

**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

**BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY**

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY**

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING**

**STANOVENÍ TEPLOTNÍHO KOEFICIENTU  
REAKTIVITY REAKTORU V JADERNÉ  
ELEKTRÁRNĚ DUKOVANY**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS**

**AUTOR PRÁCE  
AUTHOR**

**JAKUB KLÍMA**

**BRNO 2012**



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

**Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

**Student:** Jakub Klíma

**ID:** 125478

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2011/2012

## NÁZEV TÉMATU:

**Stanovení teplotního koeficientu reaktivity reaktoru v Jaderné elektrárně  
Dukovany**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Úvod (předpisy související s provozem jaderného reaktoru).
2. Fyzika reaktoru.
3. Popis aktivní zóny.
4. Spouštění reaktoru.
5. Ověření teplotního koeficientu reaktivity při dohřevu na teplotu 260 °C.
6. Statistické zpracování získaných výsledků.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 6.2.2012

**Termín odevzdání:** 25.5.2012

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Jiří Raček, CSc.

**Konzultanti bakalářské práce:**

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**

*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

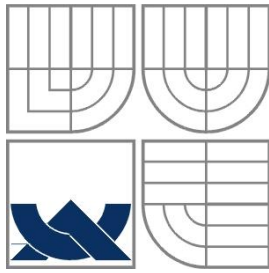
Bibliografická citace práce:

KLÍMA, J. Stanovení teplotního koeficientu reaktivity reaktoru v Jaderné elektrárně Dukovany. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012., 56 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jiří Raček, CSc..

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

.....

Na tomto místě bych chtěl poděkovat svému konzultantovi panu Ing. Viktoru Kockovi, zaměstnanci EDU, za odborné připomínky, cenné rady a poskytnutou literaturu. Dále bych chtěl poděkovat také panu doc. Ing. Jiřímu Račkovi za vedení práce.



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**



**Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií  
Ústav elektroenergetiky**

**Bakalářská práce**

# **Stanovení teplotního koeficientu reaktivity reaktoru v Jaderné elektrárně Dukovany**

**Jakub Klíma**

**vedoucí: doc. Ing. Jiří Raček, CSc.**

**Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2012**

**Brno**



**BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY**

**Faculty of Electrical Engineering and Communication  
Department of Electrical Power Engineering**

**Bachelor's Thesis**

# **Determination of the temperature reactivity coefficient for Nuclear power plant Dukovany**

by

**Jakub Klíma**

**Supervisor: doc. Ing. Jiří Raček, CSc.**

**Brno University of Technology, 2012**

**Brno**

## **ABSTRAKT**

Tato práce se zabývá zpětným ověřením teplotního koeficientu reaktivity reaktoru v Jaderné elektrárně Dukovany, měřeného v rámci fyzikálního testu Dohřev chladiva na 260 °C. V práci jsou popsány druhy spouštění jaderných reaktorů a soupis prováděných testů, které se při nich provádí. Dále je zde uveden popis metod stanovení teplotních koeficientů reaktivity.

V poslední části práce je popis programu, který byl vytvořen za účelem vypočítání teplotního koeficientu reaktivity ze zadaných souborů a ověření jeho výpočtových metodik pomocí statistického testu.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** Jaderná elektrárna Dukovany, jaderný reaktor, spouštění jaderného reaktoru, fyzikální testy, teplotní koeficient reaktivity.

**ABSTRACT**

This thesis deals with the re-determination of the temperature reactivity coefficient of the Nuclear power plant Dukovany, which is measured within the physical test Reheating of the cooling to 260 °C. This paper contains description of the types of nuclear reactors launching, list of tests which are performed during these startings and it also describes methods for determination of temperature reactivity coefficient.

Last part of this thesis includes description of programme which was created for determining temperature reactivity coefficient from given files and verification of its calculating methods by statistical test.

**KEY WORDS:** Nuclear power plant Dukovany, nuclear reactor, nuclear reactor launching, physical tests, temperature reactivity coefficient.



## OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	10
SEZNAM TABULEK .....	11
SEZNAM ZNAČEK POUŽITÝCH VELIČIN .....	12
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	13
1 ÚVOD .....	14
2 BEZPEČNOST PROVOZU JADERNÝCH REAKTORŮ .....	16
2.1 STÁTNI ÚŘAD PRO JADERNOU BEZPEČNOST .....	16
2.2 ATOMOVÝ ZÁKON .....	16
2.3 VYHLÁŠKA 106/1998 .....	17
2.4 DALŠÍ ORGANIZACE DOHLÍŽEJÍCÍ NA BEZPEČNÉ PROVOZOVÁNÍ JADERNÝCH REAKTORŮ .....	17
3 FYZIKA REAKTORU .....	19
3.1 JADERNÉ REAKCE .....	19
3.2 MULTIPLIKAČNÍ ČINITEL A ROVNICE ČTYŘ ČINITELŮ .....	21
4 POPIS AKTIVNÍ ZÓNY TLAKOVODNÍHO REAKTORU VVER-440.....	24
5 SPOUŠTĚNÍ REAKTORU .....	28
5.1 FYZIKÁLNÍ SPOUŠTĚNÍ.....	28
5.2 ENERGETICKÉ SPOUŠTĚNÍ.....	28
5.3 KOEFICIENTY REAKTIVITY .....	29
5.4 OTRAVA REAKTORU .....	29
6 REALIZACE FYZIKÁLNÍCH TESTŮ V PODMÍNKÁCH EDU.....	30
6.1 PROVOZNÍ REŽIMY BLOKU .....	30
6.2 OBECNÉ NÁLEŽITOSTI FYZIKÁLNÍCH TESTŮ.....	32
6.3 DOHŘEV CHLADIVA PRIMÁRNÍHO OKRUHU NA 260 °C .....	33
7 SYSTÉM ANMS.....	36
7.1 PROGRAM KINETIK.....	36
7.2 PROGRAM TEPKO .....	37
8 STANOVENÍ TEPLOTNÍHO KOEFICIENTU REAKTIVITY REAKTORU V JADERNÉ ELEKTRÁRNĚ DUKOVANY .....	39
8.1 ZÁKLADNÍ PRINCIP PROGRAMU .....	40
8.2 PŘÍPRAVA VSTUPNÍCH HODNOT PRO REGRESNÍ ANALÝZU.....	41
8.3 POPIS OVLÁDÁNÍ PROGRAMU STANOVENÍ TEPLOTNÍHO KOEFICIENTU REAKTIVITY.....	41
9 VÝSLEDKY.....	45
9.1 OVĚŘENÍ POUŽITÉ METODY VÝPOČTU .....	46
9.2 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ .....	49
10 ZÁVĚR.....	53

---

<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>54</b>
<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>55</b>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 3-1 Výtěžek produktů štěpení v závislosti na nukleonovém čísle.</i>	20
<i>Obr. 3-2 Optimální krok palivové mříže</i>	23
<i>Obr. 4-1 Reaktorová nádoba reaktoru VVER-440</i>	24
<i>Obr. 4-2 Příčný řez reaktorem VVER-440</i>	25
<i>Obr. 4-3 Konstrukční součásti koše AZ reaktoru VVER-440</i>	26
<i>Obr. 4-4 Palivový článek a palivová část regulačního článku reaktoru VVER-440</i>	27
<i>Obr. 4-5 Palivová tyč reaktoru VVER-440</i>	27
<i>Obr. 6-1 Předpokládaný časový průběh reaktivity a teploty v průběhu testu měření izotermického teplotního koeficientu reaktivity.</i>	35
<i>Obr. 7-1 Pilovitá křivka. <math>\rho(t)</math> je časový průběh reaktivity. <math>H(t)</math> je časový průběh polohy 6. skupiny havarijních a regulačních článků a <math>\vartheta(t)</math> je závislost teploty na čase.</i>	37
<i>Obr. 7-2 Typická závislost teplotního koeficientu reaktivity na teplotě.</i>	38
<i>Obr. 8-1 Ukázka vstupního souboru kinetik_skoky.txt</i>	39
<i>Obr. 8-2 Ukázka hlavního okna programu Stanovení teplotního koeficientu reaktivity.</i>	40
<i>Obr. 8-3 Popis ovládání hlavního okna programu Stanovení teplotního koeficientu reaktivity.</i>	42
<i>Obr. 8-4 Popis ovládání okna s výsledky programu Stanovení teplotního koeficientu reaktivity.</i>	44
<i>Obr. 9-1 Průměrné hodnoty teplotních koeficientů reaktivity pro teploty 230 °C, 240 °C, 250 °C a 260 °C.</i>	49
<i>Obr. 9-2 Absolutní odchylky počítaných a referenčních hodnot teplotních koeficientů reaktivity pro teplotu 230 °C.</i>	50
<i>Obr. 9-3 Absolutní odchylky počítaných a referenčních hodnot teplotních koeficientů reaktivity pro teplotu 240 °C.</i>	50
<i>Obr. 9-4 Absolutní odchylky počítaných a referenčních hodnot teplotních koeficientů reaktivity pro teplotu 250 °C.</i>	51
<i>Obr. 9-5 Absolutní odchylky počítaných a referenčních hodnot teplotních koeficientů reaktivity pro teplotu 260 °C.</i>	51
<i>Obr. 9-6 Závislosti teplotních koeficientů reaktivity na teplotě.</i>	52

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 3-1 Rozdělení energie štěpení .....</i>	<i>20</i>
<i>Tab. 3-2 Charakteristické vlastnosti zpožděných neutronů pro <math>^{235}\text{U}</math> .....</i>	<i>21</i>
<i>Tab. 6-1 Provozní režimy bloku .....</i>	<i>31</i>
<i>Tab. 9-1 Vypočtené teplotní koeficienty reaktivity .....</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 9-2 Teplotní koeficienty reaktivity vypočítané (Poč), referenční (Ref) a jejich absolutní odchylky (Odch). .....</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 9-3 Data pro Wilcoxonův test pro teplotu 230 °C.....</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 9-4 Data pro Wilcoxonův test pro teplotu 240 °C.....</i>	<i>47</i>
<i>Tab. 9-5 Data pro Wilcoxonův test pro teplotu 250 °C.....</i>	<i>47</i>
<i>Tab. 9-6 Data pro Wilcoxonův test pro teplotu 260 °C.....</i>	<i>48</i>
<i>Tab. 9-7 Shrnutí výsledků Wilcoxonova testu pro teploty 230 °C, 240 °C, 250 °C a 260 °C.....</i>	<i>48</i>
<i>Tab. 9-8 Vysvětlivky k obr. 9-2, obr. 9-3, obr. 9-4 a obr. 9-5. ....</i>	<i>52</i>

**SEZNAM ZNAČEK POUŽITÝCH VELIČIN**

Značka	Veličina	Jednotka
$\alpha$	hladina významnosti	
$A$	nukleonové číslo	1
$Z$	protonové číslo	1
$N$	neutronové číslo	1
$\lambda$	přeměnová konstanta	$s^{-1}$
$T_{1/2}$	poločas přeměny	s
$v$	rychlost	$m \cdot s^{-1}$
$n$	hustota počtu neutronů	$m^{-3}$
$\varphi$	hustota neutronového toku	$m^{-2} \cdot s^{-1}$
$k$	multiplikační součinitel	1
$k_{ef}$	efektivní multiplikační součinitel	1
$k_{\infty}$	multiplikační součinitel pro nekonečnou násobící soustavu	1
$\Delta k$	přebytek součinitele násobení	1
$\rho$	reaktivita	1
$\eta$	regenerační faktor	1
$\varepsilon$	součinitel násobení rychlými neutrony	1
$p$	pravděpodobnost úniku rezonančnímu záchytu	1
$f$	součinitel využití tepelných neutronů	1
$A_1$	pravděpodobnost neúniku neutronu ze soustavy během zpomalování	1
$A_2$	pravděpodobnost neúniku neutronu ze soustavy během difúze	1
$a$	krok palivové mříže	m
$P_n$	jmenovitý tepelný výkon reaktoru	W
$P_{FS}$	výkon reaktoru pro fyzikální testy	W
$p$	tlak	Pa
$t$	teplota	$^{\circ}C$
$W_+$	součet kladných rozdílů	1
$W_-$	součet záporných rozdílů	1
$W_{min}$	menší hodnota ze součtů $W_+$ a $W_-$	1
$W_k$	kritická hodnota pro Wilcoxonův test	1

**SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK**

ANMS	analytický nestandardní měřicí systém
AZ	aktivní zóna reaktoru
EDU	Jaderná elektrárna Dukovany
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	kyselina boritá
HRK	havarijní a regulační článek
HRK-6	havarijní a regulační články 6. skupiny
Poč	hodnoty počítané programem Stanovení teplotního koeficientu reaktivity
Ref	hodnoty počítané programem TEPKO
LaP	limity a podmínky
MAAE	Mezinárodní agentura pro atomovou energii
P011A	provozní předpis P011A - Fyzikální testy
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
WANO	The World Association of Nuclear Operators

# 1 ÚVOD

S nárůstem a rozvojem lidské populace jsou neodvratně spojeny zvyšující se požadavky na zajištění dostatečného množství energie. V současné době se k výrobě tak velkého množství energie vyplatí použít jaderných energetických reaktorů. Výhodou jaderných elektráren je ekologičtější provoz ve srovnání s elektrárnami, spalujícími fosilní paliva. V porovnání s fotovoltaickými panely nabízí jaderné elektrárny stabilní zdroj energie a mnohem lepší využití zastavěného prostoru.

Bohužel, jako ostatně u všeho, i u provozování jaderných reaktorů existují rizika havárie. Dopady takové havárie na životní prostředí mohou být obrovské, jak nám již bohužel historie ukázala při haváriích v elektrárně Three Mile Island (1979), v Černobylské elektrárně (1986) nebo v nedávné době při havárii v japonské elektrárně Fukušima I (2011). Proto je s dalším rozvojem jaderné energetiky kladen důraz také na zvyšování bezpečnosti provozu jaderných zařízení. Jedním takovým bezpečnostním opatřením je i provozování jaderných reaktorů, které mají záporný teplotní koeficient reaktivity. To znamená, že zvýšení teploty chladiva v reaktoru nevede k nekontrolovatelnému rozvoji štěpné řetězové reakce, jak se stalo v Černobylském reaktoru, ale štěpná řetězová reakce je tlumena, reaktor je pak stabilnější a sám sebe reguluje.

Na bezpečnost provozu jaderných zařízení dohlíží v jednotlivých zemích státní orgány. Samozřejmostí je opora těchto orgánů v zákonech a vyhláškách dané země. Mimo to existují ještě i mezinárodní organizace, které celosvětově dohlížejí na bezpečné provozování jaderných zařízení. V 2. kapitole této práce je uveden stručný průřez českým zákonem a vyhláškou ošetřující provoz jaderných zařízení na našem území.

Kapitoly 3 a 4 obsahují základní průřez fyzikou jaderného reaktoru respektive základní popis jeho konstrukčních součástí. V 5. kapitole jsou obecně popsány druhy spouštění jaderných reaktorů.

Cílem této práce je zpětně ověřit hodnoty teplotního koeficientu reaktivity v Jaderné elektrárně Dukovany. Výpočtové podklady k této práci pochází z měření prováděného v rámci fyzikálního testu, který se provádí při opakovaném spouštění reaktoru po výměně paliva. Tento fyzikální test se nazývá Dohřev chladiva primárního okruhu na 260 °C a jeho metodikám je věnována kapitola 6.3. Tyto podklady jsou ve formě datového souboru, vyexportovaného z analytického nestandardního měřicího systému. K výměně paliva a opakovanému spouštění reaktoru dochází přibližně jednou do roka, a tudíž za provozu Jaderné elektrárny Dukovany (od roku 1985) byl nastřádán větší počet takových souborů; každý soubor navíc obsahuje různý počet záznamů z měření. Na základě toho jsem se rozhodl, že pro výpočet teplotních koeficientů reaktivity bude vytvořen počítačový program nazvaný Stanovení teplotních koeficientů reaktivity, který zvládne načíst a zpracovat libovolné množství datových souborů s hodnotami a následně zobrazí ucelené a přehledně teplotní koeficienty reaktivity pro daný blok a rok provádění opakovaného spouštění. Dále do něj byla implementována možnost načtení souboru s referenčními daty, která byla poskytnuta společně s výpočtovými podklady a která jsou počítána programem TEPKO, který je součástí analytického nestandardního měřicího systému (kap. 7). Dále je možné přímo v programu zobrazit základní statistické ukazatele, díky čemuž lze v příslušném oknu programu přímo porovnat výsledky počítané přímo v programu s hodnotami referenčními, dále jsou zde zobrazeny průměrné, minimální, maximální hodnoty a směrodatné a průměrné odchylky. Poslední nabízenou možností je vyexportování výsledků do souboru formátu MS Excel pro další

uchování a práci. Popisu základních principů, vnitřních metodik programu a jeho ovládání se věnuje kapitola 8.

V kapitole 9 je popsán způsob ověření, zda mohou být metodiky programu Stanovení teplotního koeficientu reaktivity použity. Protože byly poskytnuty i referenční hodnoty, které jsou vypočítány ze stejných výchozích podkladů a vzhledem k hodnotám, počítaným programem Stanovení teplotních koeficientů reaktivity se jedná o párové hodnoty, byl pro toto ověření použit statistický Wilcoxonův párový test. Tímto testem ověřujeme hypotézu, že obě dvě sady hodnot se od sebe výrazně neliší. Dále jsou v této kapitole v tabulkách Tab. 9-1 a Tab. 9-2 zobrazeny vypočítané hodnoty. Na základě těchto dat byly vytvořeny grafické ukazatele a závislosti.



## 2 BEZPEČNOST PROVOZU JADERNÝCH REAKTORŮ

Na bezpečný provoz jaderných elektráren v České republice dohlíží Státní úřad pro jadernou bezpečnost (SÚJB). Jeho působnost upravuje zákon č. 18/1997 Sb. ze dne 24. ledna 1997 o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (atomový zákon) a o změně a doplnění některých zákonů [1].

### 2.1 Státní úřad pro jadernou bezpečnost

SÚJB zajišťuje dozor při využívání jaderné energie a ionizujícího záření v oblasti radiační, jaderné, chemické a biologické ochrany. Dále vykonává státní dozor nad jadernou bezpečností, fyzickou ochrannou jaderných zařízení a havarijní připraveností na pracovištích se zdroji ionizujícího záření. Mezi jeho další kompetence patří například vydávání povolení k umístování a provozu jaderných zařízení, schvalování dokumentace, potřebné k zajištění jaderné bezpečnosti, sledování stavu ozáření obyvatelstva, evidence jaderných materiálů a zdrojů ionizujícího záření.

### 2.2 Atomový zákon

Zákon č. 18/1997 Sb. ze dne 24. ledna 1997 o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (atomový zákon) a o změně a doplnění některých zákonů je hlavní zákon, který stanovuje zásady práce a nakládání se zdroji ionizujícího záření všech možných typů, od malých školních pomůcek, přes lékařská zařízení, až po jaderné elektrárny. Je rozčleněn do šesti hlav.

*Hlava první* obsahuje úvodní ustanovení. Jsou v ní stanoveny všechny důležité základní pojmy jako činnosti související s využíváním jaderné energie, činnosti vedoucí k ozáření, co je myšleno jadernou bezpečností, radiační, fyzickou ochrannou a havarijní připraveností. Přesně definuje ionizující záření, jako přenos energie v podobě částic nebo elektromagnetických vln vlnové délky nižší nebo rovnající se 100 nm, anebo s frekvencí vyšší nebo rovnající se  $3 \cdot 10^{15}$  Hz, který je schopen přímo nebo nepřímo vytvářet ionty. Dále zde jsou vytyčeny pravomoci Státního úřadu pro jadernou bezpečnost, mezi které patří například vykonávání státního dozoru, kontrola nešíření jaderných zbraní, schvalování dokumentací.

