

**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**

**MOŽNOSTI ZVÝŠENÍ DODÁVEK ELEKTRICKÉ  
ENERGIE Z JADERNÉ ELEKTRÁRNY  
DUKOVANY**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS**

**AUTOR PRÁCE  
AUTHOR**

**JAKUB VESELÝ**

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 Veselý

**ID:** 125694

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2011/2012

## NÁZEV TÉMATU:

**Možnosti zvýšení dodávek elektrické energie z Jaderné elektrárny Dukovany**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Úvod
2. Jaderné elektrárny ve světě a v České republice
3. Využití projektových rezerv
4. Zkrácení odstávek
5. Určení základních parametrů pro zadané tepelné schéma

## 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:

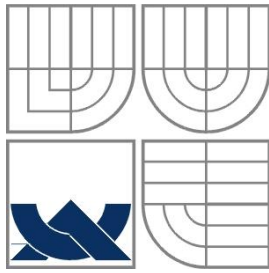
Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných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

Bibliografická citace práce:

VESELÝ, J. *Možnosti zvýšení dodávek elektrické energie z Jaderné elektrárny 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.

.....



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**



**Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií  
Ústav elektroenergetiky**

**Bakalářská práce**

# **Možnosti zvýšení dodávek elektrické energie z Jaderné elektrárny Dukovany**

Jakub Veselý

**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**

# **Possibilities of increasing electric supply from Dukovany Nuclear Power Plant**

**by**

**Jakub Veselý**

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

**Brno University of Technology, 2012**

**Brno**

## ABSTRAKT

Obsahem práce je popis probíhajících možností zvýšení dodávek elektrické energie z Jaderné elektrárny Dukovany a kontrola výběru nového koncového jímáče tepla systému technické vody důležité v Jaderné elektrárně Dukovany.

V první části práce je nastíněn stručný přehled jaderných elektráren v České republice a ve světě, v dalších kapitolách je popsán projekt zabývající se zvyšováním výkonu Jaderné elektrárny Dukovany – projekt Bezpečně 16 Tera EDU [16] a jeho součásti – podprojekt Využití projektových rezerv [19] a podprojekt s cílem zkrácení odstávek pro výměnu paliva.

V poslední kapitole je provedena kontrola výběru nového koncového jímáče tepla – ventilátorové věže – pro případ ztráty stávajících chladicích věží vlivem extrémního větru.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** Jaderná elektrárna Dukovany; využití projektových rezerv; zkrácení odstávek; koncový jímáč tepla; ventilátorová věž.

---

## ABSTRACT

Subject of the thesis is to describe the ongoing possibilities to increase the electric supply from the Dukovany Nuclear Power Plant and monitoring the selection of the new ultimate heat sink of important technical water system in Dukovany Power Plant.

In the first part of the thesis there is a short overview of nuclear power plants in the Czech Republic and around the world. In the following chapters there is a description of a project dealing with increasing the electric supply from the Dukovany Nuclear Power Plant – project Safety 16 Terra EDU [16] and its parts – subproject Utilization of project reserves [19] and subproject with the goal to reduce the shutdowns.

In the last part there is a monitoring the selection of a new ultimate heat sink – tower fan – in case of loss current cooling towers due to an extreme wind.

**KEY WORDS:** Dukovany Nuclear Power Plant; utilization of project reserves; reducing of shutdowns; ultimate heat sink; tower fan.

**OBSAH**

<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>9</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>10</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>11</b>
<b>1 ÚVOD .....</b>	<b>15</b>
<b>2 JADERNÉ ELEKTRÁRNY VE SVĚTĚ A V ČESKÉ REPUBLICE.....</b>	<b>17</b>
<b>2.1 JADERNÁ ENERGETIKA VE SVĚTĚ .....</b>	<b>17</b>
<b>2.2 JADERNÁ ENERGETIKA V ČESKÉ REPUBLICE.....</b>	<b>17</b>
<b>2.3 JADERNÉ ELEKTRÁRNY V ČESKÉ REPUBLICE.....</b>	<b>18</b>
2.3.1 JADERNÁ ELEKTRÁRNA TEMELÍN .....	19
2.3.2 JADERNÁ ELEKTRÁRNA DUKOVANY .....	19
<b>2.4 VYUŽITÍ PROJEKTOVÝCH REZERV JADERNÉ ELEKTRÁRNY DUKOVANY.....</b>	<b>19</b>
<b>2.5 MOŽNOSTI ZVÝŠENÍ ÚČINNOSTI OBĚHU PARNÍHO TURBÍNOVÉHO ZAŘÍZENÍ .....</b>	<b>19</b>
2.5.1 ZLEPŠENÍ VAKUA KONDENZÁTORU .....	20
2.5.2 ZVYŠOVÁNÍ PARAMETRŮ VSTUPNÍ PÁRY.....	20
2.5.3 REGENERACE TEPLA U PARNÍCH OBĚHŮ.....	20
2.5.4 PŘIHRÍVÁNÍ PÁRY .....	20
2.5.5 ZVYŠOVÁNÍ ÚČINNOSTI V JADERNÝCH ELEKTRÁRNÁCH S TLAKOVODNÍMI REAKTORY .....	20
<b>2.6 PROJEKT BEZPEČNĚ 16 TERA EDU.....</b>	<b>20</b>
2.6.1 PŮVODNÍ CÍLE PROJEKTU BEZPEČNĚ 16 TERA EDU.....	22
2.6.2 ZPŮSOBY ZVÝŠENÍ VÝKONU V JADERNÉ ELEKTRÁRNĚ DUKOVANY .....	22
2.6.3 JEDNOTLIVÉ INOVACE SOUČÁSTÍ, KTERÉ SE PODÍLÍ NA ZVÝŠENÍ VÝKONU .....	24
2.6.4 NOVÝ TYP PALIVA GD-2M.....	24
2.6.5 HARMONOGRAM PROJEKTU VYUŽITÍ PROJEKTOVÝCH REZERV .....	25
<b>3 ZKRÁCENÍ Odstávek.....</b>	<b>26</b>
<b>4 KONTROLA VÝBĚRU KONCOVÉHO JÍMAČE TEPLA TVD V JADERNÉ ELEKTRÁRNĚ DUKOVANY .....</b>	<b>29</b>
<b>4.1 MATEMATICKÝ MODEL SYSTÉMU TVD .....</b>	<b>32</b>
<b>4.2 VYHODNOCENÍ .....</b>	<b>40</b>
4.2.1 VÝSLEDKY SIMULACE.....	42
4.2.2 ZÁVĚR.....	44
<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>46</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>55</b>

