] byly použity vztahy :

$$\varphi \cdot \left(\frac{\ell}{A}\right)_s \cdot \frac{dQ_s}{dt} = \Delta p_c - \Delta p_s - \Delta p_a - (p_2 - p_1) \quad (3.3.)$$

$$\varphi \cdot \left(\frac{\ell}{A}\right)_r \cdot \frac{dQ_r}{dt} = (p_2 - p_1) - \Delta p_r \quad (3.4.)$$

kde φ značí hustotu chladiva, Q_s popř. Q_r jsou průtoky smyčkou či reaktorem a výrazy $\left(\frac{\ell}{A}\right)_s$, $\left(\frac{\ell}{A}\right)_r$ jsou koeficienty, postihující geometrii PO.

Rovnice (3.3.) a (3.4.) mají však pouze omezenou platnost, na což bylo již poukázáno při výčtu zjednodušujících předpokladů. V případě výpadku všech šesti HCČ nelze již

zanedbávat vliv přirozené cirkulace chladiva. V tomto případě je nutno uvažovat hydrostatické tlakové rozdíly na výškových kótách, odpovídajících vstupu (h_2) a výstupu (h_1) chladiva na reaktoru, výšce aktivní zóny (h_{AZ}) a výšce vstupu do parogenerátoru (h_{PG}). Rovnice (3.3.) a (3.4.) potom získávají tvar [7] :

$$\rho \left(\frac{\ell}{A} \right)_s \cdot \frac{dQ_s}{dt} = \Delta p_c - \Delta p_s - \Delta p_a - (p_2 - p_1) + \Delta p_{hc} \quad (3.5.)$$

$$\rho \left(\frac{\ell}{A} \right)_r \cdot \frac{dQ_r}{dt} = (p_2 - p_1) - \Delta p_r + \Delta p_{hr} \quad (3.6.)$$

Ukazuje se tedy, že dynamiku PO lze popsat soustavou diferenciálních rovnic prvního řádu.

3.2 Matematický model PO

Na základě kapitoly 3.1 byl sestaven matematický model PO. Při tom šlo o matematické vyjádření vztahů (3.3.) a (3.4.) pro výpadek jednoho až pěti HCČ, pro případě vztahů (3.5.) a (3.6.) pro výpadek šesti čerpadel, přičemž vztahy (3.5.) a (3.6.) jsou vlastně rozšířením vztahů (3.3.) a (3.4.); pro výpadek jednoho až pěti HCČ nebyly použity v zájmu co největšího zjednodušení modelu.

3.2.1 Tlaková ztráta v reaktoru

Tlakové ztráty reaktoru mají charakter ztrát třecích a ztrát lokálních. Přitom se předpokládá, že tyto ztráty jsou závislé jen na kinetické energii proudící kapaliny.

Byl použit vztah [7] :

$$\Delta p_r = \sum_i \lambda_{ri} \frac{l_{ri}}{D_{ri}} + \xi_{ri} \cdot \frac{Q_r |Q_r|}{2AR^2} \quad (3.7.)$$

Koeficienty λ postihují ztráty třecí, koeficienty ξ ztráty místní. Člen AR je výpočtový průřez reaktoru a indexem i se rozumí i -tá část reaktoru. Ztrátu v reaktoru lze souhrnně vyjádřit jako jedinou místní ztrátu, kterou lze postihnout jediným ztrátovým koeficientem ξ_r :

$$\xi_r = \sum_i \lambda_{ri} \frac{l_{ri}}{D_{ri}} + \xi_{ri} \quad (3.8.)$$

a po dosazení do (3.7.) máme nakonec :

$$\Delta p_r = \xi_r \cdot Q_r |Q_r| \cdot \frac{L}{2AR^2} \quad (3.9.)$$

3.2.2 Tlakové ztráty ve smyčkách

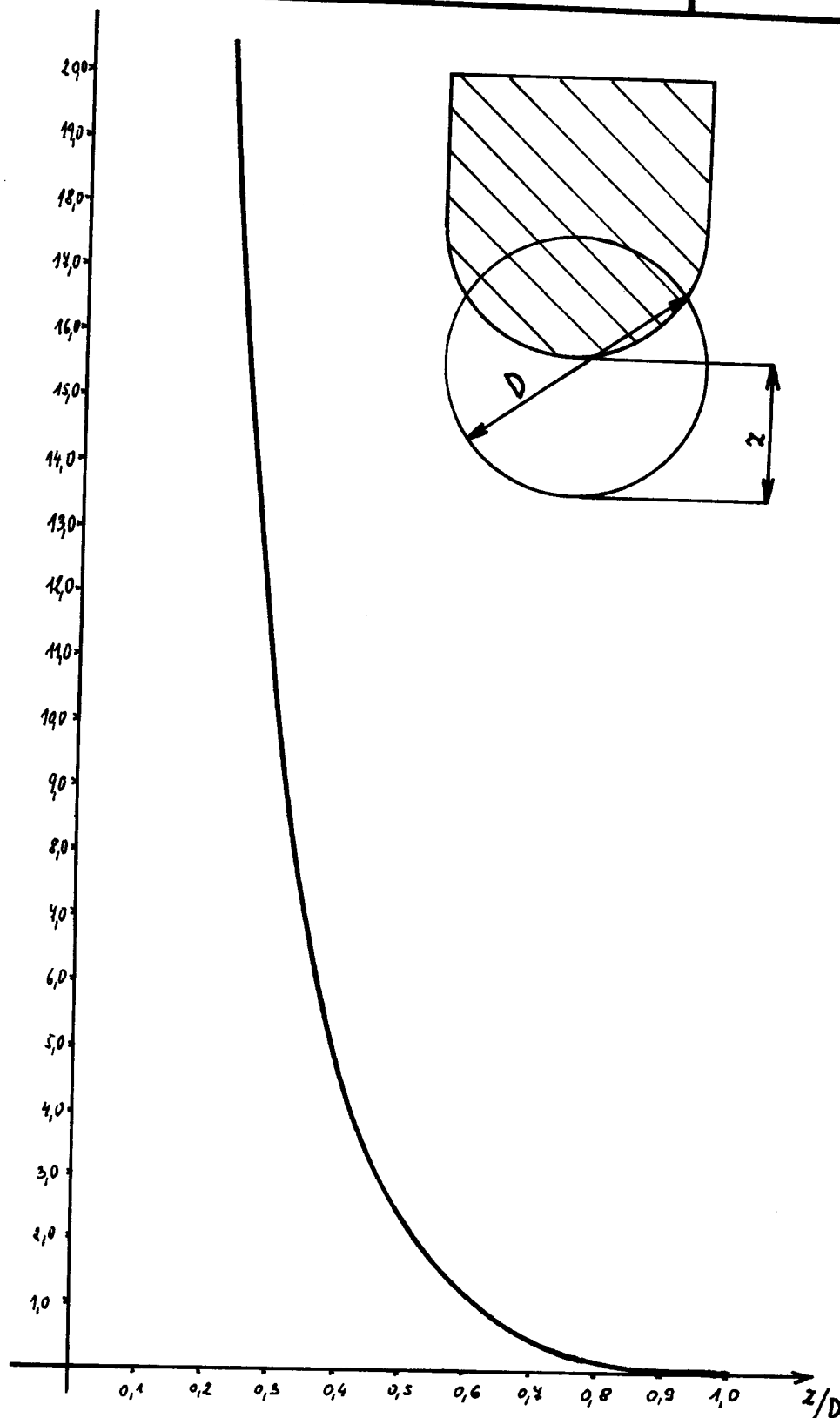
Pro tlakové ztráty ve smyčkách platí přesně tytéž předpoklady jako pro tlakové ztráty v reaktoru a rovněž vztahy, které je popisují, jsou velmi podobné s předchozími. Proto je s poukazem na [7] uveden pouze výsledný vztah :

$$\Delta p_s = \xi_s \cdot Q_s |Q_s| \cdot \frac{L}{2AS^2} \quad (3.10.)$$

kde člen AS je výpočtový průřez potrubí v PO.

3.2.3 Tlakové ztráty na armaturách

Závislost ztrátového koeficientu ξ_a na zdvihu z/D šoupěte je na obr.7, převzatého ze [7] . Byl proveden



Obr.7 Závislost tlakového ztrátového koeficientu ξ_a na zdvihu z/D šoupěte armatury

odhad funkční závislosti ve tvaru :

$$\xi_a = 5 \operatorname{tg}^2 \left(\frac{1-z}{2} \pi \right) \quad (3.11.)$$

což se ukázalo být velmi dobrým přiblížením. Tlaková ztráta je vyjádřena vztahem :

$$\Delta p_a = \xi_a \cdot Q_s / Q_s^2 \cdot \frac{\rho}{2AS^2} \quad (3.12.)$$

kde koeficient ξ_a je vyjádřen vztahem (3.11.).

3.2.4 Hydrostatické tlakové rozdíly

Hydrostatické tlakové rozdíly jsou způsobeny výškovými rozdíly mezi vstupem chladiva do reaktoru, jeho výstupem z reaktoru, aktivní zóny a vstupem a výstupem parogenerátoru. Hydrostatický tlakový rozdíl Δp_{hc} mezi smyčkou a parogenerátorem je vyjádřen vztahem :

$$\Delta p_{hc} = g \left[\int_2 (h_{PG} - h_2) - \int_1 (h_{PG} - h_1) \right] \quad (3.13.)$$

Obdobně je vyjádřen tlakový rozdíl Δp_{hr} , což je hydrostatický tlakový rozdíl mezi vstupem a výstupem reaktoru :

$$\Delta p_{hr} = g \left[\int_2 (h_2 - h_{AZ}) - \int_1 (h_1 - h_{AZ}) \right] \quad (3.14.)$$

3.2.5 Tlakový přírůstek na čerpadle

Tlakový přírůstek na čerpadle je rovný hydrostatickému tlaku, odpovídajícímu výtlačné (dopravní) výšce H čerpadla, čili vztah má tvar

$$\Delta p_c = H \rho g \quad (3.15.)$$

Dopravní výška čerpadla však vykazuje silně nelineární závislost na otáčkách čerpadla i průtoku čerpadlem [8].

Proto je třeba připojit rovněž diferenciální rovnici čerpadla, která má tvar [7] :

$$I \cdot \frac{d\omega}{dt} = T_E - T_F - T_H \quad (3.16.)$$

Kde I značí setrvačný moment rotujících částí čerpadla, T_E je elektrický krouticí moment na hřídeli motoru čerpadla, T_H je užitečný moment, spotřebovaný na hydraulickou práci a T_F je moment, spotřebovaný na třecí ztráty v ložiskách.

Technické údaje pro BIKS 500 jsou následující [7] :

příkon	$P_p = 2,26 \text{ MW}$
elektrická účinnost	$\eta_{el} = 0,72$
hydraulická účinnost	$\eta_{hyd} = 0,73$
moment setrvačnosti	$I = 73,5 \text{ kgm}^{-2}$
nominální úhlová rychlost otáčení	$\omega_o = 153,94 \text{ rad s}^{-1}$
nominální dopravní výška	$H_o = 65,037 \text{ m}$
skluz při maximálním záběrovém momentu	$s_m = 0,14$

S použitím vztahů uvedených v [9] dostáváme :

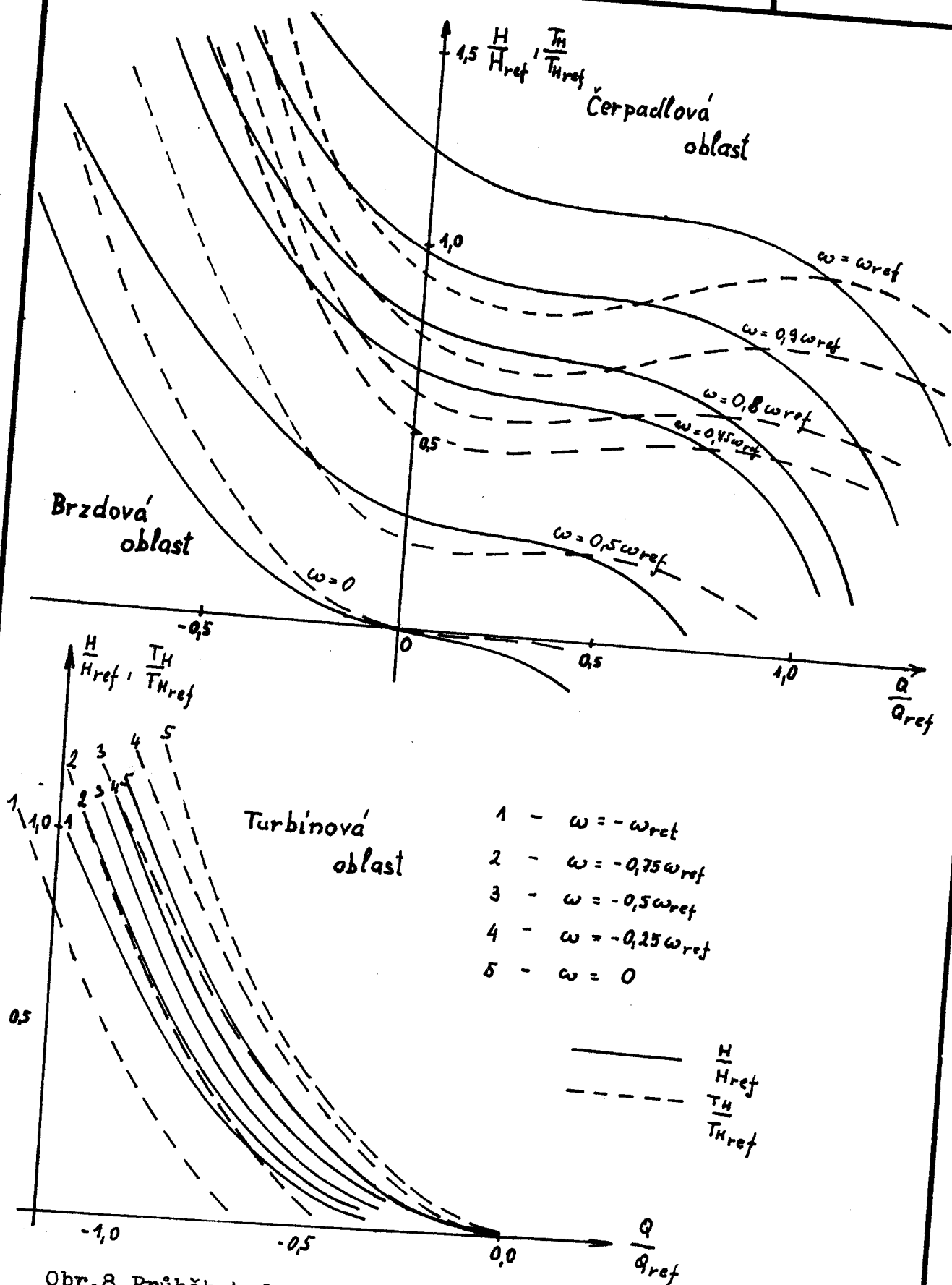
$$P_v = P_p \cdot \eta_{el} \quad (3.17.)$$

$$T_{Eo} = \frac{P_v}{\omega_o} \quad (3.18.)$$

$$\omega_{syns} = \frac{\pi f}{p} \quad (3.19.)$$

$$s_o = 1 - \frac{\omega_o}{\omega_{syns}} \quad (3.20.)$$

Ve vztahu (3.19.) znamená f síťovou frekvenci elektrického proudu a p je počet pólových dvojic. Ze známé hydraulické účinnosti a elektrického momentu spočteme nominální hydraulický moment (efektivní krouticí moment, využitý k vytvoření přírůstku tlaku na čerpadle) :