*Hlava druhá* s názvem obecné podmínky pro vykonávání činností souvisejících s využíváním jaderné energie, činností vedoucích k ozáření a zásahů ke snížení ozáření přikazuje využívání jaderné energie pouze pro mírové účely a také povinnost využívat tuto energii, tak aby byla přednostně zachována bezpečnost obyvatelstva a pracovníků. Dělí jaderná zařízení, materiály, pracoviště a pracovníky do několika kategorií a stanovují pro ně podmínky.

*Hlava třetí*, podmínky pro využívání jaderné energie a ionizujícího záření, stanovuje, k jakým činnostem je třeba získat povolení SÚJB. Povolení jsou nutná k umístění, k jednotlivým etapám výstavby, provozu, i vyřazování jaderného zařízení. Dále také pro uvedení jaderného reaktoru do kritického stavu po výměně paliva, provádění rekonstrukcí a jiných změn, nakládání s radioaktivními odpady, přepravu jaderných materiálů a odbornou přípravu vybraných pracovníků je potřeba zajistit daná povolení. Tato hlava také obsahuje podmínky, které musí být splněny, aby daná povolení mohla být vydána.

*Hlava čtvrtá*, nakládání s radioaktivními odpady, udává povinnosti pro původce radioaktivních odpadů. Vlastník radioaktivních odpadů nese veškeré náklady spojené s jejich nakládáním od jejich vzniku až po jejich uložení, včetně monitorování úložišť radioaktivních odpadů po jejich

uzavření a potřebných výzkumných a vývojových prací. Na nakládání s radioaktivními odpady se nevztahuje zákon o odpadech.

*Hlava pátá* - občanskoprávní zodpovědnost za jaderné škody. Zodpovědnost za jaderné škody vychází z mezinárodních smluv, kterými je Česká republika vázána. Konkrétně se jedná Vídeňskou úmluvu o občanskoprávní odpovědnosti za jaderné škody a Společný protokol týkající se aplikace Vídeňské úmluvy a Pařížské úmluvy. Tato hlava také upravuje odpovědnost držitele povolení za škodu a povinnost pojištění této odpovědnosti.

*Hlava šestá* s názvem výkon státního dozoru a pokuty stanovuje kontrolní pracovníky úřadu, a sice inspektory jaderné bezpečnosti a inspektory radiační ochrany. Inspektoři mohou kdykoliv vstupovat do objektů, zařízení a provozů, kde se provádějí činnosti související s využíváním jaderné energie nebo činnosti vedoucí k ozáření. Mohou provádět kontrolu a vyžadovat důkazy o dodržování podmínek jaderné bezpečnosti, provádět měření, prověřovat odbornou způsobilost, účastnit se šetření a likvidace událostí důležitých z hlediska jaderné bezpečnosti, radiační a fyzické ochrany.

### 2.3 Vyhláška 106/1998

Ve své práci se zabývám stanovením teplotního koeficientu reaktivity při opětovném spouštění a náležitosti opětovného spouštění jsou obsaženy ve vyhlášce 106/1998 [3], konkrétně v páté části. Před opětovným uvedením jaderného reaktoru do kritického stavu po výměně jaderného paliva je třeba provést a dokladovat kontrolu připravenosti. Je nutné prověřit:

- zda jsou ukončeny veškeré práce a zkoušky vztahující se k výměně paliva a odpovídajícím částem programu provozních kontrol.
- zda jsou splněna kritéria úspěšnosti vztahující se k činnostem z předchozího bodu.
- připravenost zařízení a personálu k opětovnému uvedení jaderného reaktoru do kritického stavu a k dalšímu provozu.

K žádosti o povolení se potom musí předložit nejméně jeden měsíc před podáním:

- neutronově-fyzikální charakteristiky aktivní zóny reaktoru,
- průkazy o připravenosti zařízení a personálu k opětovnému uvedení reaktoru do kritického stavu, k nimž patří i doklady a protokoly o výsledcích provozních kontrol a splnění kritérií přijatelnosti,
- harmonogram dalšího provozu včetně programu uvádění jaderného do opětovného provozu a programů fyzikálního a energetického spouštění v nezbytném rozsahu.

### 2.4 Další organizace dohlížející na bezpečné provozování jaderných reaktorů

*Mezinárodní agentura pro atomovou energii – MAAE (IAEA)* je mezivládní agentura, spadající pod OSN. Byla založena v roce 1957 jako odpověď na vzrůstající obavy pramenící z jaderné energie. Cílem této organizace je, aby jaderná energie byla využívána bezpečně a mírovou cestou. Jejími členy je 151 států včetně České republiky (k listopadu 2010). Orgány MAAE jsou: Rada guvernérů, Generální konference, Generální ředitel [4]

*The World Association of Nuclear Operators - WANO* je organizace vytvořená ke zlepšování bezpečnosti provozu jaderných elektráren ve světě. Byla založena roku 1989 provozovateli

jaderných elektráren jako reakce na nehodu Černobylské elektrárny v roce 1986. Hlavní myšlenka této organizace spočívá v předávání zkušeností s provozem jaderného zařízení mezi členy. Provozovatelé si mohou od organizace vyžádat tzv. Peer reviews, při které do elektrárny přijedou odborníci z různých světových elektráren a srovnávají provoz hostitelského a svého zařízení [5].

## 3 FYZIKA REAKTORU

### 3.1 Jaderné reakce

Elektrické energie v jaderné elektrárně se vyrábí na stejném principu jako v elektrárně tepelné. Rozdíl spočívá v tom, že tepelná energie potřebná k výrobě páry, se zde nezískává spalováním uhlí, ale ze štěpných jaderných reakcí.

Jaderné reakce jsou jaderné přeměny, k nimž dochází při vzájemných interakcích mezi jádry a částicemi. Dělíme je do tří základních typů, a to na transmutaci (přeměnu), štěpení a tříštění. Transmutace je jaderná reakce, při níž vzniká nové jádro o protonovém čísle málo odlišném od jádra terčového. Štěpení je reakce, při níž vznikají jako produkt obvykle dvě jádra o protonových číslech podstatně odlišných od jádra terčového, během této reakce navíc vznikají další částice. Tříštění je takový typ jaderné reakce, při které se po ostřelování terčového jádra uvolní velké množství produktů reakce [6].

Při všech jaderných reakcích musí platit základní zákony zachování a sice:

1. zákon zachování energie,
2. zákon zachování hybnosti,
3. zákon zachování elektrického náboje,
4. zákon zachování počtu nukleonů.

Jaderné reakce můžeme zapisovat symbolickými rovnicemi



nebo můžeme užít zápis ve zkrácené formě



V těchto vztazích značí  $a$  dopadající částice,  $A$  terčové jádro, tedy dva reaktanty vstupující do reakce. Naproti tomu  $b$  je nově uvolněná částice a  $B$  nově vzniklý prvek, čili produkty reakce.

Pro jaderný reaktor mají největší význam interakce mezi jádry a neutrony. Jedná se především o pružný a nepružný rozptyl, reakce typu  $(n, \alpha)$ ,  $(n, p)$ ,  $(n, \gamma)$  a štěpení  $(n, f)$ .

Reakce typu  $(n, \alpha)$  je reakce, při níž je neutron pohlcen jádrem a emituje částici alfa.

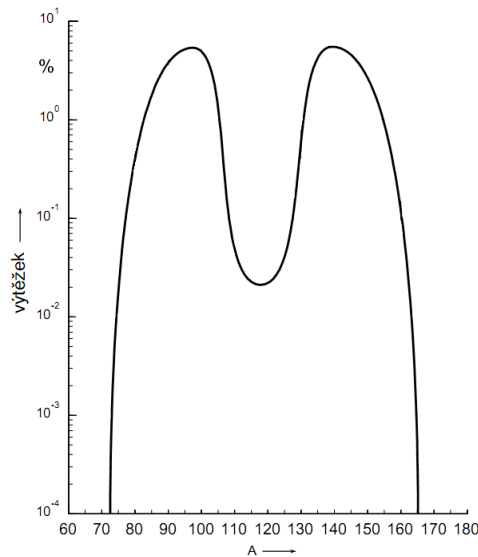
Při reakci typu  $(n, p)$  je jádrem pohlcen neutron a emituje proton.

Pružný rozptyl je reakce typu  $(n, n)$ , dochází při ní k nárazu částice do terčového jádra a vzájemnému přerozdělení kinetické energie. Součet energií před srážkou je roven součtu energií po srážce.

Nepružný rozptyl je reakce typu  $(n, n')$ . Při nárazu částice do terčového jádra dochází ke změně vnitřní energie jádra. Dopadající částice se na nesmírně krátký okamžik stává součástí jádra. Částice je pak jádrem emitována, energetický stav jádra se zvýší, ale jeho složení se nezmění. Jádro je excitované a přebytečná energie se vyzáří v podobě fotonů.

Radiační záchyt je reakce typu  $(n,\gamma)$ . Neutron je při ní pohlcen jádrem a vzniká tak izotop s o jednotku vyšším nukleonovým číslem. Takto vzniklé jádro bývá většinou nestabilní a prodělává následné radioaktivní přeměny.

Štěpení jader je hlavní jaderná reakce, při níž se v reaktoru uvolňuje tepelná energie. Neutron je pohlcen těžkým jádrem a vyvolá jeho nestabilitu. To potom vede ke vzniku dvou nebo více nových jader (odštěpků) a také nových volných tzv. okamžitých neutronů (asi 2,43 při štěpení  $^{235}\text{U}$  a 2,87 při štěpení  $^{239}\text{Pu}$  [9]). Odštěpky mají příliš vysoký poměr počtu neutronů a protonů v jádře, jsou tedy nestabilní a podléhají dalším přeměnám, při nichž se uvolňují další neutrony; označujeme je jako zpožděné. Jedna generace neutronů je potom souhrn všech okamžitých a zpožděných neutronů. Délka přeměnových řad bývá různá, průměrně odštěpek projde třemi přeměnovými stadii, než vznikne stabilní jádro. Při štěpné reakci vznikají nejčastěji dva produkty s nukleonovým číslem okolo hodnoty 95 a 140, jak je znázorněno na obr. Obr. 3-1 Výtěžek produktů štěpení v závislosti na nukleonovém čísle [9].



Obr. 3-1 Výtěžek produktů štěpení v závislosti na nukleonovém čísle.

V tab. 3-2 jsou uvedeny hodnoty energií, které jsou uvolňovány v jednotlivých stádiích štěpení.

Tab. 3-1 Rozdělení energie štěpení [7]

Forma uvolněné energie	Uvolněná energie [MeV]
kinetická energie odštěpků	$168 \pm 5$
kinetická energie okamžitých neutronů	$5 \pm 0,1$
energie okamžitého gama záření	$5 \pm 1$
energie přeměny beta	$7 \pm 1$
energie přeměny gama	$6 \pm 1$
energie neutrina	10
celkem	$201 \pm 6$

Fragmenty štěpení jsou zpomaleny v těsné blízkosti rozštěpeného jádra, proto je převážná část kinetické energie ze štěpení přeměněna v energii tepelnou již v palivu (asi 90 %). Okamžité neutrony jsou zpomaleny v moderátoru, čímž je na teplo přeměněno (4 až 5) % z celkové energie ze štěpení. Kvůli vysoké pronikavosti neutrin není možné jejich energii využít, proto je energie neutrin považována za ztrátu. Potom celková využitelná energie, získaná ze štěpení jednoho jádra  $^{235}\text{U}$  je přibližně 190 MeV.

Nyní se ještě vrátíme k okamžitým a zpožděným neutronům. Okamžité neutrony se uvolňují asi  $10^{-14}$  s po štěpení a jejich střední doba života se pohybuje mezi ( $10^{-5}$  a  $10^{-3}$ ) s. Zpožděné neutrony různých izotopů se potom obvykle rozdělují do 6 skupin viz (tab. 3-3).

Tab. 3-2 Charakteristické vlastnosti zpožděných neutronů pro  $^{235}\text{U}$  [9]

skupina	výtěžek $\beta_i \cdot 100$ [%]	přeměnová konstanta $\lambda_i$ [1/s]	poločas přeměny [s]	střední doba života $l_i$ [s]
1	0,034	3,87	0,2	0,3
2	0,096	1,40	0,5	0,7
3	0,282	0,31	2,2	2,5
4	0,136	0,115	6,1	7,0
5	0,147	0,0317	21,8	32,0
6	0,021	0,0127	54,5	80,0

### 3.2 Multiplikační činitel a rovnice čtyř činitelů

Počet neutronů jedné generace v jednotce objemu udává veličina  $n$ , zvaná hustota počtu neutronů. Pomocí ní a střední rychlosti neutronů  $v$ , můžeme stanovit hustotu neutronového toku  $\varphi$

$$\varphi = nv. \quad (3.3)$$

Hustota neutronového toku je skalární veličina vyjadřuje součet všech drah, které neutrony projdou v jednotce objemu za jednotku času.

Multiplikační činitel nebo také součinitel násobení umožňuje jednoduše charakterizovat stav probíhající štěpné jaderné reakce. Stanovíme jej jako podíl počtu neutronů dvou po sobě jdoucích generací  $n_{i-1}$  a  $n_i$

$$k = \frac{n_i}{n_{i-1}}. \quad (3.4)$$

Dále můžeme sledovat relativní přírůstek počtu neutronů. Označíme jej jako přebytek součinitele násobení  $\Delta k$

$$\Delta k = k - 1. \quad (3.5)$$

Míru odklonu reaktoru od kritického stavu (viz níže) charakterizuje veličina reaktivita  $\rho$ , vyjadřujeme ji v procentech

$$\rho = \frac{k - 1}{k}. \quad (3.6)$$

Podle hodnoty multiplikačního činitele, jeho přebytku, popřípadě reaktivity můžeme rozlišit tři stavy jaderného reaktoru.

$k < 1$ ,  $\Delta k < 0$ ,  $\rho < 0$  reaktor je podkritický. Počet neutronů v každé následující generaci klesá, štěpná řetězová reakce ustává, klesá výkon reaktoru. Uplatňuje se zejména při odstavování reaktoru nebo při snižování jeho výkonu.

$k = 1$ ,  $\Delta k = 0$ ,  $\rho = 0$  reaktor je kritický. Počet neutronů je v každé následující generaci stejný, štěpná řetězová reakce se udržuje konstantní. V tomto stavu se reaktor nachází v běžném provozu.

$k > 1$ ,  $\Delta k > 0$ ,  $\rho > 0$  reaktor je nadkritický. Počet neutronů v každé následující generaci roste, štěpná řetězová reakce se rozvíjí, narůstá výkon reaktoru. V tomto stavu se reaktor nachází při spouštění po odstávce a zvyšování výkonu. Není přípustné tento stav trvale udržovat.

Počet neutronů v dané generaci závisí na několika podmínkách, vztah mezi těmito podmínkami a multiplikačním činitelem se nazývá vzorec čtyř činitelů. Pro nekonečnou násobící soustavu platí

$$k_{\infty} = \eta \epsilon p f, \quad (3.7)$$

kde  $\eta$  je regenerační faktor,  $\epsilon$  je součinitel násobení rychlými neutrony,  $p$  je pravděpodobnost úniku rezonančnímu záchytu a  $f$  je součinitel využití tepelných neutronů. V praxi samozřejmě nekonečně velkou násobící soustavu nemáme, proto musíme vztah (3.7) rozšířit o další dva součinitele. První bude vyjadřovat pravděpodobnost, že neutrony neuniknou ze soustavy během zpomalování, značíme jej  $\Lambda_1$  a druhý je potom pravděpodobnost, že neutrony ze soustavy neuniknou během difúze, tento součinitel značíme  $\Lambda_2$ . Zahrnutím těchto součinitelů získáme vztah pro výpočet multiplikačního koeficientu  $k_{ef}$  pro soustavu s konečnými rozměry, kde uvažujeme i únik neutronů

$$k_{ef} = k_{\infty} \Lambda_1 \Lambda_2 = \eta \epsilon p f \Lambda_1 \Lambda_2. \quad (3.8)$$

Regenerační faktor  $\eta$  udává střední počet nových rychlých neutronů, které se uvolní ze štěpení způsobeného jedním tepelným neutronem

$$\eta = \nu \frac{\Sigma_f}{\Sigma_a} \quad (3.9)$$

Z rozštěpeného jádra se uvolní  $\nu$  neutronů. Veličina  $\nu$  se nazývá střední počet neutronů. Hodnota regeneračního faktoru nezávisí na geometrickém uspořádání aktivní zóny, ale je závislá pouze na jaderných vlastnostech paliva. Pro  $^{235}\text{U}$  je  $\eta$  asi 2,07.

Součinitel násobení rychlými neutrony  $\epsilon$  je definován jako poměr středního počtu rychlých neutronů, které vznikly ze štěpení neutrony všech energií, k střednímu počtu neutronů vzniklých ze štěpení, které bylo způsobeno pouze tepelnými neutrony. Rychlé neutrony mohou  $^{235}\text{U}$  štěpit také, ale ve srovnání se štěpením izotopu  $^{238}\text{U}$ , je štěpení  $^{235}\text{U}$  rychlými neutrony zanedbatelné. Můžeme tedy říci, že  $\epsilon$  zvyšuje hodnotu  $k_{ef}$  o neutrony vzniklé ze štěpení  $^{238}\text{U}$ . Pravděpodobnost, že rychlý neutron narazí na jádro  $^{238}\text{U}$  a rozštěpí jej závisí na rozměru palivového elementu, čím delší je dráha neutronu v tomto elementu, tím je větší i pravděpodobnost, že dojde ke štěpení. Čili zvětšení součinitele  $\epsilon$  můžeme dosáhnout zvětšováním palivového tyče, nebo také zhušťováním palivové mříže. V hustší palivové mříži jsou palivové tyče blíže u sebe a neutrony tak mohou pronikat i do sousedních tyčí. Součinitel  $\epsilon$  je tedy závislý i na geometrickém uspořádání aktivní zóny a u lehkovodního reaktoru s obohaceným palivem se jeho hodnota pohybuje okolo 1,15.

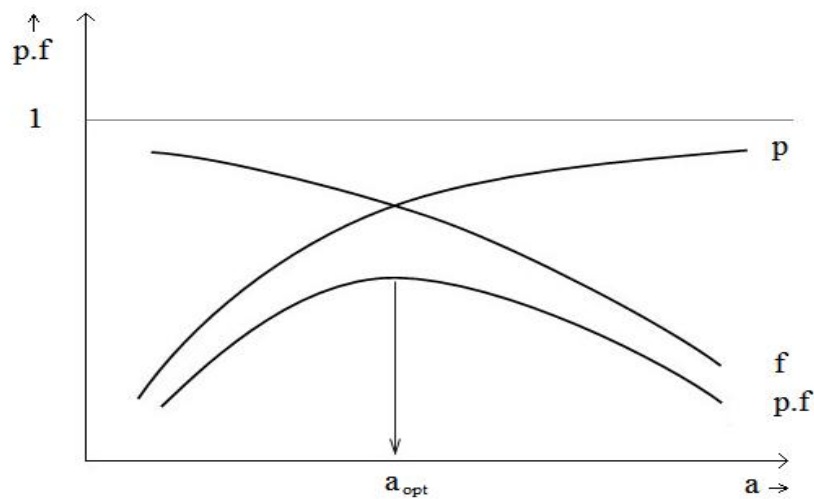
Pravděpodobnost úniku rezonančnímu záchytu  $p$  vyjadřuje podíl počtu rychlých neutronů, které během svého zpomalování prošly rezonanční oblastí  $^{238}\text{U}$  ku celkovému počtu všech rychlých

neutronů. Pravděpodobnost, že tyto neutrony uniknou je tím vyšší, čím déle se pohybují v moderátoru. Z toho můžeme vyvodit, že čím řidší bude palivová mříž, tím více neutronů projde rezonanční oblastí  $^{238}\text{U}$  bez pohlcení. U lehkovodního reaktoru je hodnota  $p$  přibližně 0,8.