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 2–1 Vyrobená elektrická energie a disponibilita Jaderné elektrárny Dukovany.....</i>	<i>21</i>
<i>Tab. 2–2 Změny parametrů tepelného schématu Jaderné elektrárny Dukovany.....</i>	<i>23</i>
<i>Tab. 2–3 Procentuální podíl obměn na zvýšení výkonu Jaderné elektrárny Dukovany.....</i>	<i>24</i>
<i>Tab. 2–4 Etapy projektu VPR.....</i>	<i>25</i>
<i>Tab. 3–1 Nové intervaly revizí, oprav, kontrol a zkoušek.....</i>	<i>27</i>
<i>Tab. 3–2 Původní doby a možné zkrácení dob odstávek při implementaci projektu CIK_CAK....</i>	<i>28</i>
<i>Tab. 4–1 Varianty koncepčního řešení ztráty koncového jímače tepla.....</i>	<i>31</i>
<i>Tab. 4–2 Časová osa iniciačních událostí.....</i>	<i>40</i>
<i>Tab. 4–3 Parametry referenční chladicí věže GEA Energietechnik GmbH 43473-D-KON-00-0002 .....</i>	<i>40</i>
<i>Tab. P-1. Okrajové podmínky iniciačních událostí.....</i>	<i>46</i>
<i>Tab. P-2. Návrh jednotlivých změn dob odstávek v letech 2008 až 2010.....</i>	<i>48</i>
<i>Tab. P-3 Návrh jednotlivých změn dob odstávek v letech 2011 až 2012.....</i>	<i>49</i>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2–1</i>	<i>Struktura výroby elektrické energie v České republice v roce 2009.....</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 2–2</i>	<i>Bilance výroby elektrické energie z neobnovitelných zdrojů v České republice pro rok 2009.....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 2–3</i>	<i>Bilance výroby elektrické energie z obnovitelných zdrojů v České republice pro rok 2009.....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 2–4</i>	<i>Trend vyrobené elektrické energie a dostupnosti Jaderné elektrárny Dukovany.....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 2–5</i>	<i>Změny parametrů tepelného schématu Jaderné elektrárny Dukovany.....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 2–6</i>	<i>Předpokládaný nárůst výkonu Jaderné elektrárny Dukovany.....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 4–3</i>	<i>Základní blokové schéma systému TVD v Jaderné elektrárně Dukovany.....</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 4–4</i>	<i>Blokové schéma koncového jmače tepla.....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 4–5</i>	<i>Schéma hlavního výrobního bloku Jaderné elektrárny Dukovany.....</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 4–6</i>	<i>Schéma reaktorového bloku.....</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 4–7</i>	<i>Blokové schéma dochlazování reaktorového bloku.....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 4–8</i>	<i>Měrná tepelná kapacita vody v závislosti na její teplotě.....</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 4–9</i>	<i>Hustota vody v závislosti na její teplotě.....</i>	<i>42</i>
<i>Obr. P-4</i>	<i>Časový průběh teploty na vstupu do hlavního výrobního bloku pro variantu 1 a konfiguraci věže 3x2 chladicích buněk.....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. P-5</i>	<i>Časový průběh chlazených výkonů zařízení hlavního výrobního bloku (P_HVB) a chladicího výkonu ventilátorové věže (P_UHS) pro variantu 1 a konfiguraci věže 3x2 chladicích buněk.....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. P-6</i>	<i>Časový průběh teploty na vstupu do hlavního výrobního bloku pro variantu 1 a konfiguraci věže 3x1 chladicích buněk.....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. P-7</i>	<i>Časový průběh chlazených výkonů zařízení hlavního výrobního bloku (P_HVB) a chladicího výkonu ventilátorové věže (P_UHS) pro variantu 1 a konfiguraci věže 3x1 chladicích buněk.....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. P-8</i>	<i>Časový průběh teploty na vstupu do hlavního výrobního bloku pro variantu 2 a konfiguraci věže 3x2 chladicích buněk.....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. P-9</i>	<i>Časový průběh chlazených výkonů zařízení hlavního výrobního bloku (P_HVB) a chladicího výkonu ventilátorové věže (P_UHS) pro variantu 2 a konfiguraci věže 3x2 chladicích buněk.....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. P-10</i>	<i>Časový průběh teploty na vstupu do hlavního výrobního bloku pro variantu 2 a konfiguraci věže 3x1 chladicích buněk.....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. P-11</i>	<i>Časový průběh chlazených výkonů zařízení hlavního výrobního bloku (P_HVB) a chladicího výkonu ventilátorové věže (P_UHS) pro variantu 2 a konfiguraci věže 3x1 chladicích buněk.....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. P-12</i>	<i>Časový průběh teploty chladicí vody systému TVD na vstupu do hlavního výrobního bloku pro kontrolované varianty.....</i>	<i>54</i>

## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Značka	Veličina	Jednotka
$c_{33}$	měrná tepelná kapacita vody při teplotě 33 °C	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
$C_{I.O.}$	celková tepelná kapacita chladiva a konstrukčních materiálů primárního okruhu, parního generátoru a potrubních systémů ostré páry na trase mezi parním generátorem a technologickým kondenzátorem	$J \cdot K^{-1}$
$m_B$	celková hmotnost chladicí vody v jímce bazénu koncového jímače tepla	kg
$m_{CCS}$	celková hmotnost chladicí vody v jímce TVD v centrální čerpací stanici	kg
$m_{p,priv}$	hmotnost chladiva v přívodních potrubních trasách mezi hlavním výrobním blokem a koncovým jímačem tepla	kg
$m_{p,vrat}$	hmotnost chladiva ve vratných potrubních trasách mezi centrální čerpací stanicí a hlavním výrobním blokem	kg
$m_{TVD}$	hmotnost chladicí vody systému TVD, která přiteče do jímky TVD v centrální čerpací stanici za časový krok $\Delta t$	kg
$N_{HCC}$	počet současně pracujících hlavních cirkulačních čerpadel při dochlazování bloku	1
$Q_{I.O.}$	hmotnostní průtok chladiva primárního okruhu	$kg \cdot s^{-1}$
$Q_{II.O.}$	hmotnostní průtok vodní páry sekundárního okruhu	$kg \cdot s^{-1}$
$Q_{m,TVD}$	hmotnostní průtok chladicí vody systému TVD	$kg \cdot s^{-1}$
$P_{1HCC}$	tepelný výkon jednoho hlavního cirkulačního čerpadla chlazený systémem TVD	W
$P_{AZ}$	zbytkový výkon aktivní zóny	W
$P_{HCC}$	tepelný výkon hlavních cirkulačních čerpadel chlazený systémem TVD	W
$P_{doch}$	tepelný výkon dochlazování reaktorového bloku chlazený systémem TVD	W
$P_{HVB}$	tepelný výkon všech zařízení hlavního výrobního bloku chlazený systémem TVD	W
$P_{kap}$	kapacitní tepelný výkon primárního okruhu při dochlazování reaktorového bloku chlazený systémem TVD	W
$P_{OSP}$	tepelný výkon ostatních spotřebičů reaktorového bloku chlazených systémem TVD	W
$P_{OSP,n}$	tepelný výkon ostatních spotřebičů chlazený systémem TVD při nominálním rozdílu teploty chladiva primárního okruhu a chladicí vody systému TVD	W

$P_R$	tepelný výkon reaktoru	W
$P_{RB}$	tepelný výkon všech zařízení reaktorového bloku chlazený systémem TVD	W
$P_{RB1}$	tepelný výkon všech zařízení 1. reaktorového bloku chlazený systémem TVD	W
$P_{RB2}$	tepelný výkon všech zařízení 2. reaktorového bloku chlazený systémem TVD	W
$P_{SAOZ}$	tepelný výkon výměníku systému havarijního chlazení aktivní zóny chlazený systémem TVD	W
$P_{UHS}$	chladicí výkon koncového jímače tepla	W
$t$	počet sekund od začátku iniciační události/odstavení reaktoru	s
$V_B$	objem chladicí vody v bazénu koncového jímače tepla	m <sup>3</sup>
$V_{CCS}$	objem chladicí vody v jímkách TVD v centrální čerpací stanici	m <sup>3</sup>
$V_{p,priv}$	celkový objem chladiva v přívodních potrubních trasách mezi hlavním výrobním blokem a koncovým jímačem tepla	m <sup>3</sup>
$V_{p,vrat}$	celkový objem chladiva ve vratných potrubních trasách mezi centrální čerpací stanicí a hlavním výrobním blokem	m <sup>3</sup>
$\alpha_{AZ}$	aproximační konstanta nultého řádu závislosti zbytkového výkonu koncového jímače tepla na době od odstavení reaktoru	W
$\alpha_{C,I.O.}$	aproximační konstanta nultého řádu závislosti tepelné kapacity primárního okruhu na teplotě chladiva primárního okruhu	J · K <sup>-1</sup>
$\alpha_{UHS}$	aproximační konstanta nultého řádu závislosti výkonu koncového jímače tepla na vstupní teplotě chladicí vody	W
$\alpha_{\vartheta,I.O.}$	aproximační konstanta nultého řádu závislosti teploty chladiva primárního okruhu na čase	°C
$\beta_{AZ}$	aproximační časová konstanta závislosti zbytkového výkonu koncového jímače tepla na době od odstavení reaktoru	s
$\beta_{C,I.O.}$	aproximační konstanta prvního řádu závislosti tepelné kapacity primárního okruhu na teplotě chladiva primárního okruhu	J · K <sup>-2</sup>
$\beta_{UHS}$	aproximační konstanta prvního řádu závislosti výkonu koncového jímače tepla na vstupní teplotě chladicí vody	W · K <sup>-1</sup>
$\beta_{\vartheta,I.O.}$	aproximační konstanta prvního řádu závislosti teploty chladiva primárního okruhu na čase	K · s <sup>-1</sup>
$\gamma_{AZ}$	aproximační konstanta druhého řádu závislosti zbytkového výkonu koncového jímače tepla na době od odstavení reaktoru	W
$\gamma_{C,I.O.}$	aproximační konstanta druhého řádu závislosti tepelné kapacity primárního okruhu na teplotě chladiva primárního okruhu	J · K <sup>-3</sup>
$\Delta t$	časový krok	s

