



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

## NÁHŘEV A SPOUŠTĚNÍ JADERNÉHO BLOKU ELEKTRÁRNY DUKOVANY PO ODSTÁVCE

WARMING AND STARTING NUCLEAR UNIT UP OF THE DUKOVANY NPP AFTER THE OUTAGE

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Lubomír Ludvík

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Karel Katovský, Ph.D.

BRNO 2016



# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektroenergetika**  
Ústav elektroenergetiky

**Student:** Bc. Lubomír Ludvík

**ID:** 146893

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2015/16

## NÁZEV TÉMATU:

### Náhřev a spouštění jaderného bloku Elektrárny Dukovany po odstávce

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Detailně se seznamte s problematikou náběhu jaderného bloku Elektrárny Dukovany po odstávce.
2. Proveďte analýzu zdrojů a spotřebičů páry v průběhu spouštění bloku. Zpracujte data z provozních měření z jaderné elektrárny Dukovany.
3. Kvantifikujte množství tepla potřebné pro náběh bloku, navrhněte optimalizaci spotřeby páry s ohledem na možnosti náběhu bloku bez externího zdroje páry.
4. Diskutujte provozní, technologická a legislativní omezení alternativního návrhu.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle pokynů vedoucího a konzultantů práce.

**Termín zadání:** 8.2.2016

**Termín odevzdání:** 20.5.2016

**Vedoucí práce:** Ing. Karel Katovský, Ph.D.

**Konzultant diplomové práce:** Ing. Miroslav Trnka, ČEZ, a.s.; Ing. Martin Blaha, TES, s.r.o.

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D., předseda oborové rady**

## UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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:

LUDVÍK, L. *Náhřev a spouštění jaderného bloku Elektrárny Dukovany po odstávce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 54 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Karel Katovský, Ph.D..

Poděkování:

Rád bych touto cestou poděkoval panu Ing. Miroslavu Trnkovi a panu Ing. Martinu Blahovi za poskytnutí teoretických podkladů a odbornou konzultaci při vypracování této diplomové práce. Podobně bych chtěl také poděkovat vedoucímu mé práce panu Ing. Karlu Katovskému Ph.D. za odbornou pomoc a podporu. V neposlední řadě děkuji své rodině a svým přátelům za pomoc a podporu.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové 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.

.....

## ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá analýzou náhřevu a spouštění jaderného bloku Elektrárny Dukovany po odstávce. V první části práce jsou vysvětleny jednotlivé provozní režimy jaderných elektráren, konkrétně provozní režimy Jaderné elektrárny Dukovany. V následující části je proveden rozbor zdrojů tepla v primárním okruhu a také jednotlivá výroba a spotřeba páry celého jaderného bloku, potažmo celého areálu. Dále je teoreticky rozčleněn samotný náhřev do několika bodů. Samotná analýza náhřevu bloku po odstávce je provedena z reálných dat, naměřených v prosinci 2015. Výsledkem analýzy je určení množství přepouštěné páry ze sousedního bloku, na které navazuje samotný návrh externího zdroje páry.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** Jaderná elektrárna Dukovany, náhřev bloku, spouštění po odstávce, analýza toku média, externí zdroj páry

## **ABSTRACT**

This thesis deals with the analysis of warming and starting up the nuclear unit of Dukovany NPP after the outage. First part explains the various operating modes of nuclear power plants, specifically operating modes of Dukovany NPP. The following part contains the analysis of heat sources in the primary circuit and also the individual production and consumption of steam by the NPP. The next part deals with division into several points of the warming of the Dukovany NPP. The analysis of warming nuclear unit after a outage is made on the basis of the industry based data, measured in December 2015. The result of the analysis is determination the amount of steam passing from a another nuclear unit, which is following by the own proposal of the external steam source.

**KEYWORDS:** Nuclear power plant Dukovany, warming of the nuclear unit, starting up, analysis, external steam source

## OBSAH

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>8</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>9</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>10</b>
<b>1 ÚVOD .....</b>	<b>11</b>
<b>2 PROVOZNÍ REŽIMY JADERNÉ ELEKTRÁRNY DUKOVANY .....</b>	<b>12</b>
<b>2.1 PROVOZNÍ REŽIMY JADERNÉ ELEKTRÁRNY DUKOVANY .....</b>	<b>13</b>
2.1.1 REŽIM 1 – VÝKONOVÝ PROVOZ .....	14
2.1.2 REŽIM 2 – NEVÝKONOVÝ PROVOZ.....	14
2.1.3 REŽIM 3 – HORKÁ REZERVA .....	14
2.1.4 REŽIM 4 – POLOHORKÁ REZERVA .....	15
2.1.5 REŽIM 5 – Odstavení reaktoru s dochlazováním I.O. ....	17
2.1.6 REŽIM 6 – Odstavení s roztěsněním I.O.....	17
2.1.7 REŽIM 7 – VYVEZENÍ PALIVA Z AZ .....	17
<b>3 TEPELNÉ ZDROJE V PRIMÁRNÍM OKRUHU .....</b>	<b>18</b>
<b>3.1 TEPELNÝ VÝKON REAKTORU.....</b>	<b>18</b>
<b>3.2 HLAVNÍ CÍRKULAČNÍ ČERPADLA .....</b>	<b>21</b>
<b>3.3 ELEKTROOHŘÍVÁKY KOMPENZÁTORU OBJEMU .....</b>	<b>21</b>
<b>4 NÁBĚH A DOSAHOVÁNÍ MINIMÁLNÍHO KONTROLOVANÉHO VÝKONU REAKTORU VVER 440.....</b>	<b>23</b>
<b>4.1 REAKTIVITA JADERNÉHO REAKTORU.....</b>	<b>23</b>
<b>4.2 KOEFICIENTY OVLIVŇUJÍCÍ REAKTIVITU .....</b>	<b>24</b>
4.2.1 TEPLOTNÍ KOEFICIENT REAKTIVITY .....	24
4.2.2 VÝKONOVÝ KOEFICIENT REAKTIVITY .....	25
4.2.3 TLAKOVÝ KOEFICIENT REAKTIVITY .....	27
4.2.4 KOEFICIENT REAKTIVITY KYSELINY BORITÉ .....	27
<b>4.3 DOSAŽENÍ MINIMÁLNÍHO KONTROLOVANÉHO VÝKONU .....</b>	<b>28</b>
<b>4.4 NÁHŘEV PRIMÁRNÍHO OKRUHU .....</b>	<b>28</b>
<b>4.5 NÁHŘEV REAKTOROVÉHO BLOKU BEZ EXTERNÍHO ZDROJE PÁRY .....</b>	<b>29</b>
<b>4.6 ZVYŠOVÁNÍ VÝKONU BLOKU .....</b>	<b>30</b>
<b>5 ZDROJE A SPOTŘEBIČE PÁRY .....</b>	<b>31</b>
<b>6 ANALÝZA TOKU MÉDIA A ENERGIE ZE SOUSEDNÍHO BLOKU .....</b>	<b>32</b>
<b>6.1 PŘECHOD RB3 Z REŽIMU R6 DO REŽIMU R5 .....</b>	<b>36</b>
<b>6.2 PŘECHOD RB3 Z REŽIMU R5 DO REŽIMU R4 .....</b>	<b>36</b>
<b>6.3 PRŮTOK PÁRY Z RB4 DO RB3 .....</b>	<b>40</b>
<b>6.4 PŘECHOD RB3 Z R4 DO R3 A PROVOZ V BLOKU V R3 .....</b>	<b>47</b>
<b>6.5 PŘECHOD RB3 Z R3 DO R2 A PROVOZ BLOKU V R2 .....</b>	<b>47</b>

6.5.1 DOHŘEV I.O. RB3 A ZVÝŠENÍ VÝKONU REAKTORU.....	47
<b>7 NÁVRH EXTERNÍHO ZDROJE PÁRY .....</b>	<b>48</b>
<b>7.1 VÝBĚR PARNÍHO KOTLE.....</b>	<b>50</b>
<b>8 ZÁVĚR .....</b>	<b>52</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>53</b>
<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>54</b>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 2-1: Průběh nestacionární xenonové otravy po odstavení reaktoru [1].....</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 2-2: Průběh limitních křivek pro tlakové zkoušky RB3 [4].....</i>	<i>16</i>
<i>Obrázek 3-1: Průběh tep. výkonu vlivem rad. rozpadu štěpení po odstavení reaktoru.....</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 3-2: Průběh zbytkového výkonu po odstavení reaktoru [4].....</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 3-3: Schéma kompenzátoru objemu, modifikováno [16].....</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 4-1: Závislost koeficientu reaktivity na teplotě [15].....</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 4-2: Vliv Dopplerova efektu při zvýšení teploty paliva [4].....</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 6-1: Schématické znázornění II.O. s umístěním měřících členů , modifikováno [6].....</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 6-2: Schéma náhřevu I.O. ze strany II.O.[2].....</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 6-3: Průběh teploty NV a teploty I.O. RB3.....</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 6-4: Záznam dP na HCC RB3.....</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 6-5: Náhřev NN5 a NN6 RB3.....</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 6-6: Průběh průtoku NV do PG RB3.....</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 6-7: Množství páry generované z PG RB4.....</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 6-8: Průtok NV za VTO2.....</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 6-9: Průběh tepelného výkonu reaktoru RB4.....</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 6-10: Průběh tlaku v kolektoru 0,7 MPa RB4.....</i>	<i>42</i>
<i>Obrázek 6-11: Průběh poměrné spotřeby NV na MW výkonu.....</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 6-12: Průběh průtoku páry z RB4 do RB3.....</i>	<i>44</i>
<i>Obrázek 6-13: Průběh činného výkonu na RB4.....</i>	<i>44</i>
<i>Obrázek 6-14: Průběh teploty CCHV na RB4.....</i>	<i>45</i>
<i>Obrázek 6-15: Poměrný průběh <math>F_{NV}</math> k <math>N_{TG}</math> před zahájením náhřevu.....</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 6-16: Pokles teploty CCHV před zahájením náhřevu.....</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 6-17: Průběh výkonu reaktoru RB3.....</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 7-1: Dispoziční uspořádání objektů v areálu EDU, modifikováno [8].....</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 7-2: Zapojení mobilních kotlů k objektu pomocné kotelny [8]......</i>	<i>49</i>
<i>Obrázek 7-3: Provedení kotle typu HS M75B [11]......</i>	<i>50</i>
<i>Obrázek 7-4: Závislost teploty spalin (páry) na výkonu kotle pro různé tlaky [11].....</i>	<i>51</i>

## SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 2-1: Přehled provozních režimů EDU, modifikováno [2] .....</i>	<i>13</i>
<i>Tabulka 3-1: Konstanty v závislosti na době odstavení reaktoru .....</i>	<i>19</i>
<i>Tabulka 3-2: Orientační hodnoty zbytkového výkonu [4] .....</i>	<i>20</i>
<i>Tabulka 3-3: Technické parametry HCČ.....</i>	<i>21</i>
<i>Tabulka 3-4: Rozdělení EOKO do skupin.....</i>	<i>22</i>
<i>Tabulka 4-1: Orientační hodnoty koeficientů reaktivity pro reaktory VVER 440 [14].....</i>	<i>27</i>
<i>Tabulka 4-2: Dovolené trendy změn parametrů [2] .....</i>	<i>29</i>
<i>Tabulka 5-1: Přehled odběrů páry z turbíny [6] .....</i>	<i>31</i>
<i>Tabulka 5-2: Ostatní spotřebiče páry v areálu JE Dukovany [9] .....</i>	<i>31</i>
<i>Tabulka 6-1: Harmonogram náběhu RB3 z prosince 2015 [12].....</i>	<i>32</i>
<i>Tabulka 6-2: Seznam analyzovaných dat, část 1. ....</i>	<i>33</i>
<i>Tabulka 6-3: Seznam analyzovaných dat, část 2. ....</i>	<i>34</i>

## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

p	[Pa]	tlak
P	[W]	výkon
T	[°C]	teplota
$\rho$	[-]	reaktivita
t	[s]	čas
F	[kg/s]	hmotnostní průtok

ARCA	Krátkodobý archiv bez apertur
AZ	Aktivní zóna
CCHV	Cirkulační chladicí voda
COPARC	Dlouhodobý archiv s aperturou
EOKO	Elektroohříváky kompenzátoru objemu
ESFAS	Engineered Safety Features Actuation System (System iniciace ochrany bloku)
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	Kyselina boritá
HCC	Hlavní cirkulační čerpadlo
HRK	Havarijní a regulační kazeta
HUA	Hlavní uzavírací armatura
I.O.	Primární okruh
II.O.	Sekundární okruh
MKV	Minimální kontrolovaný výkon
NN	Napájecí nádrž
NTO	Nízkotlaký ohřívák
NV	Napájecí voda
PG	Parogenerátor
PPK	Pomocná plynová kotelna
PS-K	Přepouštěcí stanice do kondenzátoru
RB3	Reaktorový blok č. 3
RB4	Reaktorový blok č. 4
SPP	Separátor páry a přihřívák
VS	Výměňiková stanice
VTO	Vysokotlaký ohřívák
ZRAO	Zpracování radioaktivních odpadů

# 1 ÚVOD

Životnost jaderné elektrárny je do jisté míry dána životností tlakové nádoby reaktoru, neboť ostatní komponenty technologického celku jsou vyměnitelné v průběhu provozování jaderného bloku. Životnost tlakové nádoby reaktoru se dnes pohybuje okolo 40 až 60 let, některé odhady dokonce hovoří o životnosti 80 až 100 let. Faktorem ovlivňující životnost tlakové nádoby reaktoru je kromě typu reaktoru také způsob jeho provozu. Při náhlém a nešetřném odstavení se životnost snižuje velmi rychle, totéž platí při nešetřném náběhu a náběhu.

Zajištění lepších provozních spolehlivostí jednotlivých komponent a použitých materiálů vychází z rozboru provozních zkušeností odpovídajícího zařízení a posledních provedení jaderných elektráren. Vychází se přitom ze statistického rozboru technických provozních údajů elektráren, zvláště těch, které vedly k vyřazení elektrárny z provozu.

Náběh a samotné spuštění bloku na minimální kontrolovaný výkon je doprovázeno nejen technologickými, ale také legislativními úkony. Jedná se o složitý proces, který má jasně daný postup a je tendence zvládnout celý náběh co nejefektivněji s dodržáním všech limitů a podmínek bezpečného provozu.

Situace, která v posledních měsících nastala na Jaderné elektrárně Dukovany, upozornila na jistou problematiku. V odstávce se nacházely 3 jaderné bloky a při náhlém odstavení i čtvrtého by se Elektrárna Dukovany ocitla bez externího zdroje páry. Na počátku 90. let se rozhodlo o vyřazení pomocné kotelny, která mohla právě v krajních situacích posloužit jako externí zdroj páry nutný pro náběh reaktorového bloku po odstávce. Na Temelíně pomocná kotelna stojí, na Dukovanech byla po dobu odstavení tří bloků zajištěna kotelna mobilní.

Cílem této diplomové práce je přiblížit problematiku náběhu jaderného bloku po odstávce a provést analýzu naměřených dat přímo z Elektrárny Dukovany. Pomocí zanalyzovaných dat poté určit konkrétní množství toku páry z pomocného bloku právě při náběhu primárního okruhu ze strany sekundárního okruhu. S respektováním závěrů plynoucích z analýzy dále navrhnout optimální řešení, které by umožňovalo náběh reaktorového bloku i při případné odstávce všech reaktorových bloků v areálu Jaderné elektrárny Dukovany.

## 2 PROVOZNÍ REŽIMY JADERNÉ ELEKTRÁRNY DUKOVANY

Jaderná elektrárna se může během svého provozu nacházet v různých režimech. Od prvotního spuštění, přes provoz na výkonu, až po plánované či neplánované odstávky. Jednotlivé provozní režimy se od sebe liší na základě fyzikálních a technologických parametrů. Toto rozdělení umožňuje jasně definovat limity a podmínky tak, aby byla zachována provozuschopnost zařízení. Zjednodušeně lze provozní režimy rozdělit do 4 kategorií [1]:

1. Provozní spuštění
2. Ustálený provoz na výkonu
3. Provoz za abnormálních podmínek (poruchy)
4. Odstavení a doběh

Před samotným uvedením jaderného reaktoru do provozu je potřeba provést několik kontrolních činností, které mají za úkol odhalit potencionální nedostatky v technologii. Obvykle se provádějí: kontroly svarů a kontrola těsnosti a pevnosti (těsnostní a pevnostní zkoušky) [1].

Prvnímu spuštění jaderné elektrárny předchází tzv. fyzikální spuštění, jehož úkolem je ověření neutronově fyzikálních charakteristik aktivní zóny jaderného reaktoru a ověření správného zavezení paliva (symetrie aktivní zóny). Ověřuje se funkce měření neutronového toku, řízení reaktivity reaktoru, systém rychlého odstavení reaktoru a další. Vyzkouší se všechny technologická měření a součinnost všech bezpečnostních systému navzájem. Fyzikální spuštění lze rozdělit na dvě části [13]:

- a) Zavážka paliva s kontrolou zavezených palivových souborů – poté se reaktor uzavře a utěsňuje.
- b) První dosažení samostatně se udržující štěpné řetězové reakce (kritický stav reaktoru) a fyzikální zkoušky na nízkém výkonu.

Po dosažení samostatně se udržující štěpné řetězové reakce je reaktor považován za fyzikálně spuštěný. Děje se tak při velmi nízkém výkonu (cca 0,001 % nominálního výkonu).

Po úspěšném fyzikálním spuštění následuje energetické spuštění, které má za úkol přivést jaderný blok na jmenovitý výkon. Prověřuje se činnost regulačních systémů a postupně se dosahují výkonové hladiny: 1 %, 5 %, 20 %, 35 %, 75 %, 90 %, 100 %. Významným bodem v energetickém spuštění je přifázování elektrických generátorů k elektrizační soustavě. Celý proces spuštění probíhá v řádu několika měsíců a nedá se předem určit jeho přesná délka [1].

Proces spuštění prvního bloku Jaderné elektrárny Dukovany byl zahájen v roce 1985. Zahájení štěpné reakce nastalo 12. února a o 14 dní později byl přifázován první a posléze i druhý turbogenerátor k rozvodné síti. Počátkem května téhož roku byl zahájen zkušební provoz, na který navázal trvalý provoz bloku od 3. listopadu 1985.

## 2.1 Provozní režimy Jaderné elektrárny Dukovany

Každá jaderná elektrárna má své provozní režimy odlišné od ostatních. Je to dáno např. typem jaderné elektrárny nebo rozdílností limitních a provozních předpisů. Jednotlivé rozdělení provozních režimů pro blok Jaderné elektrárny Dukovany (dále jen EDU) včetně přechodových podmínek je přehledně seřazeno v tabulce 2-1.

Tabulka 2-1: Přehled provozních režimů EDU, modifikováno [2]

Označení	Režim	$N_R^1$ [% $N_{nom}$ ]	Reaktivita $\Delta k/k$ [%]	$T_{I.O.}^2, T_{HVS}^3$ [°C]	$p_{I.O.}^4$ [MPa]
1	Provoz na výkonu	> 2	> -1	$T_{I.O.} \geq 250$	> 9,3
2	Nevýkonový provoz (max. 72 hodin)	≤ 2	≥ -1	$T_{I.O.} \geq 190$	> 9,3
3	Horká rezerva	Zbytk. výkon	< -1	$T_{HVS} \geq 180$	> atm
4	Polohorká rezerva	Zbytk. výkon	< -1	$T_{HVS} \geq 90$	> atm
5	Odstavení s dochlazováním I.O.	Zbytk. výkon	< -1	$T_{HVS} < 90$	> atm
6	Odstavení s roztěsněným I.O.	Zbytk. výkon	< -1	$T_{HVS} < 90$	= atm
7	Vyvezení paliva z AZ	AZ neobsahuje palivo			

Přechod mezi jednotlivými režimy nastává při dosažení parametru, který je v tabulce 2-1 podbarven, při splnění všech ostatních podmínek pro režim, do kterého přechází. Při abnormálním provozu a v havarijních podmínkách rozhoduje pro určení režimu pouze podbarvený parametr. V režimu č. 6 se atmosférického tlaku dosáhne otevřením odvodu vzduchu reaktoru.

Samotný proces řízení reaktoru a tedy umožnění přechodu mezi jednotlivými režimy zajišťuje systém řízení a ochrany reaktoru. Je tvořen dvěma nezávislými podsystémy [2]:

1. mechanický systém (kazety HRK)
2. systém bórové regulace

Oba systémy fungují za pomoci absorpce neutronů. Hlavní rozdíly mezi oběma způsoby jsou v rychlosti zavádění záporné reaktivity, v technologické náročnosti a ve vlivu rozložení neutronového toku v reaktoru [2].