Obr.8 Průběh hydraulického momentu a výtlačné výšky čerpadla BIKS-500, popř. GCN-317

$$T_{Ho} = \zeta_{hyd} \cdot T_{Eo} \quad (3.21.)$$

Nominální moment na překonání třecích ztrát je potom pro ustálený stav ($\frac{d\omega}{dt} \rightarrow 0$)

$$T_{Fo} = T_{Eo} - T_{Ho} \quad (3.22.)$$

Tyto vztahy tvoří předpoklad pro matematický popis chování čerpadla. Protože i hydraulický moment T_H jeví silnou nelineární závislost na průtoku a otáčkách (obr.8), bylo nutno přikročit k aproximaci této charakteristiky. Byl sestaven program pro aproximaci polynomen v jazyce FORTRAN IV G, jehož výpis je v příloze 1. Pro aproximaci byl vybrán průběh $T_H/T_{Href} = konst.$, posunutý do počátku souřadnic, tento průběh je pak posouván přičítáním absolutního členu, závislého na kvadrátu poměru ω/ω_{ref} , tím je dosaženo alespoň přibližně stejných průběhů hydraulického momentu pro celý rozsah hodnot ω a Q , jak jsou vynešeny na obr. 8. Vztah pro hydraulický moment má tvar :

$$T_H/T_{Href} = \sum_{i=1}^n B_i \cdot (Q/Q_{ref})^i + k_T \cdot (\omega/\omega_{ref})^2 \quad (3.23.)$$

kde členy s indexem ref značí referenční (vztažné) hodnoty, které jsou vesměs shodné s hodnotami nominálními.

Pro závislost elektrického momentu T_E na otáčkách byl použit upravený Klossův vztah

$$T_E = 2 \frac{T_{Emax} \cdot s \cdot s_m}{s^2 + s_m^2} \quad (3.24.)$$

kde T_{Emax} značí maximální záběrový moment při maximálním skluzu s_m a s je skluz.

Pro ztráty tření byly převzaty vztahy ze [7] :

$$T_F = T_{Fo} \cdot \frac{\omega}{\omega_{ref}^2} \quad (3.25.)$$

pro $\omega \geq \omega_{BR}$ a

$$T_F = T_{BR} \cdot \text{sign}(\omega) \quad (3.26.)$$

pro $\omega \leq \omega_{BR}$, kde ω_{BR} je prahová úhlová rychlost ložiskového tření a T_{BR} jí odpovídající třecí moment. Protože hodnota ω_{BR} nebyla v žádné literatuře uvedena, byla její velikost odhadnuta na $\omega_{BR} = 0,25\omega_{ref}$, což je podle [8] prahová úhlová rychlost pro použitelnost afinitních vztahů. Z podmínky spojitosti zleva a zprava byla pak určena hodnota T_{BR} , která je rovna jedné šestnáctině hodnoty T_{Fo} .

Vztahy (3.23.), (3.24.), (3.25.), popř. (3.26.) po dosazení do (3.16.) dávají úplnou diferenciální rovnici pro popis dynamiky otáček rotujících částí čerpadla.

Řešením této rovnice získáme hodnotu potřebnou pro výpočet hydraulického momentu, třecího momentu, elektrického momentu i dopravní výšky čerpadla. Vztah pro dopravní výšku H čerpadla byl získán obdobně jako vztah (3.23.) pro hydraulický moment čerpadla a má tvar :

$$\frac{H}{H_{ref}} = \sum_{i=1}^n k_i \cdot (Q/Q_{ref})^i + k_H (\omega/\omega_{ref})^2 \quad (3.27.)$$

Dosazením tohoto vztahu do (3.15.) dostáváme úplný vztah pro přírůstek tlaku na čerpadle.

3.2.6 Tlakový rozdíl na reaktoru

Dosazením všech dalších tlakových přírůstků, vyjádřených vztahy (3.10.), (3.12.), (3.9.) do (3.3.) a (3.4.)

po případě ještě (3.13.) a (3.14.) do (3.5.) a (3.6.) získáme soustavu pohybových diferenciálních rovnic, proudícího chladiwa pro smyčky a reaktor. Stále však zůstává nevyjádřený tlakový rozdíl ($p_2 - p_1$). To je tlakový rozdíl mezi vstupem a výstupem reaktoru.

Proto je třeba tuto soustavu pohybových rovnic ještě rovnicí kontinuity :

$$dQ_r = \sum_{j=1}^c dQ_j \quad (3.28.)$$

kde Q_j značí průtok j -tou smyčkou a c je celkový počet smyček. Z této rovnice lze vyjádřit tlakový rozdíl ($p_2 - p_1$) ve tvaru :

$$p_2 - p_1 = \frac{\left(\frac{\ell}{A}\right)_r^{-1} \Delta p_r + \sum_{j=1}^c \left(\frac{\ell}{A}\right)_{sj}^{-1} (\Delta p_{cj} - \Delta p_{sj} - \Delta p_{aj})}{\left(\frac{\ell}{A}\right)_r^{-1} + \sum_{j=1}^c \left(\frac{\ell}{A}\right)_j^{-1}} \quad (3.29.)$$

případně pro výpadek všech šesti HCČ :

$$p_2 - p_1 = \frac{\left(\frac{\ell}{A}\right)_r^{-1} (\Delta p_r - \Delta p_{hr}) + \sum_{j=1}^c \left(\frac{\ell}{A}\right)_{sj}^{-1} (\Delta p_{cj} + \Delta p_{hcj} - \Delta p_{sj} - \Delta p_{aj})}{\left(\frac{\ell}{A}\right)_r^{-1} + \sum_{j=1}^c \left(\frac{\ell}{A}\right)_j^{-1}} \quad (3.30.)$$

3.2.7 Sestavení matematického modelu PO

Pro sestavení matematického modelu dynamiky primárního okruhu je použito zjednodušeného schématu z obr.6. Ztrátové koeficienty se předpokládají ve všech smyčkách stejné, byl vzat střední koeficient vypočítaný podle vztahu :

$$\bar{f}_s = \frac{\sum_{j=1}^c f_{sj}}{c} \quad (3.31.)$$

kde $\sum_{j=1}^n$ je celkový ztrátový koeficient j -té smyčky.

Konečné tvary pohybových rovnic potom jsou :

$$\frac{dQ_V}{dt} = (\Delta p_{cV} - \Delta p_{sV} - \Delta p) \cdot \left(\frac{S}{\rho}\right) \quad (3.32.)$$

$$\frac{dQ_P}{dt} = (\Delta p_{cP} - \Delta p_{sP} - \Delta p) \cdot \left(\frac{S}{\rho}\right) \quad (3.33.)$$

$$\frac{d\omega_V}{dt} = -(T_{HV} + T_{FV}) \cdot I^{-1} \quad (3.34.)$$

$$\frac{d\omega_P}{dt} = (T_{BP} - T_{HP} - T_{FP}) \cdot I^{-1} \quad (3.35.)$$

kde přírůstek tlaku Δp je vyjádřen vztahem:

$$\Delta p = (p_2 - p_1) = \left\{ R \cdot \Delta p_r + S \cdot [P \cdot (\Delta p_{cP} - \Delta p_{sP}) + V \cdot (\Delta p_{cV} - \Delta p_{sV})] \right\} \cdot (R + C \cdot S)^{-1} \quad (3.36.)$$

Pro výpočet elektrického momentu pracujícího čerpadla je třeba připojit vztah pro výpočet skluzu:

$$s_p = 1 - \frac{\omega_P}{\omega_{sync}} \quad (3.37.)$$

Tyto výsledné vztahy jsou sestaveny ze vztahů, odvozených v kapitolách 3.2.1, 3.2.2, 3.2.5 a 3.2.6. Indexy P a V značí, že se jedná o veličiny ve smyčce s pracujícím či vypadlým čerpadlem, V je počet vypadlých čerpadel a P je počet pracujících čerpadel. Konstanty S a R jsou substituční konstanty:

$$S = \left(\frac{l}{\Lambda}\right)_s^{-1} \quad (3.38.)$$

a

$$R = \left(\frac{f-1}{A} \right)_r \quad (3.39.)$$

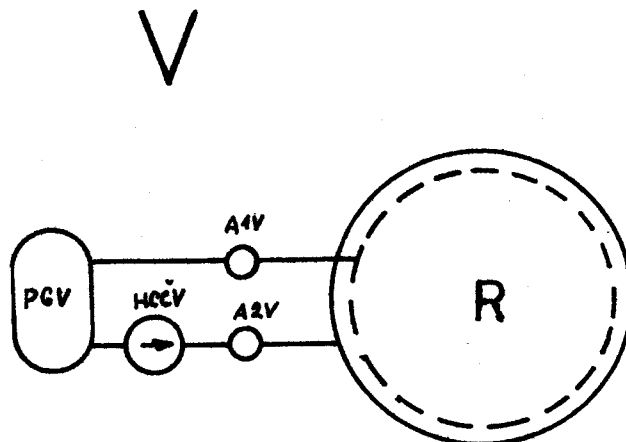
Dále platí všechny zjednodušující předpoklady, uvedené v kap.3.1. Vliv sekčních armatur se neuvažuje. Pohybová rovnice pro reaktor není použita, platí rovnice kontinuity:

$$Q_r = P \cdot Q_P + V \cdot Q_V \quad (3.40.)$$

Je tedy zřejmé, že tento model umožňuje popis dynamického děje pouze pro výpadky jednoho až pěti HCČ.

3.2.8 Matematický model pro výpadek všech HCČ

Pro pohybovou rovnici proudícího chladiva se použijí vztahy (3.5.) a (3.6.). Uvažuje se poněkud pozměněné výpočtové schema, znázorněné na obr.9.



Legenda viz obr.3, indexy V-vypadlé smyčky

Obr.9 Zjednodušené výpočtové schema pro výpadek všech HCČ

Existují pouze smyčky s vypadlým čerpadlem, takže diferenciální rovnice mají tvar:

$$\frac{dQV}{dt} = (\Delta p_{cv} - \Delta p_{sv} - \Delta p + \Delta p_{hc}) \quad (3.41.)$$

$$\frac{d\omega V}{dt} = -(T_{HV} + T_{FV}) \cdot I^{-1} \quad (3.42.)$$

kde pro Δp platí:

$$\Delta p = [R \cdot (\Delta p_r - \Delta p_{hr}) + C \cdot S \cdot (\Delta p_{cv} - \Delta p_{sv} - \Delta p + \Delta p_{hc})] \cdot (R + C \cdot S) \quad (3.43.)$$

Hydrostatické tlakové rozdíly se spočtou dle kapitoly 3.2.4. Předpokládá se, že polovina objemu je ve vstupní ("chladné") větvi a druhá polovina ve výstupní ("teplé") větvi. Změny teplot v reaktoru a v parogenerátoru se předpokládají skokové a tím jsou skokové i změny hustoty.

Pro reaktor platí rovnice kontinuity ve tvaru:

$$Q_r = C \cdot QV \quad (3.44.)$$

Jinak platí vše, co bylo uvedeno v kap.3.2.7.

3.2.9 Universální matematický model

V tomto modelu je zahrnut vliv sekčních armatur tak, jak bylo uvedeno v kap.3.2.3. Závislost zdvihu na čase se předpokládá lineární, určená časovou konstantou CA ; t_A znamená čas, kdy se armatura začne spouštět. Platí:

$$z/D = 1 - CA \cdot (t - t_A) \text{ pro } (t - t_A) \in \langle 0, \frac{1}{CA} \rangle \quad (3.45.)$$

$$z/D = 1 \text{ pro } t < t_A \quad (3.46.)$$

$$z/D = 0 \text{ pro } t > t_A \quad (3.47.)$$

Dále se pro libovolnou kombinaci počtu vypadlých HCČ uvažuje vliv hydrostatických tlakových rozdílů. Tento model tedy dovoluje simulovat všechny případy výpadků HCČ a rovněž uzavírání armatur v čase, daném časovou konstantou t_A .

Teploty na výstupu reaktoru se předpokládají ve smyčkách s pracujícím i vypadlým čerpadlem stejné pro kladný smysl proudění, pro záporný smysl proudění je teplota na vstupu vypadlé smyčky do reaktoru nižší. Na vstupu se předpokládá teplota ve vypadlé smyčce menší, než v pracující. Teploty jsou chápány jako parametry simulačního modelu; ve skutečnosti je změna teplot plynulá. Tento předpoklad je nutný, neboť skutečný průběh změn teplot není v tomto modelu k dispozici. Ve spojení s ostatními dílčími modely však k dispozici bude a blok parametrů, zadávajících teploty odpadne.