Součinitel využití tepelných neutronů  $f$  udává počet tepelných neutronů pohlcených v palivu k celkovému počtu pohlcených tepelných neutronů. V tomto případě naopak platí, že čím déle se bude neutron pohybovat v moderátoru, tím je větší pravděpodobnost, že jím bude pohlcen a nepůsobí tak další štěpení. Součinitel využití tepelných neutronů klesá s rostoucím krokem palivové mříže.

Součinitelé  $A_1$  a  $A_2$  závisí na konstrukci aktivní zóny.

Protože součinitel  $\varepsilon$  a  $f$  závisí na druhu moderátoru a kroku palivové mříže  $a$  můžeme očekávat, že existuje maximální hodnota jejich součinu právě v závislosti na druhu moderátoru a rozměru  $a$ . Jinak řečeno, existuje optimální množství moderátoru vůči palivu, kdy multiplikační koeficient vykazuje nejvyšší hodnoty.



Obr. 3-2 Optimální krok palivové mříže

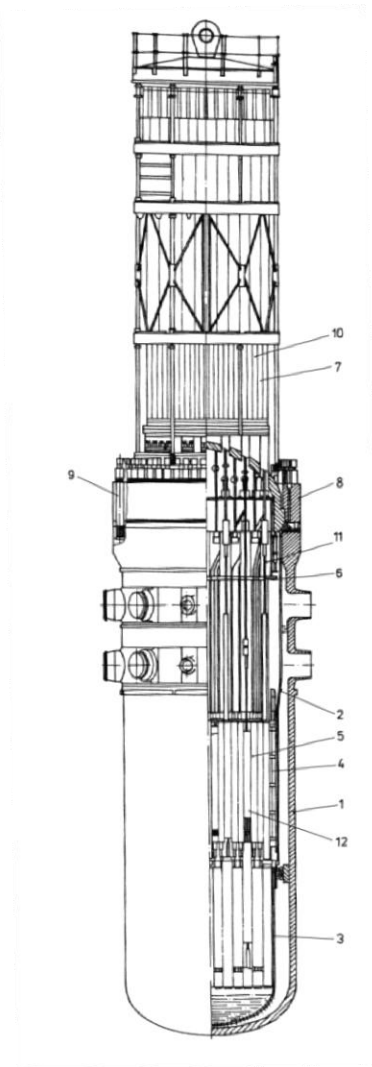
U těžkovodních reaktorů bude optimální palivová mříž velmi řídká, protože těžká voda je dobrý moderátor, u reaktoru s grafitovým moderátorem bude mříž také řídká, ale hustší než u těžkovodního reaktoru. U těchto reaktorů vychází optimální krok obvykle 200 až 250 mm. Optimální palivová mříž u lehkovodních reaktorů bude mříž velmi hustá, protože lehká voda velmi zpomaluje rychlé neutrony a silně zachycuje pomalé neutrony. Optimální krok mříže palivových tyčí tlakovodních reaktorů bývá okolo 12 mm.



## 4 POPIS AKTIVNÍ ZÓNY TLAKOVODNÍHO REAKTORU VVER-440

Tlakovodní reaktor VVER-440 (vodo-vodjanoj energetičeskij reaktor) patří do druhé generace reaktorů typu VVER. Do první generace řadíme reaktory jaderných elektráren s elektrickým výkonem 210 MW a 365 MW, do třetí generace potom řadíme reaktory s elektrickým výkonem 1000 MW.

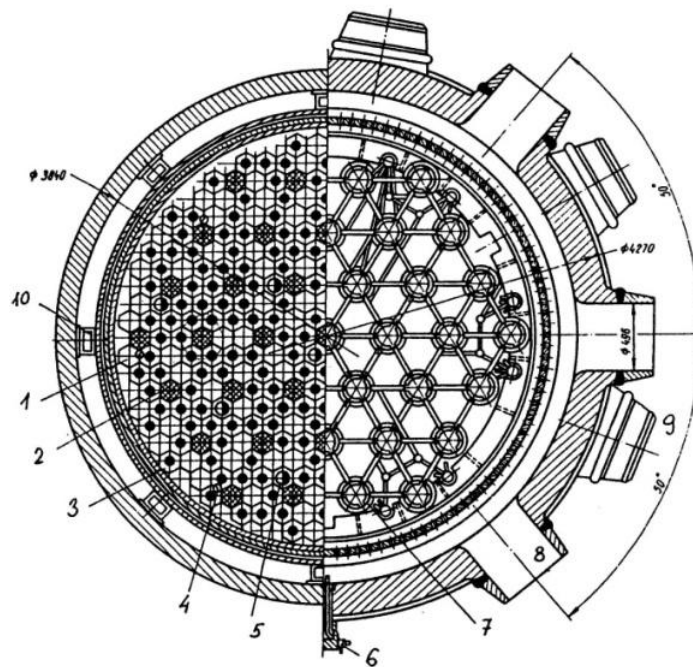
Číslice ve zkratce VVER-440 udává hodnotu nominálního projektovaného elektrického výkonu bloku, který odpovídá 1375 MW tepelného výkonu. V současné době na EDU probíhá projekt Využití projektových rezerv, v rámci kterého je zvyšován elektrický i tepelný výkon bloku na hodnoty 500 MW, respektive 1444 MW tepelného výkonu, což má za následek zvýšení účinnosti elektrárny z původních 32,71 % na 34,63 %.



Obr. 4-1 Reaktorová nádoba reaktoru VVER-440 (1 – těleso tlakové nádoby reaktoru, 2 - šachta reaktoru, 3 - dno šachty reaktoru, 4 - koš aktivní zóny, 5 – aktivní zóna, 6 - blok ochranných trub, 7 – horní blok, 8 – volná příruba, 9 - svorníky víka, 10 – pohony regulačních palivových článků, 11- spojovací tyč, 12 – regulační článek)

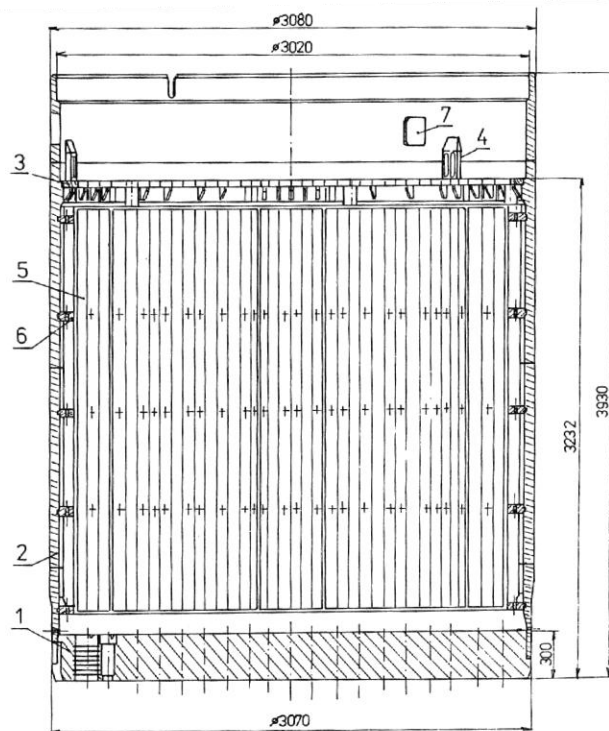
Reaktor VVER-440 je reaktor chlazený a moderovaný lehkou vodou vysokého tlaku. Díky tomu nedochází v aktivní zóně k varu chladiva. Reaktorová nádoba (Obr. 4-1) je složena ze tří částí: válcového tělesa tlakové nádoby, polokulového víka a volné příruby. Těleso tlakové nádoby je svařeno z elipsoidického dna, ze tří hladkých kovaných prstenců, ze dvou hrdlových prstenců s 12 hrdlovými nátrubky pro 6 chladicích smyček a jednoho zesíleného přírubového prstence. Na víku se potom nachází pouzdra elektromechanických pohonů systému řízení a ochran. Aktivní zóna je umístěna v dolní polovině tlakové nádoby reaktoru (Obr. 4-1).

Aktivní zóna (AZ) je jádrem reaktoru (Obr. 4-2). Obsahuje štěpné a množivé materiály, moderátor, chladivo, regulační orgány, nezbytné konstrukční součásti (obr. 4-3) a vnitroreaktorová měřicí čidla. Aktivní zóna jaderného reaktoru VVER-440 se skládá z 349 palivových článků rozložených s roztečí 147 mm. 312 palivových článků je pevných, 37 je vertikálně pohyblivých tzv. havarijních a regulačních článků (HRK), které slouží k zajištění regulační ochrany, regulaci a kompenzaci reaktivity v reaktoru [6].



Obr. 4-2 Příčný řez reaktorem VVER-440 (1 – palivový článek, 2 - regulační článek, 3 - kanál měření teplot, 4 - kanál měření průtoku, 5 - kanál měření neutronového toku, 6 - snímač tlakové ztráty v aktivní zóně, 7 - blok ochranných trub, 8 - vstupní hrdla, 9 - výstupní hrdla, 10 - konzoly vedení nosného válce aktivní zóny)

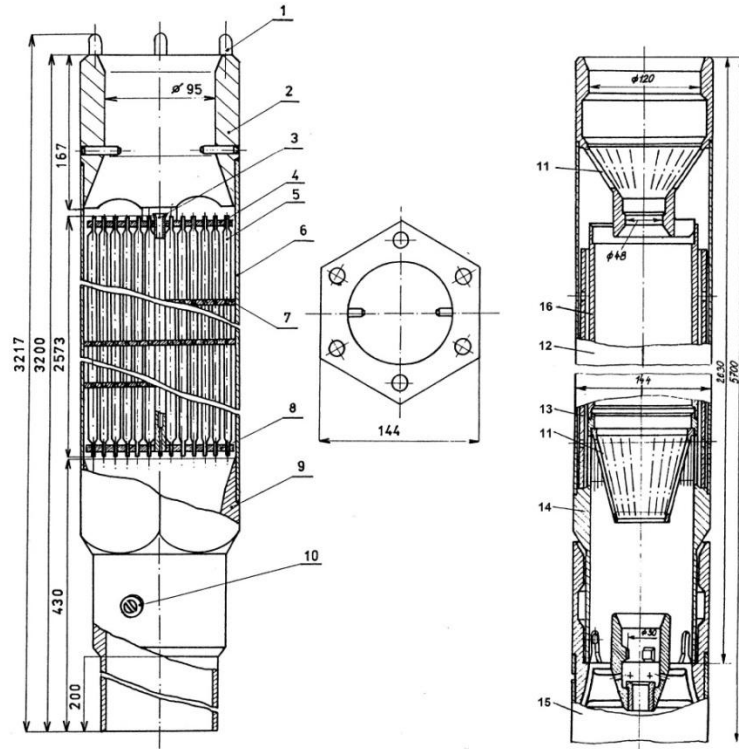
Palivový článek je základní jednotkou aktivní zóny. Nosnou částí je šestiboký plášť článku s hlavicí a koncovkou. Palivový článek je složen ze 126 palivových tyčí (Obr. 4-4) uspořádaných do trojúhelníkové mříže s roztečí 12,2 mm. Tato rozteč je po výšce zajišťována deseti distančními mřížkami. Palivové tyče jsou upevněny ve spodní mřížce, která je pevně spjata s koncovkou. Horní mřížkou procházejí posuvně, kvůli rozdílné teplotní roztažnosti článku a tyče. V hlavicí článku je zabudováno šest odpružených kolíků, které slouží k uložení palivového článku v reaktoru. Během normálního provozování reaktoru nejsou palivové články vertikálně pohyblivé.



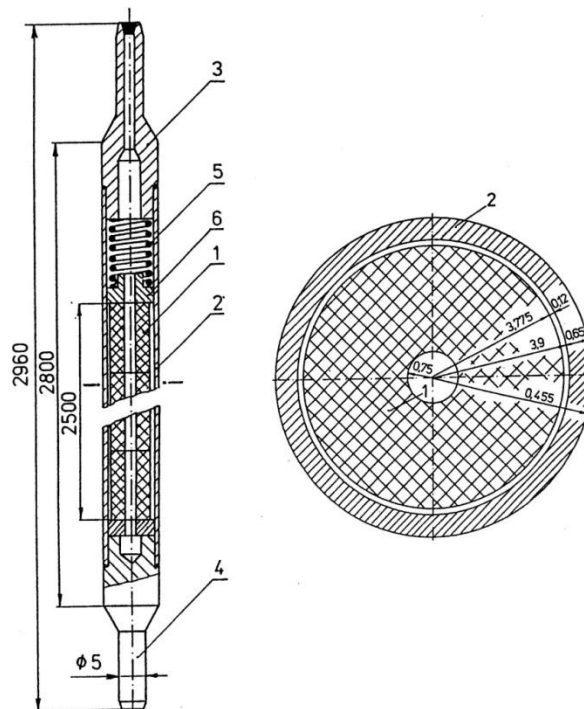
Obr. 4-3 Konstrukční součásti koše AZ reaktoru VVER-440 (1 – nosná deska, 2 – válcový plášť, 3 – zabroušený pás, 4 – klín, 5 – kovaný žlab, 6 – tvarovaný segment, 7 – záchytný otvor pro transport)

Havarijní a regulační články (HRK) jsou během provozování reaktoru vertikálně pohyblivé a skládají se ze dvou částí. Dolní část článku je podobná palivovému článku, horní část je absorpční a obsahuje vložku z borové oceli, která obsahuje dvě hmotnostní procenta bóru. Regulace těmito články se provádí vysouváním palivové části článku do prostoru pod aktivní zónou, což je spojeno se zasouváním absorbátoru hlouběji do aktivní zóny. Spodní část regulačního článku je opatřena tlumicím zařízením, které zmírňuje pohyb článku při bezpečnostním odstavení reaktoru. Havarijní a regulační články reaktoru VVER-440 jsou univerzální, slouží tedy jak k regulaci reaktoru, tak i ke kompenzaci přebytečné reaktivity a k havarijnímu odstavení reaktoru [6]. Jsou rozděleny do celkem 6 skupin, přičemž 1. až 5. skupina článků plní funkci bezpečnostní, poslední 6. skupina havarijních a regulačních článků (HRK-6) je určena k regulaci reaktoru a dále také s ostatními skupinami plní bezpečnostní funkci.

V palivové tyči se potom nachází samotné palivo. Štěpným materiálem reaktoru VVER-440 je spékáný oxid uranický. Je slisován do pelet o průměru 7,55 mm a výšce 10 mm. Uprostřed pelety se nachází otvor o průměru 1,5 mm sloužící ke kompenzaci objemových změn, k hromadění plynných produktů a ke snížení tepelného namáhání středu pelety. Výška palivového sloupce v tyči je 2480 mm a mezera mezi stěnou tyče a palivovým sloupcem je v průměru 0,1 mm, tato vzdálenost se však během provozu mění. Při dosažení teploty 2750 °C dochází k tavení  $UO_2$ .



Obr. 4-4 Palivový článek a palivová část regulačního článku reaktoru VVER-440 (1 – odpružené kolíky, 2 – hlavice článku, 3 – centrální trubka, 4 – horní distanční mřížka, 5 – palivová tyč, 6 – šestihranný plášť článku, 7 – distanční mřížka, 8 – spodní upevňovací mřížka, 9 – koncovka, 10 – středící čep, 11 – perforovaný kužel, 12 – šestihranný plášť, 13 – absorpční vložka z borové oceli, 14 – spojka, 15 – palivový článek, 16 – usměrňovací trubka.)



Obr. 4-5 Palivová tyč reaktoru VVER-440 (1 – peleta z UO<sub>2</sub>, 2 – povlaková trubka, 3 - horní koncovka, 4 – dolní koncovka, 5 – distanční pružina, 6 – přítlačná destička.)

## 5 SPOUŠTĚNÍ REAKTORU

### 5.1 Fyzikální spouštění

Začátek fyzikálního spouštění je spojen se zahájením zavážení čerstvého paliva do koše aktivní zóny. Fyzikální spouštění se tedy provádí pouze jednou, a to při prvním uvádění bloku do provozu a pak jen v případech, že bylo nutné vyvézt všechno palivo z aktivní zóny. Součástí fyzikálního spouštění jsou fyzikální testy, kterými se experimentálně ověřují neutronově-fyzikální charakteristiky aktivní zóny, které jsou nezbytné pro řízení jaderného reaktoru a zachování jeho bezpečnosti. Čas realizace těchto testů zpravidla nepřekročí 24 hodin. Fyzikální spouštění probíhá při tzv. nulovém výkonu reaktoru, kdy chladivo ještě není ohříváno teplem, uvolněným ze štěpné řetězové reakce. Tento stav odpovídá reaktoru na výkonu ( $10^{-5}$  až  $10^{-3}$ ) % z jeho jmenovitého tepelného výkonu  $P_n$ , střední teplota chladiva v primárním okruhu jaderného bloku je větší než 190 °C a tlak chladiva v primárním okruhu je větší než 8,3 MPa. Při fyzikálním spouštění reaktoru typu VVER-440 se obecně provádí následující testy: [13]

1. první uvedení reaktoru do kritického stavu,
2. kontrola spojení pohonů s regulačními články,
3. kontrola symetrie zavezení aktivní zóny,
4. měření diferenciální a integrální účinnosti skupin regulačních článků a účinnosti kyseliny borité při teplotě 200 °C,
5. měření teplotního a tlakového koeficientu reaktivity při ohřevu primárního okruhu na jmenovitou teplotu (260 °C)
6. měření efektivnosti havarijních ochran a efektivnosti skupin regulačních článků metodou pádu při jmenovité teplotě,
7. měření účinnosti kyseliny borité a diferenciální a integrální účinnosti skupin regulačních článků při nominální teplotě,
8. měření tepelných ztrát a tepelné kapacity primárního okruhu,
9. kalibrace přístrojů pro měření hustoty neutronového toku do výkonu 1 %  $P_n$ ,
10. měření výkonového koeficientu reaktivity do výkonu 1 %  $P_n$ .

Pro každý jednotlivý test jsou stanovena kritéria, která musí být splněna. Proto je každý test pečlivě vyhodnocován a s těmito kritérii srovnáván. V případě, že dojde k nesplnění nějakého kritéria, je nutné provést odstranění závad a provést nápravná opatření, následně se potom test opakuje. Pokud i výsledky z opakovaného testu nesplní předepsaná kritéria je nutné přerušit spouštění a další postup konzultovat s SÚJB.

### 5.2 Energetické spouštění

Po úspěšně provedeném a kladně vyhodnoceném fyzikálním spouštění se zahajuje energetické spouštění. Jeho cílem je vyvést blok jaderné elektrárny na jmenovitý výkon. Oproti fyzikálnímu spouštění se energetické spouštění provádí po každém odstavení bloku. Dosahování jmenovitého výkonu bloku jaderné elektrárny probíhá postupně po sedmi výkonových hladinách a sice: 5 %, 20 %, 35 %, 55 %, 75 %, 90 % a 100 % z  $P_n$ . Na těchto hladinách se provádí různé fyzikální testy a také zkoušky na jednotlivých dílčích zařízeních, které mají za cíl prověřit činnost

celého bloku při práci na výkonu, dále určit chování zařízení při normálních, přechodových a havarijních stavech a určit teplotnické charakteristiky aktivní zóny. Energetické spouštění trvá standardně 3 až 4 dny. V případě inovace zařízení bloku se doplňují další testy, které mohou proces prodloužit až na 3 týdny [13].