<sup>1</sup>  $N_R$  - Výkon reaktoru v procentuálním vyjádření vůči nominálnímu výkonu

<sup>2</sup>  $T_{I.O.}$  - teplota primárního okruhu

<sup>3</sup>  $T_{HVS}$  - teplota horkých větví smyček reaktoru

<sup>4</sup>  $p_{I.O.}$  - Tlak primárního okruhu

### 2.1.1 Režim 1 – Výkonový provoz

Provoz bloku v tomto režimu je charakteristický provozem reaktoru na nominálním nebo sníženém výkonu, v režimu regulace frekvence a výkonu a provoz na teplotním a výkonovém efektu na konci kampaně, kdy koncentrace kyseliny borité v chladivu primárního okruhu (dále jen I.O.) klesne k nule. Z tabulky 2-1 je patrné, že parametry v režimu 1 jsou: výkon reaktoru větší než 2 % nominálního, reaktivita reaktoru je větší než  $-1 \Delta k/k$ , teplota chladiva je větší než 250 °C a tlak v primárním okruhu je větší než 8,3 MPa. Reaktor může být z hlediska reaktivity mírně podkritický (vlivem vyhořívání paliva), kritický nebo mírně nadkritický (zvýšení výkonu vlivem povytažení hlavních regulačních kazet) [2].

Přechod na režim 2 nastává při poklesu výkonu reaktoru pod 2 % nominálního výkonu při dodržení střední teploty chladiva v primárním okruhu větší než 250 °C.

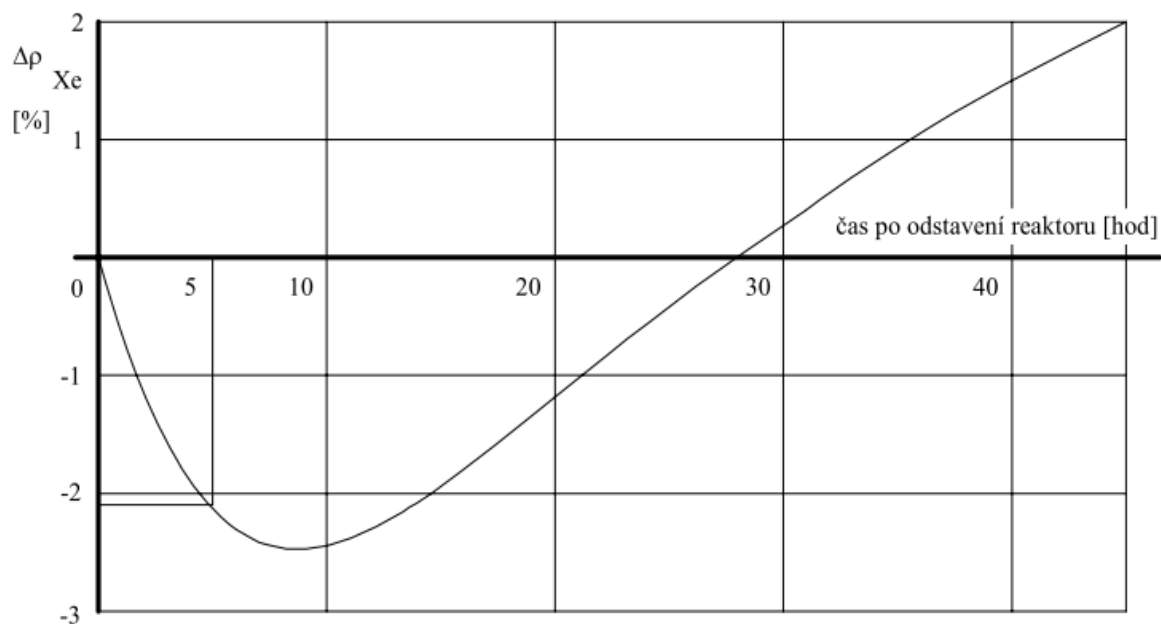
### 2.1.2 Režim 2 – Nevýkonový provoz

Jedná se o režim, který je charakteristický dosahováním kritického stavu během náběhu reaktoru a pro uvádění reaktoru do podkritického stavu při odstavování. V tomto režimu lze také udržovat reaktor v kritickém stavu při výkonu menším než 2 % nominálního (např. pro provedení oprav nebo operativních zásahů, které nelze provádět při vyšších výkonech). Tato doba ovšem nesmí překročit 72 hodin. Důvodem tohoto časového omezení je fakt, že při nižším výkonu může malá změna odběru páry z parogenerátoru způsobit velkou změnu teploty v I.O. Děje se tak z důvodu uvolnění kladné reaktivity vlivem poklesu teploty, který způsobí rychlé zvyšování výkonu. Zpětné vazby (výkonový efekt, teplotní efekt) působí stabilizačně pouze při vyšších výkonech. Tato problematika je více vysvětlena v kapitole 4 [2].

Parametry režimu 2 jsou: výkon reaktoru roven nebo menší jak 2 % nominálního výkonu, reaktivita reaktoru je rovna nebo větší než  $-1\% \Delta k/k$ , střední teplota chladiva v primárním okruhu je větší než 190 °C při tlaku větším než 9,3 MPa. Přechod do následujícího režimu nastává při reaktivitě menší než  $-1\% \Delta k/k$  a při střední teplotě chladiva v I.O. větší než 190 °C.

### 2.1.3 Režim 3 – Horká rezerva

V režimu 3 se blok může nacházet v několika případech. Při dohřevu bloku a při přípravě na dosažení kritického stavu nebo při přípravě bloku na vychlazování. Pokud bylo režimu 3 dosaženo zasunutím hlavních regulačních kazet (dále jen HRK), je nutné do 24 hodin zahájit dosahování odstavné koncentrace kyseliny borité v chladivu reaktoru. Vytvoření této koncentrace eliminuje vnos kladné reaktivity vlivem poklesu xenonové otravy pod výchozí hodnotu, viz obrázek 2-1 [2].



Obrázek 2-1: Průběh nestacionární xenonové otravy po odstavení reaktoru [1]

Charakteristické parametry režimu 3 jsou: výkon reaktoru v hodnotách zbytkového výkonu, reaktivita je menší než  $-1\% \Delta k/k$  (podkritický stav reaktoru), teplota chladiva v horkých smyčkách je větší nebo rovna  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$  a tlak je větší než atmosférický. Touto teplotou je také podmíněná aktivace/deaktivace příslušných signálů, tzv. ESFAS (Engineered Safety Features Actuation System). Jedná se o systém zajištění bezpečnosti, jehož účelem je likvidace předpokládaných havárií se zaručením jaderné bezpečnosti bloku a jeho okolí. Pokud tedy například dojde ke ztrátě napájení PG, napájení vlastní spotřeby, úniku chladiva apod. dojde k aktivaci zařízení bezpečnostních systémů určených pro jednotlivé havárie [2].

Přechod z režimu 3 do režimu 4 nastává při deaktivaci již zmíněných signálů ESFAS od teploty v horkých větvích smyček menší než  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$  a při reaktivitě menší než  $-1\% \Delta k/k$ .

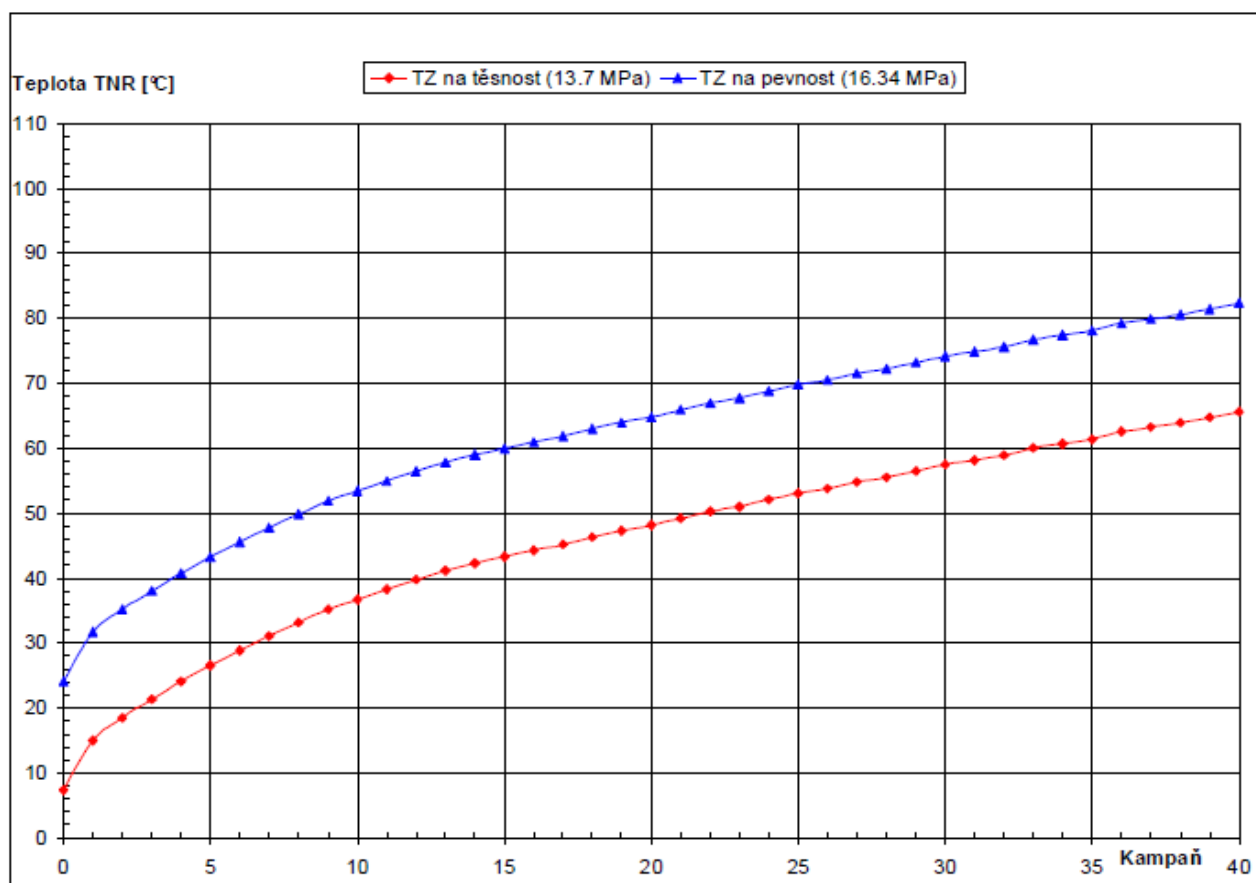
#### 2.1.4 Režim 4 – Polohorká rezerva

Při náběhu bloku se v tomto režimu provádějí tlakové zkoušky jak na primárním, tak sekundárním okruhu. Teplota v I.O. je větší než je kritická teplota křehkého lomu (bez znatelné trvalé deformace) a nárůst pokračuje až do režimu 3. Při odstavování probíhá v režimu č. 4 vychlazování I.O. v parovodním režimu, následovaný vodovodním režimem při dosažení teploty  $140\text{ }^{\circ}\text{C}$  v I.O. [2,5].

Charakteristické parametry režimu 4 jsou: výkon reaktoru stále na zbytkovém výkonu, reaktivita je menší než  $-1\% \Delta k/k$  – podkritický stav reaktoru, střední teplota chladiva v I.O. je menší než  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$  a současně je vyšší než teplota křehkého lomu tlakové nádoby reaktoru.

Dále musí být teplota kovu tlakové nádoby reaktoru vyšší, než je teplota křehkého lomu kovu<sup>5</sup>. Tlak v I.O. je v hodnotách vyšších než tlak atmosférický.

Pokud v tomto režimu pracují HCC, je vlivem velkého průtoku chladiva přes AZ a malého zbytkového výkonu reaktoru téměř vyrovnaná teplota v horkých a studených větvích smyček. Přechod do režimu 5 nastává, pokud teplota horkých větví smyček I.O. je menší než 90 °C. Při této teplotě se aktivují (nad 90 °C) nebo deaktivují (pod 90 °C) další příslušné signály ESFAS. Reaktivita aktivní zóny je menší než -1 %  $\Delta k/k$ . Samotná teplota křehkého lomu závisí na době provozu reaktoru – její hodnota s dobou provozu narůstá a stanovuje se dle křivek na obrázku 2-2. Při provádění tlakových zkoušek musí být teplota nádoby reaktoru s dostatečnou rezervou právě nad teplotou křehkého lomu kovu.



Obrázek 2-2: Průběh limitních křivek pro tlakové zkoušky RB3 [4]

<sup>5</sup> V přechodové teplotní oblasti dochází k prudkému snížení plastických vlastností. Původně plastická ocel přechází při snižování teploty do křehkého stavu a vzniká za určitých podmínek nebezpečí křehkého lomu.

### 2.1.5 Režim 5 – Odstavení reaktoru s dochlazováním I.O.

V tomto režimu se nachází vychlazený blok pod teplotou 90 °C horkých větví smyček reaktoru při neroztěsněném I.O. Při náběhu bloku se v tomto režimu provádějí tlakové zkoušky, které nevyžadují teplotu kovu tlakové nádoby vyšší než je teplota křehkého lomu a zároveň se zde zahajuje náběh I.O. nad teplotu křehkého lomu. Do režimu 5 se blok odstavuje v případě, pokud opravy vyžadují vychlazený blok, ale zároveň může zůstat v zatěsněném stavu. V případě odstavování bloku se v režimu 5 pokračuje s vychlazováním I.O. a přechází se na dochlazování reaktoru přirozenou cirkulací. Pokud je plánovaná výměna paliva probíhají přípravy na roztěsnění I.O. [2].

Charakteristické parametry jsou: výkon na zbytkovém výkonu, reaktivita je menší než  $-1\% \Delta k/k$  – reaktor je podkritický, teplota horkých větví smyček I.O. je pod úrovní 90 °C. Tlak v I.O. stále zůstává na hodnotách větších, než je tlak atmosférický a přechod do režimu 6 nastává při snížení tlaku v I.O. na hodnotu atmosférického tlaku (otevřením zavzdušnění I.O.) při teplotě v horkých větvích smyček nižší než 90 °C a při reaktivitě nižší než  $-1\% \Delta k/k$ .

### 2.1.6 Režim 6 – Odstavení s roztěsněním I.O.

Do tohoto stavu se blok dostává v případech, kdy je potřeba provést opravy na roztěsněném I.O. nebo pro případnou výměnu paliva. Odvod tepla probíhá pomocí přirozené cirkulace chladiva.

Charakteristické parametry jsou: výkon reaktoru odpovídá zbytkovému výkonu palivových kazet nacházejících se v AZ (část už může být vyvezena do bazénu skladování vyhořelého paliva). Reaktivita je menší než  $-1\% \Delta k/k$ , teplota v horkých větvích je menší než 90 °C a tlak v I.O. je roven atmosférickému. Přechod do posledního režimu nastává po vyvezení všech palivových kazet z aktivní zóny [2].

### 2.1.7 Režim 7 – Vyvezení paliva z AZ

Do režimu 7 se přechází v případě vyvezení veškerého paliva z AZ – při kontrolách tlakové nádoby reaktoru.

Jediným charakteristickým parametrem je vyvezení veškerého paliva. Přechod do režimu 6 nastává v okamžiku zavezení prvního palivového souboru do AZ při reaktivitě menší než  $-1\% \Delta k/k$ .

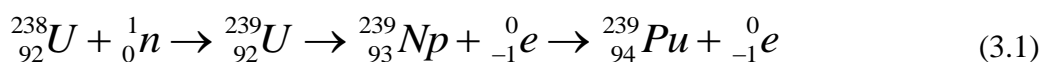
### 3 TEPELNÉ ZDROJE V PRIMÁRNÍM OKRUHU

Hlavním tepelným zdrojem v primárním okruhu je teplo vznikající přímo při štěpných reakcích uvnitř AZ. Díky tepelným ztrátám předávají určitou část tepelné energie do chladiva i hlavní cirkulační čerpadla (dále jen HCC). Jako další zdroj tepla v I.O. mohou posloužit elektroohříváky, které jsou součástí kompenzátoru objemu. Při náhřevu bloku lze uvažovat pouze zbytkový výkon, tepelné ztráty HCC a již zmíněné elektroohříváky kompenzátoru objemu [6].

#### 3.1 Tepelný výkon reaktoru

Odstavení reaktoru je spjato s pomalejší změnou tepelného výkonu v porovnání se změnou hustoty neutronového toku. Tepelný výkon reaktoru je charakterizován jako součet podílů výkonů vlivem zdroje a tepelné setrvačnosti paliva (naakumulované teplo). V momentu odstavení reaktoru intenzita štěpné řetězové reakce klesá exponenciálně a při malém výkonu se začíná uplatňovat teplo vznikající radioaktivním rozpadem produktů štěpení a radioaktivních izotopů. Zbytkový výkon reaktoru je součtem výkonů [2]:

- a) *Dobíhající štěpná reakce* – Pokles výkonu má exponenciální charakter a po ustálení přechodového procesu výkon klesá s periodou asi 80 s. Pokles je poněkud zpomalen kladnou zpětnou vazbou výkonového a teplotního efektu.
- b) *Radioaktivní rozpad produktů štěpení* – Jedná se o hlavní zdroj zbytkového tepla po odeznění štěpné reakce. Při popisu množství tepla vznikajícího tímto rozpadem se využívá různých empirických vztahů. Konstanty jsou závislé na typu reaktoru, době po odstavení a na předchozím provozu.
- c) *Radioaktivní rozpad sekundárních izotopů* – Hlavní podíl vznikajícího tepla při radioaktivním rozpadu izotopů vzniklých radiačním záchytem neutronů pochází od beta a gama záření izotopu  $^{239}\text{U}$  (vzniká radiačním záchytem  $^{238}\text{U}$ ) a izotopů, které vznikly v absorbátorech a konstrukčních materiálech. V případě  $^{239}\text{U}$  se jedná o teplo vznikající v rozpadovém řetězci:



Nelze zaměňovat zbytkový a tepelný výkon, který je předáván do chladiva. Zbytkový výkon tepla v důsledku beta a gama záření při rozpadu produktů štěpení, nahromaděných v reaktoru, je základem pro tepelný výkon reaktoru několik minut po odstavení. V prvních sekundách po odstavení je zbytkový výkon tepla cca 6 – 7% výkonu reaktoru, na kterém byl provozován. Tato hodnota odpovídá vývinu tepla vlivem radioaktivních rozpadů produktu štěpení při stacionárním provozu. Pokles zbytkového výkonu tepla je určen poločasem rozpadu produktů štěpení (od sekund až po miliony let). Hodnota zbytkového výkonu je tedy určena energií, doprovázející beta, resp. gama rozpad. Vzniklé radioaktivní produkty štěpení v průběhu provozu reaktoru snižují svoji aktivitu, jejíž hodnota v okamžiku odstavení je určena dobou od vzniku radioaktivního produktu do momentu odstavení reaktoru.