Označíme-li hustotu na výstupu smyčky s pracujícím čerpadlem ρ_{1P} , na vstupu ρ_{2P} ; podobně ve smyčce s vypadlým čerpadlem ρ_{1V} a ρ_{2V} (viz zjednodušené schema univerzálního modelu na obr.10), můžeme psát:

$$\Delta p_{cP} = H_P \rho_{2P} g \quad (3.48.)$$

$$\Delta p_{cV} = H_V \rho_{2V} g \quad (3.49.)$$

$$\Delta p_{sP} = \bar{f}_s \bar{f}_P \cdot \frac{(Q_P \cdot s)^2}{2} \quad (3.50.)$$

$$\Delta p_{sV} = \bar{f}_s \bar{\rho}_V \cdot QV \cdot |QV| \cdot \frac{S^2}{2} \quad (3.51.)$$

$$\Delta p_{sP} = (\xi_{a2P} \rho_{2P} + \xi_{a1P} \rho_{1P}) \cdot \frac{(QP \cdot S)^2}{2} \quad (3.52.)$$

$$\Delta p_{sV} = (\xi_{a2V} \rho_{2V} + \xi_{a1V} \rho_{1V}) \cdot QV \cdot |QV| \cdot \frac{S^2}{2} \quad (3.53.)$$

$$\Delta p_r = \xi_r Q_r \cdot |Q_r| \cdot (\beta_C \cdot \bar{\rho}_P + \beta_C \cdot \bar{\rho}_V) \cdot \frac{R^2}{2} \quad (3.54.)$$

$$\Delta p = \{(\Delta p_r - \Delta p_{hr}) \cdot R + S \cdot [P \cdot (\Delta p_{cP} + \Delta p_{hcP} - \Delta p_{sP} - \Delta p_{aP}) + V \cdot (\Delta p_{cV} + \Delta p_{hcV} - \Delta p_{sV} - \Delta p_{aV})]\} \cdot (R + C \cdot S)^{-1} \quad (3.55.)$$

$$\Delta p_{hcP} = g \cdot [\rho_{2P} \cdot (h_{PG} - h_2) - \rho_{1P} \cdot (h_{PG} - h_1)] \quad (3.56.)$$

$$\Delta p_{hcV} = g \cdot [\rho_{2V} \cdot (h_{PG} - h_2) - \rho_{1V} \cdot (h_{PG} - h_1)] \quad (3.57.)$$

$$\Delta p_{hr} = g \cdot [(\beta_C \cdot \rho_{2P} + \beta_C \cdot \rho_{2V}) \cdot (h_2 - h_{AZ}) - (\beta_C \cdot \rho_{1P} + \beta_C \cdot \rho_{1V}) \cdot (h_1 - h_{AZ})] \quad (3.58.)$$

$$\frac{dQ_P}{dt} = (\Delta p_{cP} + \Delta p_{hcP} - \Delta p_{sP} - \Delta p_{aP} - \Delta p) \cdot \left(\frac{S}{\rho_P}\right) \quad (3.59.)$$

$$\frac{dQ_V}{dt} = (\Delta p_{cV} + \Delta p_{hcV} - \Delta p_{sV} - \Delta p_{aV} - \Delta p) \cdot \left(\frac{S}{\rho_V}\right) \quad (3.60.)$$

$$\frac{d\omega_P}{dt} = (T_{EP} - T_{HP} - T_{FP}) \cdot I^{-1} \quad (3.61.)$$

$$\frac{d\omega_V}{dt} = -(T_{HV} + T_{FV}) \cdot I^{-1} \quad (3.62.)$$

pro čas $TIME < TAU$ a

$$\frac{d\omega_V}{dt} = (T_{EV} - T_{HV} - T_{FV}) \cdot I^{-1} \quad (3.63.)$$

pro čas $TIME > TAU$. Pro výpočet skluzu je použit vztah

(3.37.) do vzorce pro výpočet T_{EP} a do vzorce pro výpočet T_{EV} je použit vztah

$$s_v = 1 - \frac{\omega_v}{\omega_{sync}} \quad (3.64.)$$

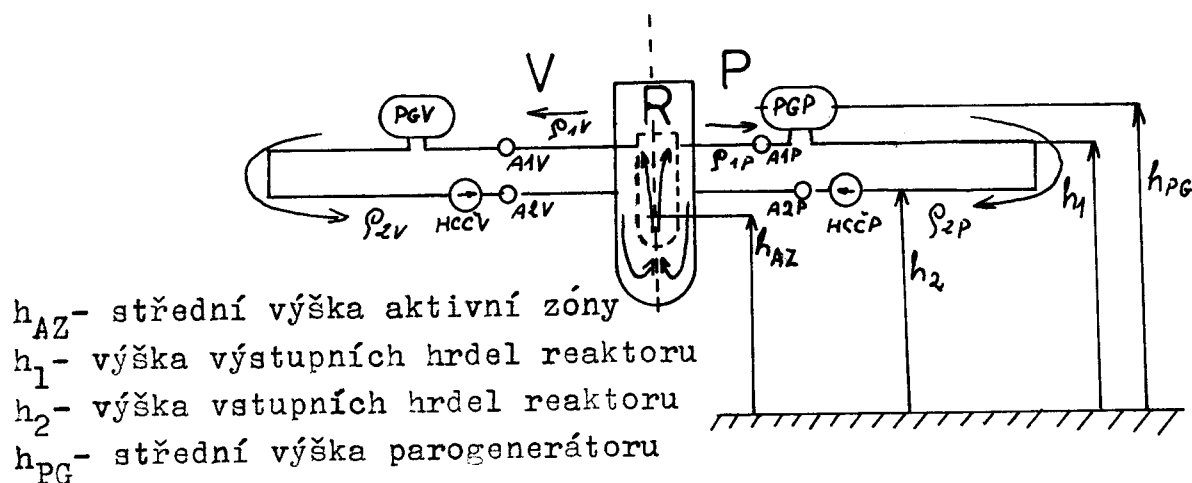
TAU je čas opětovného rozběhu čerpadel (nebo-li pro čas $TIME < TAU$ je $T_{EV} = 0$).

Pro reaktor je použita rovnice kontinuity podle vzta-
hu (3.40.).

Hustoty $\bar{\rho}_P$ a $\bar{\rho}_V$ jsou průměrné hustoty v pracující
nebo vypadlé smyčce. Jejich zavedení vychází z předpokla-
du, že polovina objemu chladiva ve smyčce se nachází ve
vstupní větvi a druhá polovina ve výstupní větvi, tedy
platí vztahy:

$$\bar{\rho}_P = \frac{\rho_{1P} + \rho_{2P}}{2} \quad (3.65.)$$

$$\bar{\rho}_V = \frac{\rho_{1V} + \rho_{2V}}{2} \quad (3.66.)$$



Obr.10 Výpočtové schema universálního modelu

3.3 Hodnoty pro počítačový model

Z hodnot, uvedených v kapitole 3.2.5 a vztahů (3.17.), (3.18.), (3.19.), (3.20.), (3.21.), (3.22.) byly určeny následující hodnoty:

$$T_{E0} = 10,570 \text{ kNm}$$

$$\omega_{\text{sync}} = 157,98 \text{ rads}^{-1}$$

příčemž byla do vztahu (3.19.) dosazena hodnota $p = 1$.

$$s_0 = 0,02$$

$$T_{F0} = 2,965 \text{ kNm}$$

$$T_{H0} = 7,605 \text{ kNm}$$

a ze vztahu (3.24.)

$$T_{E\text{max}} = 37,75 \text{ kNm}$$

Dále byl ze vztahů (3.25.) a (3.26.) určen prahový třecí moment, a to z podmínky spojitosti v bodě $\omega = \omega_{BR}$:

$$T_{BR} = 0,1853 \text{ kNm}$$

Rovněž byla určena hodnota nominálního objemového průtoku smyčkou, a to z údaje o hmotnostním průtoku reaktorem [3] (10830 kgs^{-1}) a střední hustotě cladiwa [7] ($777,2 \text{ kgm}^{-3}$)

$$Q_0 = 2,323 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$$

Tyto hodnoty bylo nutno ještě určit, aby mohl být realizován počítačový model.

Některé z hodnot byly v počítačovém modelu ještě upraveny tak, aby po dosazení nominálních hodnot průtoku, otáček, momentů a dopravní výšky čerpadla vycházely nulové derivace sledovaných veličin v pracujících smyčkách v čase $t = 0 \text{ s}$.

4 P O Č Í T A Č O V Ý M O D E L

Na základě vztahů, uvedených v kapitole 3 byl sestaven simulační model pro číslicový počítač.

Sestavení modelu probíhalo ve dvou fázích:

- 1/ Přípravná fáze - hlavní náplní bylo získání aproximačních vztahů (charakteristiky čerpadel, závislosti hustoty na teplotě, ztrátových koeficientů armatur na zdvihu).
- 2/ Sestavení a odladění simulačního modelu.

4.1 Získání aproximačních vztahů

Pro získání aproximačních vztahů byl sestaven program pro aproximaci polynomem libovolného stupně metodou nejmenších čtverců. Malou úpravou v zadávání dat (např. logaritmování jedné ze souřadnic) lze pak dosáhnout získání aproximačních vztahů ve formě různých funkčních závislostí (přímka, parabola, exponenciála atd.).

Program byl sestaven v jazyce FORTRAN IV G, výpis je v příloze 1. Samotný program je rozdělen do třech samostatných celků, podprogramů, nazvaných APRX, KOEF a ROVN. Základní částí je program APRX, který zajišťuje vstupy, výstupy, operace s hodnotami a řízení průběhu výpočtu, tedy obsluhuje podprogramy KOEF a ROVN. Podprogram KOEF sestavuje koeficienty matice, jejímž řešením jsou získány výsledné koeficienty aproximačních vztahů. Řešení soustavy lineárních rovnic je úkolem podprogramu ROVN; je použita metoda Gaussovy eliminace.

4.1.1 Aproximace charakteristiky čerpadla

Vstupní hodnoty byly odečteny z grafu na obr.8 [7].

Byly vyzkoušeny dvě varianty aproximace:

I. Jsou aproximovány jednotlivé průběhy H/H_{ref} popř. $T_H/T_{H\text{ref}}$ pro $\omega/\omega_{\text{ref}} = k$, plynule se měnící nezávislou proměnnou je Q/Q_{ref} . Postupně jsou aproximovány průběhy pro $k = 1,0; 0,9; 0,8; 0,5; 0,0; -0,5; -0,75; -1,0$ polynomelem stejného (n -tého) stupně. Aproximační polynomy mají tvar:

$$ZP_k = \sum_{i=0}^n A_{i,k} \cdot (Q/Q_{\text{ref}})^i \quad (4.1.)$$

kde ZP je symbolické označení závisle proměnné veličiny, index k označuje jednotlivé průběhy pro různá k , $A_{i,k}$ jsou koeficienty aproximačních polynomů. Poté jsou aproximovány průběhy koeficientů $A_{i,k}$ v závislosti na poměru $\omega/\omega_{\text{ref}}$ polynomelem m -tého stupně, přičemž index i se nemění:

$$A_i = \sum_{j=0}^m B_{i,j} \cdot (\omega/\omega_{\text{ref}})^j \quad (4.2.)$$

Dosazením (4.2.) do (4.1.) získáme výsledný funkční vztah pro celou oblast proměnných Q/Q_{ref} a $\omega/\omega_{\text{ref}}$:

$$ZP = \sum_{i=0}^n \left[\sum_{j=0}^m B_{i,j} \cdot (\omega/\omega_{\text{ref}})^j \right] \cdot (Q/Q_{\text{ref}})^i \quad (4.3.)$$

Program APRX zajišťuje možnost tohoto postupu včetně toho, že je možno měnit stupně n a m polynomů při jednom spuštění programu ve zvoleném rozmezí, tj. $n \in \langle n_1, n_2 \rangle$, $m \in \langle m_1, m_2 \rangle$

a to tak, že pro jedno n z intervalu $\langle n_1, n_2 \rangle$ se vystřídají všechna m z intervalu $\langle m_1, m_2 \rangle$ až do vyčerpání intervalu $\langle n_1, n_2 \rangle$. Zároveň je programem APRX počítána lineární a kvadratická chyba, takže je možno nakonec vybrat aproximace s minimální chybou, případně jednodušší aproximační vztahy při přijatelné chybě (jednodušší vztahy = kratší doba výpočtu).

II. Je aproximován jediný průběh H/H_{ref} nebo T_H/T_{Href} pro $\omega/\omega_{ref} = k$, resp. je vybrán jeden z průběhů podle varianty I., tvar polynomu je shodný se vztahem (4.1.). Absolutní člen se vypustí, resp. položí se rovný nule, čímž se charakteristika posune do počátku souřadnic, polynom získá tvar:

$$ZP_{k,0} = \sum_{i=1}^n A_{i,k} \cdot (\omega/\omega_{ref})^i \quad (4.4.)$$

Index 0 značí, že je vypuštěn absolutní člen. K tomuto vztahu se pak přičítá absolutní člen, závislý na poměru ω/ω_{ref} . Jedná se tedy vlastně o jakési zjednodušení varianty I. Výpočtem byl vybrán průběh ZP pro $\omega/\omega_{ref} = 0,9$; neboť výsledná aproximace pak vykazovala nejmenší chybu. Tomuto průběhu zároveň vyhovovala velice jednoduchá funkční závislost absolutního členu, a sice:

$$A_0 = k_0 \cdot (\omega/\omega_{ref})^2 \quad (4.5.)$$

která je získána aproximací skutečných koeficientů A_0 . Aproximační koeficient k_0 je pro čerpadlovou a brzdovou oblast stejný, ale jiný pro turbinovou oblast čerpadla.