$\Delta t_{DZ,priv}$	zpoždění změny teploty chladiva na vstupu do koncového jímače tepla vůči teplotě chladiva na výstupu z hlavního výrobního bloku	s
$\Delta t_{DZ,vrat}$	zpoždění změny teploty chladiva na vstupu do hlavního výrobního bloku vůči teplotě chladiva na výstupu z centrální čerpací stanice	s
$\Delta \vartheta_{HVB}$	změna teploty chladicí vody systému TVD způsobená ztrátovým výkonem všech chlazených zařízení	°C
$\Delta \vartheta_{J,n}$	změna teploty v jímkách systému TVD způsobená doplňováním surové vody při normálním provozu	°C
$\Delta \vartheta_{I.O.,TVD}$	rozdíl teploty chladiva primárního okruhu a chladicí vody systému TVD	°C
$\Delta \vartheta_{I.O.,TVD,n}$	rozdíl teploty chladicí vody systému TVD a teploty chladiva primárního okruhu za normálního provozu	°C
$\Delta \vartheta_V$	změna teploty chladicí vody systému TVD v koncovém jímači tepla způsobená jeho chladicím výkonem	°C
$\rho_{33}$	hustota vody teplotě 33 °C	kg · m <sup>-3</sup>
$\vartheta_{AZ}$	teplota aktivní zóny	°C
$\vartheta_{CCS,out}$	teplota chladicí vody systému TVD na výstupu z centrální čerpací stanice	°C
$\vartheta'_{CCS,out}$	teplota chladicí vody systému TVD na výstupu z centrální čerpací stanice z předchozího časového kroku	°C
$\vartheta_{HVB,in}$	teplota chladicí vody systému TVD na vstupu do hlavního výrobního bloku	°C
$\vartheta'_{HVB,in}$	teplota chladicí vody systému TVD na vstupu do hlavního výrobního bloku z předchozího časového kroku	°C
$\vartheta_{HVB,out}$	teplota chladicí vody systému TVD na výstupu z hlavního výrobního bloku	°C
$\vartheta_{ch}$	teplota vody chladicího okruhu	°C
$\vartheta_{I.O.}$	teplota chladiva primárního okruhu	°C
$\vartheta_{I.O,h}$	teplota horké smyčky primárního okruhu	°C
$\vartheta_{I.O,s}$	teplota studené smyčky primárního okruhu	°C
$\vartheta_{II,O,s}$	teplota studené smyčky sekundárního okruhu	°C
$\vartheta_{UHS,in}$	teplota chladicí vody systému TVD na vstupu do koncového jímače tepla	°C
$\vartheta_{UHS,out}$	teplota chladicí vody systému TVD na výstupu z koncového jímače tepla	°C

---

$\vartheta'_{UHS,out}$	teplota chladicí vody systému TVD na výstupu z koncového jímače tepla z předchozího časového kroku	°C
$\vartheta_{V,out}$	teplota chladicí vody systému TVD na výstupu do bazénu pod koncovým jímačem tepla	°C
$\frac{\partial \vartheta_{doch}}{\partial t}$	rychlost vychlazování primárního okruhu	K · s <sup>-1</sup>

# 1 ÚVOD

Vytváření a využívání zdrojů energie je jeden ze základních faktorů rozvoje lidské společnosti. Proto získávání, přeměna a zachování energie patří mezi důležité obory, jimiž se společnost zabývá. Jaderné elektrárny patří mezi nepostradatelné zdroje elektrické energie jak v České republice, tak v dalších zemích světa. Bez nich bychom nebyli schopni současnou poptávku po elektrické energii pokrýt.

V kapitole Jaderné elektrárny v České republice a ve světě je popsána důležitost jaderných elektráren z hlediska pokrytí poptávky po elektrické energii. Kapitola Využití projektových rezerv Jaderné elektrárny Dukovany a Zkrácení odstávek v Jaderné elektrárně Dukovany popisuje změny, které probíhají od roku 2009 v Jaderné elektrárně Dukovany. Cílem těchto projektů je zvýšení výkonu výrobních bloků elektrárny a optimalizace procesů při odstávkách spojených s výměnou paliva tak, aby elektrárna zvýšila dodávky elektrické energie do sítě z 14 TWh na 16 TWh ročně.

Těžištěm této práce je kontrola výběru koncového jímače tepla technické vody důležité (TVD) [1] v Jaderné elektrárně Dukovany. Cílem této kapitoly je popis a kontrola navrženého koncového jímače tepla TVD v Jaderné elektrárně Dukovany při různých konfiguracích ventilátorové věže GEA Energietechnik GmbH typu 43473-D-KON-00-0002. Nutno podotknout, že koncovým jímačem tepla v Jaderné elektrárně Dukovany je atmosféra, kterou nelze ztratit. V této souvislosti hovoříme o ztrátě koncového jímače tepla jako o ztrátě schopnosti přenosu tepla do koncového jímače. Protože v současné době nejsou k dispozici úplné materiály popisující postup výběru koncového jímače tepla, bylo doporučeno provést kontrolu postupu výběru koncového jímače tepla pro odvod tepla. Tento úkol bude řešen v této části práce. Základním problémem je vytvoření matematického modelu TVD, který by s dostatečnou přesností simuloval situace za normálního provozu i během havarijních situací vzniklých poruchami. Na tento model budou aplikovány reálné situace stanovené zadavatelem a bude zhodnoceno, zdali je vybraná konfigurace věže nového koncového jímače tepla efektivní.

Na základě rozhodnutí Evropské rady byly ve všech jaderných elektrárnách Evropské unie provedeny tzv. stress testy. V souvislosti s nehodou v Jaderné elektrárně Fukušima měly testy posoudit bezpečnost jaderných elektráren za normálního provozu i za provozu při extrémních podnebných podmínkách. Testovány byly i jaderné elektrárny v České republice – Jaderná elektrárna Dukovany a Jaderná elektrárna Temelín. Testy ukázaly vynikající bezpečnost českých jaderných elektráren za normálního provozu a velice dobrou připravenost pro případy i velice nepříznivých sledů událostí a dalších nepříznivých podmínek, které jsou však pro lokalitu střední Evropy dosti nepravděpodobné. I přesto bylo provozovateli navrženo několik vylepšení, která už tak výbornou bezpečnost jaderných elektráren v České republice ještě zvýší.