K určení zbytkového výkonu vlivem radioaktivního rozpadu produktů štěpení lze využít různých vztahů. Dle [14] je uvedeno použití dvou vztahů

$$N_{\beta,\gamma} = \frac{A}{200} \left[ \tau^{-a} - (T_0 + \tau)^{-a} \right] \quad (3.2)$$

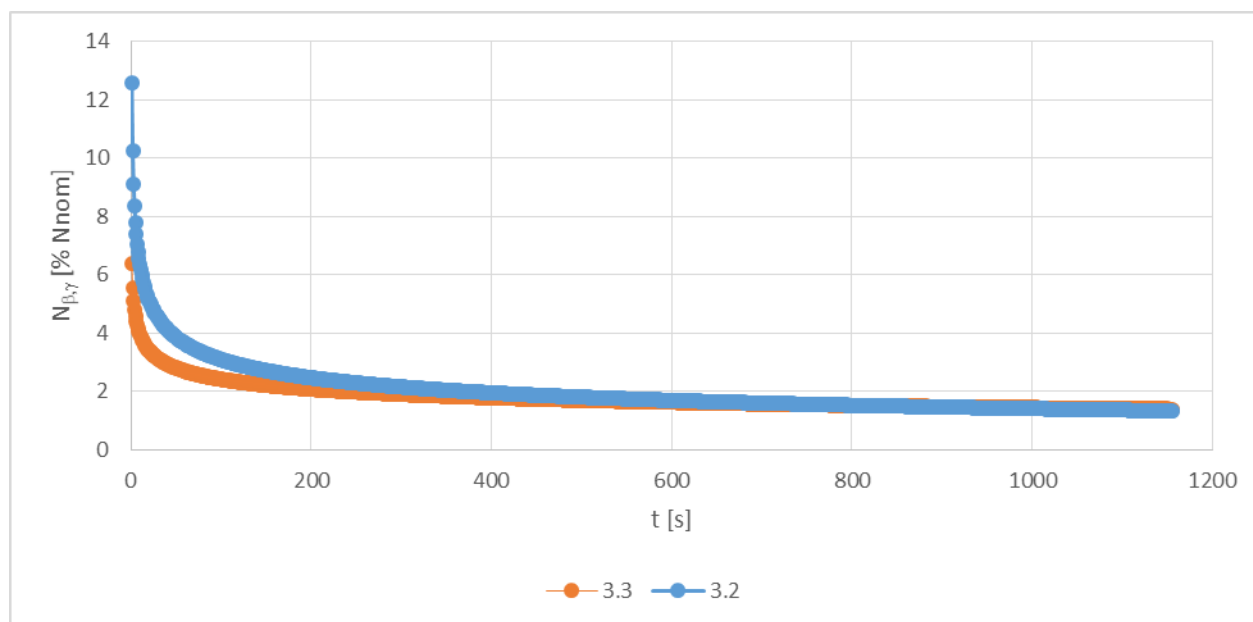
$$N_{\beta,\gamma} = 6,62 \cdot 10^{-2} \left[ \tau^{-0,2} - (T_0 + \tau)^{-0,2} \right] \quad (3.3)$$

kde  $T_0$  je doba po kterou byl reaktor provozován na výkonu  $N_0$   
 $A, a$  konstanty určené v závislosti na době odstavení reaktoru určené dle tabulky

Tabulka 3-1: Konstanty v závislosti na době odstavení reaktoru

$\tau$ (s)	A	a
$10^{-1} < \tau < 1,5 \cdot 10$	15,31	0,1800
$1,5 \cdot 10^2 < \tau < 10^4$	26,02	0,2834
$4 \cdot 10^4 < \tau < 2 \cdot 10^8$	53,18	0,3350

Průběh tepelného výkonu vlivem radioaktivního rozpadu štěpení po odstavení reaktoru, který pracoval 7000 hodin na ustáleném výkonu, je dle rovnic 3.2 a 3.3 vyneseno v průběhu na obrázku 3-1.



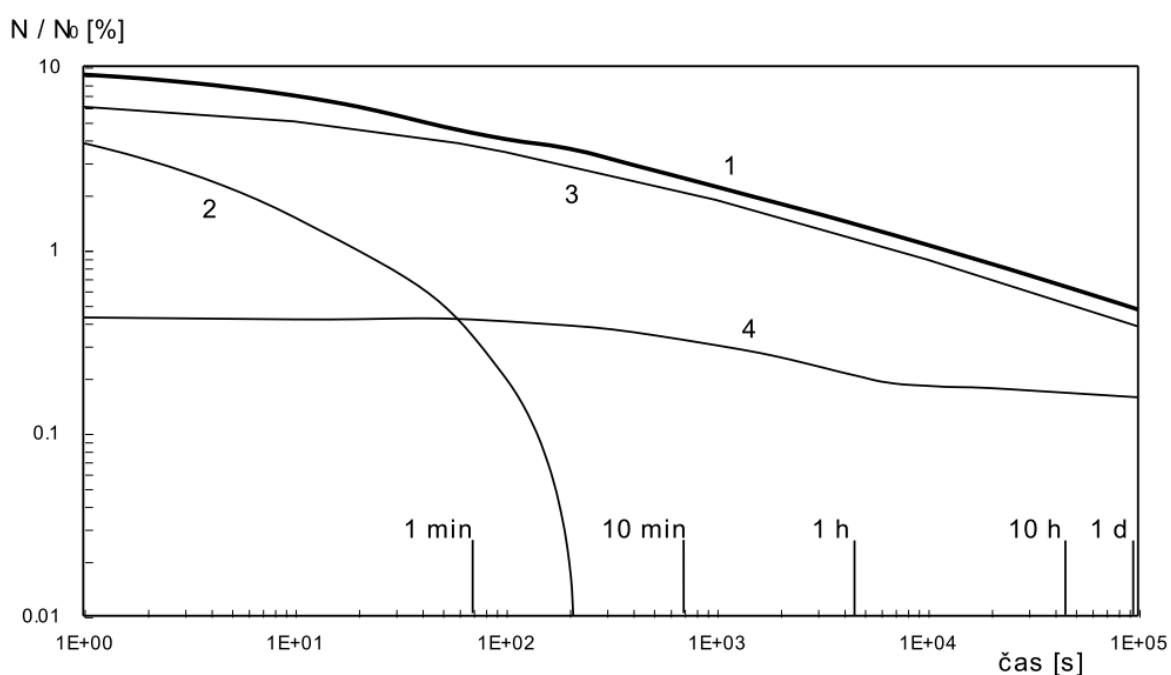
Obrázek 3-1: Průběh tep. výkonu vlivem rad. rozpadu štěpení po odstavení reaktoru

Na následujícím grafickém průběhu 3-1 lze vidět průběh celkového zbytkového výkonu tlakového reaktoru VVER 440 včetně jednotlivých složek. Z průběhu je patrné, že se dobíhající

štěpná reakce uplatňuje pouze v několika sekundách po odstavení. V tabulce 3-2 jsou poté uvedeny přibližné hodnoty zbytkového výkonu reaktoru VVER 440 v závislosti na době od odstavení reaktoru.

Tabulka 3-2: Orientační hodnoty zbytkového výkonu [4]

Doba po odstavení	$N_R$ [% $N_{NOM}$ ]	$N_R$ [MW <sub>t</sub> ]
sekundy	7 - 8	110
2minuty	4,5	60
1den	0,8	11
5dnů	0,5	7
10-14 dnů	0,4	5
20 dnů	0,15	2
40 dnů	0,07	1



- 1 - celkový výkon (3 + 2 + 4)
- 2 - výkon štěpné řetězové reakce
- 3 - radioaktivní rozpad produktů štěpení
- 4 - radioaktivní rozpad izotopů vzniklých radiačním záchytem neutronů

Obrázek 3-2: Průběh zbytkového výkonu po odstavení reaktoru [4]

### 3.2 Hlavní cirkulační čerpadla

Hlavní cirkulační čerpadla zabezpečují oběh chladiva v primárním okruhu jaderné elektrárny. Ochlazenou vodu z parogenerátorů čerpají zpět do aktivní zóny reaktoru tzv. studenou smyčkou, aby přechodem přes palivové kazety odváděla vznikající teplo.

Počet HCČ na jeden blok Jaderné elektrárny Dukovany (dále jen EDU) je šest, jedno v každé smyčce. Technické parametry HCČ jsou uvedeny v následující tabulce 3-2.

Tabulka 3-3: Technické parametry HCČ

Průtok chladicí vody	[m <sup>3</sup> /hod]	7100
Teplota chladiva I.O.	[°C]	270
Tlak na sání	[MPa]	12,11
delta_p	[MPa]	0,425+0,025
Příkon při horkém chladivu	[MW]	1,4
Příkon při studeném chladivu	[MW]	1,6
Výkon	[MW]	1,6
Napětí	[kV]	6
Proud statoru	[A]	183
Kmitočet sítě	[Hz]	50
Otáčky	[ot/min]	1500
Účinnost při výkonu 1,6 MW	[%]	94,5
Účinnost při výkonu 1,35 MW	[%]	93
Ztráty	[kW]	93,121

Část tepelných ztrát je předána do chladiva I.O., což má za příčinu navýšení teploty chladiva. Trend růstu teploty při náhřevu je z praxe cca o 1 °C/hod. V součtu 5 HCČ je k dispozici pro náhřev až 5 °C/hod. Při 200 °C se najíždí i 6. HCČ, které přidá k ohřevu další 1 °C navíc.

### 3.3 Elektroohříváky kompenzátoru objemu

Kompenzátor objemu je jedna z důležitých komponent I.O. jaderné elektrárny. Změna výkonu reaktoru je doprovázena změnou střední teploty chladiva, což v uzavřeném okruhu znamená i změnu tlaku. Z hlediska bezpečného a spolehlivého provozu je velká změna tlaku nežádoucí a proto se pro kompenzaci používá kompenzátor objemu, který představuje samostatnou nádobu připojenou k jedné horké větvi smyčky. V EDU je KO připojen k 1. větvi horké smyčky u lichých bloků a k 6. větvi horké smyčky u sudých bloků [8].

Součástí kompenzátoru objemu jsou elektroohříváky (dále jen EOKO), jejichž úkolem je ohřev vody v KO tak, aby v jeho horní části vznikala parní polštář, pomocí kterého se reguluje tlak v primárním okruhu. Jsou zavařeny v zesíleném spodním kroužku tlakové nádoby KO (tloušťka stěny 204 mm). Celkový počet EOKO je 108 ks, každý o výkonu 15 kW.

Vlastní ohřívák je tvořen třemi samostatnými topnými spirálami o výkonu 5 kW. Napájení je zajištěno z napěťové hladiny 380 V, každá polovina z jiného rozváděče [8].

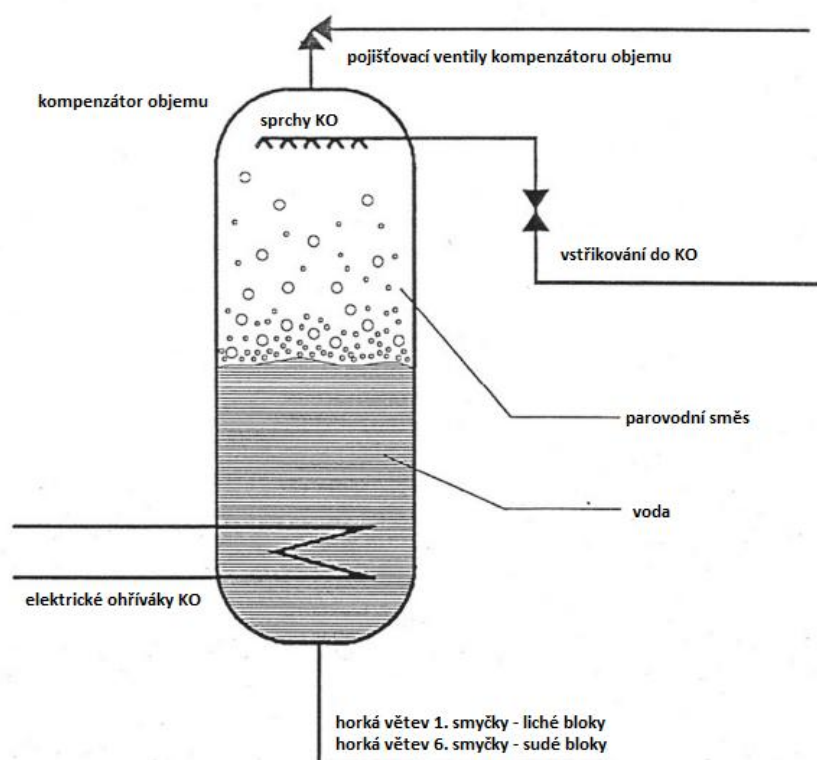
EOKO jsou rozděleny do 5 skupin o následujících výkonech:

Tabulka 3-4: Rozdělení EOKO do skupin

Skupina	Výkon
1.	2 x 90 kW
2.	2 x 90 kW
3.	1 x 360 kW
4.	1 x 360 kW
5.	1 x 540 kW

Celkový výkon EOKO je tedy 1620 kW. Jednotlivé automatické úrovně zapínání (při poklesu tlaku) a vypínání (při růstu tlaku) skupin EOKO je postupné od 1. skupiny po 5. skupinu.

Při nánřevu reaktorového bloku je v ručním režimu trvale zapnuta 3. až 5. skupina EOKO a 1. až 2. skupina EOKO je v režimu automatické regulace tlaku I.O. EOKO o výkonu 1260 kW je tedy trvale zapnuto po celou dobu nánřevu, dalších 180 kW se periodicky zapíná. Schématické provedení kompenzátoru objemu je uvedeno na obrázku 3-2. [8].



Obrázek 3-3: Schéma kompenzátoru objemu, modifikováno [16]

## 4 NÁBĚH A DOSAHOVÁNÍ MINIMÁLNÍHO KONTROLOVANÉHO VÝKONU REAKTORU VVER 440

### 4.1 Reaktivita jaderného reaktoru

Kritičnost reaktoru je určena hodnotou efektivního multiplikačního koeficientu. Při provozu reaktoru na zadaných parametrech musí být počáteční hodnoty  $k_{ef}$  (konečné soustavy) vyšší než jedna z důvodu zachování nutné doby provozu reaktoru. Přebytek multiplikačního koeficientu podle vztahu 5.1 je v aktivní zóně kompenzován absorbátory systému ochrany a regulace [13].

$$K_{ex} = k_{ef} - 1 \quad (4.1)$$

Mírou odchýlení reaktoru od kritického stavu je reaktivita, jejíž změna vyjadřuje reakci palivových souborů na změnu jejich rozmnožujících vlastností v důsledku ovlivnění různými faktory (rozměry, teplota, koncentrace absorbátorů atd.). Reaktivita  $\rho$  je dána poměrnou hodnotou odklonu  $k_{ef}$  od jedné

$$\rho = \frac{k_{ef} - 1}{k_{ef}} \quad (4.2)$$

Vzhledem k tomu, že u reaktivity jde o poměrnou hodnotu, lze ji vyjádřit v procentech odklonu multiplikačního koeficientu  $k_{ef}$  od jedné k jeho celkové hodnotě, která je brána jako 100 %. Vyjádření reaktivity v procentech bude tedy:

$$\rho = \frac{k_{ef} - 1}{k_{ef}} \cdot 100\% \quad (4.3)$$

V ustáleném (stacionárním) režimu jaderného reaktoru je hodnota  $k_{ef} = 1$  ( $\rho = 0$ ). Palivová vsázka musí být navržena tak, aby byla schopna kompenzovat všechny efekty reaktivity, které se během kampaně objevují. Celkovou zásobu reaktivity lze určit poměrnou změnou  $k_{ef}$  při odstranění všech absorbátorů neutronů systémů regulace a ochrany z aktivní zóny reaktoru. Na zásobu reaktivity lze také pohlížet jako na míru možné hloubky vyhoření paliva a efektivní doby provozu reaktoru během kampaně.

Studený reaktor bez výkonu musí mít určitou zásobu reaktivity, jejíž kompenzace je prováděna pomocí absorbátorů neutronů (obsahem kyseliny borité v chladivu). Jedná se o zásobu reaktivity, která se během snižování koncentrace kyseliny borité postupně uvolní na kompenzaci reaktivity. Reaktivita je vázána teplotním efektem (zvýšení teploty z 20 °C na 282 °C), výkonovým efektem (zvýšení výkonu z 0 na 100 %) nebo například stacionární otravou (Xe a Sm) [4].

## 4.2 Koeficienty ovlivňující reaktivitu

Jak bylo uvedeno v kapitole 2, reaktivita je ovlivňována během provozu několika faktory. Vzájemná vazba mezi reaktivitou a aktuálním stavem aktivní zóny (teplota, výkon, tlak, hloubka vyhoření, koncentrace absorbátorů neutronů, atd.) je charakterizována jednotlivými koeficienty reaktivity, určujícími vliv jednotlivých efektů.

### 4.2.1 Teplotní koeficient reaktivity

Teplotní koeficient reaktivity patří mezi koeficienty, které mají velký význam na chování reaktoru. Charakter (absolutní hodnota, znak) teplotního efektu závisí na typu reaktoru, tedy na spektru neutronů, typu moderátoru, materiálech použitých při konstrukci aktivní zóny apod.) Zvýšení teploty chladiva v primárním okruhu působí na reaktivitu dvěma zápornými efekty [14]:

- 1) *Zmenšení hustoty vody* – sníží se počet jader vodíku v jednotce objemu. Neutrony mají tedy sníženou pravděpodobnost zpomalovat se srážkami.
- 2) *Neutrony i jádra chladiva se pohybují rychleji* – mají větší energii. K štěpení  $^{235}\text{U}$  při větší energii neutronů bude docházet s menší pravděpodobností.

Zároveň však zvýšením teploty zapůsobí také dva kladné efekty mající dopad na změnu reaktivity:

- 1) Snížením hustoty vody se sníží i hustota rozpuštěného absorbátoru (kyseliny borité) v chladivu a tím se sníží absorpce neutronů na bóru.
- 2) Při vyšší teplotě se sníží absorpce neutronů na prvcích pokrytí paliva

Jednotlivé teplotní koeficienty lze obecně definovat v závislosti na změně střední teploty vody, resp. paliva [14]

$$\alpha_t = \alpha'_{H_2O} + \alpha'_{UO_2} \quad (4.4)$$

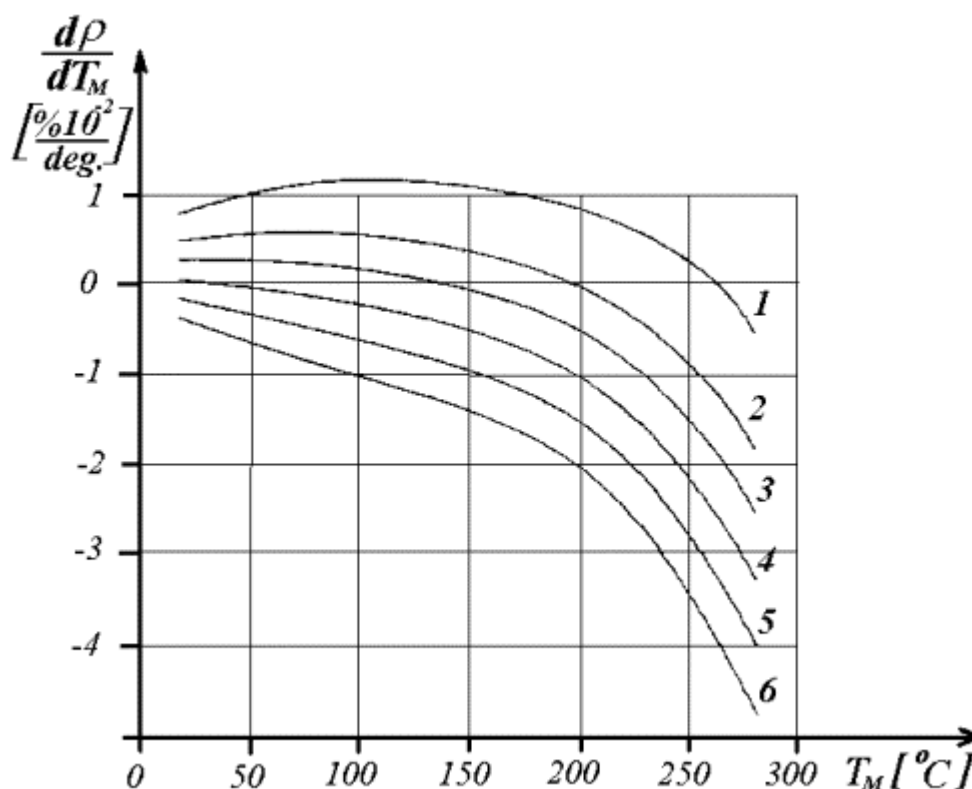
$$\alpha'_{H_2O} = \frac{\partial \rho}{\partial t_{H_2O}}; \quad \alpha'_{UO_2} = \frac{\partial \rho}{\partial t_{UO_2}} \quad (4.5)$$

kde:  $\alpha'_{H_2O}$  je teplotní koeficient reaktivity moderátoru (chladiva)

$\alpha'_{UO_2}$  je teplotní koeficient reaktivity paliva

Hodnota těchto koeficientů se v průběhu kampaně mění. Má na to vliv koncentrace moderátoru, vyhořívání paliva, poloha regulačních tyčí a samozřejmě teplota chladiva. Průběh závislost koeficientu reaktivity na teplotě je znázorněn na obrázku 5-1. Růst absolutní hodnoty teplotního koeficientu během kampaně je dán prvním kladným efektem, kdy se s poklesem koncentrace bóru ke konci kampaně zvyšuje absolutní hodnota reaktivity. Proto jsou poruchy vedoucí k rychlému snížení tlaku v hlavním parním kolektoru (dále jen HPK) nejvíce nebezpečné

právě na konci kampaně. Konkrétně u reaktorů VVER 440 pokles tlaku v HPK na hodnotu 3,6 MPa způsobí skokový pokles teploty na vstupu do reaktoru o necelých 13 °C, což má za následek kritický stav reaktoru na okamžitých neutronech. Velikost teplotního koeficientu reaktivity chladiva je u VVER 440 při výkonovém provozu v rozmezí  $-3,0 \times 10^{-2}$  až  $-5,5 \times 10^{-2} \text{ %/K}$  [4].