Zhodnocením obou variant a hlavně s přihlédnutím k složitosti výsledných vztahů vyšla nakonec vítězně varianta II. Byly tedy získány výsledné vztahy:

$$H/H_{\text{ref}} = \sum_{i=0}^n A_i \cdot (Q/Q_{\text{ref}})^i + k_{H1} \cdot (\omega/\omega_{\text{ref}})^2 \quad (4.6.)$$

pro výtlačnou výšku čerpadla v čerpadlové a brzdové oblasti ($\omega/\omega_{\text{ref}} > 0$) a

$$H/H_{\text{ref}} = \sum_{i=0}^n A_i \cdot (Q/Q_{\text{ref}})^i + k_{H2} \cdot (\omega/\omega_{\text{ref}})^2 \quad (4.7.)$$

pro výtlačnou výšku čerpadla v turbínové oblasti čerpadla ($\omega/\omega_{\text{ref}} < 0$).

Podobné jsou i vztahy pro hydraulický moment čerpadla:

$$T_H/T_{H\text{ref}} = \sum_{i=0}^n B_i \cdot (Q/Q_{\text{ref}})^i + k_{T1} \cdot (\omega/\omega_{\text{ref}})^2 \quad (4.8.)$$

v brzdové a čerpadlové oblasti čerpadla a

$$T_H/T_{H\text{ref}} = \sum_{i=0}^n B_i \cdot (Q/Q_{\text{ref}})^i + k_{T2} \cdot (\omega/\omega_{\text{ref}})^2 \quad (4.9.)$$

pro turbínovou oblast čerpadla. Pro dosažení dobré přesnosti byl zvolen stupeň polynomu $n = 6$.

4.1.2 Hustota chladiva

Na hustotu chladiva má vliv teplota a tlak v PO. Vliv tlaku se zanedbává, pro aproximaci byly použity hodnoty

z literatury [10] pro tlak 12 MPa. Byly vyzkoušeny aproximace přímkou a exponenciálou ve tvaru :

$$\rho = \rho_0 \cdot (1 + \alpha t) \quad (4.10.)$$

$$\rho = \rho_0 \cdot e^{\gamma t} \quad (4.11.)$$

kde ρ_0 je hustota při 0°C, α a γ jsou hledané aproximační koeficienty. Přesnější se ukázala být aproximace exponenciálou s hodnotami $\rho_0 = 1000 \text{ kgm}^{-3}$ a $\gamma = -0,000886 \text{ K}^{-1}$.

4.1.3 Ztrátový koeficient armatury

Aproximační vztah ztrátového koeficientu ξ_a na armatuře byl odhadnut podle těchto kritérií:

- maximální jednoduchost
- derivace v bodě $z/D = 1,0$ nulová
- růst nade všechny meze v bodě $z/D = 0,0$

Těmto požadavkům nejlépe odpovídala funkce $\text{tg}^2 x$. Tvar aproximačního vztahu je vzhledem k uvedeným požadavkům :

$$\xi_a = k_a \cdot \text{tg}^2 \left(\pi \frac{1 - z/D}{2} \right) \quad (4.12.)$$

Konstanta k_a byla určena s ohledem na minimální chybu v intervalu z/D 0,3; 1,0 (viz obr.7) a její výsledná hodnota je $k_a = 5,2$.

4.2 Sestavení simulačního modelu

Získáním aproximačních vztahů (4.6.), (4.7.), (4.8.), (4.9.), (4.11.) a (4.12.) byl učiněn poslední krok, potřebný k sestavení simulačního modelu (simulátoru).

Pro simulátor byl použit firemní jazyk fy IBM pro spojitou simulaci CSMP/360. Pro seznámení se zásadami simulace a strukturou jazyka byla použita literatura [11], [12], [13], [14] a [15].

4.2.1 Struktura programu v jazyce CSMP

Program v jazyce CSMP je rozdělen do třech základních sektorů.

V sektoru INITIAL jsou specifikovány parametry, konstanty a počáteční podmínky výpočtu a provádějí se zde výpočty, které je nutno provést ještě před započatím simulčního běhu.

Vlastní běh simulace se provádí v sektoru DYNAMIC.

Sektor TERMINAL umožňuje zajistit výstup výsledků tabulární nebo grafickou formou, specifikovat podmínky ukončení simulace, volit metodu integrace atd.

Bližší výklad není náplní této práce, pro seznámení s jazykem CSMP lze doporučit [11] a [12].

4.2.2 Struktura simulátoru

Jazyk CSMP umožňuje zápis do sekcí SORT nebo NOSORT. Příkazy v sekci SORT jsou chápány jako paralelní, tj. nezáleží na jejich pořadí, programově je zajištěno jejich seřadění do potřebného pořadí (na rozdíl od sekce NOSORT, tam jsou příkazy brány v tom pořadí, jak jsou zapsány). Této vlastnosti sekce SORT program v plné míře využívá, čímž bylo docíleno vyšší přehlednosti programu.

4.2.3 Popis programu pro simulaci výpadku 1-5 HCČ

Tento program umožňuje simulovat výpadek jednoho až pěti HCČ. Výpis programu je v příloze 2.

Sektor INITIAL obsahuje dva bloky CONSTANT. První blok CONSTANT obsahuje aproximační koeficienty pro vztahy (4.6.) a (4.7.) pro výtlačnou výšku čerpadla a koeficienty do vztahů (4.8.) a (4.9.) pro hydraulický moment čerpadla. Druhý blok CONSTANT obsahuje konstanty, popisující vlastnosti primárního okruhu jaderné elektrárny. Význam jednotlivých symbolů je popsán v seznamu zkratek.

Dále je v sektoru INITIAL blok INCON, ten obsahuje počáteční podmínky průtoků smyčkami a otáček rotorů čerpadel, potřebné pro řešení diferenciálních rovnic. Posledním blokem tohoto sektoru je blok PARAMETR, který obsahuje proměnný parametr V (počet vypadlých smyček) a parametr C (celkový počet smyček). Dále je v tomto sektoru vypočten počet pracujících smyček podle vztahu :

$$P = C - V \quad (4.13.)$$

V sektoru DYNAMIC jsou čtyři bloky. Tento sektor obsahuje vlastně komplex vztahů, popsáných v kapitolách 3 a 4.1, symboly použité v programu jsou, pokud to bylo možné, stejné jako symboly použité v kap.3 a 4.1, přesto jsou ale popsány v seznamu zkratek. Tento model je počítačovou realizací matematického modelu podle kap.3.2.7. Pro přepínání byly použity příkazy INSW a FCNSW, jejichž funkce je následující :

zápis $Y = \text{INSW}(a, b, c)$ znamená :

$Y = b$ pro $a < 0$

$Y = c$ pro $a \geq 0$

podobně $Y = \text{PCNSW}(a, b, c, d)$ značí :

$Y = b$ pro $a < 0$

$Y = c$ pro $a = 0$

$Y = d$ pro $a > 0$

Veličiny QPREF, QVREF, QRREF, OPREF a OVREF jsou skutečné hodnoty průtoků smyčkami a reaktorem, popř. otáček čerpadel; tytéž hodnoty bez indexu REF jsou hodnoty poměrné, vyjádřené v jednotkách QREF a OREF (referentní hodnoty průtoků a otáček).

Sektor TERMINAL zajišťuje výstup výsledků a ukončení simulačního běhu v čase $\text{TIME} = \text{FINTIM}$.

4.2.4 Program pro simulaci výpadku všech HCČ

Tento program je zpracováním matematického modelu podle kapitoly 3.2.8. Jeho výpis je v příloze 3.

V sektoru INITIAL je druhý blok konstant rozšířen oproti předchozímu (kap. 4.2.3) o hodnoty výškových kót P_0 a podobně je i blok PARAMETR rozšířen o hodnoty hustot ρ_1 a ρ_2 .

Sektor DYNAMIC je zkrácen, ubyly pracující smyčky a zjednodušil se i vztah pro výpočet Δp . Podobně počet diferenciálních rovnic se zmenšil na polovinu a tím je poloviční i počet integrátorů.

Žádné závažnější rozdíly mezi oběma programy nejsou,

je zřejmé, že program je vlastně zjednodušením předchozího programu (kap. 4.2.3), a to i přesto, že bylo nutno zahrnout hydrostatické tlakové rozdíly ve smyčkách a v reaktoru.

4.2.5 Universální počítačový model

Na tomto universálním modelu lze realizovat simulaci výpadků libovolného počtu čerpadel, jejich opětovného rozběhu a vlivy sekčních armatur. Je realizací matematického modelu podle kapitoly 3.2.9. Výpis programu je v příloze 4.

Sektor INITIAL je oproti programu z kapitoly 4.2.3 a 4.2.4 poněkud pozměněn, do prvního bloku konstant přibyly koeficienty pro realizaci vztahů (4.11.) a (4.12.), druhý blok konstant opět zahrnuje výškové kóty PO a počet parametrů se rozrostl o teploty chladiva na vstupech a výstupech reaktoru (není zadána přímo hustota), časové koeficienty specifikující spuštění sekčních armatur a je zde časová konstanta TAU - doba opětovného rozběhu vypadlých HCČ. Podobně je rozšířen sektor DYNAMIC v souladu se vztahy z kapitoly 3.2.9.

Jinak je struktura programu stejná, jako v předchozích dvou případech.

4.2.6 Model nezávislých smyček

Tento model je přiložen pouze pro úplnost. Má dokázat možnost realizace nezjednodušeného modelu PO. Všechny smyč-

ky jsou zde nezávislé. Vzhledem k tomu, že verze jazyka CSMP/360 nedovoluje předepsat pole integrátorů, je počet smyček stanoven pevně na šest (viz výpis v příloze 5), to odpovídá reaktoru VVER 440. Lze však snadno změnit strukturu příkazů, a to vyjmutím přebytečných štítků a takto model přizpůsobit např. reaktoru VVER 1000. To je zajištěno tím, že příkazy jsou rozepsány na pokračovací štítky tak, že na jednom štítku jsou zpracovávány pouze veličiny z jediné smyčky. Příslušné veličiny, vztahující se k příslušným smyčkám, jsou indexovány čísly 1-6 podle čísla smyčky, jíž přísluší.

Jak již bylo uvedeno, je tento model uveden pouze pro úplnost; z hlediska této práce je vedlejší. Výpis je v příloze 5 a ten, kdo se seznámí s předchozími modely mu bez neshnází porozumí. Proto je od podrobnějšího popisu upuštěno

5 EXPERIMENTY NA MODELECH

Po sestavení simulátorů bylo možno přikročit k experimentování na těchto modelech. Jednotlivé simulační pokusy na sebe navazovaly a tak se postupně rozšiřovaly údaje o chování primárního okruhu v případě havarie.

5.1 Postup při experimentování

Byly postupně prováděny experimenty na modelech, popsaných v kapitole 4.2.

Tato kapitola je při tom zaměřena hlavně na popis těch jevů, které se vyskytly při experimentování, a to z hlediska realizace modelů, t.j. průběhů prací na počítači. Výsledky experimentů jsou zpracovány v kapitole 6.

5.1.1 Výpadek jednoho až pěti HCČ

Tento experiment byl prvním experimentem, který byl na počítači prováděn. Byla sledována dynamika průtoku chladiwa smyčkami a reaktorem a rovněž otáčky rotorů čerpadel při výpadku různého počtu čerpadel, který byl v rámci možností daných strukturou modelu 1 až 5 (viz.kap.4.2.3).

Byly vyčerpány všechny možnosti počtu vypadlých čerpadel, a sice použitím několika násobného parametru V v sektoru INITIAL. Tím bylo zajištěno stejné měřítko grafů při požadovaném grafickém výstupu, což podstatně zjednodušilo práci při následném porovnávání výsledků.

Rozbor výsledků je v kapitole 6.1.1, grafické zpracování výsledků v příloze 6.

Z hlediska realizace modelu byly zjištěny tyto skutečnosti: 1/ Nezáleží ani tak na volbě integrační metody, jako spíše na délce integračního kroku ΔT . Pro dobrou přesnost je vhodné volit maximálně $\Delta T = 0,02$.

2/ Z hlediska trvání výpočtu je lépe volit metodu s proměnným krokem integrace, avšak nepožadujeme-li velkou přesnost, ale spíše rychlé zpracování orientačních výsledků, je nejlépe volit jednoduchou metodu Eulerovu s poměrně velkým krokem integrace (0,05 - 0,1).

3/ Doba trvání výpočtu roste úměrně s dobou T_{FINTIM} exponenciálně. Není proto vhodné volit z hlediska nároků na strojový čas dlouhou dobu sledování dynamických dějů, až do úplného ustálení.

4/ Rychlost dynamických jevů je zhruba nepřímě úměrná počtu vypadlých smyček, t.j. doba do dosažení ustáleného stavu je nejdelší při výpadku pěti HCČ, nejkratší při výpadku jednoho HCČ.

5.1.2 Experimenty s modelem výpadku všech HCČ

Při tomto experimentu byla sledována dynamika dějů při úplné havarii hydraulického systému PO, t.j. při výpadku všech čerpadel. Závěry z tohoto experimentu jsou stejné, jako závěry z kapitoly 5.1.1 shrnuté v bodech 1 - 3. Jelikož zde dynamické děje odeznávaly velmi poma-

lu, bylo nutno volit poměrně dlouhý čas FINTIM, nicméně vzhledem k některým zjednodušením a hlavně zmenšení počtu integrátorů na polovinu se nároky na strojový čas ukázaly poměrně nízké. Jinak se nevyskytly žádné zvláštnosti oproti předchozímu experimentu, neboť oba modely jsou velmi podobné.

5.1.3 Experimenty s universálním modelem

Experimenty s tímto modelem umožnily shrnutí předchozích dvou experimentů s přidáním dalších vlivů, které předchozí silně zjednodušené modely nemohly zahrnout. Výsledky experimentů byly porovnány, důležitá byla otázka ovlivnění předchozích modelů zjednodušujícími předpoklady. Rozbor těchto výsledků je v kapitole 6.