Pro případ extrémního větru bylo doporučeno vybudovat v Jaderné elektrárně Dukovany nový koncový jímač tepla, který by tomuto větru odolal. Byla tedy vypracována studie o dostavbě nového koncového jímače tepla a vybrána ventilátorová věž GEA Energietechnik GmbH typu 43473-D-KON-00-0002. Tato věž umožňuje dvě varianty konfigurace: 3 nebo 6 chladicích buněk. Zvolena byla konfigurace se šesti chladicími buňkami. V této práci je proveden podrobný rozbor výběru této konfigurace a kontrola, zda by konfigurace se třemi chladicími buňkami nedostačovala podmínkám stanoveným zadavatelem. Bohužel nebyly k dispozici materiály jiných ventilátorových věží, takže nebylo možné provést porovnání vybraného koncového jímače tepla s jiným.

---

Byl vytvořen matematický model systému TVD s novým koncovým jímačem tepla. Na něj byly aplikovány všechny zadavatelem určené počáteční a okrajové podmínky a všechny známé závislosti, které reálný systém popisují. Vzhledem k zadaným iniciačním událostem (LOCA [9], dochlazování reaktorového bloku), které začínají v různých časech, bylo zvoleno numerické řešení problému. Analytické řešení by vyžadovalo rozdělení na časové intervaly a definici počátečních podmínek pro každý interval. Model byl vytvořen v programu Microsoft Excel s časovým krokem  $\Delta t = 5$  s. Sledované období 10 hodin je dostatečné a veškeré sledované veličiny jsou po tomto období stabilní. Co se děje za tímto časovým horizontem již model nesimuluje a práce se tím celkově nezabývá.

V úplném závěru je provedeno stručné zhodnocení okrajových podmínek a jejich vliv na výsledky simulace a výběru koncového jímače tepla.

## 2 JADERNÉ ELEKTRÁRNY VE SVĚTĚ A V ČESKÉ REPUBLICĚ

### 2.1 Jaderná energetika ve světě

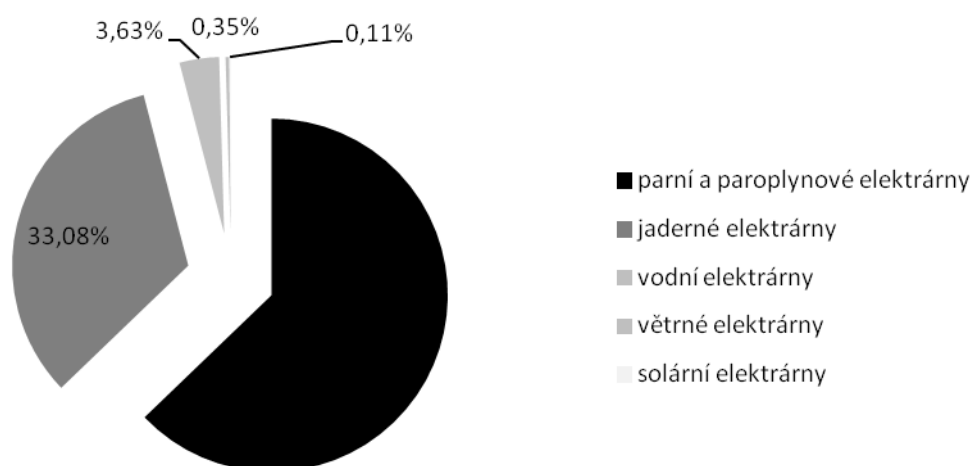
K 1. červnu 2011 bylo ve 29 státech světa podle statistik World Nuclear Association (WNA) [27] v provozu 441 jaderných reaktorů o celkovém instalovaném výkonu 376 447 MW. Celosvětově jaderné elektrárny s těmito reaktory vyrábějí asi 14 % světové elektřiny. Ve výstavbě je 60 reaktorů ve 13 zemích. Plánuje se výstavba 155 reaktorů. Celkem se ve světě předběžně uvažuje o vybudování 338 reaktorů, jejichž instalovaný výkon dosáhne více než 384 000 MW [22].

Nejvíce jaderných reaktorů je provozováno v USA (104), ve Francii (58), Japonsku (51), Rusku (32), Jižní Koreji (21), Indii (20), Velké Británii (19) a Kanadě (18). V zemích EU se většinou používají tlakovodní reaktory PWR (65 %), co do četnosti jsou na druhém místě varné reaktory BWR (22 %) [22].

Plány na výstavbu jaderných reaktorů v Evropě jsou, v porovnání se situací v Číně, Indii a v Rusku, mizivé. Čína má v současné době v provozu 13 jaderných reaktorů, 27 reaktorů je ve výstavbě a plánuje se dalších 110 jaderných reaktorů, což je nejvíce na světě. Již v roce 2012 bude mít největší kapacitu na výrobu tlakovodních reaktorů na světě. Indie provozuje 20 reaktorů, staví jich 13 a plánuje výstavbu 40 nových jaderných reaktorů. Indie také staví jaderné reaktory využívající jako palivo thorium, neboť největší naleziště tohoto prvku jsou právě na jejím území.

### 2.2 Jaderná energetika v České republice

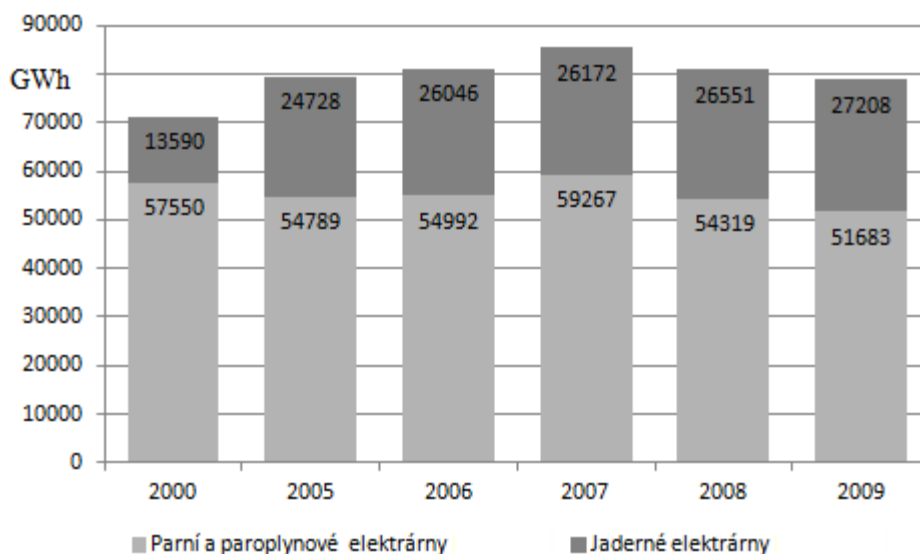
Výroba elektrické energie z jaderných elektráren nepatří v České republice mezi zanedbatelné položky. Strukturu výroby elektrické energie popisuje obr. 2-1 [2].