Obrázek 4-1: Závislost koeficientu reaktivity na teplotě [15]

Kde koncentrace kyseliny borité v chladivu je:

- |                            |                           |
|----------------------------|---------------------------|
| 1: $c_B = 12 \text{ g/kg}$ | 4: $c_B = 4 \text{ g/kg}$ |
| 2: $c_B = 8 \text{ g/kg}$  | 5: $c_B = 2 \text{ g/kg}$ |
| 3: $c_B = 6 \text{ g/kg}$  | 6: $c_B = 0 \text{ g/kg}$ |

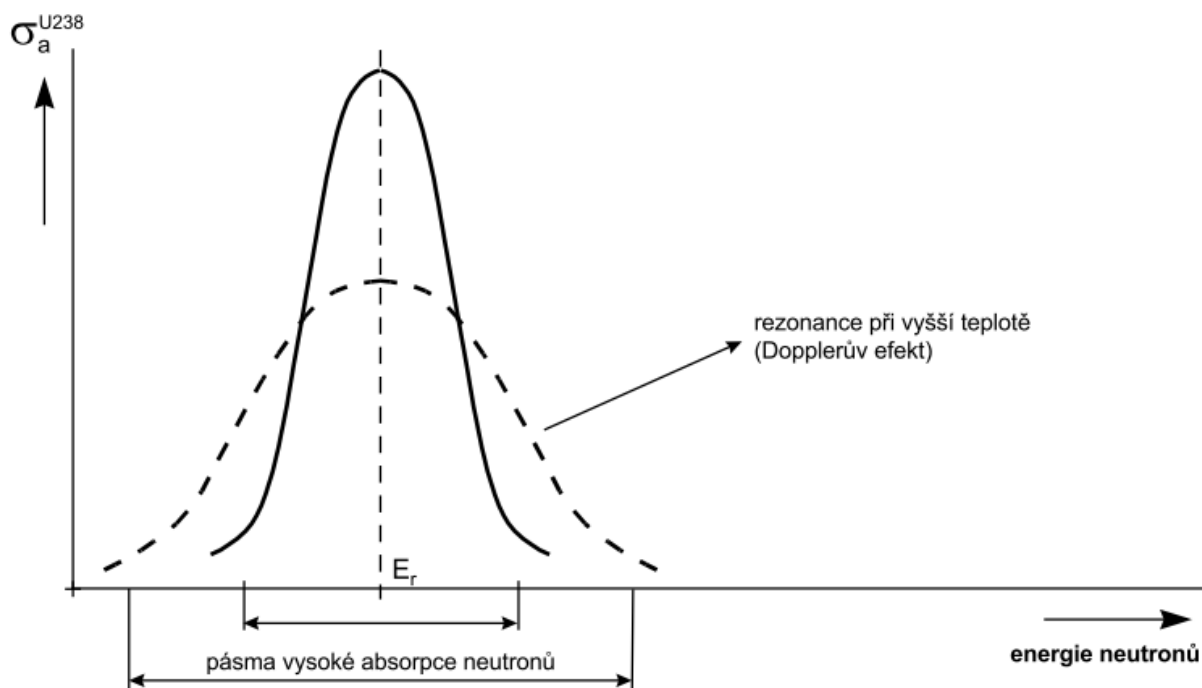
#### 4.2.2 Výkonový koeficient reaktivity

Při některých energiích je pravděpodobnost absorpce zpomalujících se neutronů na jádrech  $^{238}\text{U}$  velmi vysoká. Tyto energie se nazývají rezonanční a při zvýšení teploty paliva se jádra  $^{238}\text{U}$  pohybují rychleji a pro přilétající neutrony jsou méně zasažitelná. Maximální hodnota rezonančního pásma pro záchyt neutronů se sice sníží, ale rezonanční pásmo se rozšíří, což má v důsledku za následek zvýšení celkového počtu zachycených neutronů (viz Obr. 5-2). Tento jev se nazývá Dopplerův efekt a je v podstatě teplotním koeficientem reaktivity paliva, neboť

ho způsobuje zvýšení jeho teploty. Poněvadž však teplotu paliva nelze měřit, vztahujeme tuto změnu reaktivity právě k výkonu reaktoru [14].

Změna reaktivity je tedy charakterizována výkonovým koeficientem, definujícím změnu reaktivity při změně výkonu reaktoru

$$\alpha_N = \frac{\partial \rho}{\partial N} \quad (4.6)$$



Obrázek 4-2: Vliv Dopplerova efektu při zvýšení teploty paliva [4]

Tak jako u teplotního koeficientu, je nutnou podmínkou pro samoregulaci reaktoru záporná hodnota výkonového koeficientu reaktivity. Poklesem výkonu  $\Delta N$  při  $\alpha_N < 0$  je uvolněna reaktivita [14]

$$\Delta \rho_N = \int_{\Delta N} \alpha_N dN = \overline{\alpha_N} \cdot \Delta N \quad (4.7)$$

kde  $\overline{\alpha_N}$  je střední hodnota výkonového koeficientu reaktivity

$\Delta N$  je výkonový interval

U tlakovodního reaktoru VVER 440 se hodnota výkonového koeficientu reaktivity pohybuje okolo  $2 \times 10^{-2} \text{ \%}/\%N_{\text{nom}}$  a v průběhu kampaně se téměř nemění [4].

### 4.2.3 Tlakový koeficient reaktivity

Tlakový koeficient reaktivity má u reaktorů moderovaných vodou malý význam, neboť voda je málo stlačitelná. Je definován změnou reaktivity při změně tlaku chladiva v I.O.

$$\alpha_p = \frac{\partial \rho}{\partial p} \quad (4.8)$$

Tlakový koeficient reaktivity je na rozdíl od těch předešlých kladný, avšak při vyšší koncentraci absorbátorů v chladivu může přejít až do malých záporných hodnot. Při prudkém zvýšení tlaku tak může dojít k uvolnění reaktivity, která by byla dostatečná pro nekontrolovatelný rozběh reaktoru. Jde o jeden z důvodů omezení rychlosti nárůstu tlaku chladiva v primárním okruhu. U reaktorů VVER 440 se pro nevýkonové stavy na začátku kampaně při teplotě 240 °C uvádí vliv tlakového koeficientu reaktivity  $9 \times 10^{-3} \text{ %/MPa}$  a na konci kampaně pro nulovou koncentraci kyseliny borité v chladivu a nominální výkon  $4,5 \times 10^{-2} \text{ %/MPa}$ . Z těchto hodnot lze usoudit, že díky nízké koncentraci absorbátoru v chladivu na konci kampaně je vliv tlakového koeficientu podstatně vyšší [4].

### 4.2.4 Koeficient reaktivity kyseliny borité

Kompenzace přebytku reaktivity na počátku kampaně tlakovodního reaktoru VVER je zabezpečena přítomností kyseliny borité v chladivu. Koeficient reaktivity  $\text{H}_3\text{BO}_3$  v chladivu je záporný a po celou dobu kampaně takřka konstantní. U reaktorů VVER dosahuje tento koeficient přibližně hodnoty  $-0,1 \text{ kg/g}$  ( $-1 \text{ %kg/g}$ )

$$\alpha_c = \frac{\partial \rho}{\partial c} \quad (4.9)$$

Tabulka 4-1: Orientační hodnoty koeficientů reaktivity pro reaktory VVER 440 [14]

koeficient reaktivity	Rozměr	A	B	C	D
$\alpha_{\text{H}_2\text{O}} \cdot 10^4$	1/K	0,0469	-0,2676	-1,1349	-4,9152
$\alpha_{\text{UO}_2} \cdot 10^4$	1/K	-0,3787	-0,3529	-0,323	-0,2722
$\alpha_N \cdot 10^4$	1/MW <sub>t</sub>	-	-	-0,1348	-0,1603
$\alpha_c$	kg/g	-0,1133	-0,1	-0,0975	-0,1048

Uvedené hodnoty jsou pro následující režimy:

A:  $t = 20^\circ\text{C}$ ,  $N_R = 0$ , reaktor bez otravy

B:  $t = 285^\circ\text{C}$ ,  $N_R = 0$ , reaktor bez otravy

C:  $N_R = 10 \text{ %}$ , otrava reaktoru xenonem (začátek kampaně)

D: Poloha regulační skupiny kazet optimální (konec kampaně)

### 4.3 Dosažení minimálního kontrolovaného výkonu

Minimálního kontrolovaného výkonu (dále jen MKV) můžeme dosáhnout zvedáním regulačních kazet při konstantní koncentraci kyseliny borité nebo naopak ředěním koncentrace  $H_3BO_3$  při konstantní poloze HRK. Druhý postup je obvyklý při odstávkách delších jak 24 hodin, kdy je třeba zajistit v chladivu odstavnou koncentraci  $H_3BO_3$  [2].

V podkritickém reaktoru jsou také zdroje neutronů a dochází tedy ke štěpení jader. Mezi hlavní zdroje neutronů v tomto stavu patří [2]:

- $(\gamma, n)$  reakce na některých jádrech
- rozpadající se produkty předchozích štěpení
- kosmické záření a jeho insánírakce s jádru atomů
- transurany (některé se štěpí samovolně, jiné jsou štěpitelné neutrony)

Všechny tyto reakce vytvářejí v AZ poměrně silný zdroj neutronů. V podkritickém reaktoru je v AZ dostatečné množství absorbátorů, které potlačuje násobení neutronů. Po snížení koncentrace absorbátorů se začínají v reaktoru množit neutrony a dosahuje se kritičnosti reaktoru.

### 4.4 Náhřev primárního okruhu

Jaderný blok se na MKV dostane po přechodu z režimu 6 až na režim 2. Proces náhřevu primárního okruhu VVER 440 by se dal zjednodušeně rozdělit do několika kroků [8]:

- 1) *Natlakování na 2,5 MPa* – Pomocí dusíku v kompenzátoru objemu se natlakuje primární okruh na 2,5 MPa (blokace HCC pod 1MPa).
- 2) *Natápění z II.O.* – Parou z libovolného bloku přes kolektor 0,7 MPa se natápí I.O. přirozenou cirkulací na cca 130 °C.
- 3) *Náběh HCC* – Spuštění pěti HCC na cirkulaci chladiva. Díky tepelným ztrátám je přídavek tepla do chladiva cca 5 °C/hod. Probíhá náhřev teploty tlakové nádoby reaktoru nad teplotu křehkého lomu kovu pro vykonání tlakové zkoušky I.O.
- 4) *Provedení tlakové zkoušky I.O.*
- 5) *Vytvoření parního polštáře v KO* - dohřev I.O. na teplotu 200 °C a náhřev KO do stavu sytosti (325 °C).
- 6) *Spuštění 6. HCC* – Při dosažení teploty větší jak 200 °C je zapnuto také poslední, tedy šesté HCC. Po jeho najetí je možno zahájit dosahování MKV.
- 7) *Dosahování MKV* - po odstávce vždy snižováním koncentrace kyseliny borité. Z počátku nejprve velkou bórovou výměnou (přívod čistého kondenzátu v množství 35 t/hod) a po dosažení reaktivity -1 % od kritického stavu je zahájena tzv. malá bórová výměna (přívod čistého kondenzátu s průtokem 8 t/hod)
- 8) *Dohřev I.O. na 260 °C* – Provádí se zvýšením výkonu reaktoru na 0,5% nominálního.

Při náhřevu nebo dochlazování jaderného bloku musí být dodrženy některé trendy změn parametrů dané limitami a podmínkami bezpečného provozu. Trendy pro jaderné bloky Elektrárny Dukovany jsou uvedeny v tabulce 4-2.

Tabulka 4-2: Dovolené trendy změn parametrů [2]

Veličina	název	provozní hodnota	rozměr	parametr dle limitů a podmínek
rychlost	ohřevu I.O.	max. 15	°C/hod	max. 20
	ohřevu KO	max. 25	°C/hod	max. 40
	dochlazování I.O.	max. 15	°C/hod	max. 30
	ochlazování KO	max. 25	°C/hod	max. 30
	ohřevu betonové šachty reaktoru	max. 10	°C/hod	
	ohřevu parovodů TG	max. 6	°C/min	
	ohřevu NTO a VTO do teploty 60 °C	max. 3	°C/min	
	ohřevu NTO a VTO při teplotě 60 - 100 °C	max. 2	°C/min	
	změny tlaku I.O.	max. 1	MPa/min	Max. 2,94
	plnění AZ roztokem H3BO3	max. 3	cm/min	
	změny výkonu reaktoru při nehavarijních režimech	max. 3	%/min	max. 3

## 4.5 Náhřev reaktorového bloku bez externího zdroje páry

V předchozí podkapitole byla uvedena potřeba externího zdroje páry při natápění I.O. ze strany II.O přes kolektor páry 0,7 MPa. Absence tohoto kroku při náhřevu bloku po odstávce sice teoreticky možná je, neboť máme zdroje tepla přímo v I.O. (EOKO, tepelné ztráty HCČ a zbytkový výkon), avšak z důvodu životnosti a hlavně bezpečnosti provozu jej nelze použít.

Pára z kolektoru 0,7 MPa nahřívá nízkotlakou regeneraci (NTO) a bez její absence by se do NN doplňoval studený kondenzát – tepelný šok. Dalším problémem by byl tlakový ráz – bez topení napájecí nádrže se v ní nepodaří udržet potřebný tlak. V neposlední řadě by absence externího zdroje páry podstatně prodloužila celý proces náběhu. Z hlediska ekonomického by prodloužení náhřevu a tedy i odstávky způsobilo značnou finanční ztrátu. Prodloužení odstávky o jednu hodinu představuje:

$$N_{hod} = P \cdot A \cdot B \quad (4.10)$$

kde:  $N_{hod}$  je celková ztráta za hodinu  
 $P$  je elektrický výkon bloku  
 $A$  je aktuální cena 1 MWh v eurech  
 $B$  kurz koruny vůči euru

uvažuje se:

$P$	jednoho bloku snížený o vlastní spotřebu:	$500 \text{ MW} - 26 \text{ MW} = \underline{474 \text{ MW}}$
$A$	uvažovaná cena 1MWh na burze:	25 EUR / MWh
$B$	uvažovaný kurz EUR/KČ:	1EUR = 27 KČ

Po dosazení do vztahu 4.10:

$$N_{hod} = 474 \cdot 25 \cdot 27 \approx 320\,000 \text{ Kč} / \text{hod}$$

Prodloužení náhřevu o den tedy představuje finanční ztrátu přibližně 7,7 mil. korun.

## 4.6 Zvyšování výkonu bloku

Při zvyšování výkonu bloku v momentu najíždění z odstávky je nutná souhra operátorů primárního a sekundárního okruhu. Zvyšování výkonu reaktoru se provádí dle potřeb II.O. Postupné zvyšování výkonu bloku lze rozdělit do několika kroků [14]:

- 1) Dosažení maximálního výkonu, který lze odvést technologickým kondenzátorem (většinou 3 %  $N_{nom}$ ) při současném prohřevu parovodů až po rychlozávěrný ventil TG (při nominálním tlaku v HPK).
- 2) Převedení parního výkonu z technologického kondenzátoru na jednu zvolenou stranu přepouštěcí stanice do kondenzátoru (dále jen PS-K) z TG a zapnutí PS-K do režimu automatického udržování tlaku v HPK.
- 3) Zvýšení výkonu reaktoru na 15 – 20 %  $N_{nom}$  (tlak v HPK udržuje automaticky PS-K)
- 4) Při konstantním výkonu reaktoru se provede roztočení a prohřev prvního TG, jeho postupné vyvedení na otáčky a provedení všech nezbytných zkoušek TG. Zvyšující se spotřeba páry v TG je automaticky eliminována přivíráním PS-K.
- 5) Přifázování TG, rychlé nabrání základního zatížení a postupné zvyšování zatížení tak, aby se PS-K úplně uzavřela. Tlak páry v HPK se v dalším období reguluje turbínovým regulátorem.
- 6) Postupné zvýšení výkonu pracujícího TG na hodnotu rovnající se minimálně celé vlastní elektrické spotřebě bloku zvýšené o cca 25 MW (rezerva parního výkonu pro roztočení, přifázování a základní zatížení druhého TG) při současném zvyšování výkonu reaktoru tak, aby byl udržován konstantní tlak v HPK.
- 7) Při konstantním výkonu reaktoru navolit předtlakovou regulaci pracujícího TG a provést roztočení, prohřev, vyvedení na otáčky, přifázování a základní zatížení druhého TG tak jako v bodě 4 a 5. Zvyšující se spotřeba páry pro druhý TG je automaticky eliminována snižováním výkonu prvního TG pracujícího v předtlakové regulaci.

## 5 ZDROJE A SPOTŘEBIČE PÁRY

Sytá pára se vyrábí v jednotlivých parogenerátorech (dále jen PG) a přes parovody je distribuována do hlavního parního kolektoru (dále jen HPK). Do jedné poloviny HPK je přivedena pára z lichých PG (1, 3, 5) a do druhé poloviny ze sudých PG (2, 4, 6). Parametry ostré páry v HPK jsou 4,4 MPa a 256 °C. Z každé poloviny HPK jsou navíc vyvedeny potrubní trasy na redukční stanici dochlazování (dále jen RSD) a redukční stanici (dále jen RS), která slouží k zásobování kolektoru vlastní spotřeby (4,4/0,7 MPa). RSD i RS jsou za nominální provozu uzavřeny, neboť kolektor páry 0,7 MPa je zásobován z odběrů na turbíně. Kolektor 0,7 MPa lze přímo propojit s kolektorem 0,7 MPa sousedního bloku. Tohoto propojení se využívá v situacích nízkého výkonu reaktoru, tedy při odstavování, náběhu nebo poruchových stavech [2].

Při průchodu páry turbínou jsou z jednotlivých vysokotlakých (dále jen VT) a nízkotlakých (dále jen NT) částí odebírané různé množství páry o rozdílných parametrech. Tyto odběry jsou neregulovatelné a jsou názorně uvedeny včetně parametrů a využití v tabulce 5-1. Schématické znázornění jednotlivých odběrů je ve schématu sekundárního okruhu, viz Obrázek 6-1.

Tabulka 5-1: Přehled odběrů páry z turbíny [6]

Místo odběru	Číslo odběru	Teplota [°C] <sup>6</sup>	Tlak [MPa] <sup>7</sup>	Výkon [t/hod]	Spotřebič
Z VT dílu	VIII.	232	2,9050	174	VTO 2, SPP, ZRAO
	VII.	196	1,4220	118	VTO 1, SPP, kol. 0,7MPa
	VI.	181	1,0186	36,77	Kol. 0,7 MPa, ZRAO, VS
Propojovací potrubí	V.	152	0,4961	58,65	NTO 5
Z 1. NT dílu	IV.	152	0,2275	34,28	NTO 4, VS
Z 2. NT dílu	III.	104	0,1160	32	NTO 3
Z 1. NT dílu	II.	82	0,0505	36	NTO 2
Z 1. a 2. NT dílu	I.	58	0,0180	16,43	NTO 1

Tabulka 5-2: Ostatní spotřebiče páry v areálu JE Dukovany [9]

Užití	Množství [t/den]	
	Léto	Zima
Vytápění AB, PB I/II, Kordy	0	200
Stanice zdroje chladu	500	300
Zpracování radioaktivních odpadů	14	14
Chemická úpravna vody	0	2
Vyhřívání nádrží demivody	0	Zanedbatelné
Prádelna	Zanedbatelné	Zanedbatelné

<sup>6</sup> Teplota se při nominálním provozu může nepatrně lišit od uvedených teplot v tabulce

<sup>7</sup> Tlak se při nominálním provozu může nepatrně lišit od uvedených tlaků v tabulce

## 6 ANALÝZA TOKU MÉDIA A ENERGIE ZE SOUSEDNÍHO BLOKU

V této kapitole bude provedena analýza náběvu reaktorového bloku č. 3 Jaderné elektrárny Dukovany (dále jen RB3) s pomocí sousedního reaktorového bloku č. 4 (dále jen RB4). Analýza zahrnuje celý přechod od režimu R5 až po provoz na sníženém výkonu. Časový harmonogram celého náběhu je přehledně uveden v tabulce 6-1.