### 5.3 Koeficienty reaktivity

Koeficient reaktivity reaktoru je obecně definován jako změna reaktivity reaktoru při jednotkové změně hodnoty některého jeho parametru a ostatních parametrech nezměněných.

*Teplotní koeficient reaktivity chladiva* u reaktoru VVER 440 velkou měrou přispívá k bezpečnosti. Zvýšení teploty chladiva vede ke zmenšení hustoty vody, a tedy ke snížení počtu jader vodíku v jednotce objemu, neutrony se potom hůře zpomalují. Neutrony i jádra chladiva se pohybují rychleji, mají větší energii a pravděpodobnost štěpení  $^{235}\text{U}$  je při větší energii neutronu menší. Snížením hustoty vody se sníží i hustota  $\text{H}_3\text{BO}_3$  a tedy i záchyt neutronů na bóru a také pravděpodobnost záchyty na prvcích pokrytí je nižší.

*Výkonový koeficient reaktivity* je v podstatě teplotním koeficientem reaktivity paliva, protože je způsoben zvýšením jeho teploty. Ke změně teploty paliva může dojít v důsledku změny výkonu reaktoru nebo změny teploty chladiva bez změny výkonu. Zvýšením teploty paliva dojde k rozšíření rezonančního pásma  $^{238}\text{U}$ , pravděpodobnost záchyty neutronů v tomto pásmu je vyšší. Důležitou bezpečnostní podmínkou pro provoz reaktoru VVER 440 je, aby součet teplotního koeficientu reaktivity chladiva a paliva byl záporný, což má potom v praxi pozitivní význam, protože reaktor sám reguluje vnosi kladné reaktivity.

*Tlakový koeficient reaktivity* je kladný, jeho velikost je však malá, protože je voda málo stlačitelná.

*Koeficient reaktivity kyseliny borité* je záporný a v průběhu provozu reaktoru mezi dvěma odstávkami klesá.

*Koeficient reaktivity stacionárních otrav* reaktoru je taktéž záporný a je prakticky neměnný po celou dobu provozu reaktoru mezi dvěma odstávkami.

### 5.4 Otrava reaktoru

Štěpením jader  $^{235}\text{U}$  vznikají také jádra s velkou schopností pohlcovat neutrony. Po najetí reaktoru na jmenovitý výkon se koncentrace těchto jader ustálí, tomuto jevu potom říkáme stacionární otrava. V několika hodinách po skokové změně výkonu se projevují tzv. nestacionární otravy, které sice trvají pouze omezenou dobu, ale mohou vázat téměř dvojnásobek reaktivity než otravy stacionární. Mezi jádra, která způsobují otravy, patří zejména  $^{135}\text{Xe}$  a  $^{149}\text{Sm}$ , podle nich potom rozlišujeme xenonovou respektive samariovou otravu.

## 6 REALIZACE FYZIKÁLNÍCH TESTŮ V PODMÍNKÁCH EDU

### 6.1 Provozní režimy bloku

Blok jaderného reaktoru se na základě důležitých technologických a fyzikálních parametrů může nacházet v jednom ze sedmi režimů. Popis jednotlivých režimů je obsažen v Limitech a podmínkách bezpečného provozu (LaP) [14]. Režimy jsou jednoznačně určeny hodnotami daných parametrů, jak ukazuje Tab. 6-1. Žlutě jsou vyznačeny tzv. dominantní parametry, které jsou určující pro přechod mezi jednotlivými režimy. V následujícím výčtu jsou uvedeny charakteristické stavy parametrů pro dané režimy a čím se liší od režimu přecházejícího.

#### *Režim 1 - provoz na výkonu*

Je charakterizován tím, že výkon reaktoru je větší než 2 % z výkonu nominálního, reaktivita je větší než -1 % a střední teplota chladiva v primárním okruhu je větší než 250 °C. Na tyto podmínky jsou projektovány všechny regulace bloku.

#### *Režim 2 – nevýkonový provoz*

Výkon reaktoru je roven nebo menší než 2 % z výkonu nominálního, reaktivita je rovna nebo větší než -1 %, střední teplota v primárním okruhu je větší než 190 °C a tlak chladiva je větší než 8,3 MPa. V tomto režimu se blok nachází, když je nutné provádět opravy nebo zásahy do technologie, které nelze provést v případě provozu bloku v režimu 1, reaktor je však stále kritický. Doba setrvání v tomto režimu je omezena na 72 hodin, v případě jejího překročení je nutné převést blok do režimu 1 nebo 3. V režimu 2 se realizují fyzikální testy.

#### *Režim 3 – horká rezerva*

Výkon reaktoru odpovídá zbytkovému výkonu aktivní zóny, reaktivita je menší než -1 %, reaktor je podkritický a tlak v primárním okruhu je větší než atmosférický. Případy, při nichž se reaktor nachází v režimu 3 jsou následující: příprava na dosahování kritického stavu nebo při přípravě na vychlazování bloku, provádění činností předepsaných pro režim 3 nebo po zásahu havarijní ochrany.

#### *Režim 4 – polohorká rezerva*

Oproti režimu 3 je teplota chladiva primárního okruhu je nižší, ale současně musí být společně s teplotou kovu tlakové nádoby vyšší než teplota křehkého lomu tlakové nádoby reaktoru.

#### *Režim 5 – odstavení s dochlazováním primárního okruhu.*

Střední teplota chladiva primárního okruhu nebo teplota kovu tlakové nádoby je nižší než teplota křehkého lomu tlakové nádoby reaktoru.

#### *Režim 6 – odstavení s roztěsněním primárního okruhu.*

V tomto režimu se blok nachází, pokud je odstaven pro provedení oprav a kontrol na zařízení primárního okruhu, pro provedení výměny paliva nebo je odstaven v abnormálních a mimořádných stavech.

#### *Režim 7 – vyvezení paliva a aktivní zóny*

V tomto režimu jsou z aktivní zóny vyvezeny všechny palivové články. Přechod do režimu 6 potom souvisí se zavezením prvního palivového článku [14].

Tab. 6-1 Provozní režimy bloku [14]

Režim	Název režimu	Výkon reaktoru [% $P_n$ ]	Reaktivita $\rho$ [%]	Teplota $t_{I.O.}, t_{TNR}, t_{HVS}$ [°C]	Tlak $p_{I.O.}$ [MPa]
1	Provoz na výkonu	> 2	> -1	$t_{I.O.} > 250$	$p_{I.O.} > 8,3$
2	Nevýkonový provoz $\tau_R = 72$ hodin	$\leq 2$	$\geq -1$	$t_{I.O.} > 190$	$p_{I.O.} > 8,3$
3	Horká rezerva	Zbytkový výkon	< -1	$t_{I.O.} > t_{180}$	$p_{I.O.} > p_{atm}$
4	Polohorká rezerva	Zbytkový výkon	< -1	(*1) $t_{I.O.} \geq t_{KL}$ A $t_{TNR} \geq t_{KL}$	$p_{I.O.} > p_{atm}$
5	Odstavení s dochlazením I.O	Zbytkový výkon	< -1	(*1) $t_{I.O.} < t_{KL}$ NEBO $t_{TNR} < t_{KL}$	$p_{I.O.} > p_{atm}$
6	Odstavení s roztěsněním I.O	Zbytkový výkon	< -1	$t_{HVS} < 100$	$p_{I.O.} = p_{atm}$ (*2)
7	Vyvezení paliva z aktivní zóny	Aktivní zóna neobsahuje palivo			

Legenda:

$t_{I.O.}$  Střední teplota chladiva primárního okruhu.

$t_{TNR}$  Teplota tlakové nádoby reaktoru (bereme teplotu nižší ze dvou měření).

$t_{HVS}$  Teplota chladiva v horkých větvích.

$t_{KL}$  Teplota křehkého lomu tlakové nádoby reaktoru.

$t_{180}$  Teplota chladiva v horkých větvích cirkulačních smyček, při níž dochází k aktivaci / deaktivaci technických prostředků pro zajištění bezpečnosti.

$p_{I.O.}$  Tlak v primárním okruhu.

$\tau_R$  Maximální povolená doba setrvání v režimu 2.

(\*1) Při dochlazování bloku v režimu přirozené cirkulace se podmínka pro vztah teploty chladiva k hodnotě  $T_{KL}$  vztahuje na nejnižší vstupní teplotu chladiva do reaktoru .

(\*2) Atmosférický tlak je zabezpečen otevřením odvodu reaktoru.



## 6.2 Obecné náležitosti fyzikálních testů

Všechny prováděné fyzikální testy na Jaderné elektrárně Dukovany musí být v souladu s provozním předpisem P011A. Mimo konkrétních postupů jsou v tomto dokumentu také obsažena důležitá organizační, technická a bezpečnostní opatření. Vedoucím testu je provozní fyzik, který je po dobu spouštění bloku součástí směny, je přítomen na blokové dozorně a veškerý průběh testu zaznamenává do provozního deníku. Pro všechny fyzikální testy jsou dány obecné body, které se poté v každém testu zpřesňují [15]:

1. *Cíl testu* popisuje, co je třeba testem ověřit.
  1. *Organizační a bezpečnostní opatření* mimo jiné vymezují odpovědnosti osob.
  2. *Výchozí stav* uvádí stav bloku, tolerance a podmínky, které musí být před započítáním testu splněny. Eventuálně jsou v tomto bodu uvedeny postupy, jakými lze tohoto stavu dosáhnout.
  3. *Postup testu* jsou samotné manipulace, které se musí provést, aby bylo dosaženo cíle testu. V tomto bodě se popisují i očekávané odezvy na jednotlivé činnosti.
  2. *Konečný stav* uvádí ideální stav bloku po ukončení testu a přijatelné tolerance.
  4. *Kritéria hodnocení testu* jsou předem stanovené parametry a tolerance, kterých musí být testem dosaženo. Dále sem patří omezení a odezvy zkoušeného zařízení. Tato kritéria se dále dělí na:
    - a. *kritéria bezpečnosti*,
    - b. *kritéria přijatelnosti*.

Každý test obsahuje stručný, ale přesný popis daných typů kritérií hodnocení. V případě, že pro test není některý typ kritéria hodnocení předepsaný, bývá i tato skutečnost uvedena.

Pokud nastane situace, že některé kritérium hodnocení testu není splněno, musí vedoucí testu o této skutečnosti informovat vedoucího reaktorového bloku, vedoucího odboru reaktorové fyziky a také správce zařízení, na kterém byl příslušný test prováděn. Tyto osoby, případně i další přízvaní specialisté, vyhodnotí příčiny nesplnění kritéria a navrhnou opatření k odstranění závad. Po provedení těchto opatření se v některých případech test opakuje, a pokud není ani toto opakování úspěšné je nutné další postup konzultovat v SÚJB a do té doby nesmí reaktor přejít do režimu 1 viz. kap. 6.1.

Provedení a vyhodnocení fyzikálních testů se protokolárně zpracovává. Protokoly z fyzikálních testů, prováděných v režimu 2 a nižším při opakovaném spouštění reaktoru po výměně paliva, se na SÚJB dokládají vždy před tím, než je reaktor uveden do režimu 1. Konečné hodnocení fyzikálních testů se SÚJB předkládá nejpozději do jednoho měsíce od ukončení spouštění.

Mezi bezpečnostní opatření patří zákaz provádění testů, pokud jsou vypnuty nebo nesprávně nastaveny ochranné systémy. Nesmí se také provádět operace nad rámec testu, které by vedly ke změnám parametrů primárního nebo sekundárního okruhu jaderné elektrárny. V případě, že stav jaderného zařízení není shodný se stavem, který je předepsán v konkrétním testu, je zapotřebí:

1. okamžitě zastavit a přerušit vnos kladné reaktivity,
2. přerušit provádění testu,
3. jaderné zařízení navrátit do bezpečného a kontrolovatelného stavu.

Pokud je toto zajištěno a závada odstraněna je možné v testu pokračovat nebo jej opakovat. Perioda reaktoru v průběhu fyzikálních testů nesmí klesnout pod hodnotu 100 s. Výkon reaktoru nesmí překročit hodnotu 1,8 %  $P_n$ .

Technicky fyzikální testy zaopatřuje analytický a měřicí systém (ANMS). Tento systém slouží ke snímání a archivaci dat, jeho součástí jsou seznamy měřených parametrů, které jsou důležité pro vyhodnocování konkrétních testů. Vyhodnocení testů je prováděno pomocí vyhodnocovací části systému ANMS.

V průběhu spouštění bloku je nutné kontrolovat stav chladiva primárního okruhu. Kontrolní vzorky jsou odebrány v několika významných okamžicích během spouštění a sice:

- Po stabilizaci kritického stavu po dosažení minimálního kontrolovatelného výkonu.
- Po vyrovnání koncentrace  $H_3BO_3$  mezi primárním okruhem a kompenzátorem objemu.
- Před zahájením jakéhokoliv testu, pokud byla před jeho zahájením změněna koncentrace  $H_3BO_3$ .
- V průběhu testu se provádí odběry, pokud je to uvedeno v daném postupu.
- Odběry se provádí také při speciálních požadavcích.

Fyzikální testy prováděné na Jaderné elektrárně Dukovany se dělí na testy realizované na výkonové hladině nad 2 %  $P_n$ , kam patří měření teplotního a výkonového koeficientu reaktivity na nominálním výkonu; a na testy realizované na výkonové hladině do 2 %  $P_n$ , mezi které řadíme:

1. Dosahování kritického stavu reaktoru na minimálním kontrolovatelném výkonu snižováním koncentrace  $H_3BO_3$  v chladivu primárního okruhu.
2. Kontrola spojení havarijních a regulačních článků se svými pohony.
3. Kontrola nastavení výpočtu reaktivity v analytickém a měřicím systému (ANMS).
4. Dohřev chladiva primárního okruhu na 260 °C.
5. Měření účinnosti systému havarijních a regulačních článků (HRK) při odstavení reaktoru ochranným systémem rychlého odstavení reaktoru.
6. Měření účinnosti HRK se zablokovanou kazetou při odstavení reaktoru.
7. Měření účinnosti 6. skupiny HRK a účinnosti  $H_3BO_3$ , měření účinnosti vystřelené HRK.
8. Měření účinnosti 6. skupiny HRK a účinnosti vystřelené HRK, bez změny koncentrace  $H_3BO_3$ .

### 6.3 Dohřev chladiva primárního okruhu na 260 °C

Cílem tohoto testu je dohřát chladivo v primárním okruhu na teplotu  $(260 \pm 2)$  °C a ověřit vypočtenou hodnotu teplotního koeficientu reaktivity chladiva primárního okruhu v průběhu dohřevu. Aby bylo splněno bezpečnostní kritérium pro tento test je nutné, aby celkový teplotní koeficient reaktivity byl záporný [16].

Během tohoto testu jsou stanoveny mimo obecná organizační a technická opatření také dvě dodatečná. Ohřev chladiva primárního okruhu můžeme provádět maximálně o 15 °C za hodinu

a maximální výkon reaktoru v celém průběhu nesmí překročit  $1,8 \% P_n$ . Ve výchozím stavu pro tento test je reaktor stabilizován na výkonu ( $10^{-2}$  až  $10^{-1}$ )  $\% P_n$ , střední teplota chladiva v primárním okruhu je ustálená a nastavení havarijních ochran pro daný výkon odpovídá příslušným provozním předpisům. Postup činností u tohoto testu je přesně popsán v provozním předpise P011A - Fyzikální testy [15].

Na začátku tohoto testu je odebrán kontrolní vzorek chladiva z primárního okruhu. Pomocí analytického a měřicího systému je zkontrolována poloha havarijních a regulačních článků, dále je zkontrolováno, zda je v analytickém a měřicím systému odpovídající sada kinetických parametrů a do tabulky jsou zaznamenány parametry výchozího stavu bloku.

Poté se začne postupně zvyšovat výkon reaktoru na  $0,5 \% P_n$ , to se provádí opatrně tak, aby výkon nepřekročil  $1,8 \% P_n$ . Až se dosáhne požadované hladiny výkonu, je spuštěn záznam měřených parametrů na analytickém a vyhodnocovacím systému a nastaví se sledování trendu změny střední teploty chladiva v primárním okruhu na 20 minut. Dále je potřeba snížit odběr páry z hlavního parního kolektoru na minimum, přičemž se neuzavírají úplně všechny odběry tepla ze strany sekundárního okruhu. Pokud během dohřevu chladiva na  $260\text{ }^{\circ}\text{C}$  dojde ke změně trendu náhřevu, tak kompenzace tohoto jevu se provádí změnou odvodu tepla ze strany sekundárního okruhu.

V průběhu testu se provádí další činnosti pro náběh bloku. Trend náhřevu chladiva primárního okruhu je hlídán a v případě potřeby se provádí změny polohy havarijních a regulačních článků 6. skupiny. Po každé takové změně se musí opět zaznamenat parametry. Jakmile je dosažena teplota  $260\text{ }^{\circ}\text{C}$ , tak je kvůli korektnímu ukončení měření nutné povytáhnout HRK-6 asi o 10 mm.

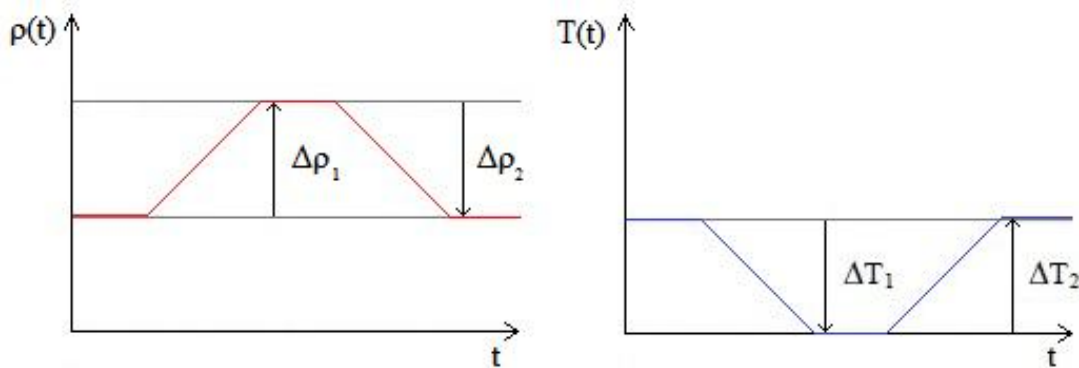
Po ukončení měření je uložen záznam na analytickém a měřicím systému a podle situace se upravuje výkon reaktoru. Poté je ještě potřeba úpravou odvodu páry z hlavního parního kolektoru stabilizovat parametry primárního okruhu a naposledy zaznamenat stav parametrů bloku. V konečném stavu je reaktor stabilizován na výkonu asi  $1,5 \% P_n$ , střední teplota chladiva primárního okruhu je asi  $260\text{ }^{\circ}\text{C}$  a havarijní a regulační články 1. až 5. skupiny jsou na horní koncové poloze a články skupiny 6. jsou v poloze (2000 – 2500) mm. Dobra trvání tohoto testu je asi 4 hodiny.

Následně se potom ověřuje hodnota teplotního koeficientu reaktivity. Celkový teplotní koeficient reaktivity patří ke klíčovým bezpečnostním parametrům, které přímo ovlivňují chování reaktoru. Jeho zápornost zaručuje inherentně samoregulační vlastnosti reaktoru, a tedy stabilitu reaktoru v kritickém stavu. Nepříjemnou skutečností je, že složka celkového teplotního koeficientu, odpovídající teplotnímu koeficientu od moderátoru, může při nulovém výkonu reaktoru v určitém rozsahu teplot měnit znaménko, a tak ovlivňovat i znaménko celkového koeficientu. Následkem této skutečnosti mohou být hodnoty nacházející se blízko nule, což má vliv i na spolehlivost jeho určení výpočtem. Fyzikální test Dohřev chladiva primárního okruhu na  $260\text{ }^{\circ}\text{C}$  tedy slouží také jako podpora vypočtených výsledků, jako případné upřesnění výpočtové neurčitosti a současně také na ověření podmínek, za kterých se hodnota celkového teplotního koeficientu reaktivity stává zápornou [16].