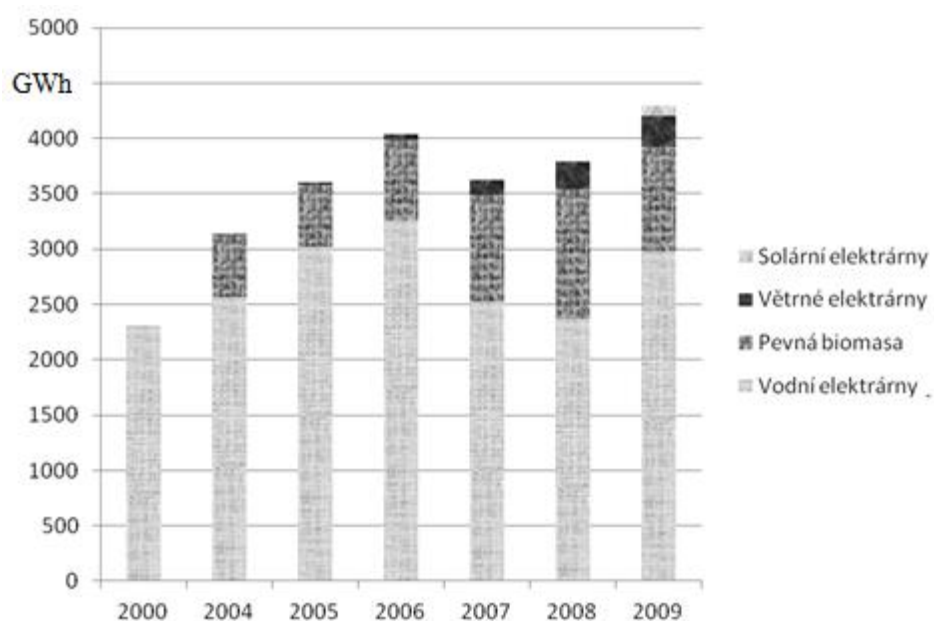
Obr. 2-1 Struktura výroby elektrické energie v České republice v roce 2009

Z obr. 2-1 je patrné, že se jaderná energetika na výrobě elektrické energie v roce 2009 podílela 33 %. Bez ní by poptávka po elektrické energii mohla být jen stěží naplněna. Celkovou bilanci

výroby elektrické energie z neobnovitelných zdrojů pro rok 2009 ukazuje obr. 2-2 [2], z obnovitelných zdrojů obr. 2-3 [2].



Obr. 2-2 Bilance výroby elektrické energie z neobnovitelných zdrojů v České republice pro rok 2009



Obr. 2-3 Bilance výroby elektrické energie z obnovitelných zdrojů v České republice pro rok 2009

Z obr. 2-3 je patrné, že v současné době v České republice nejsou elektrárny pracující s obnovitelnými zdroji schopny pokrýt poptávku po elektrické energii. V roce 2009 činila výroba elektřiny z neobnovitelných zdrojů 80 900 GWh, z obnovitelných zdrojů pouhých 6 306 GWh.

### 2.3 Jaderné elektrárny v České republice

V České republice jsou v provozu dvě jaderné elektrárny: Jaderná elektrárna Temelín a Jaderná elektrárna Dukovany.

### 2.3.1 Jaderná elektrárna Temelín

Jaderná elektrárna Temelín leží přibližně 24 km od Českých Budějovic a 5 km od Týna nad Vltavou. S instalovaným elektrickým výkonem 2 000 MW je největším energetickým zdrojem v České republice. Elektrickou energii vyrábí ve dvou výrobních blocích s tlakovodními reaktory VVER 1000 (třetí generace). Projekt byl z počátku plánován na čtyři výrobní bloky. Po roce 1989, kdy došlo ke změně politických a ekonomických podmínek, došlo k přehodnocení projektu a potřeby 4 000 MW zdroje. Postaveny byly pouze dva výrobní bloky, nicméně v současné době probíhají jednání o dostavbě zbývajících dvou bloků [6].

### 2.3.2 Jaderná elektrárna Dukovany

Jaderná elektrárna Dukovany se nachází 30 km jihovýchodně od Třebíče. V elektrárně jsou ve dvou dvojblocích instalovány celkem čtyři tlakovodní reaktory typu VVER 440 o celkovém projektovém výkonu 1 760 MW, tedy 440 MW na blok. Z důvodu modernizace technologických zařízení jak na primární, tak na sekundární smyčce mají v současnosti tři ze čtyř bloků elektrický výkon 500 MW, jeden disponuje výkonem 460 MW. Konečný cíl projektu Bezpečně 16 Tera je zvýšit celkový elektrický výkon elektrárny na 2 000 MW, čili 500 MW na každý reaktorový blok.

Historie Jaderné elektrárny Dukovany sahá až do počátku 70. let, kdy tehdejší Československo a Sovětský svaz v roce 1970 podepsaly mezivládní dohodu o výstavbě dvou jaderných elektráren. V prvním případě šlo o elektrárnu v Jaslovských Bohunicích na Slovensku a ve druhém v Dukovanech na jižní Moravě. Změna projektu posunula plné zahájení výstavby Jaderné elektrárny Dukovany až na rok 1978. První reaktorový blok byl uveden do provozu v květnu 1985, poslední čtvrtý blok v červenci 1987. Maximálního projektového výkonu 1 760 MW dosáhla elektrárna v červenci 1987. Spuštění dvou jaderných bloků – druhého a třetího – v jediném roce 1986 a na jedné lokalitě bylo ve své době zcela unikátní a doposud se ve světě neopakovalo. Od roku 1985 do jara roku 2009 bylo ve všech čtyřech blocích elektrárny vyrobeno téměř 300 mld. kWh elektrické energie, to je nejvíce ze všech elektráren v České republice. Elektrárna Dukovany pokrývá přibližně 20 % spotřeby elektrické energie v ČR. Ročně vyrobí více než 14 mld. kWh, což by stačilo k pokrytí spotřeby všech domácností v Česku [5].

## 2.4 Využití projektových rezerv Jaderné elektrárny Dukovany

Jaderná elektrárna Dukovany tvoří spolu s Vodní elektrárnou Dalešice o celkovém instalovaném elektrickém výkonu 4x 112 MW významný energetický komplex České republiky. Výkonové rezervy a konzervatismus původního projektu primárního okruhu Jaderné elektrárny Dukovany umožňují zvýšení elektrického výkonu na 113 % původního výkonu. Původní záměr projektu bylo postavení jaderné elektrárny se čtyřmi tlakovodními reaktory VVER 440 a délkou provozu 30 let, která vyprší v roce 2015. Současné zkušenosti s jadernými elektrárnami typu PWR (VVER) ukazují, že původní životnost byla silně podhodnocena a tyto elektrárny jsou schopny vyrábět elektrickou energii až 60 let. V souvislosti s prodloužením životnosti na Jaderné elektrárně Dukovany mluvíme o projektu Long Term Operation (LTO) [18], který v maximálním prodloužení počítá s ukončením provozu v roce 2045 [18].

## 2.5 Možnosti zvýšení účinnosti oběhu parního turbínového zařízení

Účinnost elektrárny využívající tepelný oběh je možné realizovat dvěma způsoby:

- zmenšením odvedeného tepla,
- zvětšením tepla přivedeného.

### 2.5.1 Zlepšení vakua kondenzátoru

Zmenšením odvedeného tepla lze dosáhnout zlepšením vakua v kondenzátoru. To je možné provést:

- snížením teploty chladicí vody,
- zvětšením průtoku chladicí vody,
- zvětšením teplosměnné plochy kondenzátu.

Pro zlepšení vakua v kondenzátoru existují určité hranice dané přírodními a technicko-ekonomickými podmínkami [14].

### 2.5.2 Zvyšování parametrů vstupní páry

Zvětšení přivedeného tepla lze realizovat zvýšením parametrů vstupní páry a to zvýšením tlaku nebo teploty. Účinnost oběhu na tlaku vstupní páry není monotónní funkcí. Od určité hodnoty tlaku účinnost klesá. Za to závislost účinnosti oběhu na teplotě vstupní páry extrém nemá. Zvyšování admisních parametrů je omezeno pevnostními možnostmi materiálu [14].

### 2.5.3 Regenerace tepla u parních oběhů

Aby parní kotel nemusel ohřívat vodu o parametrech na výstupu z turbíny, předehřejeme ji párou odebranou z turbíny.