Tabulka 6-1: Harmonogram náběhu RB3 z prosince 2015 [12]

Datum	Čas	Stav
24.12.2015	04:24	R5 (uzavřeno odvodušnění)
<b>24.12.2015</b>	<b>14:00</b>	<b>Zahájení analýzy*</b>
24.12.2015	23:47	Najetí HCČ 1,3,5,4,6
25.12.2015	02:20	R4 (90 °C)
25.12.2015	11:08	Tlaková zkouška 13,7 MPa při cca 120 °C
25.12.2015	18:18	Pevnostní zkouška na II.O. při 7,65 MPa
26.12.2015	15:04	Vytvoření parního polštáře KO
26.12.2015	19:03	Na RB4 zvýšen tlak v kol. 0,7 MPa z 0,63 na 0,69 MPa
26.12.2015	20:19	R3 (180 °C)
27.12.2015	21:20	Dohřev KO do stavu sytosti (325 °C)
27.12.2015	01:09	Najetí posledního HCČ č. 5 při 200 °C
27.12.2015	06:15	Náběh snižováním koncentrace kyseliny borité
27.12.2015	09:11	R2
27.12.2015	10:18	MKV při 220 °C
27.12.2015	14:59	$N_{re} = 0,5 \%$
27.12.2015	17:57	Dohřev na 260 °C
27.12.2015	20:42	R1 ( $N_{re} > 2 \%$ )
28.12.2015	01:40	Oddělení kolektoru 0,7 MPa od RB4
28.12.2015	01:53	$N_{re} = 15 \%$
<b>28.12.2015</b>	<b>03:00</b>	<b>Ukončení analýzy</b>

\*Čas zahájení analýzy je považován jako  $t_0$  (24.12.2015 14:00 = 0 s)

Dne 18.9.2015 bylo provedeno neplánové odstavení RB3 pro kontrolu svarů. Blok se v té době nacházel v 29. palivovém cyklu při 182. efektivním dni kampaně. Pro výměnu paliva byl opětovně odstaven až 22.4.2016, kdy byl reaktor na 298. efektivním dni kampaně.

Data byla převzata z krátkodobého, velmi podrobného archivu Jaderné elektrárny Dukovany, tzv. archivu ARCA, který je zpětně k dispozici až 6 měsíců. Analogové hodnoty se poté ukládají v dlouhodobém archivu (COPARC). Seznam převzatých dat včetně proměnné, popisu a rozsahu měření je uveden v tabulce 6-2 a 6-3. Naměřená data jsou zaznamenána v intervalu 10 sekund, nicméně pro větší přehlednost jsou do přílohy zredukována na krok po 50 sekundách.

Tabulka 6-2: Seznam analyzovaných dat, část 1.

Proměnná RB3	Proměnná RB4	Popis	Min	Max	Jednotka
3EAPcim31	4EAPcim41	P_TG1	0	300	MW
3EAPcim32	4EAPcim42	P_TG2	0	300	MW
3IR5101	4IR5101	$T_{Sreaktor}$	0	1260	°C
3MA0932	4MA0932	dP na HCC1	0	1	MPa
3MA0935	4MA0935	dP na HCC2	0	1	MPa
3MA0938	4MA0938	dP na HCC3	0	1	MPa
3MA0941	4MA0941	dP na HCC4	0	1	MPa
3MA0944	4MA0944	dP na HCC5	0	1	MPa
3MA0947	4MA0947	dP na HCC6	0	1	MPa
3MA4187	4MA4187	D1 Tepelný výkon	0	110	% $N_{nom}$
3MA4188	4MA4188	D2 Tepelný výkon	0	110	% $N_{nom}$
3MA4189	4MA4189	D3 Tepelný výkon	0	110	% $N_{nom}$
3MA8007	4MA8007	$T_{HVS1}$	0	400	°C
3MA8008	4MA8008	$T_{HVS2}$	0	400	°C
3MA8009	4MA8009	$T_{HVS3}$	0	400	°C
3MA8010	4MA8010	$T_{HVS4}$	0	400	°C
3MA8011	4MA8011	$T_{HVS5}$	0	400	°C
3MA8012	4MA8012	$T_{HVS6}$	0	400	°C
3MA8013	4MA8013	$T_{SVS1}$	0	400	°C
3MA8014	4MA8014	$T_{SVS2}$	0	400	°C
3MA8015	4MA8015	$T_{SVS3}$	0	400	°C
3MA8016	4MA8016	$T_{SVS4}$	0	400	°C
3MA8017	4MA8017	$T_{SVS5}$	0	400	°C
3MA8018	4MA8018	$T_{SVS6}$	0	400	°C
3MA8714	4MA8714	$\rho_{HPK1,3,5}$	0	6	MPa
3MA8715	4MA8715	$\rho_{HPK2,4,6}$	0	6	MPa
3MA8723	4MA8723	Výkon1_avg	0	120	% $N_{nom}$
3MA8724	4MA8724	Výkon2_avg	0	120	% $N_{nom}$
3QA2759	4QA2759	$F_{PÁRY}$ Z PG1	0	550	t/h
3QA2760	4QA2760	$F_{PÁRY}$ Z PG3	0	550	t/h
3QA2761	4QA2761	$F_{PÁRY}$ Z PG5	0	550	t/h
3QA2765	4QA2765	$F_{PÁRY}$ Z PG2	0	550	t/h
3QA2766	4QA2766	$F_{PÁRY}$ Z PG4	0	550	t/h
3QA2767	4QA2767	$F_{PÁRY}$ Z PG6	0	550	t/h
3UA0453	4UA0453	$F_{PÁRY}$ PŘED TG42_A	0	800	t/h
3UA0454	4UA0454	$F_{PÁRY}$ PŘED TG42_B	0	800	t/h
3UA0462	4UA2053	$F_{PÁRY}$ PŘED TG41_A	0	800	t/h
3UA1107	4UA2054	$F_{PÁRY}$ PŘED TG41_B	0	800	t/h

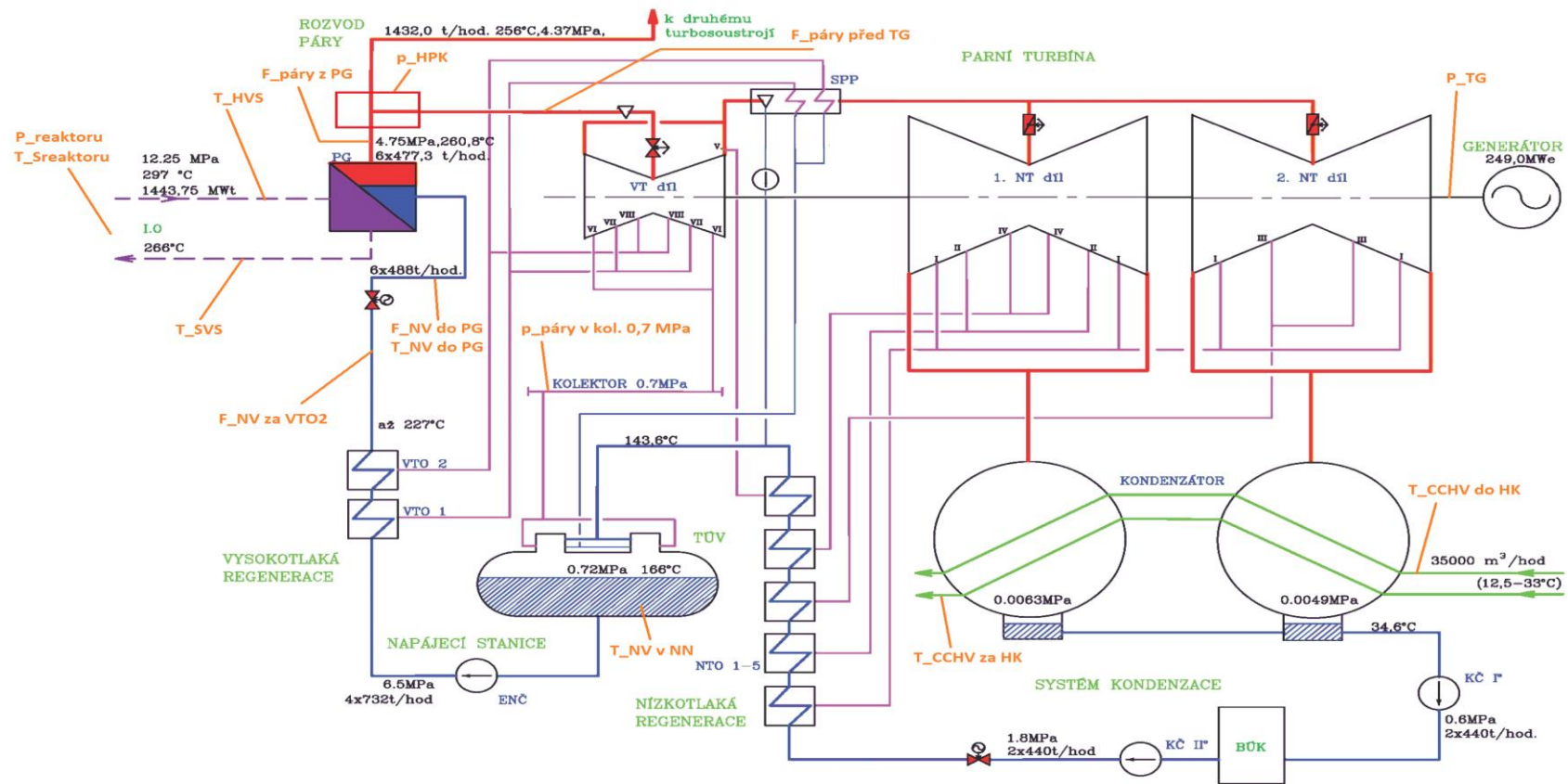
Tabulka 6-3: Seznam analyzovaných dat, část 2.

Proměnná RB3	Proměnná RB4	Popis	Min	Max	Jednotka
3UA1110	4UA0462	$F_{NV}$ ZA VTO2 - TG42	0	1600	t/h
3UA1514	4UA2062	$F_{NV}$ ZA VTO2 - TG41	0	1600	t/h
3UA1515	4UA1107	$T_{NV}$ V NN6 (NN8)	0	200	°C
3UA1516	4UA1110	$T_{NV}$ V NN5 (NN7)	0	200	°C
3UA1517	4UA1514	$T_{1CCHV}$ do HK	0	50	°C
3UA2053	4UA1515	$T_{2CCHV}$ do HK	0	50	°C
3UA2054	4UA1516	$T_{1CCHV}$ za HK	0	50	°C
3UA2062	4UA1517	$T_{2CCHV}$ za HK	0	50	°C
3UA2444	4UA2444	$p_{PÁRY}$ V KOLEKTORU 0,7MPa-TG42	0	1,2	MPa
3UA2445	4UA2445	$p_{PÁRY}$ V KOLEKTORU 0,7MPa-TG41	0	1,2	MPa
3UA3074	4UA3074	$P_{TG1\_analog}$	-28,58	285,8	MW
3UA3146	4UA3146	$P_{TG2\_analog}$	-28,58	285,8	MW
3UA4070	4UA4070	$F_{NV}$ DO PG 1	0	200	t/h
3UA4071	4UA4071	$F_{NV}$ DO PG 2	0	200	t/h
3UA4072	4UA4072	$F_{NV}$ DO PG 3	0	200	t/h
3UA4073	4UA4073	$F_{NV}$ DO PG 4	0	200	t/h
3UA4074	4UA4074	$F_{NV}$ DO PG 5	0	200	t/h
3UA4075	4UA4075	$F_{NV}$ DO PG 6	0	200	t/h
3UA4076	4UA4076	$T_{NV}$ DO PG1	0	400	°C
3UA4077	4UA4077	$T_{NV}$ DO PG2	0	400	°C
3UA4100	4UA4100	$T_{NV}$ DO PG3	0	400	°C
3UA4101	4UA4101	$T_{NV}$ DO PG4	0	400	°C
3UA4102	4UA4102	$T_{NV}$ DO PG5	0	400	°C
3UA4103	4UA4103	$T_{NV}$ DO PG6	0	400	°C

Mezi nejdůležitější fyzikální parametry měřené uvnitř reaktoru patří neutronový tok a rychlost jeho nárůstu (perioda), ohřev na reaktoru, ohřevy na kazetách, výstupní teploty z kazet, vstupní teplota do reaktoru, radiální proutkový koeficient nerovnoměrnosti rozložení neutronového toku, lineární výkon proutku, koncentrace kyseliny borité a poloha HRK [2].

Při spouštění jsou logicky nejdůležitější parametry neutronový tok, perioda (odpovídá rychlosti a velikosti vnášení kladné reaktivity) a poloha regulačních kazet. Při odstávkách je zcela jednoznačně nejdůležitějším hlídaným parametrem hodnota odstavné koncentrace, která musí být bezpodmínečně dodržena s ohledem na jadernou bezpečnost. Při výkonovém provozu přebírají důležitost ohřevy a teploty na kazetách společně s proutkovými koeficienty nevyrovnání a lineárními výkony proutků, hustota neutronového toku, perioda a poloha HRK. Při všech režimech musí být parametry dodrženy v předepsaných mezích a při přechodových procesech se k nim navíc přidává i rychlost změn neutronového toku (perioda) [2].

V následujícím schématu na obrázku 6-1 je znázorněn sekundární okruh EDU včetně popisu míst, kde byly jednotlivé naměřené veličiny zaznamenány. Toto schéma je analogicky stejné pro oba analyzované bloky.



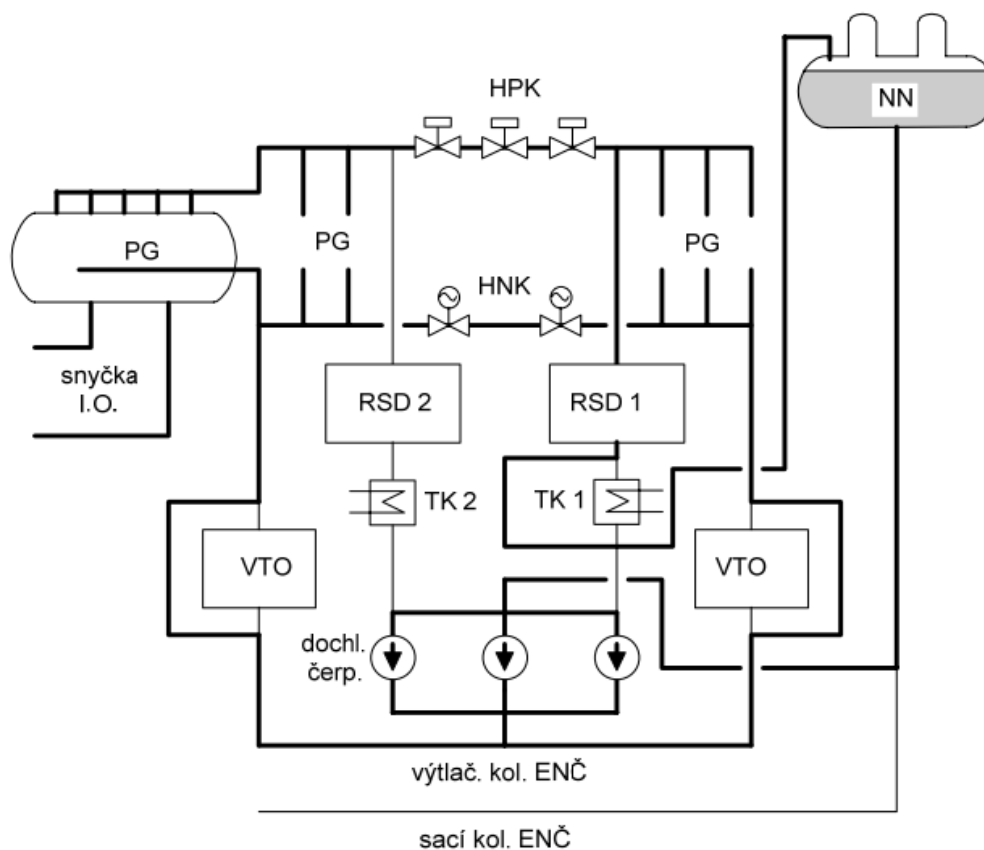
Obrázek 6-1: Schématické znázornění II.O. s umístěním měřících členů , modifikováno [6]

## 6.1 Přechod RB3 z režimu R6 do režimu R5

V této fázi přechodu byla provedena příprava zařízení primárního a sekundárního okruhu nutná pro zahájení náhřevu I.O. nad teplotu křehkého lomu kovu tlakové nádoby reaktoru. Všechny chladicí smyčky jsou připojeny k reaktoru, jsou otevřeny jednotlivé hlavní uzavírací armatury a odvod zbytkového tepla z I.O. je prováděn v režimu přirozené cirkulace. Na II.O. je v provozu systém dochlazování. V tomto přechodu také probíhá tlaková zkouška za studena (2,5 MPa) [12].

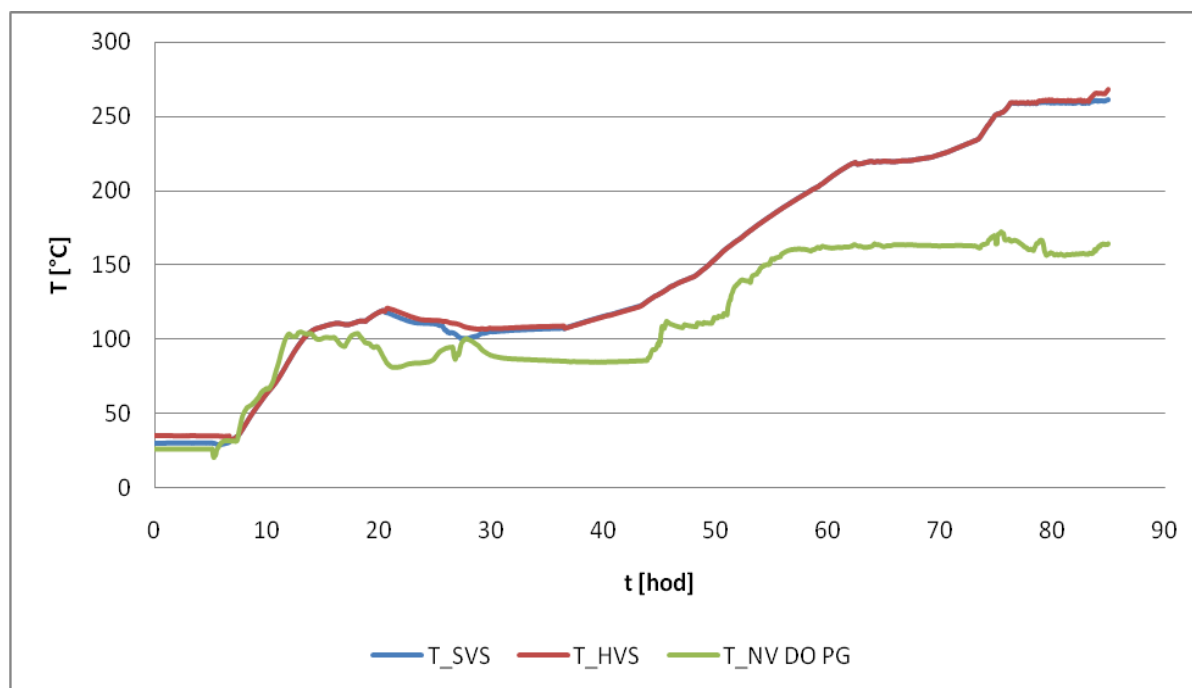
## 6.2 Přechod RB3 z režimu R5 do režimu R4

Po vykonání tlakových zkoušek za studena pokračuje RB3 náhřevem I.O. nad teplotu křehkého lomu tlakové nádoby reaktoru. Samotný přechod nastává při dosažení teploty I.O. nad teplotu 90 °C. Náhřev se provádí pomocí HCČ, elektroohříváků kompenzátoru objemu a pro zvýšení rychlosti náhřevu se využívá i dochlazovací okruh II.O. Zde se technologický kondenzátor (dále jen TK) zapojený do okruhu nahradí napájecí nádrž (dále jen NN). V NN se provádí náhřev kondenzátu na teplotu max. 150 °C. Celá trasa náhřevu je: redukční stanice dochlazování – napájecí nádrž – sání dochlazovacích čerpadel – výtlač elektronapájecího čerpadla – obtok vysokotlaké regenerace – parogenerátor – hlavní parní kolektor – redukční stanice dochlazování. Schématické znázornění náhřevu I.O. ze sekundární části je znázorněn na obrázku 6-2 [2].