Nároky na strojový čas se u tohoto modelu ukázaly být větší (více výpočtů), avšak nikterak zásadně. Vyskytly se však některé zvláštnosti, (viz kap.5.2).

Realizační závěry jsou tytéž, jako v kapitole 5.1.1 s tím, že bod 4/ platí rozšířeně i na výdavek 6-ti HCČ. Čas FINTIM nebylo nutno zvětšovat, neboť při výpadku 6 HCČ sice odeznívají děje mnohem pomaleji, ale změny sledovaných veličin jsou tak malé, že se v grafickém výstupu neprojeví.

Dále byly sledovány dynamické děje při opětovném rozběhu čerpadel a uzavření armatur při výpadku čerpadel. Tyto výsledky jsou rozebrány v kapitole 6.1.3.

Model je velice variabilní, lze jej dále rozšiřovat o další logické funkce a tím rozšiřovat rozsah experimentů, které lze s tímto modelem provádět.

Jeho struktura jej předurčuje k zařazení do celkového modelu jaderné elektrárny, neboť svými bloky je schopen zpracovávat všechny hodnoty, které jsou (nebo budou) výstupními veličinami ostatních dílčích modelů.

5.1.4 Experimenty na modelu s nezávislými smyčkami

Při oživení modelu se nevyskytly žádné problémy. Byl realizován experiment s postupným výpadkem čerpadel až do celkového počtu pěti vypadlých HCČ.

Jelikož se při tom ukázalo, že nároky na strojový čas jsou velké (velký počet integrátorů), bylo od dalších experimentů upuštěno. Výsledky experimentu jsou popsány v kap. 6.1.4.

5.2 Zvláštnosti při realizaci experimentů

Při realizaci experimentů se vyskytly některé zvláštnosti, kterým je věnována tato kapitola.

Především je třeba poukázat na výhody při realizaci některých funkcí a logických operací pomocí přepínačů INSW a PCNSW. K popisu jejich činnosti viz kap. 4.2.3. Příjemným zjištěním bylo, že je možno tyto instrukce volně používat v algebraických výrazech a že je dokonce možné tyto příkazy slučovat (t.j. možnost použití těchto přepínačů jako argumenty funkcí či dokonce jako argumenty dalších přepínačů). Tyto kombinace mohou ušetřit počet proměnných a tím i zpřehlednit program, po případě mohou nahradit i makroinstrukce, které by jinak byl uživatel nucen definovat.

Další zvláštností bylo chování modelu při požadovaném grafickém výstupu. Byl-li požadován čas ukončení výpočtu $FINTIM = 40$, interval tisku $OUTDEL = 0,2$ a v sektoru $INITIAL$ se vyskytoval několikanásobný parametr V , proběhl výpočet $(V-1)$ krát. V tomto okamžiku se počítač zastavil a běh programu bylo nutno přerušit, takže výstup výsledků nebyl vůbec realizován. Stačila však úprava $FINTIM = 38$, $OUTDEL = 0,25$ a program běžel bez jakýchkoliv problémů.

Obdobně se choval program při pokusech s universálním modelem. Při volbě časové konstanty $CA = 0,1$ se výpočet těsně před uzavřením armatury zastavil a počítač ohlásil zmenšení minimálního kroku integrace $DELMIN$ pod přípustnou mez (při použití integrační metody s proměnným krokem integrace), případně zahlcení při metodě s pevným krokem integrace. Při současném použití několikanásobného parametru V se další pokusy vůbec nerealizovaly a byla hlášena stále tatáž chyba. Stačilo však změnit časovou konstantu na $CA = 0,2$ a všechny pokusy proběhly bez problémů.

Tyto zvláštnosti jsou zřejmě dány nějakou nedokonalostí jazyka CSMP/360 a nelze jim předem čelit, neboť procedura není do podrobností známa.

Na tyto zvláštnosti zde bylo upozorněno s ohledem na další uživatele, kteří by chtěli s modelem experimentovat, aby se nedali některou z těchto zvláštností zaskočit. Je přesto možné, že se vyskytnou některé jiné problémy, které zde nejsou popsány, neboť se nevyskytly. V takovém případě je nutno provést nějakou, zdánlivě nepodstatnou

změnu, a to zejména ve veličinách, které se nějakým způsobem týkají časového průběhu výpočtu (veličiny PRDEL, OUTDEL, FINTIM, DELT, a případně některé časové konstanty v sektoru INITIAL).

6 V Ý S L E D K Y E X P E R I M E N T Ů

Tato kapitola je zaměřena na rozbor výsledků, které byly získány při jednotlivých experimentech, popsaných v kapitole 5.1 a dále na srovnání výsledků jednotlivých experimentů.

6.1 Zpracování výsledků experimentů

Byly postupně provedeny experimenty podle kapitoly 5.1. V dalších podkapitolách je komentář k jednotlivým výsledkům. Výsledky jsou vesměs udávány jako bezrozměrné, vyjádřené v jednotkách Q_{ref} a ω_{ref} , neboť je tak dosaženo větší názornosti.

6.1.1 Výpadek jednoho až pěti HCČ

Výsledky jsou souhrnně graficky zpracovány v příloze 6. Základní náhled poskytne tab.3, která udává maximální a minimální hodnoty sledovaných veličin během pokusů a časy, kdy bylo těchto hodnot dosaženo.

K jednotlivým veličinám :

Otáčky pracujících čerpadel (OP): po výpadku zbylých čerpadel mírně vzrostou, nejméně při výpadku jediného čerpadla, nejvíce při výpadku pěti čerpadel (viz.obr.11). To je způsobeno tím, že výpadkem několika čerpadel se sníží průtok reaktorem, následkem toho tlakové ztráty reaktoru a tím i tlakový rozdíl Δp (PDELTA), takže čerpadlo může pracovat při menším elektrickém momentu (TEP), tj. při vyšších otáčkách. Podle práce [7] je tento přírůstek zanedbáván.

Skutečně se ukazuje, že tento přírůstek je zanedbatelný, neboť v případě výpadku pěti HCČ (to nastává největší zvýšení ω_p) činí tento přírůstek 0,11%. Průběh tohoto děje zhruba odpovídá přechodové charakteristice 2.řádu.

Otáčky vypadlého čerpadla (OV) : po výpadku čerpadel klesají, a to nejvíce při výpadku jediného HCČ, nejméně při výpadku pěti HCČ. Děj je nelineární, a není jej proto možné popsat nějakou jednoduchou přechodovou charakteristikou. Vlivem strvačností rotoru čerpadla přechází po výpadku čerpadlo do brzdové oblasti (kladné otáčky, záporný průtok), později přejde do turbinové oblasti (záporné otáčky i průtok). Děj je zakreslen na obr.12.

Průtok pracujícími smyčkami (QP) : vzroste tím více, čím více je vypadlých smyček (viz obr.13). Důvody jsou obdobné jako u otáček pracujících čerpadel; zmenšením tlakového rozdílu na reaktoru se zvětší efektivní podíl přírůstku tlaku na čerpadle k urychlení proudění chladiva. Časový průběh opět přibližně odpovídá přechodové charakteristice druhého řádu.

Průtok vypadlými smyčkami (QV) : klesne tím méně, čím více smyček vypadne (viz obr.14). Rychlost poklesu průtoku je rovněž závislá na počtu vypadlých smyček. Průtok se ustaluje v záporných hodnotách. Důvod tohoto průběhu je zhruba následující : s výpadkem některých čerpadel se začíná zmenšovat rychlost rotace jejich rotorů, neboť elektrický moment je skokem nulový (viz vztah (3.34.)). S poklesem otáček klesá hydraulický moment i výtlačná výška. To se odrazí v poklesu stlačení (tlakový přírůstek Δp_c) na čerpadle;

ale protože jiná čerpadla pracují, je na vstupu reaktoru stále přetlak. Tento přetlak vyvolává zpomalování průtoku chladiva vypadlou smyčkou, což naopak přispívá ke zvyšování hodnot H a T_H . Tyto hodnoty začínají prudce růst v oblasti záporných průtoků a tím se rychlost zmenšování průtoku chladiva začíná opět zmenšovat, až pro jisté hodnoty Q_V a v je dosaženo ustálení, systém se přestává vyvíjet a přechází do nového ustáleného stavu.

Při tom je třeba vidět, že teče-li chladivo vypadlou smyčkou v opačném smyslu, odčerpává vodu ze vstupu reaktoru, tedy vlastně "chladnou" vodu. Ta ještě jednou projde parogenerátorem a vteče do výstupní části reaktoru, kde se mísí naopak s "horkou" vodou. To má zřejmě na teplotu chladiva na výstupu reaktoru značný vliv a případný model PO a reaktoru z hlediska teplotní bilance musí s tímto faktem počítat.

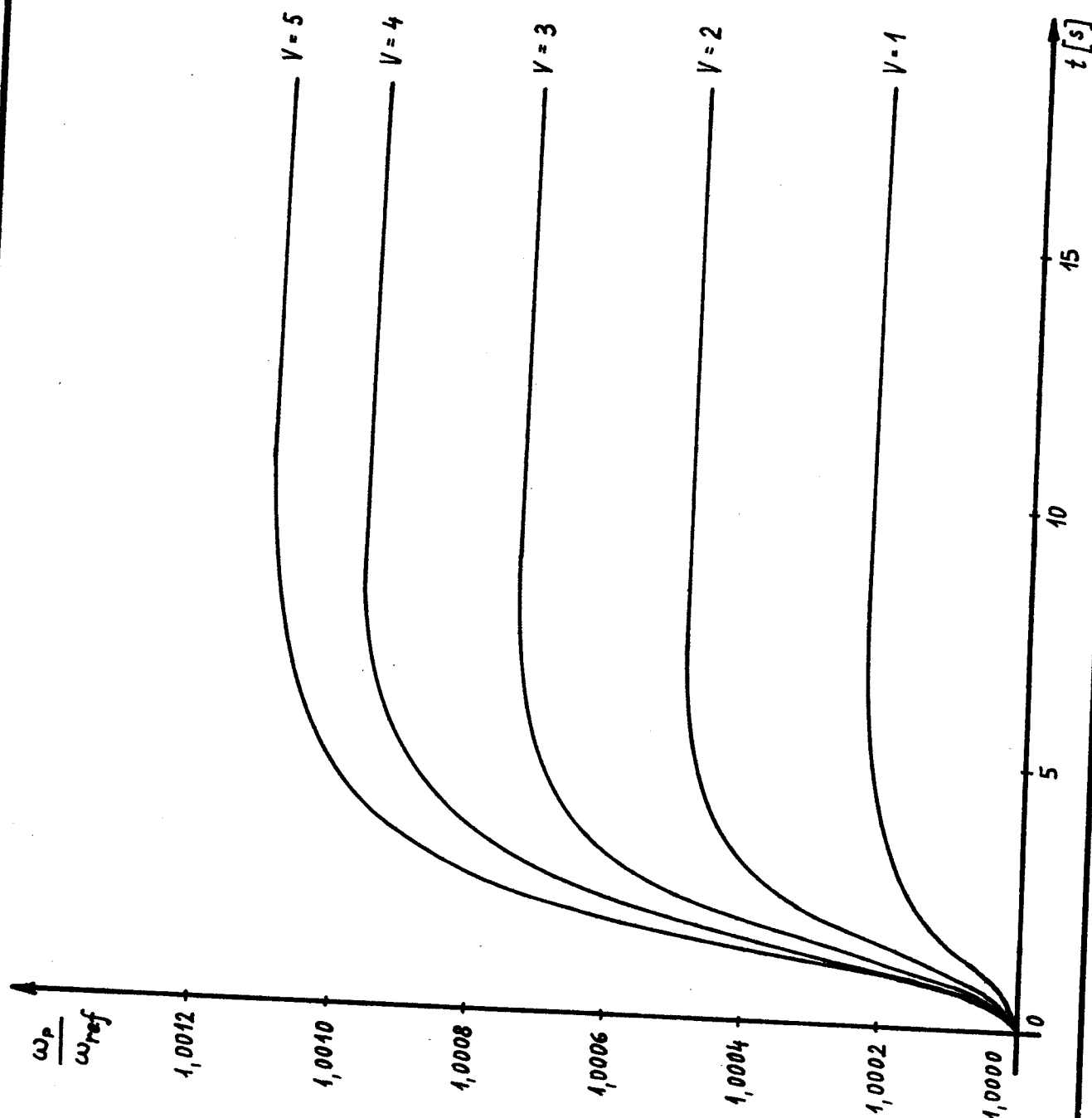
Průtok reaktorem (Q_R) : je propočítáván podle vztahu (3.40.). Ačkoliv průtok vypadlými smyčkami je záporný, dojde naproti tomu ke zvýšení průtoku pracujícími smyčkami, takže nakonec průtok reaktorem neklesá tak rapidně, jak by se na první pohled zdálo, a platí pro něj přibližně závislost :