Pokud není podmínka zápornosti celkového teplotního koeficientu reaktivity ve sledovaném rozsahu teplot splněna automaticky, zajišťuje se její splnění pomocí kombinace teploty chladiva a polohy 6. skupiny havarijních a regulačních článků tak, aby pro kritický stav reaktoru byl celkový teplotní koeficient reaktivity záporný. Z tohoto důvodu je nutné určit maximální polohu HRK-6 pro teplotu dosahování minimálního kontrolovatelného výkonu a teplotu  $260\text{ }^{\circ}\text{C}$ , při které

je celkový teplotní koeficient reaktivity bezpečně záporný. Další skutečností, ke které je třeba přihlížet, je, že toto bezpečnostní kritérium musí být splněné i s uvažování chyby měření. Při malých záporných hodnotách celkového teplotního koeficientu reaktivity blízkých nule může dojít k tomu, že při uvažování chyby měření se záporné znaménko změní na kladné, což odporuje bezpečnostnímu kritériu. Znaménko můžeme bezpečně určit pomocí jednoduchého způsobu. Výchozím stavem je stabilizovaný kritický stav. Při změně teploty je znaménko určené směrem pohybu regulačních článků při dosažení konečného stabilního kritického stavu [16].

Jinou metodou jak stanovit teplotní koeficient reaktivity chladiva primárního okruhu je izotermální metoda. Tato metoda je vyžadována normami některých zemí například Slovenské republiky [17]. Mimo to je používána například v Jaderné elektrárně Temelín v rámci fyzikálního testu Měření izotermického teplotního koeficientu reaktivity. Výchozím stavem pro tento test je reaktor v kritickém stavu, jehož reaktivita je ustálená, teplota chladiva primárního okruhu je  $(278,6 \pm 2) \text{ } ^\circ\text{C}$ , tlak chladiva je  $(15,6 \pm 2) \text{ MPa}$  a výkon reaktoru je  $(0,1 \text{ až } 2,0) P_{FS}$  výkonu pro fyzikální testy. V první fázi tohoto testu se snižuje teplota primárního okruhu asi o  $2 \text{ } ^\circ\text{C}$  rychlostí  $4 \text{ až } 8 \text{ } ^\circ\text{C/hod}$ . Změny reaktivity jsou kompenzovány 10. skupinou regulačních orgánů (klastrů) a výkon je stále udržován na hladině  $(0,1 \text{ až } 2,0) P_{FS}$ . Po snížení teploty je nutné na 10 až 15 min stabilizovat parametry reaktoru. Po této době je zahájen ohřev chladiva primárního okruhu na výchozí teplotu opět rychlostí  $4 \text{ až } 8 \text{ } ^\circ\text{C/hod}$ . Konečný stav tohoto testu musí být shodný se stavem výchozím. Po dobu tohoto testu jsou zaznamenávány parametry reaktoru, jejich předpokládaný časový průběh je zobrazen na Obr. 6-1. Z těchto hodnot je poté vypočítán teplotní koeficient reaktivity pro teplotu  $(278,6 \pm 2) \text{ } ^\circ\text{C}$ . Doba trvání toho testu se pohybuje mezi 7 až 10 hodinami [18].



Obr. 6-1 Předpokládaný časový průběh reaktivity a teploty v průběhu testu měření izotermického teplotního koeficientu reaktivity.

Aby bylo splněno bezpečnostní kritérium pro tento test, tak musí být teplotní koeficient reaktivity chladiva v horkém stavu reaktoru při nulovém výkonu a vytažení všech regulačních orgánů menší nebo roven nule. Ve srovnání s testem Dohřev chladiva na  $260 \text{ } ^\circ\text{C}$ , kde je nutné ověřit, že teplotní koeficient reaktivity je záporný v průběhu celého dohřevu, stačí ověřit, že teplotní koeficient reaktivity je menší nebo roven nule pouze pro teplotu  $(278,6 \pm 2) \text{ } ^\circ\text{C}$ . Z časového hlediska je test Měření izotermického teplotního koeficientu reaktivity 2 krát náročnější než Dohřev chladiva na  $260 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

## 7 SYSTÉM ANMS

Analytický nestandardní měřicí systém (ANMS) slouží ke snímání a archivaci signálů, potřebných pro řízení, vizualizaci a vyhodnocení testů spouštění. Tento systém poskytuje [19]

- Připojení k počítačovému informačnímu systému přes datovou zásuvku externích uživatelů umístěnou na blokové dozorně. Datová zásuvka zajišťuje on-line přenos dat pro připojený počítač systému ANMS.
- Snímání dat, respektive přenos signálů z počítačového informačního systému přes standardní síťovou přípojku pomocí protokolu TCP/IP do systému ANMS.
- Archivaci všech snímaných signálů po čas celého spouštění bloku.
- Řízení testů spouštění a vizualizaci signálů.
- Vyhodnocení testů spouštění pomocí analytického nestandardního vyhodnocovacího systému (ANVS). ANVS je podsystém ANMS a obsahuje programy pro off-line vyhodnocování všech fyzikálních testů spouštění.

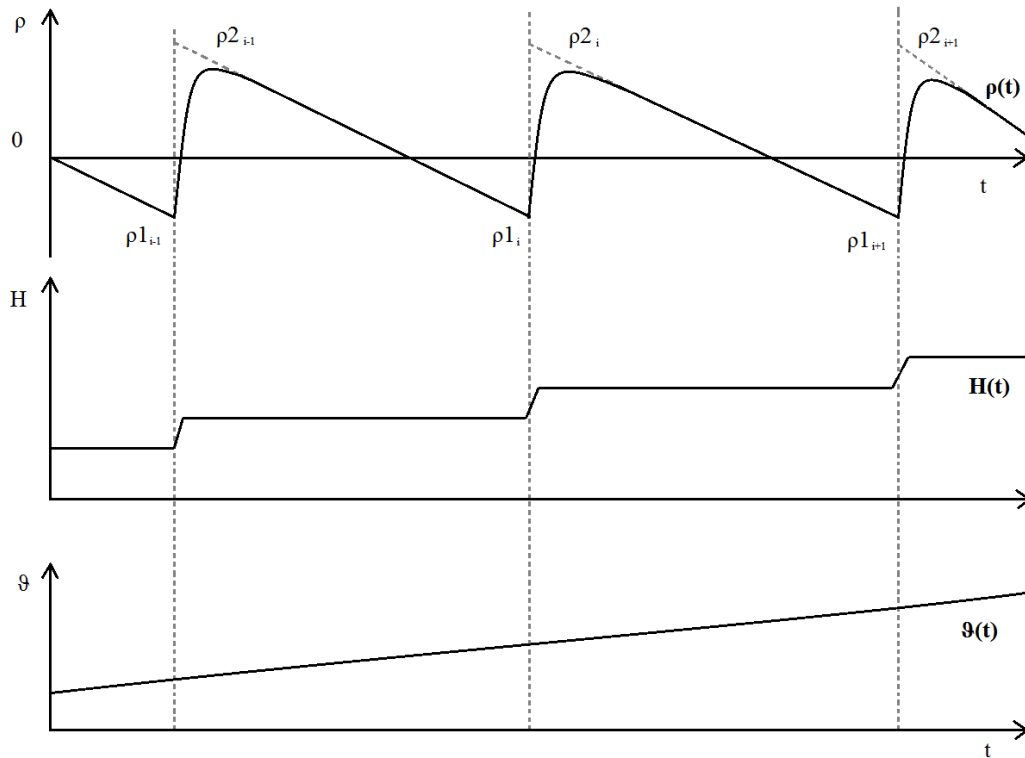
Dále obsahuje systémové a kontrolní funkce. Mezi systémové funkce patří funkce pro nastavení kinetických parametrů, pro zpracování neutronového toku před výpočtem reaktivity, pro stanovení reaktivity, periody reaktoru, středních hodnot, trendů signálů a pro stanovení polohy 6. skupiny havarijních a regulačních článků.

Mezi kontrolní funkce potom patří monitorování podkritičnosti reaktoru, stanovení předzpracovaných hodnot, stanovení integrální účinnosti celého systému havarijních a regulačních článků, kontrola výpočtu reaktivity, informování o stavu systému, kontrola překročení mezí signálů a organizace měření.

### 7.1 Program KINETIK

Program KINETIK [19] slouží k on-line zpracování pilovitého průběhu neutronového toku a k stanovení předzpracovaných hodnot, které se používají na stanovení teplotního koeficientu reaktivity od změny teploty, na stanovení účinnosti 6. regulační skupiny havarijních a regulačních článků a na stanovení borového koeficientu reaktivity od změny koncentrace kyseliny borité v primárním okruhu.

V časovém intervalu 10 až 15 minut je změna reaktivity vyvolaná změnou teploty přibližně lineární funkcí času. Její následná kompenzace se provádí změnou polohy 6. skupiny havarijních a regulačních článků, tato změna je prakticky skoková. Proto výsledný časový průběh reaktivity vytváří pilovitou křivku (Obr. 7-1). Pro stanovení teplotního koeficientu reaktivity je nutné nejprve eliminovat skokové změny reaktivity, vyvolané změnou polohy 6. skupiny havarijních a regulačních článků, následně lineárně aproximovat měřený signál reaktivity a pospojovat úseky reaktivity od změny teploty. Tímto získáme spojitou závislost reaktivity a taktéž spojitou závislost střední teploty na čase [19].



Obr. 7-1 Pilovitá křivka.  $\rho(t)$  je časový průběh reaktivity.  $H(t)$  je časový průběh polohy 6. skupiny havarijních a regulačních článků a  $\theta(t)$  je závislost teploty na čase.

Hodnoty  $\rho_{2i}$  a  $\rho_{1i}$  (Obr. 7-1) jsou obsaženy v souboru předzpracovaných hodnot a jsou vstupem pro další vyhodnocovací programy. Program KINETIK také dokáže od celkového průběhu reaktivity odseparovat výkonový efekt.

## 7.2 Program TEPKO

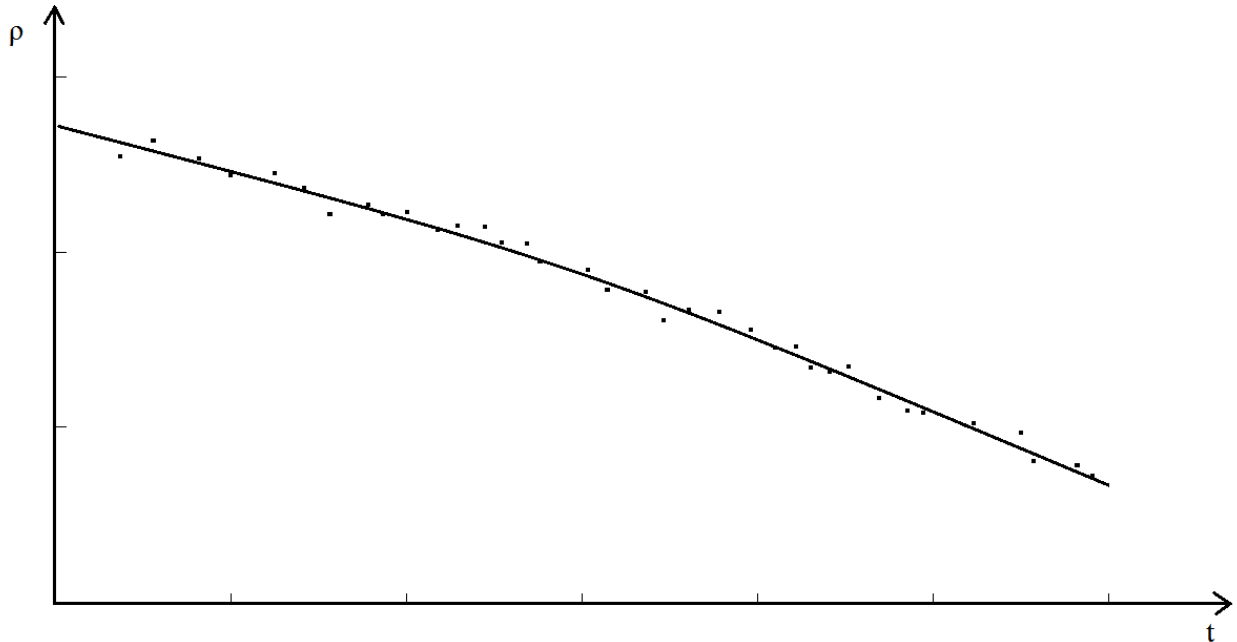
Program TEPKO [19] slouží ke stanovení teplotního koeficientu reaktivity, ten je počítán jako změna reaktivity v závislosti na změně teploty. Protože je zvyšování teploty dosahováno zvyšováním výkonu reaktoru na hodnotu asi 0,5 % z  $P_n$ , čímž je celková reaktivita ovlivněna zpětnovazební složkou reaktivity od výkonu – výkonovým efektem, není možné počítat izotermický teplotní koeficient reaktivity, ale je nutné odseparovat výkonovou složku reaktivity. Izotermický teplotní koeficient reaktivity je určen jako změna reaktivity, vyvolaná změnou teploty chladiva a moderátoru o 1 °C v izotermickém stavu aktivní zóny, tedy takovém stavu, kdy je teplota chladiva rovna teplotě moderátoru.

Pro teplotní koeficient reaktivity  $TKR$  platí:

$$TKR(\tau) = \left[ \frac{\partial \rho_s(\tau)}{\partial \tau} \right]_{c(H_3BO_3), p = konst.} = \frac{\partial \rho(t)}{\partial t}, \quad (7.1)$$

kde  $TKR(\tau)$  je závislost teplotního koeficientu reaktivity na teplotě v měřeném intervalu teplot,  $\frac{\partial \rho_s(\tau)}{\partial \tau}$  je časová změna reaktivity, odpovídající časové změně teploty  $\frac{\partial t(\tau)}{\partial \tau}$  během měření, při konstantní koncentraci kyseliny borité a konstantním tlaku chladiva v primárním okruhu. Program TEPKO stanovuje teplotní koeficient reaktivity numerickou derivací  $\partial \rho_s((t(\tau)))$  podle

$t$ , přičemž  $t$  reprezentuje střední teplotu chladiva primárního okruhu. Na Obr. 7-2 [19] je znázorněna typická závislost průběhu reaktivity na teplotě.



Obr. 7-2 Typická závislost teplotního koeficientu reaktivity na teplotě.

Pro přesnější výpočet se používá také korekce reaktivity na změnu tlaku, protože se předpokládá, že měření teplotního koeficientu reaktivity probíhá při konstantním tlaku a konstantním koncentraci kyseliny borité v primárním okruhu, což v praxi není možné vždy dodržet. Vliv změny tlaku na měřený průběh reaktivity se určí dle vztahu:

$$\rho(\tau) = \rho_{\text{měř}}(\tau) + \frac{\partial \rho(\tau)}{\partial p} \Delta p, \quad (7.2)$$

kde  $\rho(\tau)$  je korigovaný průběh reaktivity,  $\rho_{\text{měř}}(\tau)$  je měřený průběh reaktivity,  $\frac{\partial \rho(\tau)}{\partial p}$  je výpočtový tlakový koeficient reaktivity a  $\Delta p$  je změna tlaku chladiva primárního okruhu.

Program TEPKO dále také umožňuje odseparovat vliv změny reaktivity od změny koncentrace  $\text{H}_3\text{BO}_3$ , ke které dochází při vyrovnávání koncentrace  $\text{H}_3\text{BO}_3$  mezi primárním okruhem a kompenzátořem objemu po dosažení minimálního kontrolovatelného výkonu.

## 8 STANOVENÍ TEPLOTNÍHO KOEFICIENTU REAKTIVITY REAKTORU V JADERNÉ ELEKTRÁRNĚ DUKOVANY

Cílem této práce je stanovit teplotní koeficient reaktivity pro tabulkové hodnoty teplot (230 °C, 240 °C, 250 °C a 260 °C). Pro toto zadání bylo poskytnuto celkem 16 datových souborů (viz. Obr. 8-1), které generuje program KINETIK, který je součástí analytického nestandardního měřicího systému ANMS v Jaderné elektrárně Dukovany (kap. 7). Konkrétně byly poskytnuty 4 soubory ze spouštění každého bloku:

pro 1.blok – cyklus 23, 24, 25, 26;

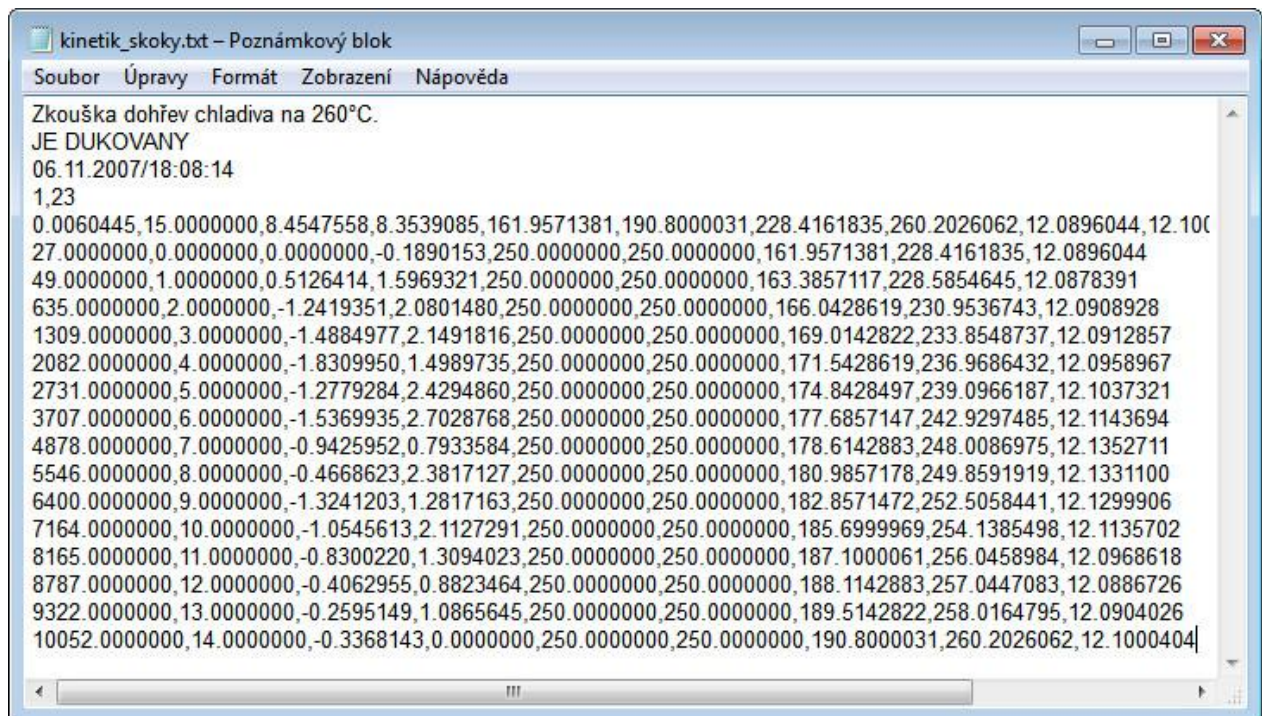
pro 2.blok – cyklus 23, 24, 25,26;

pro 3.blok – cyklus 22, 23, 24, 25;

pro 4.blok – cyklus 21, 22, 23, 24.