Obrázek 6-2: Schéma náhřevu I.O. ze strany II.O.[2]

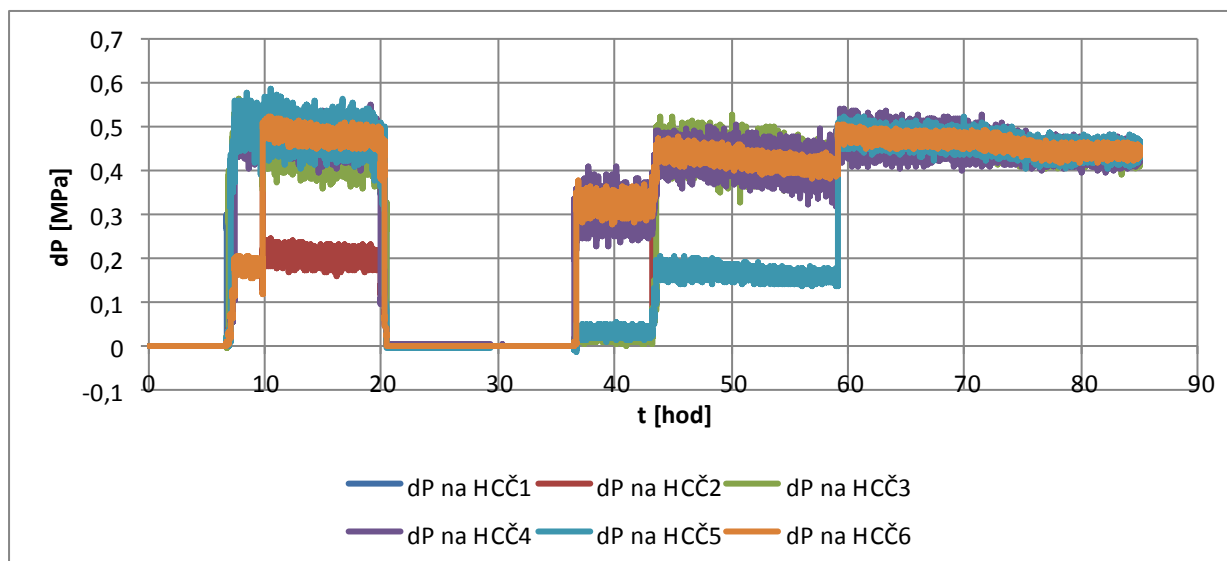
Ze záznamu teploty napájecí vody (dále jen NV) a teploty chladiva I.O. RB3 je patrné, že pouze v době od 7,3 – 13,9 hodin docházelo k náhřevu I.O. párou přepuštěnou z RB4 přes kolektor 0,7 MPa, neboť je teplota NV vyšší, než teplota I.O. K průtoku páry z RB4 do RB3 docházelo i poté, ale v menším množství. Průběhy teplot jsou vyneseny na obrázku 6-3.



Obrázek 6-3: Průběh teploty NV a teploty I.O. RB3

Operátor primárního okruhu postupně uvedl do provozu 5 HCČ, jak bylo avizováno v předchozí kapitole. Je to patrné ze záznamu  $dP^8$  na HCČ RB3, viz průběh na obrázku 6-4. Počet HCČ je v tomto režimu omezen na max. počet 5 z důvodu omezení tlakového spádu na AZ při studeném chladivu I.O. Zabráni se tak nadměrnému namáhání vnitřních vestaveb reaktoru. Zároveň nesmí být rozdíl teploty NV a I.O. vyšší než 20 °C, aby nebyl překročen dovolený trend náhřevu 15 °C/hod. Při zvýšení tlaku I.O. na hodnotu 8,0 MPa se zapínají elektromagnety pro odlehčení axiálních ložisek HCČ [2].

<sup>8</sup> Jedná se o rozdíl tlaku mezi sáním a výtlačkem HCČ.

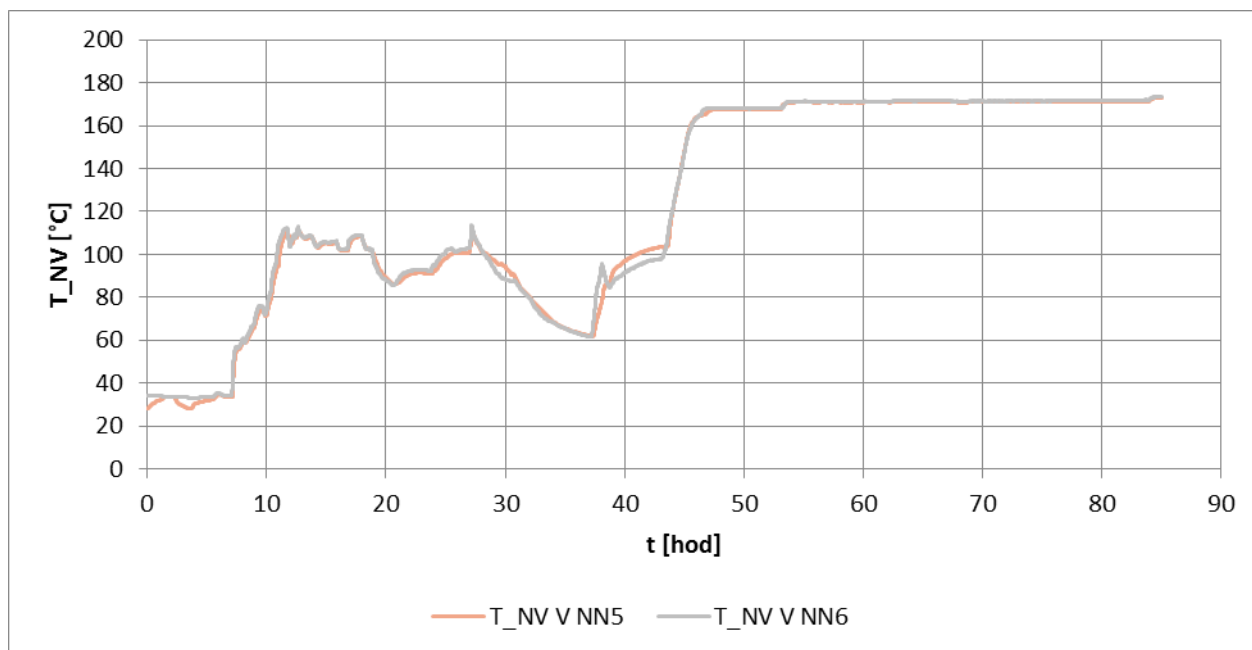


Obrázek 6-4: Záznam dP na HCČ RB3

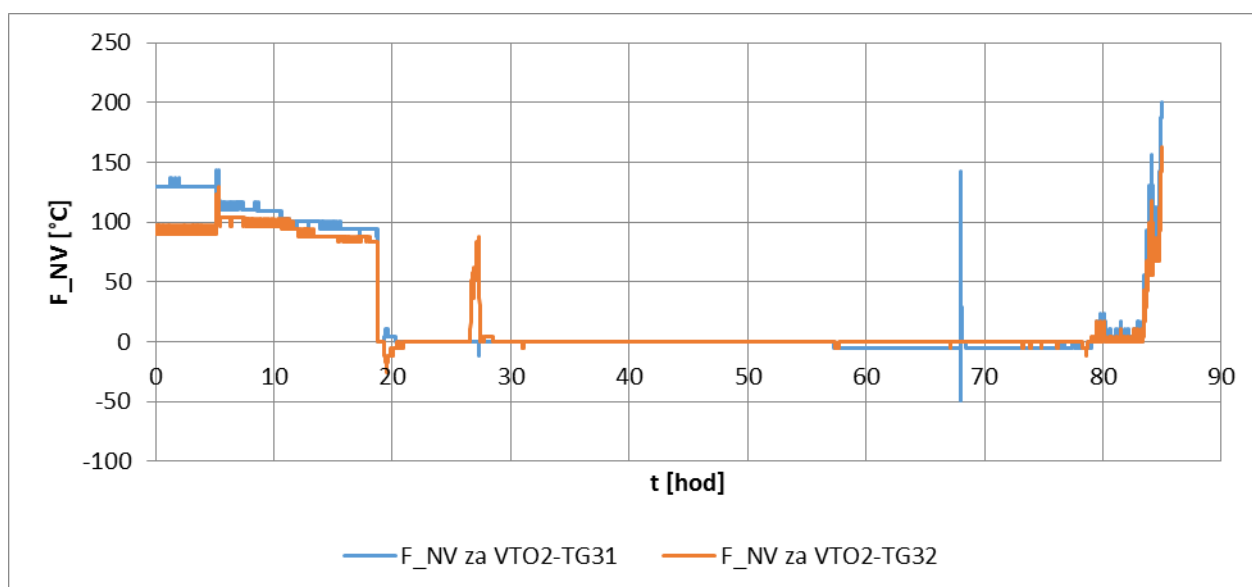
Vypnutí všech pěti HCČ v 20. hodině je z důvodu provádění tlakové zkoušky I.O. na 13,7 MPa. Jejich opětovné spuštění bylo zahájeno v 37. hodině, kdy byl zahájen dohřev I.O. na teplotu 180 °C. V čase od 20. hodiny můžeme zpozorovat mírný pokles teploty I.O. (průběh na uvedeném obrázku 6-3). Je to dáno prováděním tlakových zkoušek, při kterých nemohou být HCČ v provozu a tak dochází k přestupu tepla z I.O. na II.O. Po vykonání všech tlakových zkoušek byla nakonec teplota stabilizována na cca 105 °C pomocí dvou HCČ, což lze vidět v 37. hodině na obrázku 6-4. Pokračování náběhu do režimu 3 pomocí pěti HCČ bylo zahájeno opět v čase od cca 43. hodiny. Při opětovném náběhu musela být opět zachována podmínka symetrie spuštěných HCČ a doporučený interval mezi spuštěním jednotlivých HCČ je 10 minut.

Zároveň také docházelo k náběhu NN RB3 a byl nastaven průtok NV do parogenerátorů RB3, což je patrné z průběhu na obrázku 6-4. Potvrzuje to tak tvrzení, že docházelo k náběhu I.O. ze strany II.O.

I z průběhů na obrázku 6-5 lze vidět pokles teploty z důvodu provádění tlakových zkoušek a jejich opětovný nárůst při pokračování náběhu po jejich vykonání. Teplota napájecí vody v NN RB3 se dostala na nominální hodnotu až v cca 45. hodině, což bylo následkem zvýšení páry v kolektoru 0,7 MPa a tento průběh zvýšení je poté viditelný v podkapitole 6.3.



Obrázek 6-5: Náhřev NN5 a NN6 RB3

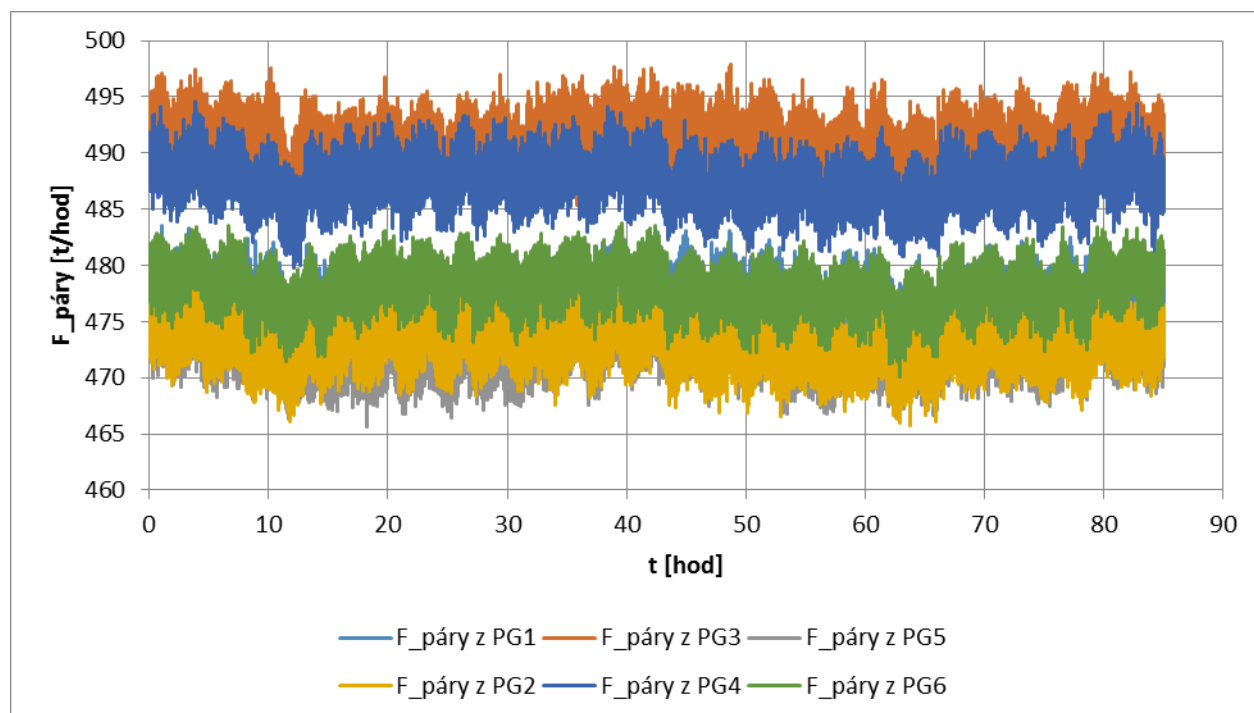


Obrázek 6-6: Průběh průtoku NV do PG RB3

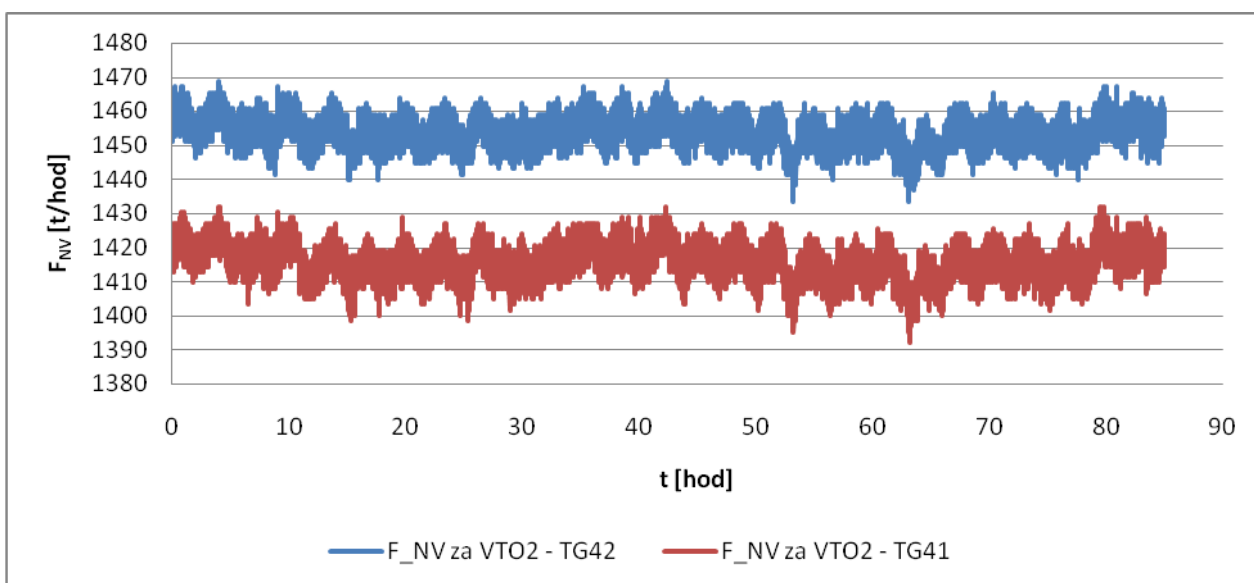
V 19. hodině lze zpozorovat z průběhu na obrázku 6-6 ukončení průtoku NV do PG. Sekundární okruh je v této době již chladnější než primární okruh a protože budou provedeny tlakové zkoušky, je tendence udržet teplotu I.O. pokud možno stabilizovanou. Krátkodobý průtok NV v cca 27. hodině je zapříčiněn provedením pevnostní tlakové zkoušky II.O. při tlaku 7,65 MPa. Tlakování je provedeno otevřením ochozu výtlačné armatury elektronapájecích čerpadel. Běžně se provádí pouze těsnostní tlaková zkouška při tlaku 5,6 MPa, zde byla provedena i pevnostní z důvodu revize svarů při odstávce [2].

### 6.3 Průtok páry z RB4 do RB3

Z průběhu na obrázku 6-7 lze vidět, že množství páry generované jednotlivými parogenerátory v RB4 se pohybují v rozmezí přibližně 470 až 495 t/hod, což odpovídá nominálnímu výkonu. Případně lze z průběhu na obrázku 6-8 vidět, že průtok NV za VTO2 byl taktéž nominální.

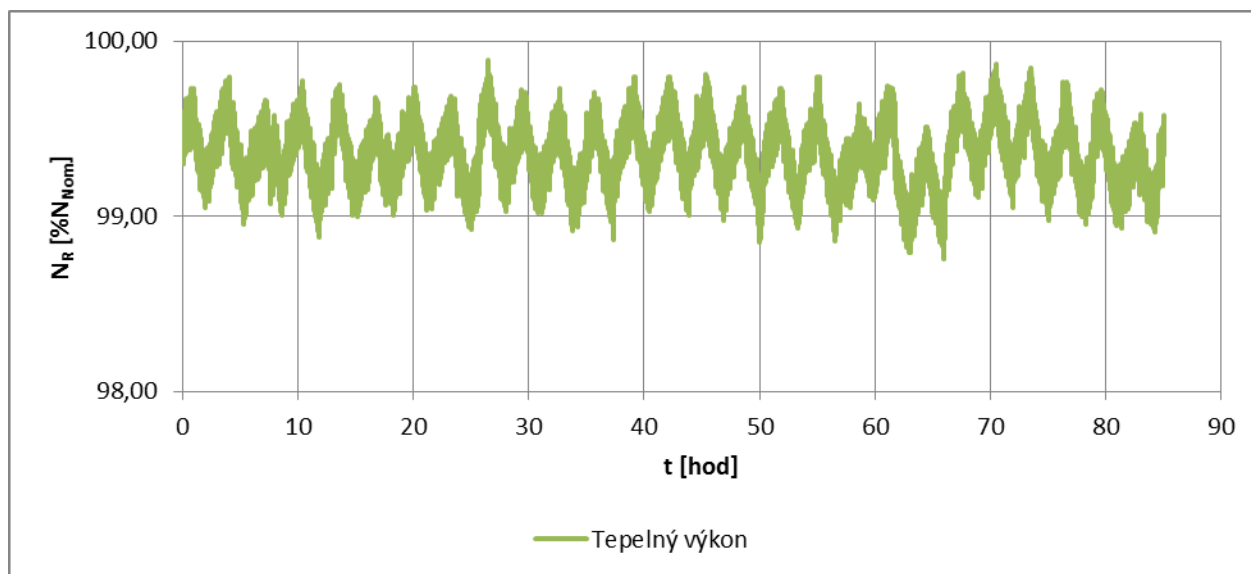


Obrázek 6-7: Množství páry generované z PG RB4



Obrázek 6-8: Průtok NV za VTO2

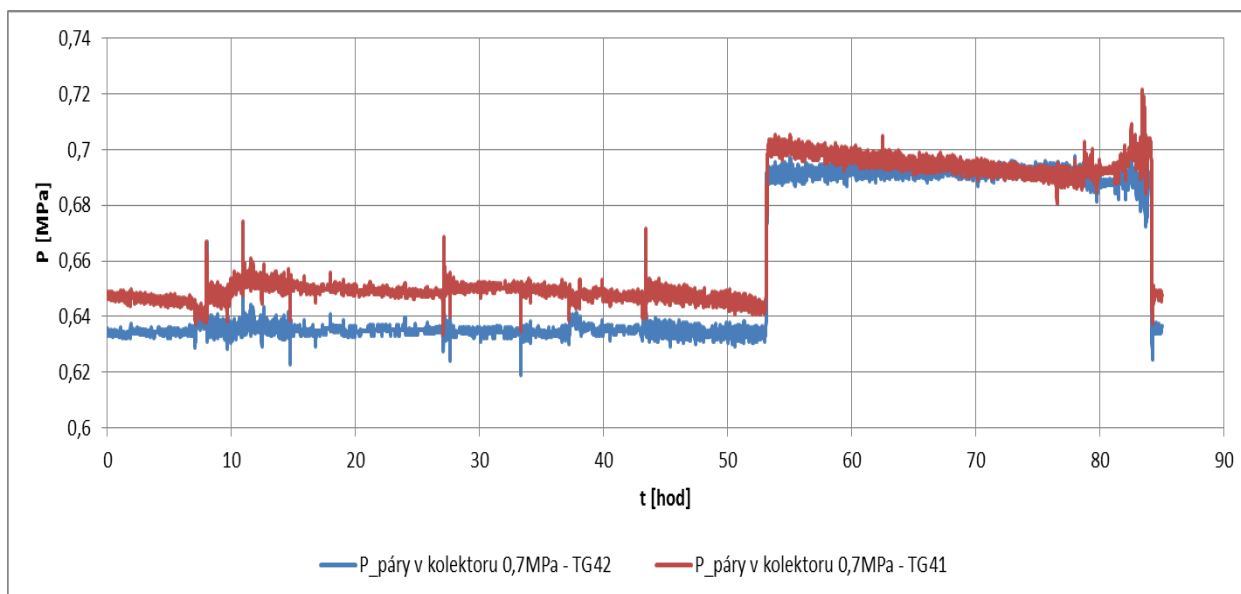
Z průběhu na obrázku 6-9 je patrné, že RB4 byl po celou dobu náhřevu sousedního bloku na nominálním výkonu, tedy množství vypočtené páry nebude ovlivněno sníženým výkonem. Mírné kolísání výkonu je způsobeno tlakovým koeficientem reaktivity, který je vysvětlen v kapitole 5 a má ke konci kampaně větší vliv. Dne 24.12.2015 byl navíc RB4 téměř na konci kampaně ( $T_{ef} = 350$  dní) [4].