$$Q_{RREF} = P \cdot Q_{REF} \quad (6.1.)$$

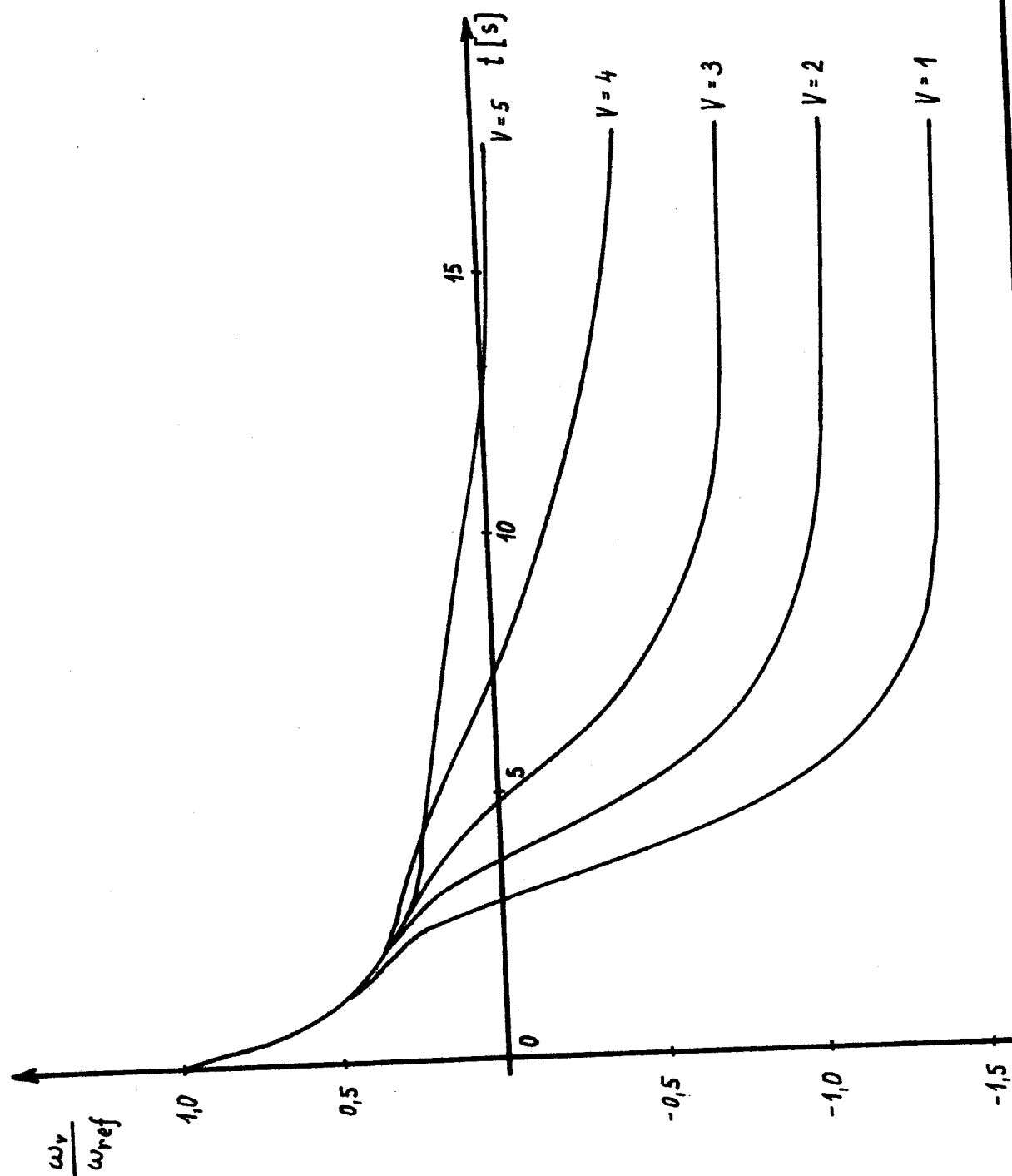
s chybou maximálně 8%. Indexy REF znamenají, že se jedná o veličiny skutečné. Tento vzorec je empirický, ale dostatečně přesný. Průtok reaktorem je ve skutečnosti při výpadku jednoho a pěti HCČ o něco vyšší, při výpadku dvou, tří a čtyř HCČ naopak o něco menší, ale odchylka nepřesáhne zmíněných 8%.

veličina	poč. vyp. HCČ	minimum v čase[s]		maximum v čase[s]	
OP	1	1,0000	0,0	1,0002	6,5
	2	1,0000	0,0	1,0005	7,5
	3	1,0000	0,0	1,0007	9,5
	4	1,0000	0,0	1,0009	9,0
	5	1,0000	0,0	1,0011	9,5
OV	1	-1,4185	18,0	1,0000	0,0
	2	-1,0813	19,0	1,0000	0,0
	3	-0,7624	20,0	1,0000	0,0
	4	-0,4643	20,0	1,0000	0,0
	5	-0,0299	20,0	1,0000	0,0
QP	1	1,0000	0,0	1,1145	12,5
	2	1,0000	0,0	1,1966	16,0
	3	1,0000	0,0	1,2517	19,5
	4	1,0000	0,0	1,2859	19,5
	5	1,0000	0,0	1,3051	20,0
QV	1	-0,5465	19,5	1,0000	0,0
	2	-0,4343	20,0	1,0000	0,0
	3	-0,2696	20,0	1,0000	0,0
	4	-0,1479	20,0	1,0000	0,0
	5	-0,0438	20,0	1,0000	0,0
QR	1	5,0260	16,5	6,0000	0,0
	2	3,9777	18,0	6,0000	0,0
	3	2,9463	20,0	6,0000	0,0
	4	1,9904	20,0	6,0000	0,0
	5	1,0856	20,0	6,0000	0,0

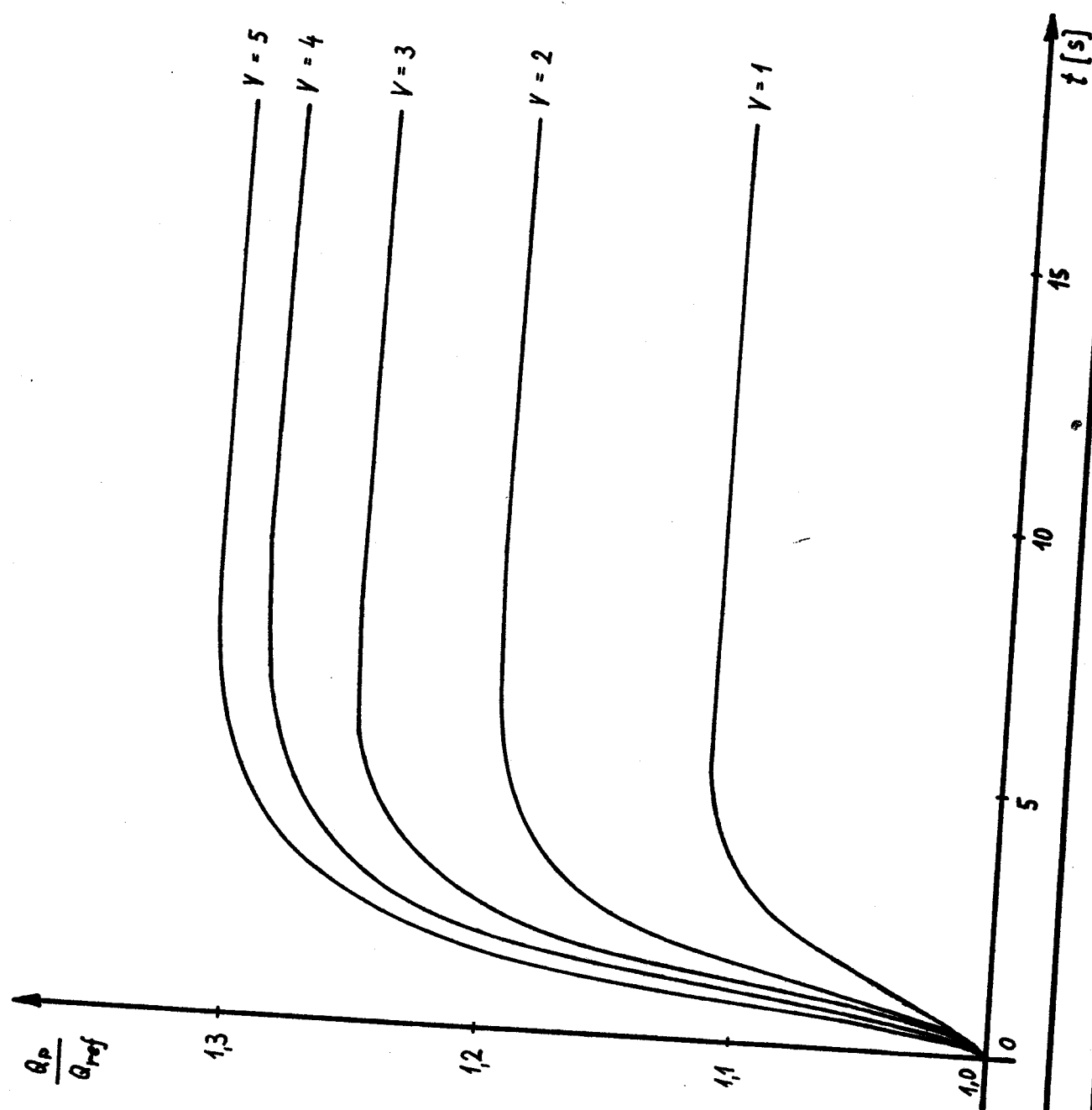
Tab.3 Orientační tabulka minim a maxim sledovaných veličin
během experimentu s výpadkem 1 - 5 HCČ, trvání poku-
su 20 s



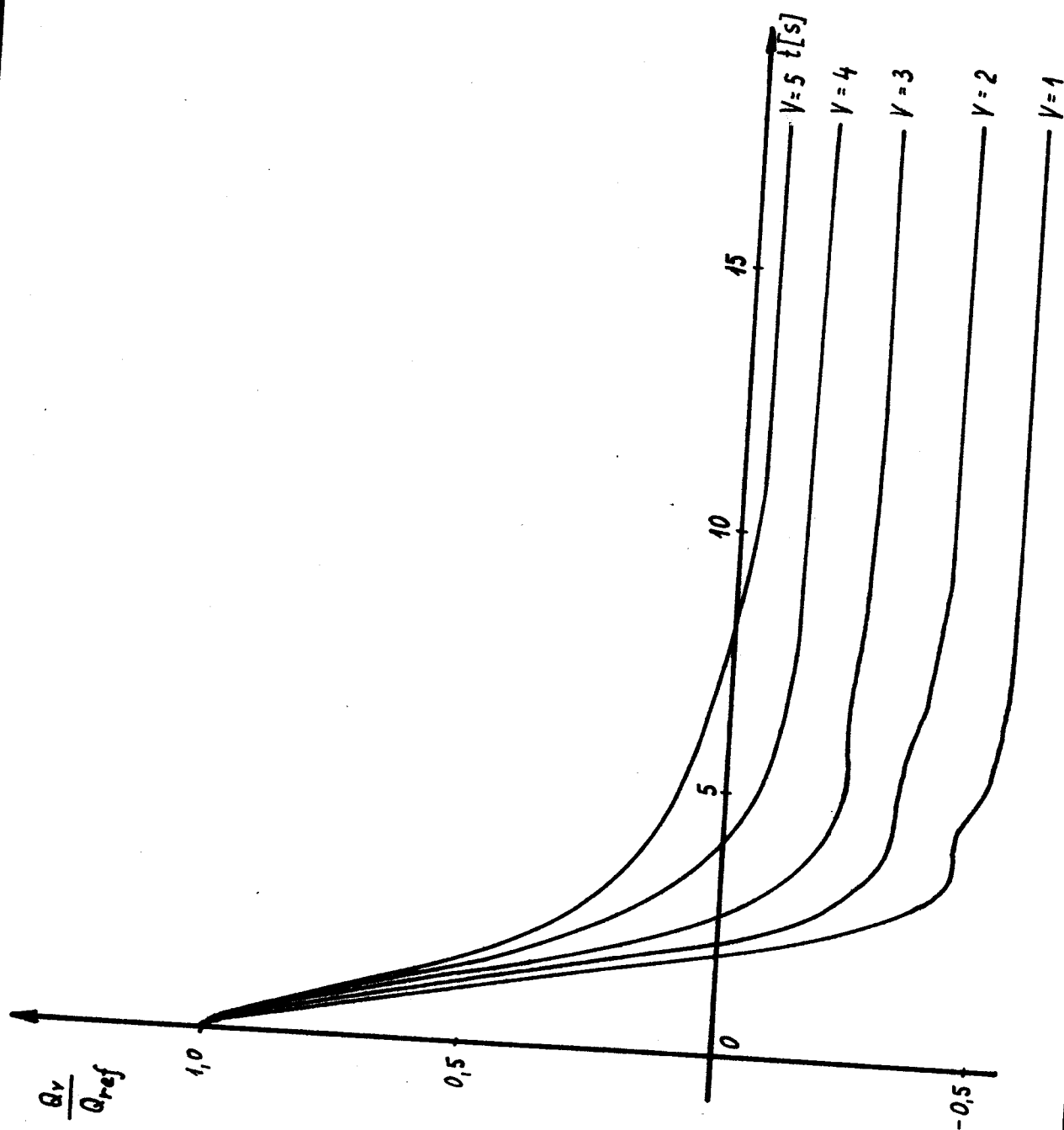
Obr.11 Srovnání časového průběhu otáček pracujícího čerpadla při výpadku 1 - 5 HCČ