Dále byla poskytnuta závěrečná vyhodnocení fyzikálního spouštění po výměně paliva pro odpovídající bloky a cykly. Tato vyhodnocení byla použita jako zdroj referenčních dat. Referenční hodnoty jsou hodnoty teplotního koeficientu reaktivity, stanovené programem TEPKO. Jak již bylo popsáno v kapitole 7.2 program TEPKO pro výpočet teplotního koeficientu reaktivity používá i odseparování vlivu tlaku, pro potřeby této práce však byly vygenerovány referenční hodnoty bez separace vlivu tlaku.

Pro potřeby stanovení teplotního koeficientu reaktivity byl napsán počítačový program v jazyce C# a .NET Frameworku 4.0. Jako integrované vývojové prostředí (IDE) bylo použito Visual Studio 2010 od společnosti Microsoft. Program byl pojmenován *Stanovení teplotního koeficientu reaktivity*.



```
kinetik_skoky.txt - Poznámkový blok
Soubor Úpravy Formát Zobrazení Nápověda
Zkouška dohřev chladiva na 260°C.
JE DUKOVANY
06.11.2007/18:08:14
1,23
0.0060445,15.0000000,8.4547558,8.3539085,161.9571381,190.8000031,228.4161835,260.2026062,12.0896044,12.100
27.0000000,0.0000000,0.0000000,-0.1890153,250.0000000,250.0000000,161.9571381,228.4161835,12.0896044
49.0000000,1.0000000,0.5126414,1.5969321,250.0000000,250.0000000,163.3857117,228.5854645,12.0878391
635.0000000,2.0000000,-1.2419351,2.0801480,250.0000000,250.0000000,166.0428619,230.9536743,12.0908928
1309.0000000,3.0000000,-1.4884977,2.1491816,250.0000000,250.0000000,169.0142822,233.8548737,12.0912857
2082.0000000,4.0000000,-1.8309950,1.4989735,250.0000000,250.0000000,171.5428619,236.9686432,12.0958967
2731.0000000,5.0000000,-1.2779284,2.4294860,250.0000000,250.0000000,174.8428497,239.0966187,12.1037321
3707.0000000,6.0000000,-1.5369935,2.7028768,250.0000000,250.0000000,177.6857147,242.9297485,12.1143694
4878.0000000,7.0000000,-0.9425952,0.7933584,250.0000000,250.0000000,178.6142883,248.0086975,12.1352711
5546.0000000,8.0000000,-0.4668623,2.3817127,250.0000000,250.0000000,180.9857178,249.8591919,12.1331100
6400.0000000,9.0000000,-1.3241203,1.2817163,250.0000000,250.0000000,182.8571472,252.5058441,12.1299906
7164.0000000,10.0000000,-1.0545613,2.1127291,250.0000000,250.0000000,185.6999969,254.1385498,12.1135702
8165.0000000,11.0000000,-0.8300220,1.3094023,250.0000000,250.0000000,187.1000061,256.0458984,12.0968618
8787.0000000,12.0000000,-0.4062955,0.8823464,250.0000000,250.0000000,188.1142883,257.0447083,12.0886726
9322.0000000,13.0000000,-0.2595149,1.0865645,250.0000000,250.0000000,189.5142822,258.0164795,12.0904026
10052.0000000,14.0000000,-0.3368143,0.0000000,250.0000000,250.0000000,190.8000031,260.2026062,12.1000404
```

Obr. 8-1 Ukázka vstupního souboru *kinetik\_skoky.txt*



## 8.1 Základní princip programu

Vstupem programu jsou datové soubory, generované programem KINETIK. Po načtení souboru dojde k rozčlenění dat a jejich následnému zobrazení uživateli. Dalším krokem je připravení vstupních hodnot pro regresní analýzu, metodiky stanovení těchto hodnot jsou popsány v kapitole 8.2. Jako regresní funkce byl zvolen polynom 2. stupně. Tento polynom bylo nutné najít pro závislost reaktivity na teplotě. Regresní funkce i její koeficienty jsou zobrazeny uživateli. Poté je provedena derivace regresní funkce. Do této funkce jsou pak dosazeny tabulkové hodnoty teplot a jsou vypočteny teplotní koeficienty reaktivit.

Stanovení teplotního koeficientu reaktivity

Načti soubor    b1c23  
b1c24  
b1c25  
b1c26  
b2c26  
b3c22  
b3c23  
b3c24

Seřaď podle jména    Cesta k souboru: C:\Work\CF#\Výstup\_Kinetik\B3\b3c22\kinetik\_

Seřaď podle přidání

Smaž soubor ze seznamu    Vypočti vše    Shmutí výsledků

Počet nahraných souborů: 9

Blok 3 / Cyklus: 22

Relativní čas skoku [s]	Pořadové číslo skoku [-]	Reaktivita Rho_1	Reaktivita Rho_2	Poloha 4.sk. HRK [cm]	Poloha 5.sk. HRK [cm]	Poloha 6.sk. HRK [cm]	Teplota [°C]	Tlak [MPa]
318	0	0	-0,769	250	250	157,829	229,574	11,964
467	1	-1,489	-3,134	250	250	158,286	230,724	11,928
499	2	-0,257	-0,653	250	250	159,071	230,818	11,926
581	3	0,052	2,443	250	250	161,586	231,048	11,922
1199	4	-1,692	0,564	250	250	163,386	233,517	11,908
1720	5	-1,214	2,175	250	250	166,057	234,684	11,974
2366	6	-0,977	1,192	250	250	167,786	236,369	11,901
2728	7	-0,238	2,169	250	250	169,843	237,264	11,899
3290	8	-0,871	1,886	250	250	172,043	239,054	11,98

Vypočti mezihodnoty

Střední Teplota	Střední reaktivita [%]
0	0
0,017	0,017
0,022	0,022
-0,003	-0,003
-0,014	-0,014
-0,033	-0,033
-0,042	-0,042
-0,06	-0,06
-0,076	-0,076

Koeficienty regresní funkce

a: -5,676E+000  
b: 5,695E-002  
c: -1,398E-004

$$p = -5,676x^2 + 0,057x + 0$$

$$dp(t)/dt = 0x + 0,057$$

Teplotní koeficienty reaktivit pro dané teploty

dp/dt (230) -0,738  
dp/dt (240) -1,017  
dp/dt (250) -1,297  
dp/dt (260) -1,577

Obr. 8-2 Ukázka hlavního okna programu Stanovení teplotního koeficientu reaktivity.

Program umí pracovat s libovolným počtem souborů. Po nahrání dvou a více souborů se zpřístupní možnost zobrazení shrnutí výsledků. V tomto shrnutí jsou pak v tabulce zobrazeny

vypočtené teplotní koeficienty reaktivit pro nahrané soubory a dále je zde možnost nahrání referenčních dat. Pokud je tato možnost zvolena, tak dojde k překreslení tabulky. Nově překreslená tabulka obsahuje vypočtené a referenční hodnoty teplotního koeficientu reaktivity a také absolutní odchylky vypočtených a referenčních hodnot. Pro vybrané sloupce tabulky je také možné rychle zobrazit základní statistické ukazatele jako aritmetický průměr, medián, rozptyl a další.

Poslední nabízenou možností je vyexportování všech zobrazených dat do souboru formátu MS Excel.

## 8.2 Příprava vstupních hodnot pro regresní analýzu

Teplotní koeficient reaktivity popisuje, jak závisí reaktivita reaktoru na teplotě a je definován jako derivace reaktivity podle teploty. Datový soubor, generovaný programem KINETIK obsahuje naměřené hodnoty reaktivit a teplot v závislosti na čase. Je tedy nutné stanovit závislost reaktivity na teplotě. To se provádí ve dvou krocích a jsou používány naměřené hodnoty reaktivit  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  a teplot  $t$  (ukázka těchto hodnot je na obr. 8.2). Reaktivity  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  odpovídají reaktivitám z pilovitého průběhu (viz. kap. 7.1, Obr. 7-1).

V prvním kroku se ze sloupců  $\rho_1$  a  $\rho_2$  vypočte reprezentativní sloupec reaktivit  $\rho_r$  podle následujícího předpisu:

$$\rho_{r,i+1} = [\rho_{r,i} + (\rho_{1,i+1} - \rho_{2,i})] \cdot \beta_{ef}, \quad (8.1)$$

kde  $\rho_{r,i+1}$  je  $i+1$  reprezentativní reaktivita,  $\rho_{r,i}$  je předchozí hodnota reprezentativní reaktivity,  $\rho_{1,i+1}$  je hodnota reaktivity ze sloupce  $\rho_1$  a  $\rho_{2,i}$  je předcházející hodnota reaktivity ze sloupce  $\rho_2$  a  $\beta_{ef}$  je hodnota efektivního výtěžku, taktéž obsažená v datovém souboru. Aby bylo možné výpočet takto provést, je nutné položit první hodnotu reprezentativní reaktivity  $\rho_{r,1}$  rovnu nule.

V druhém kroku se počítá sloupec reprezentativních teplot  $t_r$ . Reprezentativní teplota je střední teplota mezi dvěma po sobě následujícími skoky, výpočet se tedy provádí pouze ze sloupce teplot podle předpisu

$$t_{r,i+1} = t_i + \frac{t_{i+1} - t_i}{2}. \quad (8.2)$$

Závislost reprezentativní reaktivity na reprezentativní teplotě je potom interpolována polynomem 2. stupně a jsou vypočteny koeficienty tohoto polynomu.

## 8.3 Popis ovládání programu Stanovení teplotního koeficientu reaktivity

Program se skládá ze dvou oken. První slouží k načtení souborů a vypočtení hledaných teplotních koeficientů reaktivit. V okně druhém jsou shrnuty všechny výsledky, dále nabízí možnost načtení referenčních dat, stanovení základních statistických ukazatelů a možnost vyexportování zobrazených výsledků do souboru formátu MS Excel. Na Obr. 8-3 je zobrazeno hlavní okno programu Stanovení teplotního koeficientu reaktivity.

Tlačítko Načti soubor (1) složí k nahrání souboru s výstupními daty z programu KINETIK. Kontrolní mechaniky nedovolí načíst jiný soubor. Kontroly se provádí celkem 3:

- kontrola typu souboru – zabraňuje načtení jiného než požadovaného souboru (např.: obrázku),
- kontrola duplicity – zabraňuje načtení souboru se stejnými daty,
- kontrola vnitřní struktury – ověřuje, zda načítaný soubor obsahuje požadovaný počet sloupců.

Pokud načítaný soubor projde kontrolami, je zobrazen v Seznamu souborů (2).

Počet nahraných souborů: 9

Blok 3 / Cyklus: 22

Relativní čas skoku [s]	Pořadové číslo skoku [-]	Reaktivita Rho_1	Reaktivita Rho_2	Poloha 4.sk. HRK [cm]	Poloha 5.sk. HRK [cm]	Poloha 6.sk. HRK [cm]	Teplota [°C]	Tlak [MPa]
318	0	0	-0,769	250	250	157,829	229,574	11,964
467	1	-1,489	-3,134	250	250	158,286	230,724	11,928
499	2	-0,257	-0,653	250	250	159,071	230,818	11,926
581	3	0,052	2,443	250	250	161,586	231,048	11,922
1199	4	-1,692	0,564	250	250	163,386	233,517	11,908
1720	5	-1,214	2,175	250	250	166,057	234,684	11,974
2366	6	-0,977	1,192	250	250	167,786	236,369	11,901
2728	7	-0,238	2,169	250	250	169,843	237,264	11,899
3290	8	-0,871	1,886	250	250	172,043	239,054	11,98

Vypočti mezihodnoty

Střední Teplota	Střední reaktivita [%]
0	0
0,017	0,017
0,022	0,022
-0,003	-0,003
-0,014	-0,014
-0,033	-0,033
-0,042	-0,042
-0,06	-0,06
-0,076	-0,076

Koeficienty regresní funkce

a: -5,676E+000  
b: 5,695E-002  
c: -1,398E-004

$p = -5,676x^2 + 0,057x + 0$

$dp(t)/dt = 0x + 0,057$

Teplotní koeficienty reaktivit pro dané teploty

dp/dt (230) -0,738  
dp/dt (240) -1,017  
dp/dt (250) -1,297  
dp/dt (260) -1,577

Obr. 8-3 Popis ovládání hlavního okna programu Stanovení teplotního koeficientu reaktivity.

Číslo 2 na Obr. 8-3 je Seznam nahraných souborů. Jméno zobrazené v seznamu se neshoduje s jménem souboru, ale vytváří se z dat, která tento soubor obsahuje. Označení „b1c23“ znamená blok 1, cyklus 23. Dále jsou položky v seznamu odlišeny barvami. Červeně jsou vypsány soubory, u kterých ještě nebyl proveden výpočet teplotního koeficientu reaktivity. U černě vypsáných položek byl výpočet již proveden.

Tlačítkem Smaž soubor ze seznamu (3) lze vybraný soubor ze seznamu odstranit.

Nahrané soubory je možné řadit podle pořadí přidání, nebo abecedně podle jména. To se provádí tlačítky (4).

Tlačítko Vypočti vše (5) slouží ke kompletnímu přepočtení všech nahraných souborů. Stiskem tohoto tlačítka se pro všechny jednotlivé soubory vypočtou teplotní koeficienty reaktivity, což je doprovázeno změnou barvy všech položek v seznamu na černou.

Do tabulky (6) jsou převedena data z načteného souboru (Obr. 8-1). Zobrazované hodnoty jsou zaokrouhleny na 3 desetinná místa.

Tlačítko Vypočti mezihodnoty (7) slouží k získání hodnot, potřebných pro nalezení koeficientů regresní funkce. Jejich výpočet je proveden podle metodik popsanych v kapitole 8.3. Vypočtené hodnoty jsou zobrazeny v tabulce (8). Po provedení výpočtu se toto tlačítko deaktivuje a není již možné na ně klikat.

Tlačítkem Vypočti koeficienty regresní funkce (9) jsou vypočteny koeficienty a zobrazeny v příslušných textových polích. Jako regresní funkce byla zvolena polynomická funkce druhého stupně. Tvar této funkce i její derivace je zobrazena ve vymezeném prostoru (10, 11). Toto tlačítko se zpřístupní, až když jsou stanoveny mezihodnoty. Po provedení výpočtu koeficientů polynomické funkce toto tlačítko zmizí a je nahrazeno textovým popiskem daného prostoru.

Tlačítkem Vypočti teplotní koeficienty reaktivity (12) stanoveny hledané teplotní koeficienty reaktivity a zobrazeny v příslušných textových polích. Do zderivované funkce závislosti reaktivity na teplotě (11) jsou postupně dosazovány hodnoty teplot 230°C, 240°, 250°C a 260°C. Toto tlačítko se zpřístupní pouze v případě, že je tato funkce stanovená. Po provedení výpočtu teplotních koeficientů reaktivit toto tlačítko zmizí a je nahrazeno textovým popiskem daného prostoru.

Tlačítko Shrnutí výsledků (13) slouží k zobrazení druhého okna. Po stisku je provedena kontrola, zda jsou stanoveny teplotní koeficienty reaktivit u všech nahraných souborů. V případě, že tomu tak není, je uživateli nabídnuta možnost dodatečného dopočtení.

Zobrazení druhého okna programu (Obr. 8-4) je doprovázeno dotazem na uživatele, zda si přeje dopočíst nevypočtené hodnoty. V tomto okně jsou přehledně shrnuty všechny vypočtené teplotní koeficienty reaktivity.

Tlačítkem Nahraj referenční hodnoty (Obr. 8-4 a) může uživatel načíst soubor s referenčními hodnotami. Tento soubor musí mít požadovanou strukturu viz. Příloha 1 o kontrolu správnosti nahrávaného souboru se starají vnitřní mechaniky programu. Referenční hodnoty (Ref) jsou společně s vypočtenými (Poč) a jejich absolutními odchylkami (Odch) zobrazeny v tabulce. Červeně odlišené buňky tabulky označují maximální hodnotu teplotního koeficientu reaktivity v daném sloupci, modře jsou pak označeny hodnoty maximální.

V dolní části okna (Obr. 8-4 b) jsou zobrazeny základní statistické ukazatele pro zvolenou teplotu. Jak je již z obrázku patrné, program počítá pro hodnoty příslušného sloupce průměr, medián, vypíše minimální a maximální hodnotu, variační rozpětí hodnot, průměrnou a směrodatnou odchylku. Výběrem z roletové nabídky je možné zobrazit statistické ukazatele dle požadované teploty.

Poslední nabízenou možností okna s výsledky je tlačítko Export do .xls (Obr. 8-4 c). Po stisku si uživatel může vybrat umístění a název exportovaného souboru. Exportují se pouze data zobrazená v tabulce. Statistické ukazatele nejsou do exportu zahrnuty.

The screenshot shows the 'Results' window with the following data table:

Blok/Cykklus	TKR pro 230 °C			TKR pro 240 °C			TKR pro 250 °C			TKR pro 260 °C		
	Poč	Ref	Odch	Poč	Ref	Odch	Poč	Ref	Odch	Poč	Ref	Odch
b1c23	-0,591	-0,530	0,061	-0,652	-0,630	0,022	-0,712	-0,700	0,012	-0,773	-0,770	0,003
b1c24	-0,684	-0,780	-0,096	-0,880	-0,930	-0,050	-1,077	-1,090	-0,013	-1,273	-1,250	0,023
b1c25	-0,862	-0,860	0,002	-0,941	-0,950	-0,009	-1,020	-1,050	-0,030	-1,100	-1,140	-0,040
b1c26	-1,040	-1,060	-0,020	-1,129	-1,150	-0,021	-1,218	-1,240	-0,022	-1,307	-1,330	-0,023
b2c23	-0,827	-0,840	-0,013	-1,034	-1,060	-0,026	-1,241	-1,170	0,071	-1,448	-1,200	0,248
b2c24	-0,838	-0,840	-0,002	-0,921	-0,930	-0,009	-1,005	-1,030	-0,025	-1,089	-1,130	-0,041
b2c25	-1,148	-1,140	0,008	-1,235	-1,240	-0,005	-1,321	-1,340	-0,019	-1,408	-1,430	-0,022
b2c26	-1,296	-1,540	-0,244	-1,389	-1,380	0,009	-1,482	-1,490	-0,008	-1,575	-1,520	0,055
b3c22	-0,738	-0,880	-0,142	-1,017	-1,090	-0,073	-1,297	-1,310	-0,013	-1,577	-1,530	0,047
b3c23	-1,006	-0,860	0,146	-1,196	-1,190	0,006	-1,386	-1,350	0,036	-1,576	-1,590	-0,014
b3c24	-1,294	-1,270	0,024	-1,417	-1,390	0,027	-1,540	-1,510	0,030	-1,663	-1,640	0,023

Below the table, the 'Zobrazit statistiky pro teplotu 250 °C' section is visible, showing calculated, reference, and deviation statistics for 250 °C.

Spočtené hodnoty		Referenční hodnoty		Odchylky	
Průměr	-1,233	Průměr	-1,232	Průměr	0,001
Medián	-1,283	Medián	-1,275	Medián	-0,01
Minimum	-1,54	Minimum	-1,51	Minimum	-0,03
Maximum	-0,712	Maximum	-0,7	Maximum	0,071
Variační rozpětí	-0,557	Variační rozpětí	-0,54	Variační rozpětí	0,017
Směrodatná odchylka	0,198	Směrodatná odchylka	0,193	Směrodatná odchylka	0,027
Průměrná odchylka	0,151	Průměrná odchylka	0,148	Průměrná odchylka	0,022

Obr. 8-4 Popis ovládání okna s výsledky programu Stanovení teplotního koeficientu reaktivity

## 9 VÝSLEDKY

Pro poskytnuté soubory a zadané teploty byly pomocí programu Stanovení teplotních koeficientů reaktivity vypočteny následující teplotní koeficienty reaktivity (TKR) jak ukazuje tabulka Tab. 9-1. Tabulka Tab. 9-2 navíc obsahuje referenční hodnoty teplotních koeficientů reaktivit, které byly stanoveny programem TEPKO.