Obrázek 6-9: Průběh tepelného výkonu reaktoru RB4

Pro zabezpečení nominální teploty v NN na najížděném RB3 byla na bloku, který zásoboval parou zvýšen tlak v kolektoru na cca 0,7MPa pomocí VII. odběru na turbíně RB4. Tento průběh zvýšení tlaku lze vidět po 50. hodině analýzy na obrázku 6-10. Zvyšování teploty NN na nominální hodnotu lze vidět z průběhu 6-5.

Zajištění nominální teploty v NN se provádí až po vykonání tlakových zkoušek, neboť při zjištění netěsnosti v technologii by musel být blok vychlazen z podstatně vyšší teploty, což by mělo negativní vliv na celou dobu náhřevu.



Obrázek 6-10: Průběh tlaku v kolektoru 0,7 MPa RB4

Samotná analýza průtoku páry z RB4 do RB3 byla provedena na základě průtoku napájecí vody RB4 za vysokotlakými ohříváky (dále jen VTO) a z elektrického výkonu obou TG RB4. Množství napájecí vody je během náhřevu takřka konstantní, ale výkon TG bude klesat z důvodu absence množství páry, která je přepouštěna přes kolektor 0,7 MPa do sousedního bloku.

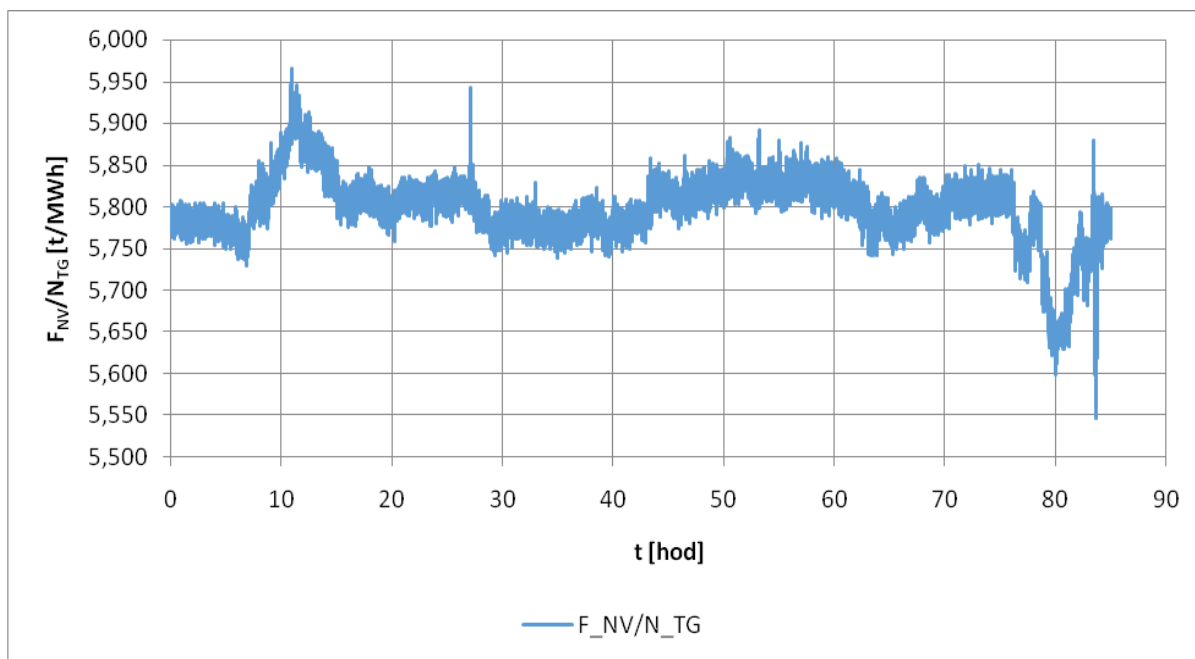
Průběh poměrné spotřeby NV na MW výkonu TG je poté vyneseno na obrázku 6-12.

Ukázka výpočtu pro čas 7,3 hod:

$$\frac{F_{NV}}{N_{TG}} = \frac{\sum F_{NV}}{\sum N_{TG}} = \frac{2884,8}{496,1} = 5,815 \text{ t / MWh} \quad (6.1)$$

Ukázka výpočtu pro čas 11,5 hod:

$$\frac{F_{NV}}{N_{TG}} = \frac{\sum F_{NV}}{\sum N_{TG}} = \frac{2852,8}{483,5} = 5,900 \text{ t / MWh} \quad (6.2)$$



Obrázek 6-11: Průběh poměrné spotřeby NV na MW výkonu

Z vypočtených hodnot, potažmo vneseného průběhu v čase je opět jasně patrné, že před zahájením náhřevu RB3 v čase okolo 7,3 hod. je poměr  $F_{NV}/N_{TG}$  cca 5,8 t/MWh. Tento poměr po zahájení náhřevu RB3 zřetelně roste až na hodnotu cca 5,9. To znamená, že pára z RB4 byla přes kolektor 0,7 MPa odebírána pro náhřev RB3 a po ukončení náhřevu ze II.O. opět klesá viz průběh 6-11.

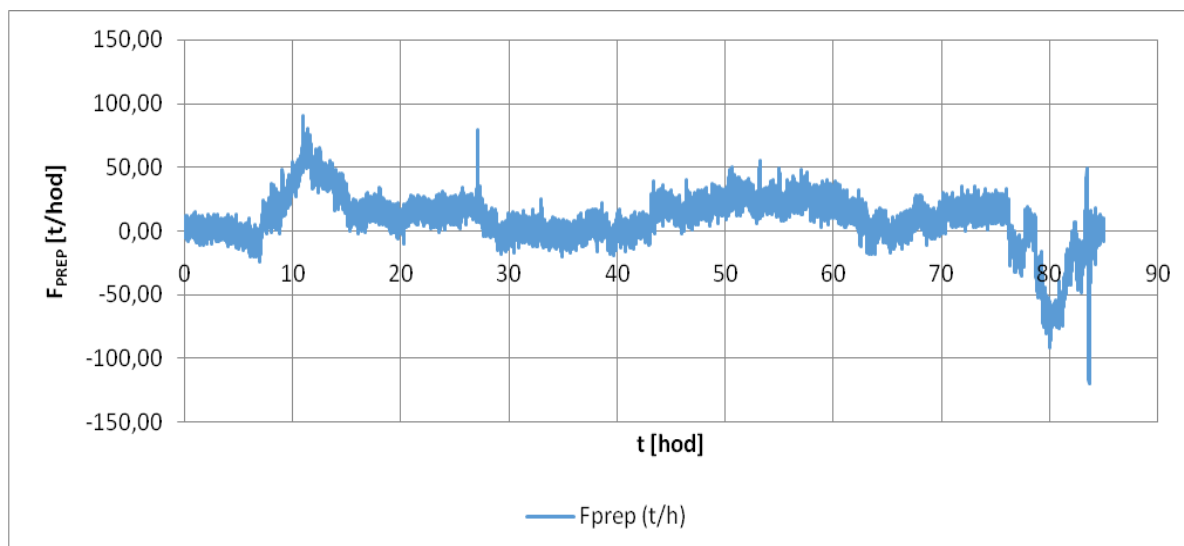
Samotný přepočítání uvedeného poměru na hmotnostní průtok přepouštěné páry z RB4 do RB3 se zanedbáním vlivu teploty cirkulační chladicí vody (dále jen CCHV) byl stanoven z jednotlivých naměřených poměrů, z průměrného poměru a naměřeného aktuálního výkonu turbogenerátorů. Tímto způsobem bylo vypočteno množství přepouštěné páry pro jednotlivé časy z naměřených dat pomocí programu Excel. Průměrná poměrná hodnota napájecí vody a výkonu turbogenerátoru během analýzy byla:

$$\left( \frac{F_{NV}}{N_{TG}} \right)_{AVG} = 5,778 \text{ t/MWh} \quad (6.3)$$

Jednotlivé poměrné hodnoty NV a výkonu TG byly poté přepočteny na přepouštěné množství páry:

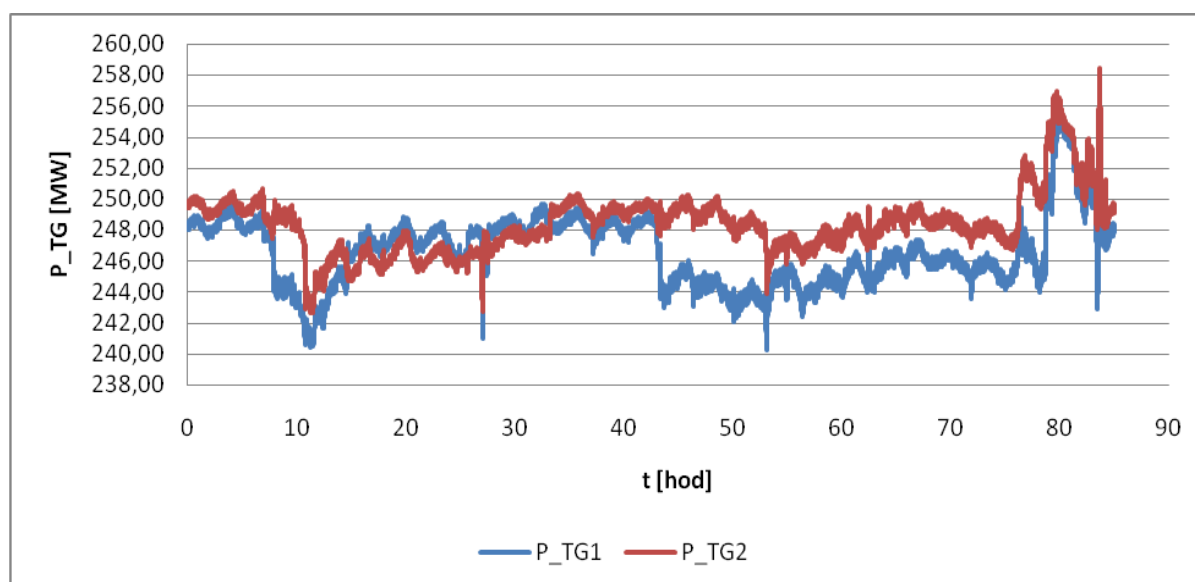
$$F_{PREP} = \left( \frac{F_{NV}}{N_{TG}} - \left( \frac{F_{NV}}{N_{TG}} \right)_{AVG} \right) \cdot N_{TG} = (5,815 - 5,778) \cdot 496,1 = 18,35 \text{ t/hod} \quad (6.4)$$

Podobně bylo určeno množství páry pro jednotlivé časy a výsledný průběh vnesen na obrázku 6-12.



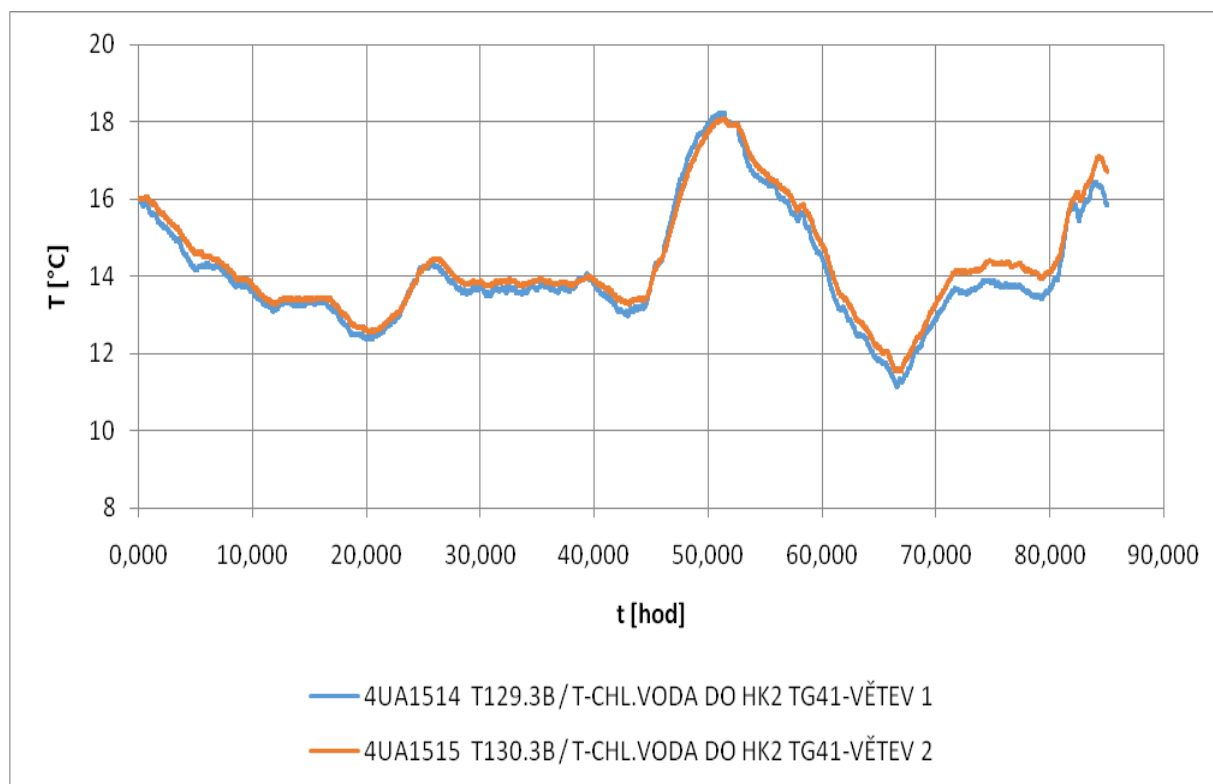
Obrázek 6-12: Průběh průtoku páry z RB4 do RB3

Z výpočtu, potažmo samotného průběhu je vidět, že hmotnostní průtok přepuštěné páry z RB4 do RB3 dosahuje v maximu hodnoty až cca 50 t/h. Dále je patrné, že tento průtok páry je nenulový i po ukončení režimu náhřevu I.O. ze strany II.O. Stoupající tendence jde opět vidět při opětovném dohřevu po tlakových zkouškách. Pokles v čase okolo 80. hodiny jasně ukazuje, že pára byla již generována z RB3 a přes kolektor 0,7 MPa přepouštěna opačným směrem, tedy do RB4, neboť na RB3 nebyly ještě připojeny turbíny a touto manipulací byl zvýšen výkon RB4, viz průběh výkonu na obrázku 6-13.



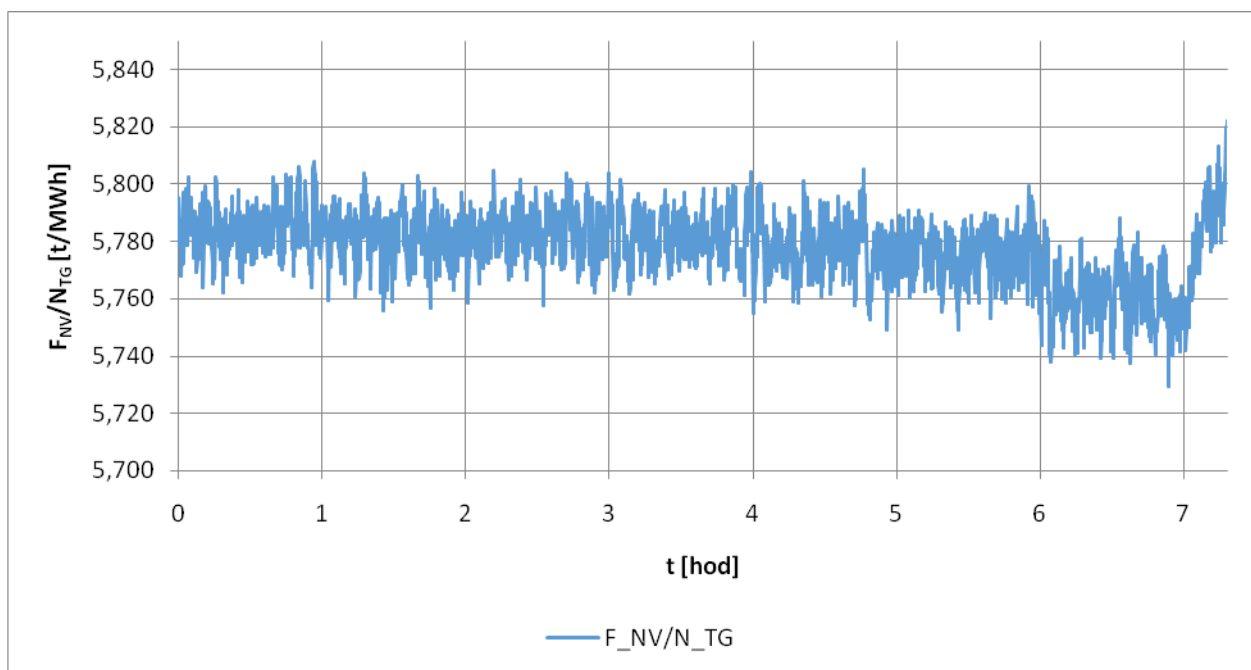
Obrázek 6-13: Průběh činného výkonu na RB4

Výše uvedený výpočet je nicméně zatížen chybou, neboť neuvažuje vliv teploty CCHV na účinnost tepelného cyklu RB4. Z průběhu na obrázku 6-14 je patrné, že teplota CCHV nebyla po celou dobu záznamu dat konstantní. Nicméně pokles této teploty je při náběhu I.O. ze strany II.O. (7,3 – 14 hod) tak malý, že nemá na vypočtené množství páry nějak zásadní vliv.

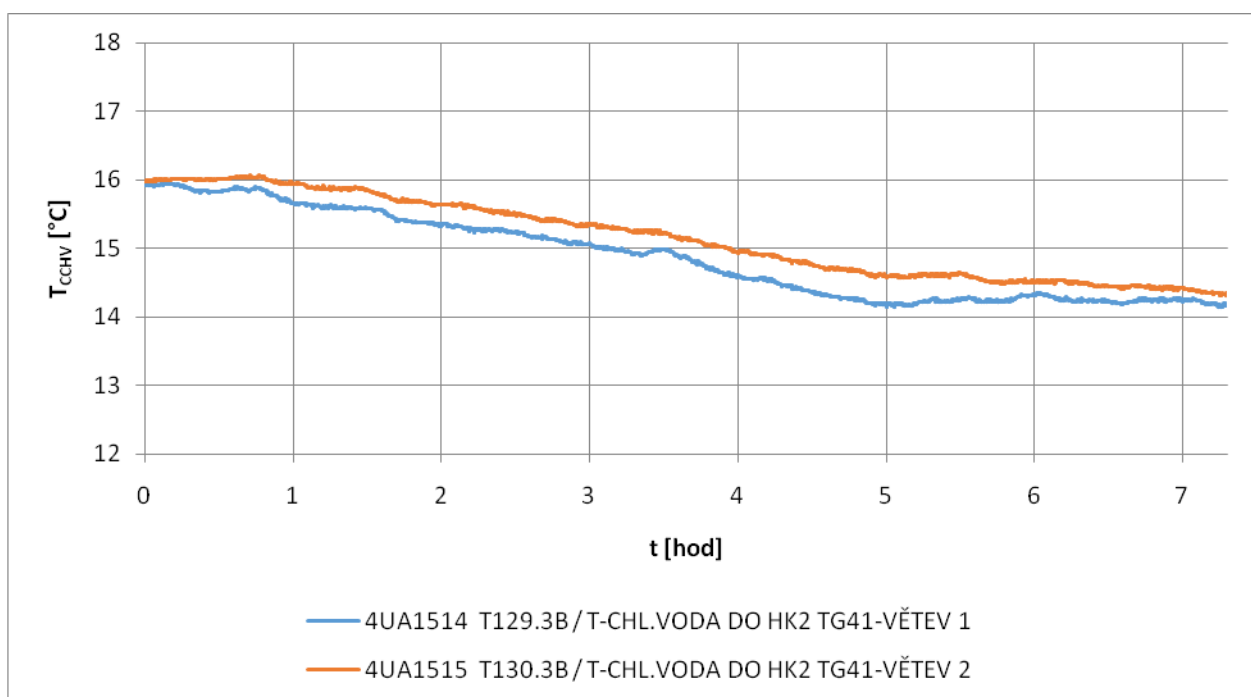


Obrázek 6-14: Průběh teploty CCHV na RB4

Teplota cirkulační chladicí vody v kondenzátoru má vliv na celkovou účinnost elektrárny. Porovnáním průběhů na obrázku 6-15 a 6-16 je patrné, že s klesající teplotou CCHV klesá poměr  $F_{NV}/N_{TG}$ , čili se zlepšuje účinnost tepelného cyklu a to v trendu cca  $1^{\circ}\text{C} \approx 1,5\text{MW}$  [8].