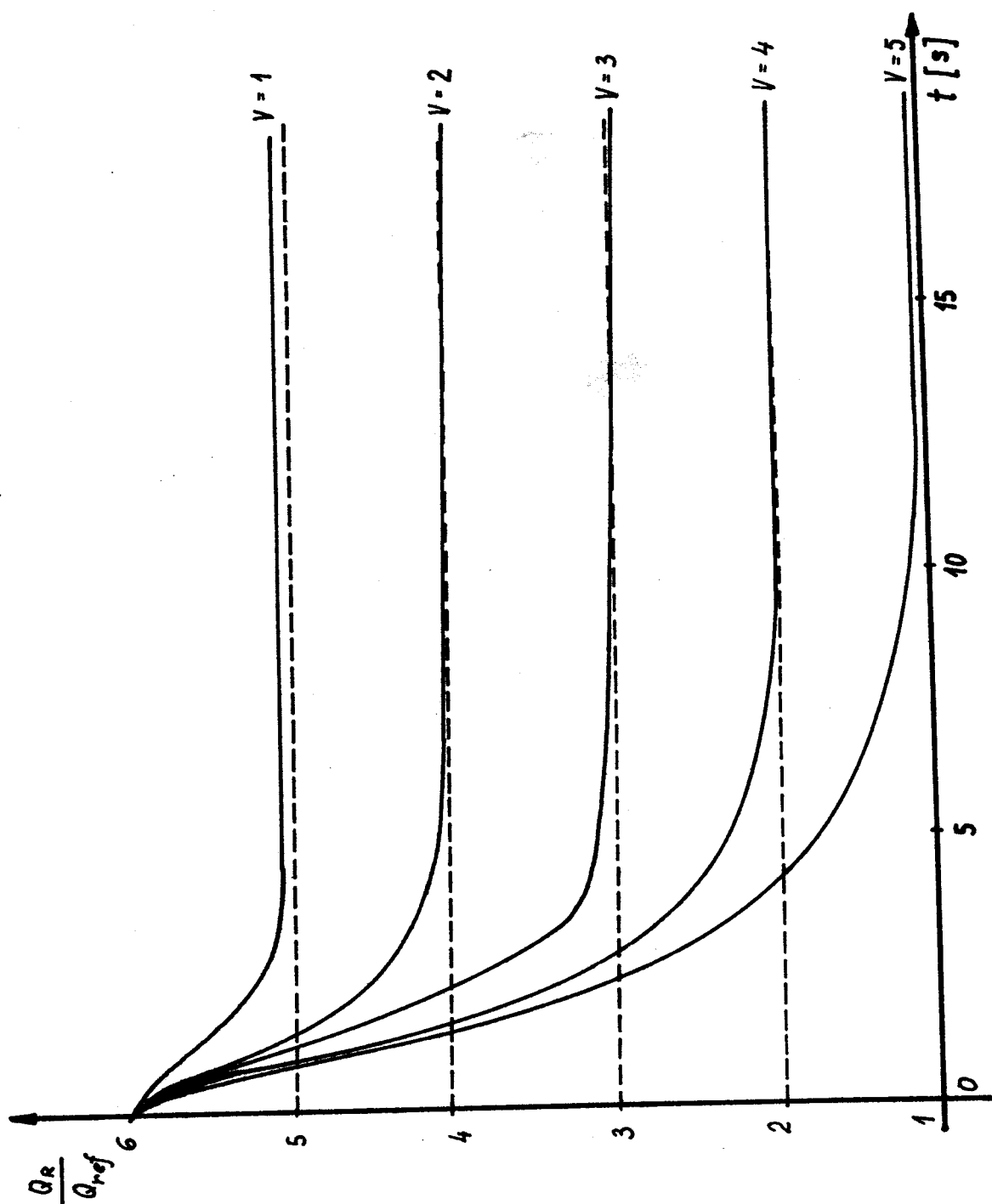
Obr.12 Srovnání časového průběhu otáček vypadlého čerpadla při výpadku 1 - 5 HCČ



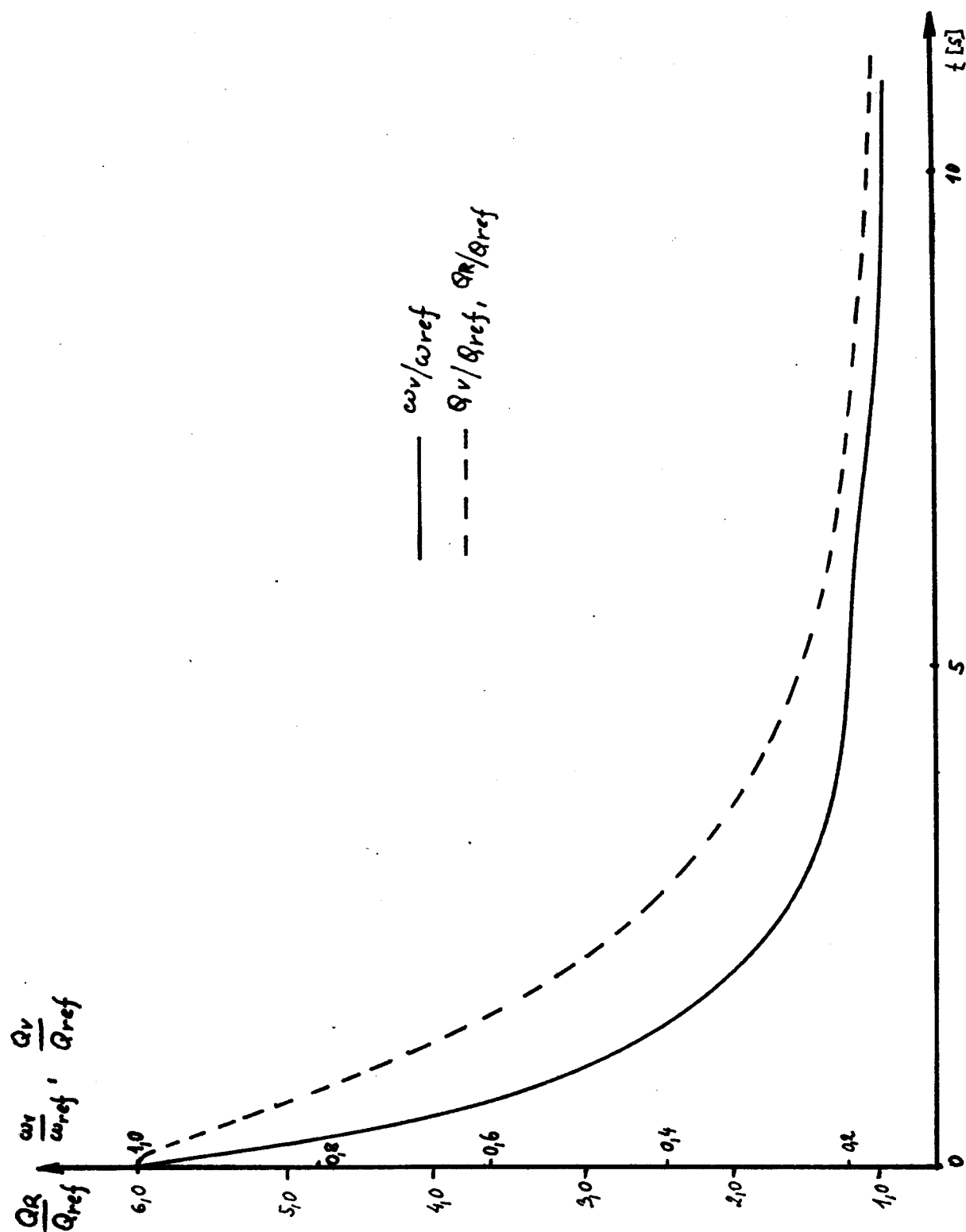
Obr.13 Srovnání časového průběhu průtoků pracující smyčkou při výpadku 1 - 5 HCČ



Obr.14 Srovnání časového průběhu průtoků vypadlou smyčkou při výpadku 1 - 5 HCČ



Obr.15 Srovnání časového průběhu průtoků reaktorem
při výpadku 1 - 5 HCČ



Obr.16 Časový průběh sledovaných veličin při výpadku
šesti HCČ

6.1.2 Výpadek všech HCČ

Grafické zpracování výsledků je v příloze 7. Jak je vidět, k přechodu do ustáleného stavu je třeba podstatně delší doby než v předchozích případech, ale změny sledovaných veličin jsou po deseti sekundách již velmi malé. Průtok smyčkami zvolna klesá, rovněž klesají otáčky rotorů. Jelikož však existují hydrostatické tlakové rozdíly, neklesne ani jedna z těchto hodnot na nulu či dokonce do záporných hodnot a reaktorem stále proudí určité množství chladiva. Průběh dějů je zakreslen na obr.16.

V čase $TIME = 20$ s klesly derivace otáček o čtyři řády a průtoku o dva řády, takže je vidět, že rychlost zpomalování průtoku je menší, než rychlost zpomalování otáček.

6.1.3 Universální model

Na tomto modelu byly učiněny tři experimenty :

- 1/ Výpadek 1 - 6 HCČ
- 2/ Výpadek 1 - 5 HCČ s jejich následovným rozběhem
- 3/ Výpadek 1 - 5 HCČ s následovným spuštěním armatur

6.1.3.1 Výpadek jednoho až šesti HCČ

Tento experiment byl proveden pouze zkusmo, aby jeho výsledky bylo možno srovnat s předchozími experimenty a zjistit případné rozdíly.

Podle očekávání byly rozdíly velice malé, největší

při výpadku pěti HCČ, kdy činily asi 9%. Tyto výsledky byly velkým uspokojením, neboť znamenaly potvrzení oprávněnosti zanedbání hydrostatických tlakových rozdílů při výpadku 1 - 5 HCČ. Protože výsledky jsou téměř shodné s předchozími experimenty, a nejsou zvlášť rozpracovávány. Platí pro ně tytéž závěry, jako v kapitolách 6.1.1 a 6.1.2.

6.1.3.2 Následovný rozběh čerpadel

Při tomto experimentu byly sledovány dynamické děje při rozběhu čerpadel po předchozím výpadku čerpadel. Rozběh byl uskutečněn v čase $T_{IME} = 20$ s, tedy po dosažení ustáleného stavu ve vypadlých smyčkách. K jednotlivým veličinám :

Otáčky pracujícího čerpadla (OP) : přecházejí zpět do nominálních hodnot, a to se zpožděním tím větším, čím menší byl počet vypadlých čerpadel. Přejít do počátečních hodnot je velmi prudký, průběhem odpovídá charakteristice druhého řádu. Je tím prudší, čím větší byl počet vypadlých čerpadel. Na příklad pro výpadek pěti HCČ trvá tento přechod zhruba 3 s, kdežto pro výpadek jednoho HCČ asi 12 s.

Otáčky vypadlého čerpadla (OV) : vzrůstají zpět do nominálních hodnot a ^{to} tím prudčeji, čím větší byl počet vypadlých čerpadel. To je způsobeno tím, že při větším počtu vypadlých čerpadel neklesají jejich otáčky tak hluboko do záporných hodnot, a záběrový moment při opětovném rozběhu je větší. Přejít k nominálním hodnotám je náhlý s nepatrným zakmitáním, které činilo maximálně 0,2 % nominální hodnoty.

Průtok pracujícími smyčkami (QP) : po opětovném rozběhu čerpadel klesá zpět do nominálních hodnot a to s určitým zpožděním, nepřímo úměrným počtu vypadlých čerpadel. Toto zpoždění činí pro srovnání při výpadku pěti HCČ asi 1 s, při výpadku jednoho HCČ asi 4 s. Rychlost přechodu je tím větší, čím větší byl počet vypadlých čerpadel a odpovídá zhruba přechodové charakteristice druhého řádu.

Průtok vypadlými smyčkami (QV) : po rozběhu čerpadel vzrůstá zpět do nominálních hodnot. Děj je nelineární, nárůst průtoku je povlnný, bez zpoždění. V určité oblasti, zhruba okolo nuly se rychlost narůstání zpomaluje a pak opět prudce roste. Dosáhne-li průtok asi 70% nominální hodnoty, rychlost se opět zpomaluje a přechod do nominální hodnoty je plynulý, bez závitů.

Průtok reaktorem (QR) : po rozběhu čerpadel vzrůstá na původní hodnotu. Děj odpovídá zhruba přechodové charakteristice druhého řádu. Zatímco při výpadku jednoho čerpadla dosáhl průtok reaktorem ustálené hodnoty asi za 4 s, při rozběhu tohoto čerpadla se hodnota průtoku reaktorem zvětšila na původní hodnotu až za 12 s. Při tom zpoždění (tj. doba za kterou se od rozběhu čerpadla začal projevovat přírůstek průtoku reaktorem), činilo asi 9 s, vlastní přechod trval pouze 4 s. Při výpadku pěti HCČ došlo k ustálení průtoku reaktorem až za 12 s, kdežto při jejich opětovném rozběhu bylo dosaženo původní hodnoty již za 2 s.

Při výpadku jednoho čerpadla je doba, potřebná k dosažení nominálních hodnot u otáček a průtoku ve vypadlé

smyčce po rozběhu čerpadla zhruba stejná jako doba, potřebná k dosažení ustáleného stavu po výpadku. Při výpadku pěti HCČ je doba, potřebná k dosažení ustálených hodnot těchto veličin mnohem delší, než doba potřebná k dosažení nominálních hodnot po opětovném rozběhu čerpadla.

V pracující smyčce je tomu jinak. Při výpadku jednoho čerpadla je dosaženo ustáleného stavu za dobu, která je zhruba polovinou až třetinou doby, potřebné k dosažení nominálních hodnot po rozběhu čerpadla. Při výpadku pěti čerpadel je tomu naopak; tj. doba, která uplyne do dosažení ustáleného stavu po výpadku čerpadel je zhruba dvakrát až třikrát větší, než doba potřebná k dosažení nominálních hodnot po opětovném rozběhu těchto čerpadel.

6.1.3.3 Uzavření sekčních armatur

Byl proveden experiment uzavření sekčních armatur po dosažení ustáleného stavu při výpadku jednoho HCČ. Bylo sledováno, jak se liší hlavně hodnoty průtoků Q_P , Q_V , Q_R , hodnoty otáček jsou podružné a nejsou zde rozebírány.

Spuštění armatur ve vypadlé smyčce má podle výsledků tohoto experimentu takovýto vliv: uzavřením armatur je průtok vypadlou smyčkou nulový. Tlakový rozdíl p se zvětší a tím poklesne hodnota průtoků zbylými pracujícími smyčkami, ale přesto bude vyšší, než hodnota nominální. Následkem toho bude průtok reaktorem vyšší, než by byl v případě neuzavření armatur. Pro srovnání: při výpadku jednoho HCČ a neuzavřených armaturách je ustálený průtok reaktorem roven asi 5,03, kdežto při uzavření armatur je tato hodnota 5,38.

To dokazuje, že při výpadku čerpadel lze zavřením armatur ve vypadlých smyčkách dosáhnout lepšího chlazení reaktoru. Při tom by bylo optimální začít armatury uzavírat v takovém okamžiku, aby k jejich úplnému uzavření došlo právě tehdy, kdy je průtok vypadlou smyčkou nulový bez vlivu armatury, tj. v čase, dosaženém při experimentu popsaném v kap. 6.1.1.