### 2.5.4 Přihřívání páry

Účinnost parního oběhu lze zvýšit také tím, že turbínu rozdělíme na více částí (vysokotlakovou popř. středotlakovou a nízkotlakovou část) a provedeme expanzi v části vysokotlakové. Této páře přivedeme teplo, které ji za stálého tlaku ohřeje na teplotu před expanzí a pára expanduje v další části turbíny až na tlak v kondenzátoru [14].

### 2.5.5 Zvyšování účinnosti v jaderných elektrárnách s tlakovodními reaktory

Všechny výše zmíněné možnosti zvýšení účinnosti se u jaderných elektráren s tlakovodními reaktory nepoužívají. Nezvyšují se parametry vstupní páry. Pára odchází z parního generátoru v sytém stavu. Tlak v kondenzátoru se udržuje vyšší než v klasických tepelných elektrárnách z důvodu použití levnějšího paliva na množství energie, které obsahuje. Běžná opatření pro zvyšování účinnosti v jaderných elektrárnách s tlakovodními reaktory jsou:

- přihřívání páry mezi středotlakovými a nízkotlakovými částmi turbíny,
- regenerace tepla.

## 2.6 Projekt Bezpečně 16 Tera EDU

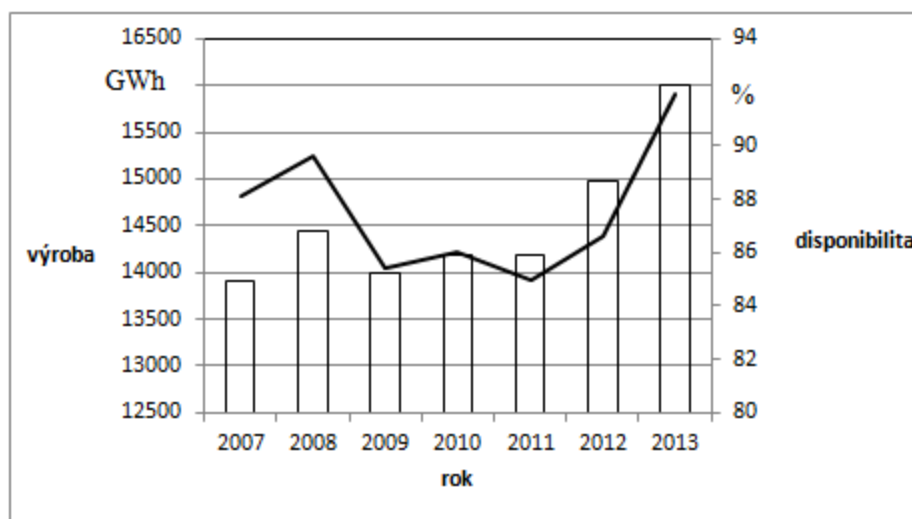
Program LTO Jaderné elektrárny Dukovany počítá s prodloužením životnosti Jaderné elektrárny Dukovany až do roku 2045 za současného rozšíření o pátý výrobní blok. Ten je ale z důvodu dostavby Jaderné elektrárny Temelín pro majitele elektráren – Skupinu ČEZ – až prioritou číslo dvě.

LTO je provoz jaderné elektrárny za hranicí stanoveného časového rámce (daného termíny licence, projektovými limity, standardy a předpisy atd.), který byl zdůvodněn bezpečnostními analýzami, zvažujícími životnost limitující procesy a vlastnostmi systémů, konstrukcí a komponent [18].

Toto prodloužení životnosti počítá s obměnou různých částí elektrárny. Nové díly jsou zároveň schopny využít výkonové rezervy instalovaných reaktorů. Projekt Bezpečně 16 Tera EDU, jehož součástí jsou podprojekty Využití projektových rezerv, podprojekt CIK\_CAK [17], jehož cílem je zkrácení odstávek a Modifikace systému kontroly a řízení (SKŘ) [24] zároveň navazuje na pozitivní zkušenosti při zvyšování výkonu v tlakovodních elektrárnách především v USA a na zkušenosti z elektráren přímo s reaktorem VVER 440. V minulosti totiž projektové rezervy využily finská Jaderná elektrárna Loviisa (o 10 %), ruská Jaderná elektrárna Kola (o 7 %) a maďarská Jaderná elektrárna Paks (o 8 %) [23].

Celý název projektu Bezpečně 16 Tera EDU je Využití projektových rezerv Jaderné elektrárny Dukovany a modifikace nízkotlakových dílů turbogenerátoru [16].

Motivací tohoto projektu je samozřejmě vyšší schopnost pokrytí poptávky po elektrické energii. Projekt předpokládá počínaje rokem 2013 výrobu elektrické energie 16 TWh za rok, což oproti projektovému plánu činí rozdíl 2 TWh ročně. Minulý a současný trend nárůstu výroby elektrické energie a její disponibility v letech 2007 až 2013 je ukázán v tab. 2-1 [16] a na obr. 2-4 [16].



Obr. 2-4 Trend vyrobené elektrické energie a disponibility Jaderné elektrárny Dukovany

Tab. 2-1 Vyrobena elektrická energie a disponibilita Jaderné elektrárny Dukovany

Roky	Výroba GWh	Disponibilita %
2007	13 907	88,10
2008	14 448	89,60
2009	13 995	85,40
2010	14 176	86,00
2011	14 189	85,00
2012	14 975	86,60
2013	16 003	91,90

### 2.6.1 Původní cíle projektu Bezpečně 16 Tera EDU

Realizace projektu Bezpečně 16 Tera EDU je záležitostí několika let. V závislosti na událostech v průběhu došlo ke změnám původních cílů projektu.

Původní cíle projektu byly:

- zvýšení výkonu bloku elektrárny Dukovany na 500 MW,
- zkrácení sumární roční délky odstávek v letech 2008 až 2013 v průměru o 35 dní oproti standardům z roku 2007,
- technická poruchovost maximálně 0,8 %,
- disponibilita elektrárny větší než 89 %,
- dosažená výroba 16 TWh v roce 2013,
- v průběhu realizace projektu podle ukazatele The World Association of Nuclear Operators (WANO) [26] udržovat bezpečnost na úrovni 20 % nejlépe hodnocených jaderných elektráren PWR na světě.

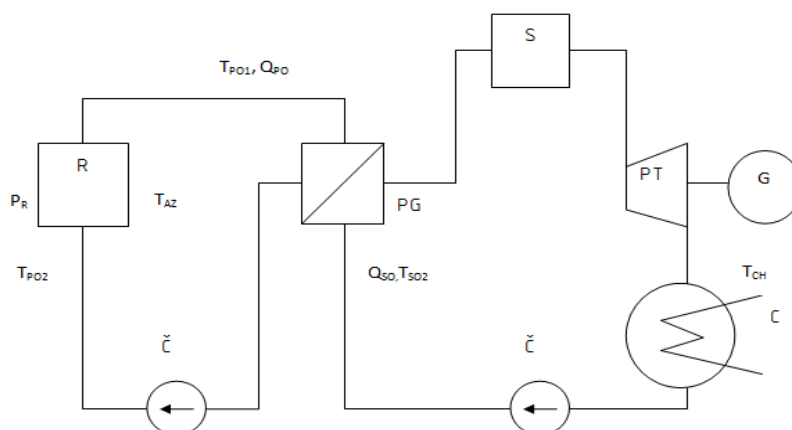
Cíle k roku 2010

- zvýšení výkonu bloku elektrárny Dukovany na 500 MW,
- zkrácení sumární roční délky odstávek v letech 2008 až 2013 v průměru o 35 dní oproti standardům z roku 2007,
- technická poruchovost maximálně 0,8 %,
- disponibilita elektrárny větší než 89 %,
- dosažená výroba 16 TWh v roce 2013,
- v průběhu realizace projektu podle ukazatele WANO udržovat bezpečnost na úrovni 30 % nejlépe hodnocených jaderných elektráren PWR na světě.