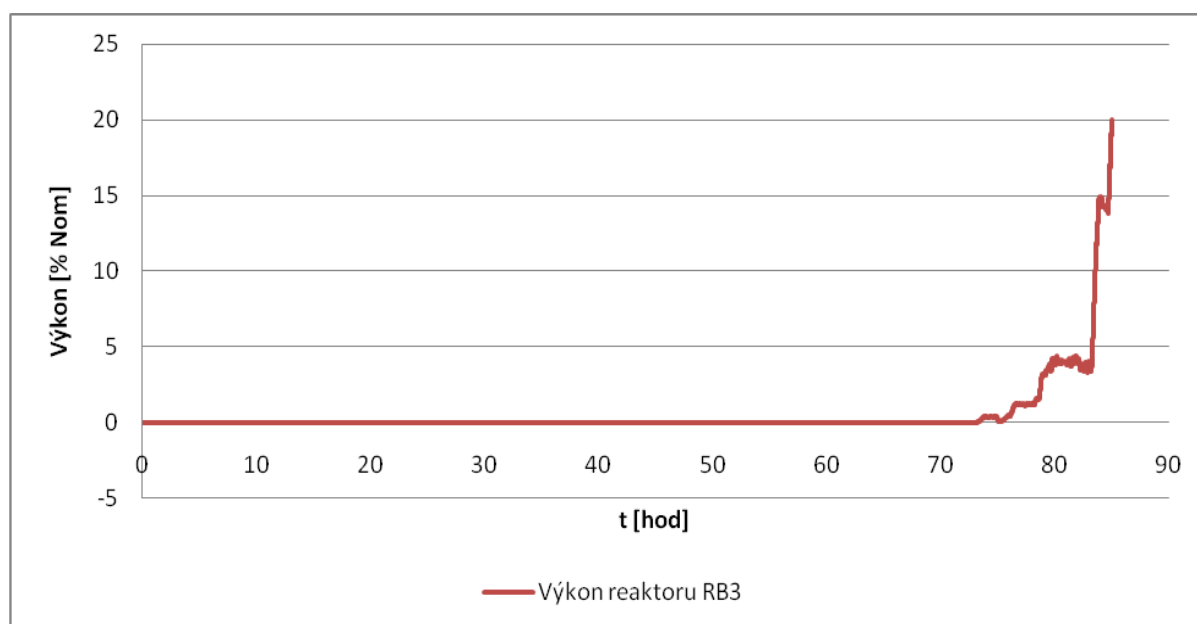
Obrázek 6-15: Poměrný průběh  $F_{NV}$  k  $N_{TG}$  před zahájením náhřevu



Obrázek 6-16: Pokles teploty CCHV před zahájením náhřevu

## 6.4 Přejít z RB3 z R4 do R3 a provoz v bloku v R3

Přejít z RB3 do režimu R3 byl dán zvýšením teploty v horkých větvích smyček I.O. nad teplotu 180 °C. Po dosažení teploty v I.O. na hodnotu 200 °C bylo uvedeno do provozu i zbylé 6. HCČ. Tlak v I.O. byl již nominální, což splňovalo jeden z předpokladů pro možnost vyvedení reaktoru na kritický stav na MKV. Zvýšení výkonu reaktoru můžeme pozorovat v průběhu na obrázku 6-17.



Obrázek 6-17: Průběh výkonu reaktoru RB3

## 6.5 Přejít z RB3 z R3 do R2 a provoz bloku v R2

Předposlední etapou bylo vyvedení reaktoru na MKV. Náběh na MKV je možné provádět dvěma způsoby. Méně častý způsob je vytahováním skupin HRK. Tento způsob lze provést, pouze pokud nebyl I.O. vychlazen a nebyla při odstavení bloku vytvořena odstavná koncentrace kyseliny borité v chladivu. Jedná se o situace při řešení abnormálních stavů, plánované odstavení do R3, popřípadě zásahem havarijní ochrany. Druhý, častější způsob je snižováním koncentrace kyseliny borité v chladivu [2].

### 6.5.1 Dohřev I.O. RB3 a zvýšení výkonu reaktoru

Zvýšení teploty I.O. na nominální teplotu se provádí pomocí zvýšení výkonu reaktoru na 0,5 %  $N_{nom}$ . Limitní podmínka je, že výkon reaktoru při náběhu nesmí přesáhnout 1 % nominálního výkonu. Po dosažení nominální teploty chladiva I.O. se pokračuje zvyšováním výkonu reaktoru. Po zvýšení nad 10 %  $N_{nom}$  se zapíná systém regulace výkonu reaktoru (RCS – Reactor Control System) do automatického režimu [8].



Samotný návrh pro lokalitu EDU bude zahrnovat několik předpokladů:

- a) Původní kotelna v areálu EDU byla  $3 \times 25 \text{ t/hod} + 8 \text{ t/hod} = 83 \text{ t/hod}$
- b) ETE má k dispozici  $5 \times 25 \text{ t/hod} = 125 \text{ t/hod}$  (1,23 MPa, 270 °C)
- c) Mobilní kotelny byly  $2 \times 16 \text{ t/hod} = 32 \text{ t/hod}$  (0,7 MPa, 170 °C)
- d) Přepouštění páry ze sousedního bloku  $50 \text{ t/hod}$
- e) Pomocné objekty se spotřebou cca  $500 \text{ t/den} \approx 21 \text{ t/hod}$

Z analýzy přepouštěné páry a ze spotřeby na vytápění/chlazení pomocných objektů lze vidět, že původní kotelna bez problémů pokryla i maximální množství přepouštěné páry pro nejrychlejší trend nárůstu reaktorového bloku. Během nepříznivé situace na Elektrárně Dukovany (odstavení tří bloků zároveň) bylo jako prozatímní řešení externího zdroje páry zajištěno pomocí dvou mobilních kotlů. Jejich zapojení do objektu pomocné kotelny lze vidět na obrázku 7-2.



Obrázek 7-2: Zapojení mobilních kotlů k objektu pomocné kotelny [8].

## 7.1 Výběr parního kotle

Parní kotel pro pomocnou kotelnu EDU by měl splňovat tyto požadavky:

1. Středotlaké provedení
2. Vysoká účinnost
3. Spolehlivost
4. Nízkoemisní spalování
5. Množství a kvalita páry při požadovaných parametrech

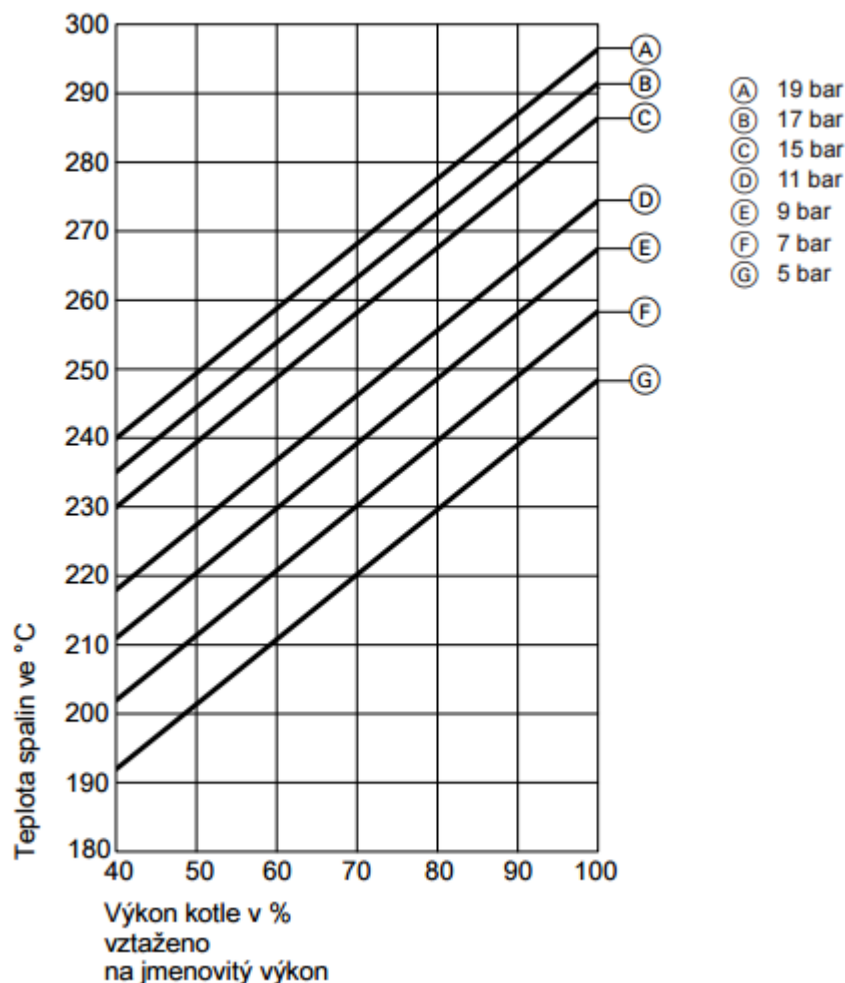
S ohledem na výsledky analýzy z kapitoly 6 se jeví jako ideální varianta dvou kotlů, každý o dodávce páry až 30 tun za hodinu. V případě poruchy jednoho z nich máme stále k dispozici až 30 tun páry za hodinu, což by s respektováním pomalejšího trendu nárůstu bylo dostačující pro nárůst bloku z kolektoru 0,7 MPa. Díky možnosti provozu jednoho nebo obou kotlů zároveň máme de facto možnost variability výroby páry v množství od 5 až po 60 tun páry za hodinu. Pokud by to dovolovalo dispoziční uspořádání objektu pomocné kotelny a ekonomická situace, je možnost přidat ještě třetí kotel do zálohy.

Výše uvedené předpoklady splňují např. kotle od firmy Vitomax. Jedná se o třítahové kotle s nebo bez integrovaného ekonomizéru, s vysokou účinností (až 95 %) a se splněním požadavků na nízkoemisní spalování. Jsou schopny dodávat až 30 tun páry za hodinu a díky velké odpařovací ploše je dosahována vysoká kvalita páry při nízké zbytkové vlhkosti. Jako palivo může být zvolen lehký i těžký topný olej, bio olej nebo zemní plyn. Jelikož v areálu EDU není plynová přípojka a palivem pro prozatímní mobilní kotle byly lehké topné oleje, bude uvažováno spalování právě tohoto druhu topných olejů. Ukázka provedení kotle je na obrázku 7-3 [11].



Obrázek 7-3: Provedení kotle typu HS M75B [11].

Výkon dodávané páry v rozmezí 5 - 30 t/hod nezávisle na zvoleném typu paliva dává dostatečný prostor pro případnou variabilní potřebu páry v různých úsecích náběhu bloku. Provozní tlak je také variabilní od 5 do 19 barů<sup>9</sup>. Závislost teploty, tlaku a výkonu kotle je uvedena na obrázku 7-4. [11].



Obrázek 7-4: Závislost teploty spalin (páry) na výkonu kotle pro různé tlaky [11].

S respektováním popřípadě pomalejšího trendu náběhu bych zvolil s rozvahou variantu dvou kotlů, čímž by se dosáhlo množství vyrobené páry až 60 t/hod. Díky možnosti provozu pouze jednoho z kotlů máme de facto možnost výroby páry v množství od 5 až po 60 tun páry za hodinu. Pokud by to dovolovalo dispoziční uspořádání objektu pomocné kotelny a ekonomická situace, je možnost přidat ještě třetí kotel do zálohy.

<sup>9</sup> přepočít: 1 bar = 0,1 MPa

## 8 ZÁVĚR

V úvodu práce je proveden rozbor provozních režimů jaderných bloků Elektrárny Dukovany. Pochopení přechodů jednotlivých režimů dává ucelený pohled na samotnou problematiku při odstavování nebo najíždění bloků. Dále jsou v teoretické části rozebrány tepelné zdroje primárního okruhu, které lze využít při samostatném procesu náhřevu jaderného bloku a jeho následném spuštění.

Celkový náhřev a náběh bloku je nejprve teoreticky rozebrán s vysvětlením změny reaktivity reaktoru ve vzájemné vazbě na změnách parametrů jaderného reaktoru. V jednotlivých krocích je potom stručně popsán samotný náhřev bloku Elektrárny Dukovany. Pro lepší orientaci výroby a spotřeby páry je také přehledně uvedena spotřeba ostatních objektů v areálu EDU.

Cílem této práce bylo provést analýzu náhřevu a spouštění hlavního výrobního bloku Jaderné elektrárny Dukovany a určit celkové množství přepouštěné páry z pomocného bloku. K analýze byla využita naměřená data z prosince 2015. Naměřená data jsou z najížděného bloku č. 3 a z bloku č. 4, který dodával přes kolektor 0,7 MPa páru. Pomocí výpočtu a grafických průběhů je vysvětlena problematika samotného náhřevu bloku s nutností potřeby externího zdroje páry, která v maximu dosahuje až 50 tun páry za hodinu. Celý proces náhřevu trvá několik dní a zahrnuje nejen technologické, ale i legislativní kroky.

V návaznosti na provedenou analýzu a ostatní faktory byl proveden samotný návrh pomocné kotelny, situované na původním místě staré kotelny. Jako nejlepší varianta dle ekonomického a technického hlediska, popřípadě dispozičního uspořádání bylo doporučeno pořízení dvou kotlů, každý o výkonu až 30 tun páry za hodinu. Tato pára má dostatečné parametry, aby zabezpečila náhřev napájecí nádrže právě přes pomocnou kotelnu a kolektor 0,7 MPa tak, že náhřev bloku bude proveden v podobně rychlé době jako je tomu při přepouštění páry z jiného bloku v areálu EDU. Další výhodou tohoto návrhu je, že palivem mohou být lehké topné oleje, které je možno v dostatečné zásobě skladovat v areálu EDU.

Tato práce vyvrátila prvotní domněnku náhřevu jaderného bloku bez externího zdroje páry jen pomocí primárního okruhu. Celá technologie je tak rozsáhlá, že je nemožné nahradit zdroj externí páry jen pomocí tepelných zdrojů primárního okruhu. Dalším problémem se jeví tepelné a tlakové rázy, které by nastaly při absenci náhřevu sekundárního okruhu pomocí již zmíněné páry z kolektoru 0,7 MPa. V neposlední řadě by se případný pokus o náhřev jen pomocí tepelných zdrojů primárního okruhu a samotný nájezd bloku prodloužil o několik dní, což by mělo také nemalý ekonomický dopad.

Externí zdroj páry bude jistě také využit i při konečném vyřazování jaderných bloků, kdy samotný proces vyřazování může trvat až desítky let. Dle uvedených zhodnocení je navrženo pořízení kotlů v co nejkratším horizontu.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] RAČEK, Jiří. *Jaderná zařízení*. Brno: NOVOPRESS s.r.o., 2009. ISBN 978-80-214-3961-0.
- [2] ČERNÝ, Vítězslav. *PROVOZNÍ REŽIMY BLOKU JE VVER 440: Normální provoz* [skripta]. 2010 [cit. 2016-05-03].
- [3] SOUKUP, Michal a Josef RŮŽIČKA. *A004a: Limity a podmínky bezpečného provozu* [předpis]. 2015. Dukovany [cit. 2016-05-05].
- [4] ODDĚLENÍ REAKTOROVÉ FYZIKY. *Reaktorová fyzika pro operátory* [skripta]. Dukovany, 2014 [cit. 2016-04-21].
- [5] Křehký lom a ochrana proti němu. *IPotrubi* [online]. 2013 [cit. 2016-04-12]. Dostupné z: <http://www.ipotrubi.cz/clanky/4.-pevnostni-vypocty-potrubi/10.-mezni-stavy/krehky-lom-a-ochrana-proti-nemu.html>
- [6] TRNKA, Miroslav, ČEZ, a.s., ústní sdělení, konzultace 28.4.2016, Jaderná elektrárna Dukovany
- [7] BLAHA, Martin, TES s.r.o., ústní sdělení, konzultace 31.3.2016, Jaderná elektrárna Dukovany
- [8] LUDVÍK, Lubomír, ČEZ, a.s., ústní sdělení, konzultace 16.5.2016, Jaderná elektrárna Dukovany
- [9] BEROUN, Pavel, ČEZ, a.s., telefonické sdělení, konzultace 05.5.2016, Jaderná elektrárna Dukovany
- [10] *Vyjádření k žádosti o vydání integrovaného povolení společnosti ČEZ, a. s.* [online]. In: s. 22 [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: [http://www.mzp.cz/www/ippc.nsf/3BF23A6C88E8ADBAC125715E003CC411/\\$file/%C4%8CEZ%2C%20a.s.%20-%20elektr%C3%A1rna%20Temel%C3%ADn.pdf](http://www.mzp.cz/www/ippc.nsf/3BF23A6C88E8ADBAC125715E003CC411/$file/%C4%8CEZ%2C%20a.s.%20-%20elektr%C3%A1rna%20Temel%C3%ADn.pdf)
- [11] Parní a spalínové kotle. *Viessmann* [online]. 2012 [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: [http://www.viessmann.cz/content/dam/vi-brands/DE/Produkte/Dampferzeuger/Vitomax-HS-Typ\\_M75B/DB-5547983\\_Vitomax\\_HS\\_M75B.pdf/\\_jcr\\_content/renditions/original.media\\_file.download\\_attachment.file/DB-5547983\\_Vitomax\\_HS\\_M75B.pdf](http://www.viessmann.cz/content/dam/vi-brands/DE/Produkte/Dampferzeuger/Vitomax-HS-Typ_M75B/DB-5547983_Vitomax_HS_M75B.pdf/_jcr_content/renditions/original.media_file.download_attachment.file/DB-5547983_Vitomax_HS_M75B.pdf)
- [12] *Zápisy náběhu 3. a 4. bloku* [elektronicky]. EDU, 2015 [cit. 2016-05-07].
- [13] FLEISCHHANS, Jiří. Spouštění jaderné elektrárny Temelín. *ALTERNATIVNÍ ENERGETIKA*. 2/2001, 8.
- [14] KAŇOVSKÝ, Pavel, František HEZOUČKÝ a Ján NAŇO. *Základy teorie provozních režimů jaderných elektráren s tlakovodními reaktory*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2005.
- [15] KOLEKTIV AUTORŮ. Reaktor v prevádzkových podmienkach. In: *KATEDRA JADROVEJ FYZIKY A TECHNIKY* [online]. Bratislava, 2011 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: [http://www.nuc.elf.stuba.sk/lit/tjr\\_www/13tjr.htm](http://www.nuc.elf.stuba.sk/lit/tjr_www/13tjr.htm)
- [16] ZÁCHA, Pavel. *Jaderné systémy a jaderné reaktory a parogenerátory* [online]. , 16 [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: [http://energetika.cvut.cz/files/JS1\\_JR\\_prednasky\\_3.cast%20-%20komponenty%20a%20systemy.pdf](http://energetika.cvut.cz/files/JS1_JR_prednasky_3.cast%20-%20komponenty%20a%20systemy.pdf)

## **PŘÍLOHY**

Elektronické přílohy:

Příloha č. 1 – Naměřená data na reaktorovém bloku č. 3 Jaderné elektrárny Dukovany

Příloha č. 2 – Naměřená data na reaktorovém bloku č. 4 Jaderné elektrárny Dukovany