6.2 Porovnání experimentálních a vypočtených výsledků

V literatuře [7] jsou graficky zpracovány děje při výpadku jednoho, dvou a tří HCČ, charakteristiky byly změřeny při experimentu na druhém bloku jaderné elektrárny V-1 v Jaslovských Bohunicích. Tyto charakteristiky umožnily udělat srovnání počítačového modelu se skutečným PO.

Při experimentech popsaných v [7] byly měřeny průtoky pracujícími a vypadlými smyčkami a reaktorem a dále otáčky rotorů vypadlých čerpadel.

Při výpadku jednoho HCČ byly otáčky vypadlého čerpadla nulové podle experimentu asi za 4,2 s, podle počítačového modelu, sestaveného podle kap. 3.2.7 (dále jen modelu) asi za 3,3 s. Průtok pracující smyčkou vzrostl na 1,9, podle modelu na 1.11, což je rozdíl menší než 2%, tedy velmi dobrá shoda. Průtok vypadlou smyčkou byl podle experimentu nulový za asi 2 s a ustálená hodnota činila -0,55; podle modelu byl nulový asi za 1,8 s, ustálená hodnota -0,55, tedy téměř úplná shoda. Konečně ustálená hodnota průtoku reaktorem při experimentu činila 4,92; podle modelu 5,02, což je opět rozdíl pouhých 2%. Ustálenou hodnotu

otáček vypadlého čerpadla [7] neuvádí.

Při výpadku dvou HCČ byly otáčky vypadlého čerpadla nulové za 5,0 s , ustálená hodnota neuvedena; podle modelu byly otáčky nulové asi za 3,7 s . Průtok pracující smyčkou vzrostl dle experimentu na 1,2 , podle modelu rovněž na 1,2; tedy úplná shoda. Průtok vypadlou smyčkou byl nulový podle experimentu asi za 2,5 s a ustálená hodnota činila -0,42 ; podle modelu jsou tyto hodnoty 2,2 s a -0,40 ; průtok reaktorem klesl podle experimentu na 3,72 , podle modelu to bylo 3,98 .

Konečně při výpadku tří HCČ byly otáčky vypadlého čerpadla nulové asi za 7 s , ustálená hodnota neuvedena, podle modelu byly nulové za 5 s . Průtok pracující smyčkou vzrostl při experimentu na 1,21 , podle modelu na 1,25 původní hodnoty. Průtok vypadlou smyčkou byl nulový za 3,9 s a ustálil se na hodnotě -0,28 podle experimentu, podle modelu byl nulový za 2,7 s a ustálená hodnota byla -0,26. Průtok reaktorem se ustálil dle experimentu na hodnotě 2,88 , dle modelu na hodnotě 2,97 .

Časové průběhy dějů mají podle experimentu tentýž nelineární charakter, jak byl popsán v kap. 6.1.1.

Dále byl experimentálně zpracován průtok reaktorem po výpadku všech HCČ, i tento experiment vykazuje poměrně dobrou shodu s modelem jak po stránce časového průběhu děje, tak i po stránce ustálené hodnoty.

Srovnáním experimentálních výsledků s výsledky získanými při simulačních pokusech na počítači je vidět poměrně dobrá přesnost simulátoru, zejména co se týče průtoků. Ta-

ké časové průběhy simulovaných dějů jeví velmi dobrou shodu s experimenty. Pouze co se týče otáček rotorů čerpadel, je patrný jistý časový rozdíl dosažení jejich nulové hodnoty; ten může být způsoben např. nepřesným údajem o momentu setrvačnosti rotujících částí čerpadla, případně zanedbáním turbulence proudění.

Celkově však jsou výsledky dosažené na modelu uspokojivé, zejména s přihlédnutím k faktu, že údaje o otáčkách rotorů čerpadel nemají velký praktický význam.

ké časové průběhy simulovaných dějů jeví velmi dobrou shodu s experimenty. Pouze co se týče otáček rotorů čerpadel, je patrný jistý časový rozdíl dosažení jejich nulové hodnoty; ten může být způsoben např. nepřesným údajem o momentu setrvačnosti rotujících částí čerpadla, případně zanedbáním turbulence proudění.

Celkově však jsou výsledky dosažené na modelu uspokojivé, zejména s přihlédnutím k faktu, že údaje o otáčkách rotorů čerpadel nemají velký praktický význam.

7 SROVNÁNÍ S ANALOGOVÝM MODELEM

Současně s touto prací probíhala podobná práce i na analogovém počítači. Vzhledem k poměrně dosti velké složitosti problému bylo nápní práce spíše ověřit možnosti simulace PO na analogovém počítači.

I přes značné obtíže, které se vyskytly, podařilo se realizovat na analogovém počítači model PO přibližně v takové podobě, jak je sestaven matematický model pro výpadek jednoho až pěti HCČ v kapitole 3.2.7.

7.1 Srovnání realizace modelů

Mezi modelováním na analogovém (AP) a číslicovém (ČP) počítači jsou podstatné rozdíly, které vyplývají ze samotné podstaty výpočtu na obou počítačích, i když v případě AP je lépe hovořit spíše o řešení než o výpočtu. Tyto rozdíly přetrvávají i přesto, že se simulační jazyky pro spojitou simulaci snaží co nejvíce přiblížit technikám běžně používaným na AP.

Předností AP je možnost paralelního řešení, značnou nevýhodou naopak obtížná realizace složitějších funkčních závislostí. Z těchto dvou základních faktů vyplývají také specifické odlišnosti v přístupu k realizaci obou modelů.

Zatímco na ČP nebylo žádným velkým problémem realizovat aproximační charakteristiky čerpadel a další závislosti, poskytuje AP pouze omezenou možnost realizace takových funkcí, a to prostřednictvím univerzálních funkčních měničů (UFM). Vzhledem k tomu, že na jednom AP MEDA 42-TA mo-

hou být maximálně dva UFM, není možnost realizace více funkcí možná jinak, než propojením více AP, i když i zde jsou možnosti omezené. Simulátor byl realizován na AP MEDA 43-HA, který obsahuje některé funkční měniče ve standardním vybavení (x^3 , $\frac{1}{x}$, atp.), k realizaci funkcí $H(\omega, Q)$ a $T_H(\omega, Q)$ byl použit AP MEDA 42-TA. Vedle toho byly použity násobičky k realizaci kvadrátů a absolutních hodnot proměnných.

Dalším závažným omezením AP je ta skutečnost, že absolutní hodnoty všech proměnných nesmějí překročit jisté referenční napětí, tzv. strojovou jednotku (S_j), na AP MEDA 43-HA a MEDA 42-TA je to 10 V. Vzhledem k tomu, že přesnost řešení na těchto počítačích je malá, je žádoucí, aby absolutní hodnoty proměnných byly větší než 0,01 S_j . Těmto požadavkům lze vyhovět pouze použitím metod normalizace; to ale představuje značné množství výpočtů nehledě k tomu, že normy je mnohdy nutno odhadovat, jak tomu bylo ostatně i v tomto případě, což vždy skrývá určité riziko.

Uvedené nevýhody se na ČP nevyskytují, ČP řeší v pohyblivé řádové čárce.

Rozdíly jsou rovněž v technikách programování obou počítačů. Zatímco na ČP je program realizován na snadno přenosných děrných štítcích, které je možno snadno skladovat a tak umožnit rešerše, případně může být program nahrán na magnetickou pásku do knihovny programů; je na AP nutno realizovat zapojení pomocí vodičů na modelovací desce, kterýžto způsob je značně nepřehledný, nesnadno se nacházejí chyby v zapojení a naopak se snadno vnášejí chyby vlivem špatného kontaktu, nehledě k tomu, že manipulace s modelo-

vací deskou je nesnadná.

Dále je na AP mnohem složitější realizovat experimenty, a to z toho důvodu, že je nutno nově přepočítat a nastavit koeficienty na potenciometrech. Zároveň jsou touto cestou vnášeny do modelu další nepřesnosti, neboť malé koeficienty lze jen velmi obtížně nastavit s dostatečnou přesností.

Naproti tomu model na ČP dovoluje použít několikanásobný parametr, metoda je velice rychlá a jednoduchá.

Oproti uvedeným nevýhodám má AP dvě podstatné výhody. První z nich plyne ze samé podstaty analogových modelů; to je spojitost řešení. Zatímco na ČP je nutno volit metodu integrace a integrační krok takový, aby řešení bylo stabilní a dostatečně přesné, u AP žádný takový problém není.

Druhá výhoda přímo vyplývá z předcházející : zatímco rychlost řešení lze u ČP ovlivňovat buď volbou velikosti kroku integrace nebo integrační metody, což je vždy omezené a experimenty to může zatížit značnou chybou, není u AP problémem volit časové měřítko nebo zisk integrátorů a takto rychlost řešení libovolně měnit. U ČP by se naskýtala ještě možnost zvětšení rychlosti řešení zvětšením operační rychlosti počítače, ale tato možnost je spíše jen teoretická.

Konečně je třeba podotknout, že jistou výhodou AP je i snadná realizace grafických zobrazení prostřednictvím kreslicího zařízení BAK, popřípadě možnost připojení osciloskopu s více kanály.

7.2 Srovnání výsledků modelů

Na AP i ČP byly realizovány experimenty s výpadky jednoho až pěti HCČ. Výsledky podle obou modelů vykazovaly velmi dobrou shodu, což bylo dalším potvrzením správnosti realizace modelů.

Vzhledem k této skutečnosti je zbytečné tyto výsledky dále rozebírat.

7.3 Porovnání modelů

Vzhledem k tomu, že oba modely dávaly velmi dobré výsledky, je z tohoto hlediska těžké rozhodnout, který z modelů je lepší. Je jisté, že přesnější jsou výsledky z ČP. Naproti tomu výsledky z AP lze získat podstatně rychleji.

Proto se zdá, že číslicový model nalezne uplatnění tam, kde záleží na přesnosti výsledků, tj. při zkoumání procesů probíhajících v PO, pro různé výpočty atd.

Všude tam, kde stačí orientační výsledky, ale v reálném čase či ještě rychleji nalezne uplatnění analogový model.

Nabízí se dále lákavá možnost realizovat celý model jaderné elektrárny technikou integrovaných obvodů na deskách plošných spojů. Tento model by mohl být realizován modulově, tj. každý dílčí model by byl zvláštním modulem, celý model by byl z těchto modulů kompletován jako stavebnice. Realizace by sice byla nákladná, ale číslicový počítač, vyhrazený pouze pro takovýto model, by byl patrně mnohem dražší.

Takto realizovaný analogový model, použitý jako vybavení operačního stanoviště, by umožňoval téměř okamžité zobrazování zvolených režimů a průběhů havarijních stavů, v případě havárie předem určit s velkou rychlostí možné následky a včasným zásahem na ně reagovat a tak omezit jejich dopad.

8 Z Á V Ě R

Ačkoliv programy pro simulaci PO vypadají na pohled velice jednoduše, je třeba uvést, že při sestavování simulátorů se vyskytly některé vážné problémy. Lze říci, že na sestavení simulačního modelu a experimenty na něm připadla zhruba asi 1/5 času z doby, potřebné k sestavení celé práce. Zhruba stejná byla i doba, potřebná k získání bližších údajů o problematice primárního okruhu jaderné elektrárny s reaktorem typu VVER 440 a sepsání této práce. Největší časové nároky si ale vyžádaly přípravné práce, zejména sestavování aproximačních charakteristik čerpadel. Rovněž nalézt způsob, jak tyto charakteristiky získat, nebyl jednoduchý.

Přes tyto problémy se nakonec podařilo sestavit simulační modely a uskutečnit na nich řadu experimentů, které přinesly nové poznatky o chování PO. Zároveň byla použita nejjednodušší varianta modelu PO ke spojení s ostatními dílčími modely funkčních celků jaderné elektrárny, takže lze říci, že práce našla již své praktické uplatnění.

Modely však nabízejí možnosti dalšího využití (zejména universální model). To by mohlo obohatit vědomosti o problematice dějů v jaderné elektrárně s reaktory typu VVER a tak přispět k dalšímu zvyšování bezpečnosti provozu jaderných elektráren a tím i k urychlení tempa jejich výstavby, což by v konečném důsledku znamenalo zajištění zdrojů el.energie pro naše národní hospodářství a další rozvoj naší socialistické společnosti.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- 1 Vliv výroby a využívání energie na životní prostředí, Část II. Jaderná energie, Ústřední informační středisko pro jaderný program, Praha, 1981
- 2 Mareš, Z. a kolektiv: Jaderná energie v současném světě, Svoboda, Praha, 1980
- 3 Jaderné elektrárny s reaktory typu VVER 440, sborník přednášek ČSVTS, Brno, 1978
- 4 Bečvář, J.: Jaderné elektrárny, SNTL, Praha, 1981
- 5 Klik, F.: Rozvoj jaderné energetiky v ČSSR, sborník referátů z konference "Průmyslová energetika" pořádané u příležitosti 20.výročí založení VŠST Liberec, Liberec, květen 1973
- 6 Škoda revue 1982
- 7 Mišák, J.; Klepáč, J.: PUMCO - Výpočtový program pro hydrodynamiku primárního okruhu VVER při výpadkoch cirkulačních čerpadel, VÚJE 22/80
- 8 Paciga, A.: Projektovanie zariadení čerpacej techniky, Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry, Bratislava, 1967
- 9 Vladař, J.: Elektrotechnika a průmyslová elektronika, skriptum ČVUT, Praha, 1981
- 10 Rivkin, S.L.; Alexandrov, A.A.: Termodinamičeskije svojstva vody i vodjanovo para
- 11 Nevřiva, P.: Simulace řídicích systémů na číslicovém počítači, SNTL, Praha, 1975
- 12 Aplikační problémy simulačních modelů, Dům techniky ČVTS, Praha, 1976
- 13 Kindler, E.: Simulační programovací jazyky, SNTL, Praha, 1980
- 14 Simulace a její použití, sešity INORGA, řada A, Praha, 1973

- 15 CSMP/360, manuál fy IBM
- 16 Michele, F.; Dubšek, F.; Trubášek, J.: Strojní zařízení jaderných elektráren, skriptum VUT, Brno, 1974