Změnu původních cílů od současných (pokles ukazatele WANO z 20 % na 30 % nejlépe hodnocených elektráren) způsobilo prodloužení odstávek v letech 2010 a 2011 na třetím reaktorovém bloku a to z důvodu časového podhodnocení nabídky ze strany zhotovitele [16].

### 2.6.2 Způsoby zvýšení výkonu v Jaderné elektrárně Dukovany

Realizace projektu byla schválena roku 2005. Základní myšlenkou je použití nového typu paliva Gd-2M a tím zvýšení tepelného výkonu reaktoru VVER 440 z 1375 MW na 1444 MW. Vyšší tepelný výkon je třeba odvést z reaktoru, proto se zvýší některé parametry primárního okruhu a spolu s parametry je nutné zajistit kompatibilitu parametrů a hlavních částí, především sekundárního okruhu. Změny parametrů jsou patry na obr. 2-5 a v tab. 2-2 [23]; (R – reaktor, PG – parní generátor, S – odlučovač páry, PT – parní turbína, G – generátor, C – kondenzátor, Č – čerpadlo, význam ostatních veličin je uveden v tab. 2-2).

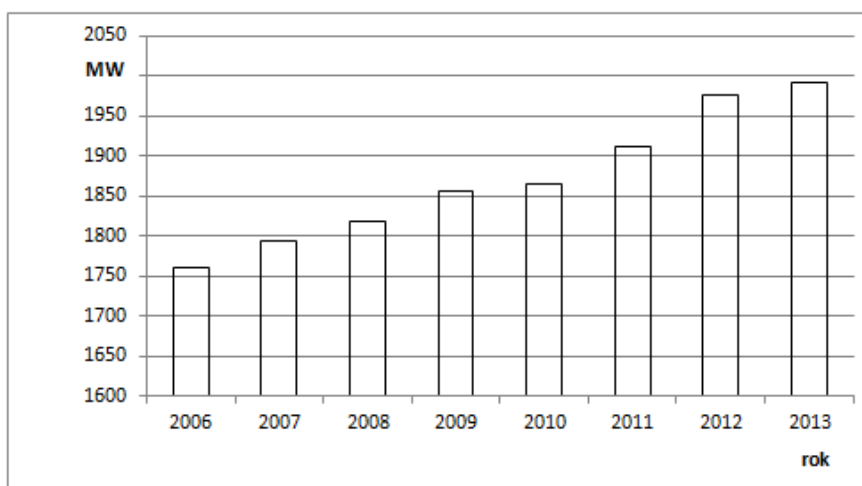


Obr. 2–5 Změny parametrů tepelného schématu Jaderné elektrárny Dukovany

Tab. 2–2 Změny parametrů tepelného schématu Jaderné elektrárny Dukovany

Parametr	Popis parametru	Zvýšení o
$P_R$	tepelný výkon reaktoru	69 MW
$\vartheta_{AZ}$	teplota aktivní zóny	1,4 °C
$\vartheta_{I.O.,h}$	teplota horké smyčky primárního okruhu	2 °C
$Q_{I.O.}$	hmotnostní průtok chladiva primárního okruhu	146,9 t · h <sup>-1</sup>
$\vartheta_{ch}$	teplota vody chladicího okruhu	0,5 °C
$Q_{II.O.}$	hmotnostní průtok vodní páry sekundárního okruhu	147,8 t · h <sup>-1</sup>
$\vartheta_{II.O.,s}$	teplota vodní páry studené smyčky sekundárního okruhu	1,7 °C
$\vartheta_{I.O.,s}$	teplota studené smyčky primárního okruhu	0,6 °C

Projekt počítá s celkovým zvýšením elektrického výkonu z 1 760 MW na 2 000 MW, což dělá zvýšení o 240 MW. Předpokládaný nárůst výkonu v letech 2006 až 2013 ukazuje obr. 2-6 [23].



Obr. 2–6 Předpokládaný nárůst výkonu Jaderné elektrárny Dukovany

Investice do projektu Bezpečně 16 Tera EDU jsou značné a jejich návratnost je závislá na prodloužení životnosti elektrárny (projekt LTO) a na cenách elektrické energie v těchto letech. V případě nesplnění podmínek a neudělení licence Státního úřadu pro jadernou bezpečnost pro provoz za projektovou životností by byl tento projekt silně ztrátový.

### 2.6.3 Jednotlivé inovace součástí, které se podílí na zvýšení výkonu

Výsledné zvýšení výkonu se skládá ze dvou efektů:

- zvýšení tepelného výkonu reaktoru použitím paliva Gd-2M,
- zvýšení účinnosti modifikovaných zařízení sekundárního okruhu a vyvedení výkonu.

Modifikovaná zařízení sekundárního okruhu a vyvedení výkonu se dále dělí na:

- výměnu rotorů nízkotlakových dílů turbín,
- výměnu rotorů vysokotlakových dílů turbín,
- výměnu dýz a odlučováků,
- zvýšení účinnosti cyklu provozem na vyšších parametrech.

Procentuální podíl jednotlivých obměn na zvýšení výkonu je uveden v tab. 2-3 [23].

Tab. 2–3 *Procentuální podíl obměn na zvýšení výkonu Jaderné elektrárny Dukovany*

Změna	Procentuální nárůst výkonu o
Zvýšení tepelného výkonu reaktoru použitím paliva Gd-2M	5,0 %
Výměna rotorů nízkotlakých dílů turbín	3,6 %
Výměna rotorů vysokotlakých dílů turbín	2,6 %
Výměna dýz a odlučováků, zvýšení účinnosti cyklu provozem na vyšších parametrech	1,8 %

### 2.6.4 Nový typ paliva Gd-2M

Rozdíl mezi současně používaným palivem Gd-2 a Gd-2M je především ve stupni obohacení. Průměrný stupeň obohacení vzrostl ze 4,25 % na 4,38 %. Stejně jako starší palivo Gd-2 obsahuje palivo Gd-2M palivové tyče se sloučeninami gadolinia. Gadolinium, jako dobrý pohlcovač neutronů, umožňuje nejen lepší vyrovnaní výkonu na začátku cyklu, ale jeho význam spočívá také ve zvýšení podkritičnosti skladovaných čerstvých souborů [23].

### 2.6.5 Harmonogram projektu Využití projektových rezerv

Nejdůležitější etapy projektu VPR jsou shrnuty v tab. 2-4 [19].

*Tab. 2–4 Etapy projektu VPR*

Etapa	Zahájení	Ukončení
Odstávka třetího výrobního bloku - VPR	10. 1. 2009	4. 4. 2009
Odstávka čtvrtého výrobního bloku - VPR	10. 10. 2010	28. 12. 2010
Odstávka prvního výrobního bloku - VPR	20. 8. 2011	20. 11. 2011
Odstávka druhého výrobního bloku - VPR	3. 3. 2012	26. 5. 2012
Dosažení výroby 16 TWh	10. 1. 2009	31. 12. 2013

Projekt VPR je spojen se spoustou rizik, které ho provází po celou dobu. Největší riziko je neobdržení kladného rozhodnutí Státního úřadu pro jadernou bezpečnost pro provoz na tepelném výkonu reaktoru 1 444 MW. Dalším rizikem je nemožnost výměny průtočné části vysokotlakového dílu, která by zajistila průtok turbínou pro 105 % výkon reaktoru [19].

### 3 ZKRÁCENÍ Odstávek

Jaderné reaktory můžeme dělit podle způsobu doplňování paliva na:

- reaktory s kampaňovitou výměnou paliva,
- reaktory s kontinuální výměnou paliva.