Tab. 9-1 Vypočtené teplotní koeficienty reaktivity

Blok / Cyklus	TKR pro 230 °C	TKR pro 240 °C	TKR pro 250 °C	TKR pro 260 °C
b1c23	-0,591	-0,652	-0,712	-0,773
b1c24	-0,684	-0,880	-1,077	-1,273
b1c25	-0,862	-0,941	-1,020	-1,100
b1c26	-1,040	-1,129	-1,218	-1,307
b2c23	-0,827	-1,034	-1,241	-1,448
b2c24	-0,838	-0,921	-1,005	-1,089
b2c25	-1,148	-1,235	-1,321	-1,408
b2c26	-1,296	-1,389	-1,482	-1,575
b3c22	-0,738	-1,017	-1,297	-1,577
b3c23	-1,006	-1,196	-1,386	-1,576
b3c24	-1,294	-1,417	-1,540	-1,663
b3c25	-1,033	-1,187	-1,341	-1,496
b4c21	-0,940	-1,120	-1,300	-1,481
b4c22	-0,877	-1,016	-1,155	-1,294
b4c23	-1,137	-1,251	-1,365	-1,479
b4c24	-1,032	-1,151	-1,270	-1,389

Tab. 9-2 Teplotní koeficienty reaktivity vypočítané (Poč), referenční (Ref) a jejich absolutní odchylky (Odch).

Blok / cyklus	TKR pro 230 °C			TKR pro 240 °C			TKR pro 250 °C			TKR pro 260 °C		
	Poč	Ref	Odch	Poč	Ref	Odch	Poč	Ref	Odch	Poč	Ref	Odch
b1c23	-0,591	-0,374	0,218	-0,652	-0,725	-0,074	-0,712	-1,077	-0,365	-0,773	-1,429	-0,656
b1c24	-0,684	-0,960	-0,276	-0,880	-1,090	-0,210	-1,077	-1,220	-0,143	-1,273	-1,350	-0,077
b1c25	-0,862	-0,850	0,012	-0,941	-0,950	-0,009	-1,020	-1,050	-0,030	-1,100	-1,150	-0,050
b1c26	-1,040	-1,060	-0,020	-1,129	-1,150	-0,021	-1,218	-1,240	-0,022	-1,307	-1,340	-0,033
b2c23	-0,827	-0,850	-0,023	-1,034	-1,000	0,034	-1,241	-1,150	0,091	-1,448	-1,290	0,158
b2c24	-0,838	-0,840	-0,002	-0,921	-0,930	-0,009	-1,005	-1,030	-0,025	-1,089	-1,130	-0,041
b2c25	-1,148	-1,120	0,028	-1,235	-1,230	0,005	-1,321	-1,340	-0,019	-1,408	-1,440	-0,032
b2c26	-1,296	-1,270	0,026	-1,389	-1,380	0,009	-1,482	-1,490	-0,008	-1,575	-1,600	-0,025
b3c22	-0,738	-0,880	-0,142	-1,017	-1,090	-0,073	-1,297	-1,310	-0,013	-1,577	-1,520	0,057
b3c23	-1,006	-1,000	0,006	-1,196	-1,180	0,016	-1,386	-1,360	0,026	-1,576	-1,530	0,046
b3c24	-1,294	-1,270	0,024	-1,417	-1,390	0,027	-1,540	-1,510	0,030	-1,663	-1,630	0,033
b3c25	-1,033	-1,030	0,003	-1,187	-1,190	-0,003	-1,341	-1,350	-0,009	-1,496	-1,500	-0,004
b4c21	-0,940	-0,980	-0,040	-1,120	-1,190	-0,070	-1,300	-1,400	-0,100	-1,481	-1,600	-0,119
b4c22	-0,877	-0,860	0,017	-1,016	-1,010	0,006	-1,155	-1,170	-0,015	-1,294	-1,330	-0,036
b4c23	-1,137	-1,100	0,037	-1,251	-1,230	0,021	-1,365	-1,360	0,005	-1,479	-1,480	-0,001
b4c24	-1,032	-1,040	-0,008	-1,151	-1,140	0,011	-1,270	-1,240	0,030	-1,389	-1,330	0,059

## 9.1 Ověření použité metody výpočtu

Pro ověření zda metodiky výpočtu používané programem Stanovení teplotních koeficientů reaktivity jsou ekvivalentní programu TEPKO používanému v EDU bylo použito Wilcoxonova párového testu. Tento test byl zvolen s ohledem na to, že počítané a referenční hodnoty jsou párové, tedy pochází z jednoho výběrového souboru.

Pro hodnoty teplotního koeficientu reaktivity pro dané teploty stanovíme jako nulové hypotézy, že počítané a referenční hodnoty se od sebe výrazně neliší. Jako alternativní hypotézu potom, že se počítané a referenční hodnoty od sebe výrazně liší. Pravdivost hypotéz budeme ověřovat na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ . Nejprve vypočteme jejich rozdíly a absolutní hodnoty těchto rozdílů, k těmto rozdílům přiřadíme pořadí. Dále určíme počet nenulových rozdílů  $n$  a sečteme pořadí kladných  $W_+$  a záporných  $W_-$  rozdílů. Z těchto součtů vybereme menší  $W_{min}$ . Všechny tyto údaje jsou pro teploty 230 °C, 240 °C, 250 °C a 260 °C zobrazeny v tabulkách Tab. 9-3, Tab. 9-4, Tab. 9-5 a Tab. 9-6. V Tab. 9-7 jsou tato data shrnuta a pro každou teplotu je podle počtu nenulových rozdílů  $n$  vybrána kritická hodnota viz. Příloha 2.

Tab. 9-3 Data pro Wilcoxonův test pro teplotu 230 °C

Poč	Ref	Rozdíly	Absolutní hodnoty rozdílů	Pořadí rozdílů	Pořadí včetně znaménka
-0,591	-0,374	-0,218	0,218	15	-15
-0,684	-0,960	0,276	0,276	16	16
-0,862	-0,850	-0,012	0,012	5	-5
-1,040	-1,060	0,020	0,020	7	7
-0,827	-0,850	0,023	0,023	8	8
-0,838	-0,840	0,002	0,002	1	1
-1,148	-1,120	-0,028	0,028	11	-11
-1,296	-1,270	-0,026	0,026	10	-10
-0,738	-0,880	0,142	0,142	14	14
-1,006	-1,000	-0,006	0,006	3	-3
-1,294	-1,270	-0,024	0,024	9	-9
-1,033	-1,030	-0,003	0,003	2	-2
-0,940	-0,980	0,040	0,040	13	13
-0,877	-0,860	-0,017	0,017	6	-6
-1,137	-1,100	-0,037	0,037	12	-12
-1,032	-1,040	0,008	0,008	4	4
Počet nenulových rozdílů:			$n =$	16	
Součet pořadí kladných rozdílů:			$W_+ =$	63	
Součet pořadí záporných rozdílů:			$W_- =$	73	
Minimum ze součtů $W_+$ a $W_-$ :			$W_{min} =$	63	

Tab. 9-4 Data pro Wilcoxonův test pro teplotu 240 °C

Poč	Ref	Rozdíly	Absolutní hodnoty rozdílů	Pořadí rozdílů	Pořadí včetně znaménka
-0,652	-0,725	0,074	0,074	15	15
-0,880	-1,090	0,210	0,210	16	16
-0,941	-0,950	0,009	0,009	5	5
-1,129	-1,150	0,021	0,021	10	10
-1,034	-1,000	-0,034	0,034	12	-12
-0,921	-0,930	0,009	0,009	4	4
-1,235	-1,230	-0,005	0,005	2	-2
-1,389	-1,380	-0,009	0,009	6	-6
-1,017	-1,090	0,073	0,073	14	14
-1,196	-1,180	-0,016	0,016	8	-8
-1,417	-1,390	-0,027	0,027	11	-11
-1,187	-1,190	0,003	0,003	1	1
-1,120	-1,190	0,070	0,070	13	13
-1,016	-1,010	-0,006	0,006	3	-3
-1,251	-1,230	-0,021	0,021	9	-9
-1,151	-1,140	-0,011	0,011	7	-7
Počet nenulových rozdílů:			$n =$	16	
Součet pořadí kladných rozdílů:			$W_+ =$	78	
Součet pořadí záporných rozdílů:			$W_- =$	58	
Minimum ze součtů $W_+$ a $W_-$ :			$W_{min} =$	58	

Tab. 9-5 Data pro Wilcoxonův test pro teplotu 250 °C

Poč	Ref	Rozdíly	Absolutní hodnoty rozdílů	Pořadí rozdílů	Pořadí včetně znaménka
-0,712	-1,077	0,365	0,365	16	16
-1,077	-1,220	0,143	0,143	15	15
-1,020	-1,050	0,030	0,030	12	12
-1,218	-1,240	0,022	0,022	7	7
-1,241	-1,150	-0,091	0,091	13	-13
-1,005	-1,030	0,025	0,025	8	8
-1,321	-1,340	0,019	0,019	6	6
-1,482	-1,490	0,008	0,008	2	2
-1,297	-1,310	0,013	0,013	4	4
-1,386	-1,360	-0,026	0,026	9	-9
-1,540	-1,510	-0,030	0,030	11	-11
-1,341	-1,350	0,009	0,009	3	3
-1,300	-1,400	0,100	0,100	14	14
-1,155	-1,170	0,015	0,015	5	5
-1,365	-1,360	-0,005	0,005	1	-1
-1,270	-1,240	-0,030	0,030	10	-10
Počet nenulových rozdílů:			$n =$	16	
Součet pořadí kladných rozdílů:			$W_+ =$	92	
Součet pořadí záporných rozdílů:			$W_- =$	44	
Minimum ze součtů $W_+$ a $W_-$ :			$W_{min} =$	44	



Tab. 9-6 Data pro Wilcoxonův test pro teplotu 260 °C

Poč	Ref	Rozdíly	Absolutní hodnoty rozdílů	Pořadí rozdílů	Pořadí včetně znaménka
-0,773	-1,429	0,656	0,656	16	16
-1,273	-1,350	0,077	0,077	13	13
-1,100	-1,150	0,050	0,050	10	10
-1,307	-1,340	0,033	0,033	6	6
-1,448	-1,290	-0,158	0,158	15	-15
-1,089	-1,130	0,041	0,041	8	8
-1,408	-1,440	0,032	0,032	4	4
-1,575	-1,600	0,025	0,025	3	3
-1,577	-1,520	-0,057	0,057	11	-11
-1,576	-1,530	-0,046	0,046	9	-9
-1,663	-1,630	-0,033	0,033	5	-5
-1,496	-1,500	0,004	0,004	2	2
-1,481	-1,600	0,119	0,119	14	14
-1,294	-1,330	0,036	0,036	7	7
-1,479	-1,480	0,001	0,001	1	1
-1,389	-1,330	-0,059	0,059	12	-12
Počet nenulových rozdílů:			$n =$	16	
Součet pořadí kladných rozdílů:			$W_+ =$	84	
Součet pořadí záporných rozdílů:			$W_- =$	52	
Minimum ze součtů $W_+$ a $W_-$ :			$W_{min} =$	52	

Tab. 9-7 Shrnutí výsledků Wilcoxonova testu pro teploty 230 °C, 240 °C, 250 °C a 260 °C

	Wilcoxonův test dle teploty			
	230 °C	240 °C	250 °C	260 °C
$n$	16	16	16	16
$W_+$	63	78	92	84
$W_-$	73	58	44	52
$W_{min}$	63	58	44	52
$W_k(\alpha = 0,05)$	29	29	29	29

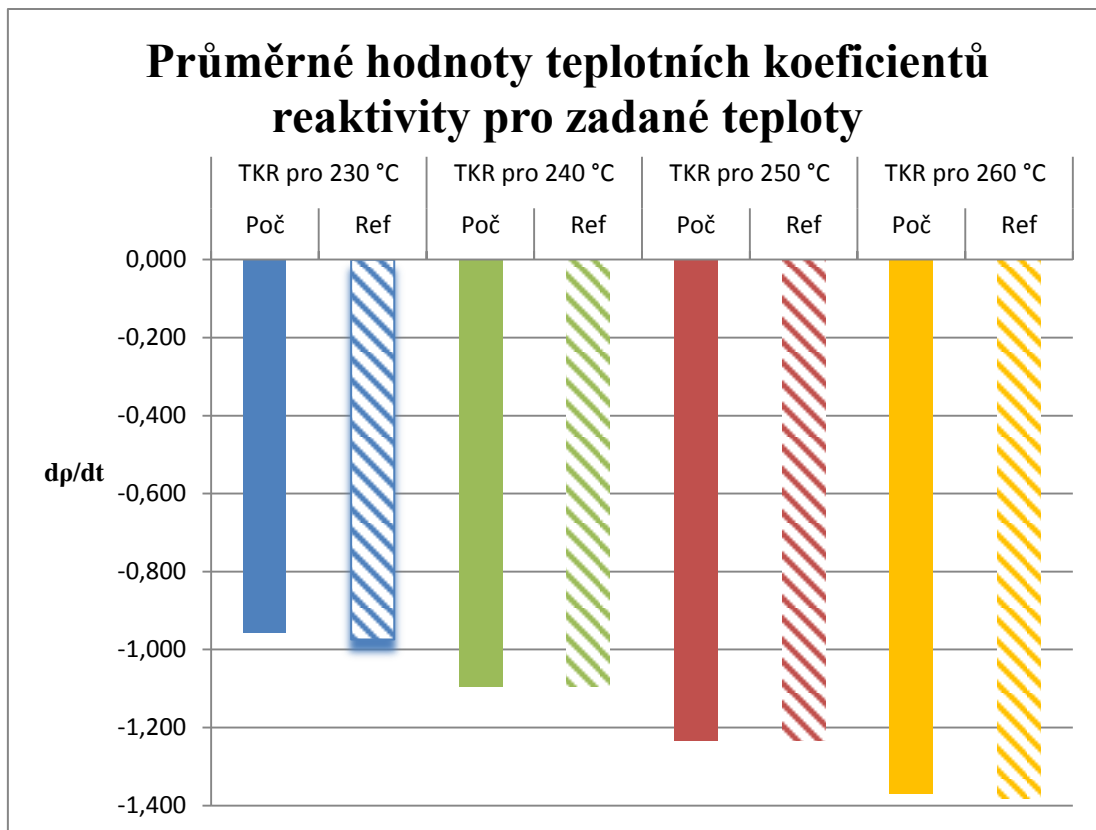
Na závěr zbývá porovnat menší ze součtů  $W_{min}$  s kritickou hodnotou pro Wilcoxonův test  $W_k$ . V případě, že hodnota  $W_{min}$  je větší než hodnota  $W_k$  platí nulovou hypotézu, v opačném případě ji zamítáme. Z posledních dvou řádků Tab. 9-7 je patrné, že pro všechny teploty je hodnota  $W_{min}$  větší než hodnota  $W_k$ , tedy ve všech těchto případech nezamítáme nulovou hypotézu a o počítaných a referenčních hodnotách můžeme říct, že se ze statistického hlediska neliší, a tedy metodiky výpočtu teplotního koeficientu reaktivity programem TEPKO a Stanovení teplotního koeficientu reaktivity jsou ekvivalentní.

## 9.2 Porovnání výsledků

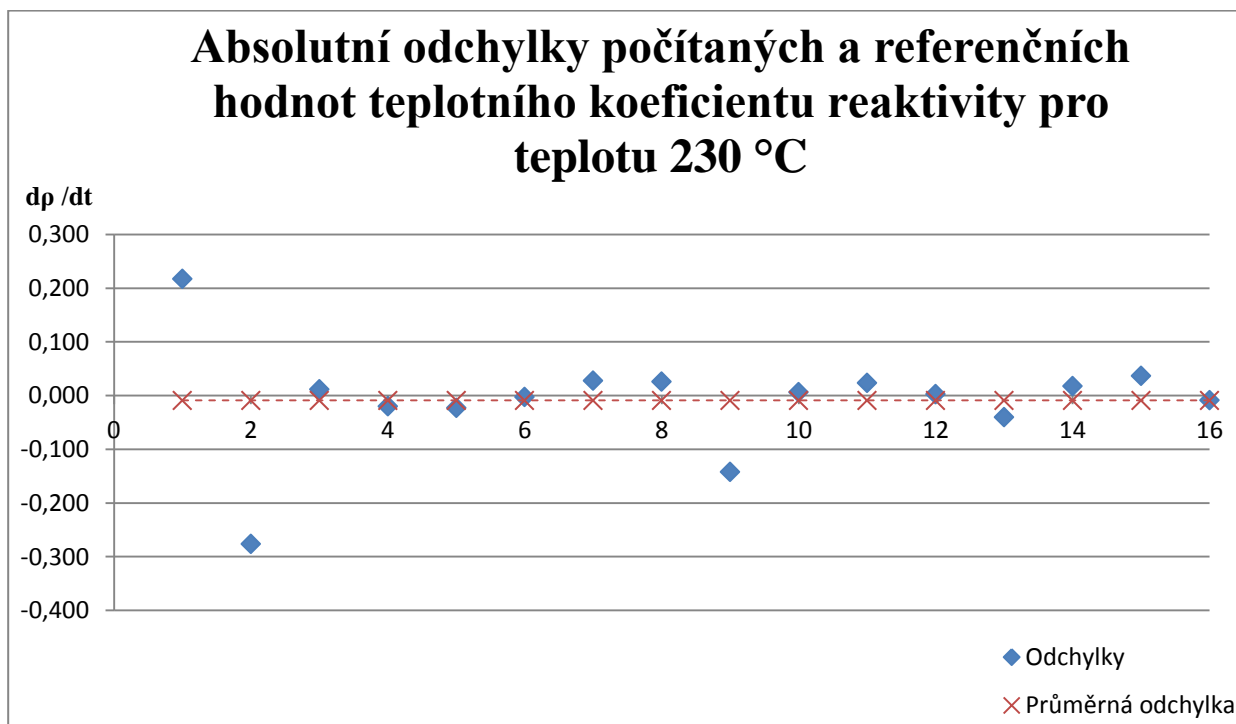
Na obr. 9.1 jsou zobrazeny průměrné hodnoty teplotních koeficientů, plné sloupce reprezentují hodnoty počítané programem Stanovení teplotních koeficientů reaktivity, šrafované sloupce jsou referenční průměrné hodnoty počítané programem TEPKO.

Na obr. 9.2, 9.3, 9.4 a 9.5 jsou potom zobrazeny hodnoty absolutních odchylek počítaných a referenčních hodnot teplotních koeficientů reaktivity.

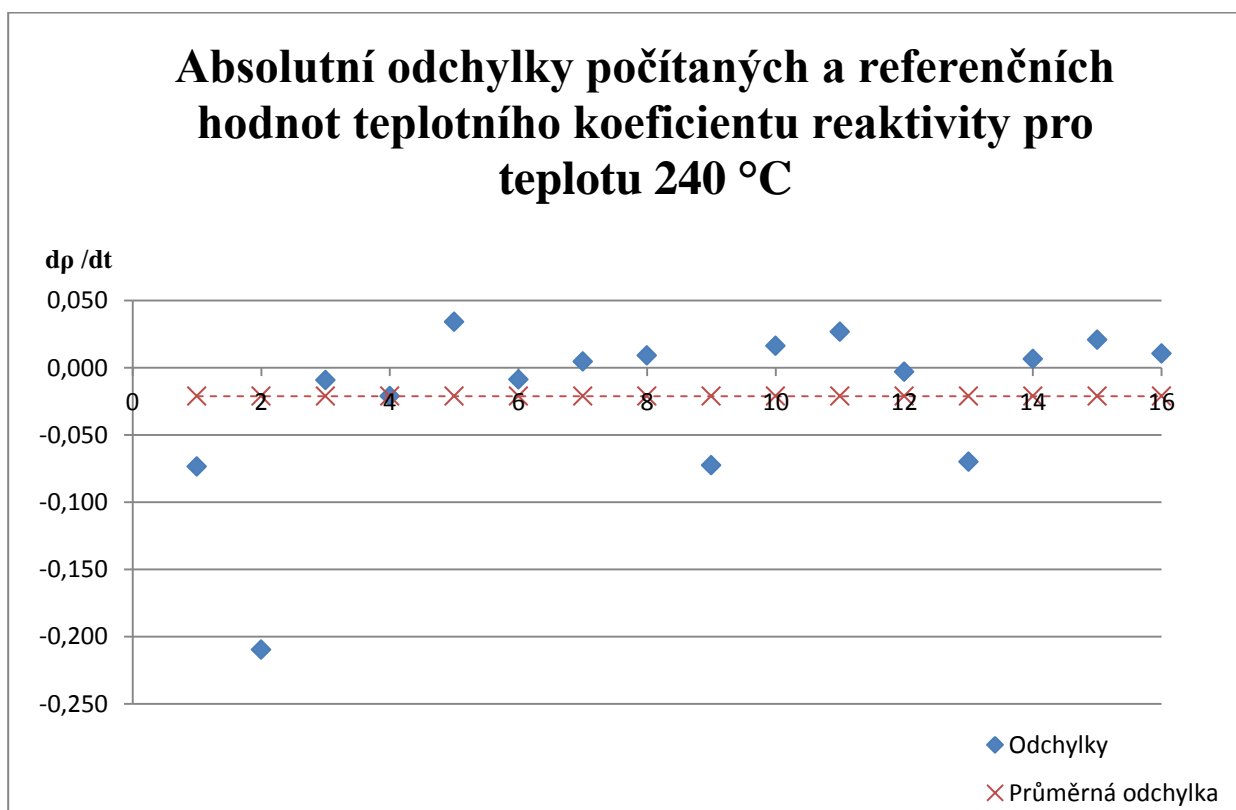
Z obr. 9.6 je patrné, že s rostoucí teplotou teplotní koeficienty reaktivity klesají, na obrázku jsou odstíny modré zobrazeny hodnoty minimální, odstíny zelené průměrné hodnoty a odstíny červené maximální hodnoty. Na základě tohoto obrázku můžeme prohlásit, že bylo splněno bezpečnostní kritérium pro test Dohřev chladiva primárního okruhu na 260 °C (kap. 6.3).



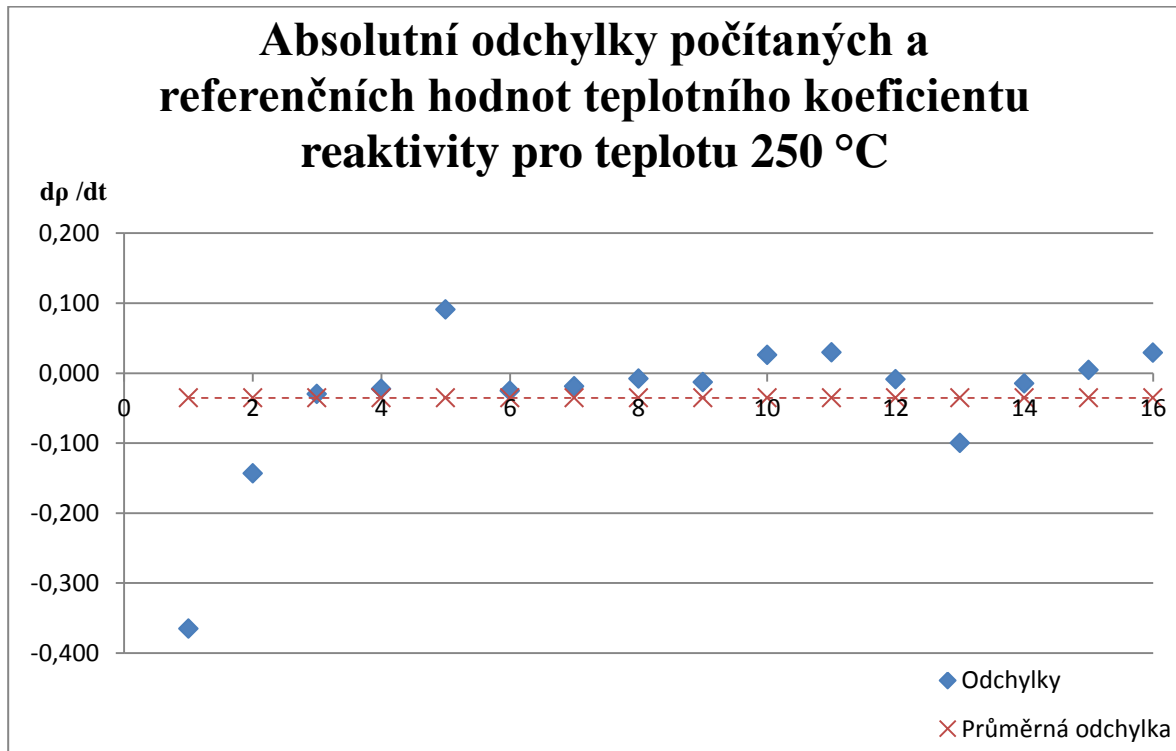
Obr. 9-1 Průměrné hodnoty teplotních koeficientů reaktivity pro teploty 230 °C, 240 °C, 250 °C a 260 °C.



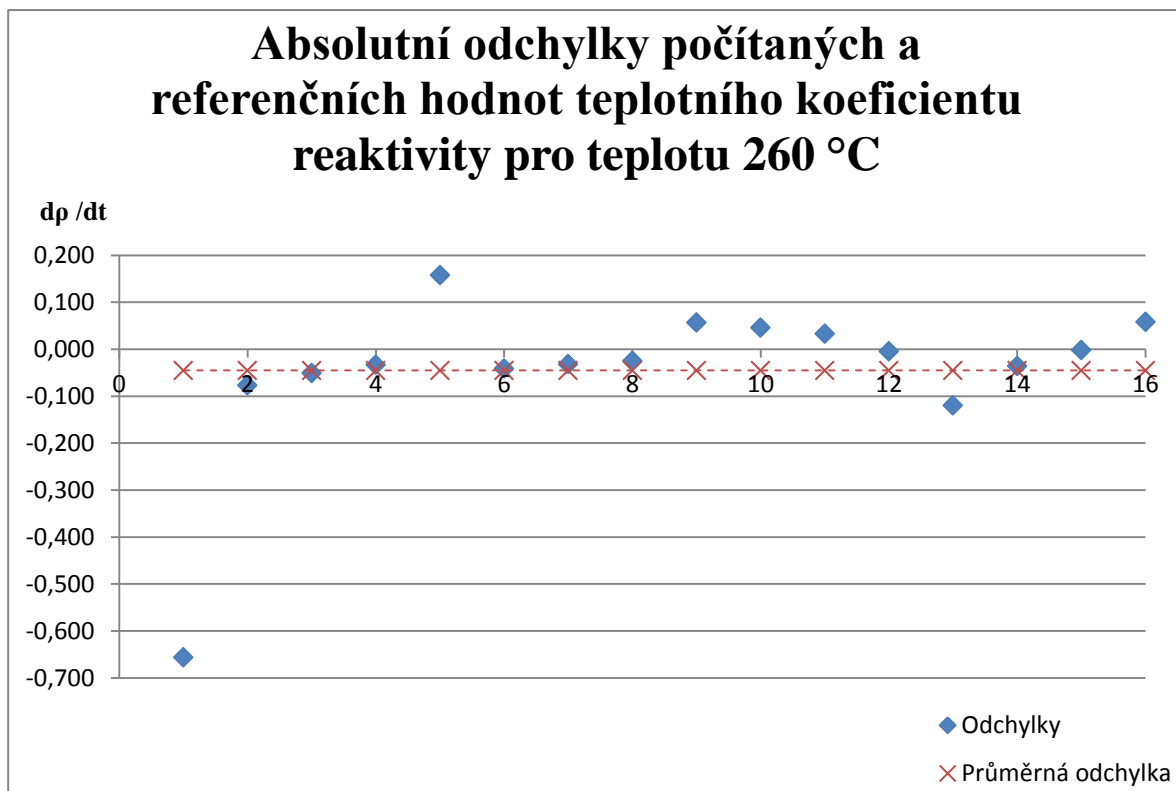
Obr. 9-2 Absolutní odchylky počítaných a referenčních hodnot teplotních koeficientů reaktivity pro teplotu 230 °C.



Obr. 9-3 Absolutní odchylky počítaných a referenčních hodnot teplotních koeficientů reaktivity pro teplotu 240 °C.



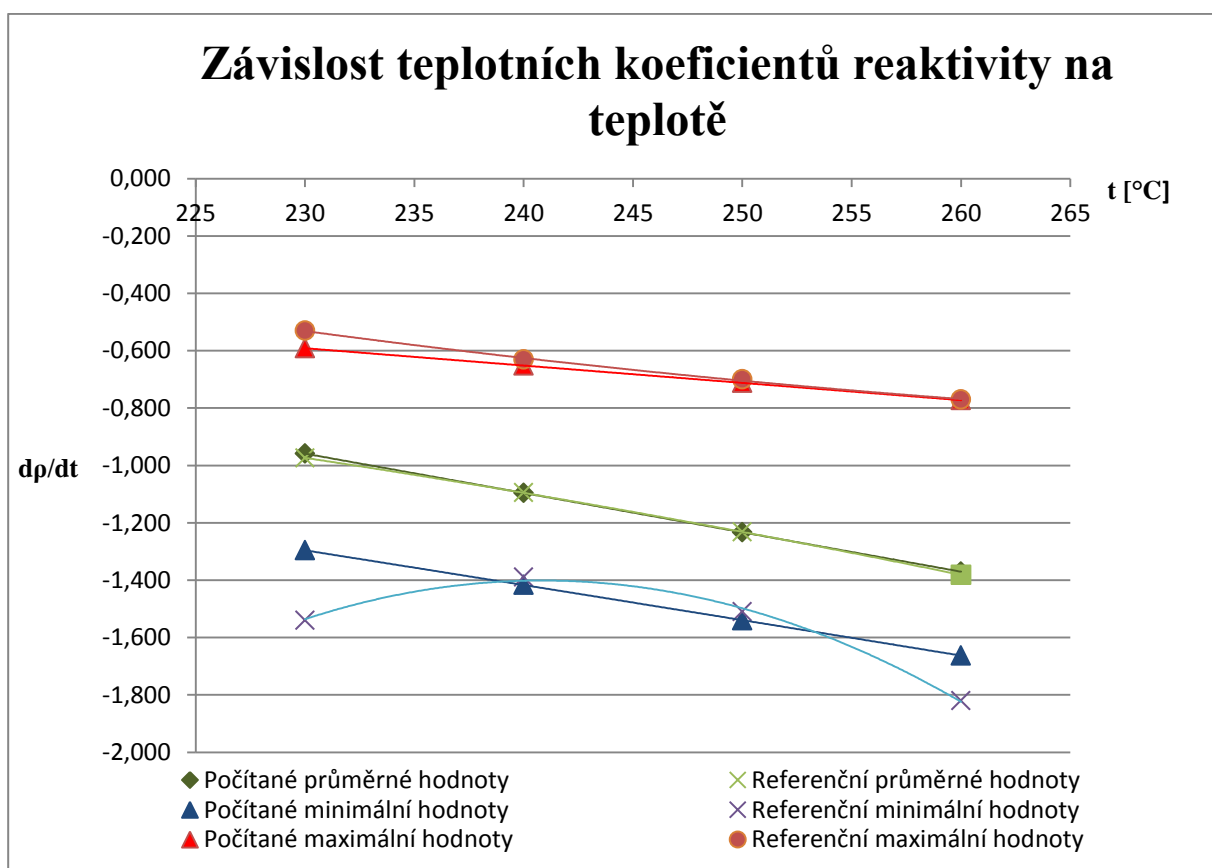
Obr. 9-4 Absolutní odchylky počítaných a referenčních hodnot teplotních koeficientů reaktivity pro teplotu 250 °C.



Obr. 9-5 Absolutní odchylky počítaných a referenčních hodnot teplotních koeficientů reaktivity pro teplotu 260 °C.

Tab. 9-8 Vysvětlivky k Obr. 9-2, Obr. 9-3, Obr. 9-4 a Obr. 9-5.

Popisek na ose x	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Blok	1				2				3				4			
Cyklus	23	24	25	26	23	24	25	26	22	23	24	25	21	22	23	24



Obr. 9-6 Závislosti teplotních koeficientů reaktivity na teplotě.

## 10 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo zpětně ověřit hodnoty teplotního koeficientu reaktivity v Jaderné elektrárně Dukovany. Pro tyto účely byl napsán počítačový program Stanovení teplotního koeficientu reaktivity, kterým byly z poskytnutých souborů vypočítány hodnoty teplotních koeficientů reaktivity.

K ověření správnosti použitých metodik bylo použito statistického Wilcoxonova párového testu, kterým jsme porovnávali, zda se od sebe liší hodnoty počítané programem Stanovení teplotního koeficientu reaktivity a referenční hodnoty počítané programem TEPKO. Na základě výsledků tohoto testu můžeme prohlásit, že použité metodiky jsou ekvivalentní a výsledky počítané programem Stanovení teplotního koeficientu reaktivity jsou statisticky ekvivalentní k referenčním datům.

Na základě výsledků programu Stanovení teplotních koeficientů reaktivity můžeme prohlásit, že při zpětném ověřování zadaných opakovaných spouštění jaderných reaktorů bylo splněno bezpečnostní kritérium a hodnoty teplotních koeficientů reaktivity byly pro zkoumané teploty záporné.

Z grafických závislostí uvedených v kapitole 9.2 je patrné, že s rostoucí teplotou teplotní koeficienty reaktivity klesají, čímž se zvyšuje stabilita jaderného reaktoru.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Česká republika. Zákon č. 18/1997 SB. ze dne 24. ledna 1997 o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (atomový zákon) a o změně a doplnění některých zákonů. In Sbírka zákonů České republiky. 1997, 5, s. 82-120. Dostupný z WWW: <[http://www.sujb.cz/docs/Atomovy\\_zakon\\_20110907.pdf](http://www.sujb.cz/docs/Atomovy_zakon_20110907.pdf)>.
- [2] SÚJB.cz [online]. 2011 [cit. 2011-10-15]. O SÚJB. Dostupné z WWW: <<http://www.sujb.cz/>>.
- [3] Česká republika. Vyhláška č. 106/1998 Sb. O zajištění jaderné bezpečnosti a radiační ochrany jaderných zařízení při jejich uvádění do provozu a při jejich provozu. In: Sbírka zákonů České republiky. 1998. Dostupné z: <[http://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/vyhlasky/106\\_98.pdf](http://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/vyhlasky/106_98.pdf)>.
- [4] IAEA.org [online]. 2010 [cit. 2011-10-15]. About Us. Dostupné z WWW: <<http://www.iaea.org/>>.
- [5] WANO.info [online]. 2011 [cit. 2011-10-15]. About Us. Dostupné z WWW: <<http://www.wano.info/>>.
- [6] RAČEK, J.: Jaderná zařízení. Brno: Nakladatelství NOVOPRESS, 2009.
- [7] RAČEK, J.: Jaderné elektrárny. Brno: Nakladatelství Novotný, 2005.
- [8] OECD : Nuclear Energy Agency [online]. 2011 [cit. 2011-12-11]. JANIS 3. Dostupné z WWW: <<http://www.oecd-nea.org/janis/>>.
- [9] Odbor reaktorové fyziky EDU.: Reaktorová fyzika pro operatory. Dukovany: ČEZ, 2010.
- [10] DUBŠEK, F.: Základy teorie a stavby jaderných reaktorů. Brno: Ediční středisko VUT, 1990.
- [11] MATAL, O.: Konstrukční cvičení (Vybrané komponenty jaderně energetických zařízení). Brno: Ediční středisko VUT, 1988.
- [12] HEŘMANSKÝ, B.: Jaderné energetické reaktory. Zbraslav: ÚIS, 1988.
- [13] MATOUŠEK, A.: Provoz jaderných elektráren. Brno: Ediční středisko VUT, 1988.
- [14] ONDRÁK, C.: Provozní předpis A004a – Limity a podmínky bezpečného provozu. 2005, 113 s.
- [15] KOCEK, V.: Provozní předpis P011a – Fyzikální testy. 2011, 76 s.
- [16] SVETLÍK, M.: Metodika pre hodnotenie fyzikálnych testov. 2003, 50 s.
- [17] Slovenská republika. Požiadavky na vypracovanie, realizáciu a hodnotenie výsledkov testov programu fyzikálneho spúšťania. In: Bratislava: Úrad jadrového dozoru Slovenskej republiky, 2007. Dostupné z WWW: <[http://www.ujd.gov.sk/files/legislativa/Bezpecnostne\\_navody/testy%20programu%20fyzikalneho%20spustania.pdf](http://www.ujd.gov.sk/files/legislativa/Bezpecnostne_navody/testy%20programu%20fyzikalneho%20spustania.pdf)>.
- [18] DURĎÁK, Z., STOLBENKOVÁ, E. a KIBUS, M.: Program pro opakované spouštění 1TP009/2 - Fyzikální testy spouštění po výměně jaderného paliva. 169 s.
- [19] MINARČIN, M., TOMAŠOVIČ, D.: Metodiky základných SW funkcií systému ANMS. 2006, 41 s.
- [20] BAŠTINEC, J., FAJMON, B., KOLÁČEK, J.: Pravděpodobnost, statistika a operační výzkum. VUT Brno, 2010, 360 s.

## PŘÍLOHY

Příloha 1 Požadovaná struktura souboru s referenčními daty

TKR referenci		TKR pro 230 °C		TKR pro 240 °C		TKR pro 250 °C		TKR pro 260 °C	
Blok/Cyklus	Ref		Ref		Ref		Ref		
b1c23	-0,37		-0,73		-1,08		-1,43		
b1c24	-0,96		-1,09		-1,22		-1,35		
b1c25	-0,85		-0,95		-1,05		-1,15		
b1c26	-1,06		-1,15		-1,24		-1,34		
b2c23	-0,85		-1,00		-1,15		-1,29		
b2c24	-0,84		-0,93		-1,03		-1,13		
b2c25	-1,12		-1,23		-1,34		-1,44		
b2c26	-1,27		-1,38		-1,49		-1,60		
b3c22	-0,88		-1,09		-1,31		-1,52		
b3c23	-1,00		-1,18		-1,36		-1,53		
b3c24	-1,27		-1,39		-1,51		-1,63		
b3c25	-1,03		-1,19		-1,35		-1,50		
b4c21	-0,98		-1,19		-1,40		-1,60		
b4c22	-0,86		-1,01		-1,17		-1,33		
b4c23	-1,10		-1,23		-1,36		-1,48		
b4c24	-1,04		-1,14		-1,24		-1,33		

Příloha 2 Výřez z tabulky kritických hodnot pro Wilcoxonův párový test [20].

Počet nenulových rozdílů	Hladiny významnosti $\alpha$			
	0,1	0,05	0,02	0,01
n				
5	0	-	-	-
6	2	0	-	-
7	3	2	0	-
8	5	3	1	0
9	8	5	3	1
10	10	8	5	3
11	13	10	7	5
12	17	13	9	7
13	21	17	12	9
14	25	21	15	12
15	30	25	19	15
16	35	29	23	19
17	41	34	27	23
18	47	40	32	27
19	53	46	37	32
20	60	42	43	37