Palivo v jaderných reaktorech s kontinuální výměnou paliva lze vyměňovat kontinuálně - za chodu reaktoru. Reaktory VVER 440 stejně jako všechny tlakovodní reaktory mají kampaňovitou výměnu paliva. To znamená, že v případě potřeby výměny paliva (nejčastěji jednou za rok), dojde k plánovanému odstavení reaktoru, otevření reaktorové nádoby, výměny části paliva, přeskládání nevyhořelých palivových článků a vložení článků nových. Při n-letém palivovém cyklu se vždy vymění 1/n palivových článků. Projektový návrh Jaderné elektrárny Dukovany počítal s tříletým palivovým cyklem. Zdokonalováním palivových článků došlo v průběhu provozu k přechodu na cyklus čtyřletý a použití nového paliva Gd-2M počítá již s pětiletým cyklem.

Výměna paliva v jaderném reaktoru není záležitostí hodin. Celková doba odstávky trvá podle rozsahu kontrol a oprav jeden až tři měsíce a pro každou odstávku je vždy vypracován harmonogram akcí. Součástí odstávky jsou i různé technologické zkoušky komponent a kontroly měření v průběhu najetí reaktoru na 100 % jeho výkonu. Nicméně každý den, při kterém je reaktor odstaven a reaktorový blok nevyrábí elektrickou energii, je ztrátový. Proto je snahou odstávky optimalizovat a zkrátit je na minimální délku.

Optimalizace délky odstávek v Jaderné elektrárně Dukovany je cíl projektu s názvem CIK\_CAK. V odstávkách spojených s výměnou paliva probíhají další důležité činnosti, které nelze za provozu elektrárny realizovat. Jedná se především o revize, kontroly a generální a běžné opravy technologických zařízení přímo navazujících na tepelný okruh elektrárny a fyzikální testy jaderného reaktoru. Tyto činnosti představují většinu času odstávky, neboť samotná výměna paliva je záležitostí 2 až 3 dní.

Průběžně vyměňované komponenty a zařízení výrobních bloků umožňují díky technologickému pokroku méně časté revize a kontroly. Takto může dojít k celkovému zkrácení doby odstávky. V původním projektu elektrárny se počítalo s dobami odstávek 32, 67 a 85 dní. Přesně naplánovaný harmonogram dob odstávek je dán několik let dopředu. Podle rozsahu testů a oprav se v projektovém návrhu elektrárny počítalo se třemi dobami odstávek spojených s výměnou paliva. Původní doby a možné zkrácení těchto typů odstávek při implementaci projektu CIK\_CAK se nacházejí v tab. 3-2 [17].

Předpokládaný výsledek tohoto projektu je dosažení dob odstávek 20, 20, 20, 32, 20, 20, 20 a 63 dní, které se opakují každých osm let. Odhadované zkrácení odstávek spojených s výměnou paliva ve vyhodnocovacím období (rok 2007 až 30. června 2011) bylo 112 dní. Změny na třetím reaktorovém bloku započaly v roce 2008. Plán konce změn počítá s rokem 2012, čímž by v roce 2013 dosáhla Jaderná elektrárna Dukovany díky implementaci podprojektů VPR a CIK\_CAK výroby elektrické energie 16 TWh ročně [17].

Perioda revizí 6 kV rozveden koresponduje s odstávkami délky 32 a 63 dní. Dalším krokem přispívajícím ke zkrácení času odstávky je vytipování odstávek, u kterých nebude nutná přemanipulace systému dochlazování bloku s předběžným zkrácením odstávky o 12 hodin. Byla provedena optimalizace odstávování bloku. Spolu s nutným vypracováním legislativy bylo realizováno rozdělení kolektoru TY12 a zakoupeno mobilní čerpadlo k drenáži reaktoru. Časový

přínos se odhaduje na 12 hodin. U všech činností spojených s odstavováním bloku došlo k posílení provozního personálu. Také byla provedena optimalizace náběhu bloku. Díky implementaci nové metodiky vyhodnocení teplotního koeficientu reaktivity a revizí rozsahu testů neutronového toku se optimalizovaly testy spouštění. Optimalizace zkoušek PERIZ [17] počítá s časovým ziskem 12 hodin. U všech činností spojených s náběhem bloku došlo k posílení provozního personálu. Odstávky spojené s kompletním vyvezením paliva aktivní zóny a revizí tlakové nádoby reaktoru jsou plánovány po 8 letech a korespondují s odstávkami délky 63 dní [17].

Průběžné výsledky implementace projektu CIK\_CAK ukazují, že odhadovaná doba zkrácení odstávek je reálná. Na prvním, druhém a třetím výrobním bloku došlo ke zkrácení dob odstávek z 32 na 20 dnů. Některé nově plánované délky odstávek byly již v rozpočtu negativně ovlivněny realizací projektu Modifikace SKŘ M 3-5 (což znamenalo v letech 2010 a 2011 prodloužení dvou odstávek ze standardu 20 dní na dobu 35 respektive 33 dní, celkově o 28 dní u dosud ukončených odstávek proti původnímu plánu). Celková doba zkrácení odstávek pro výměnu paliva během implementace projektu v letech 2007 až 2011 činí 99,8 dní. Je třeba podotknout, že jakákoliv porucha zařízení, nutnost opakování zkoušky či jiný nesoulad v etapě odstavování či najetí bloku, v údržbě bloku nebo jiné odchylce, vede k nevratnému prodloužení doby odstávky [17].

Podrobný přehled o návrhu jednotlivých změn dob odstávek ukazuje tab. P-2 [17] a tab. P-3 [17].

*Tab. 3–1 Nové intervaly revizí, oprav, kontrol a zkoušek*

Typ revizí, oprav, kontrol a zkoušek	Interval
Revize jednoho parního generátoru s příslušným hlavním cirkulačním čerpadlem	1 rok
Revize jednoho systému havarijního chlazení	1 rok
Revize 6 kV rozvoden nenavazujících na systémové rozvodny	4 roky
Generální oprava motoru jednoho hlavního cirkulačního čerpadla	1 rok
Běžná oprava motoru jednoho hlavního cirkulačního čerpadla	1 rok
Kontrola tlakové nádoby reaktoru zvenku	8 let
Kontrola kompenzátoru objemu	8 let
Kontrola hlavní uzavírací armatury	16 let
Kontrola hydroakumulátorů	8 let
Primární zkouška turbogenerátoru	4 roky
Zkouška těsnosti hermetických prostor PERIZ	2 roky

*Tab. 3–2 Původní doby a možné zkrácení dob odstávek při implementaci projektu CIK\_CAK*

Doba projektového návrhu odstávky [dny]	Zkrácení [dny]	Nová doba odstávky [dny]
32	12	20
67	35	32
85	22	63

## 4 KONTROLA VÝBĚRU KONCOVÉHO JÍMAČE TEPLA TVD V JADERNÉ ELEKTRÁRNĚ DUKOVANY

Jakékoliv jaderné zařízení musí být provozováno podle definice jaderné bezpečnosti ve smyslu zákona 18/1997 Sb. Podle této definice je jaderná bezpečnost stav a schopnost jaderného zařízení a osob obsluhujících jaderné zařízení zabránit nekontrolovatelnému rozvoji štěpné řetězové reakce nebo nedovolenému úniku radioaktivních látek nebo ionizujícího záření do životního prostředí a omezovat následky nehod [28]. Jakýkoliv test jaderného zařízení, při kterém by byl zjištěn nesoulad s jadernou bezpečností, by měl za následek provedení takových opatření, aby zařízení jadernou bezpečnost splňovalo, nebo zastavení jeho činnosti.

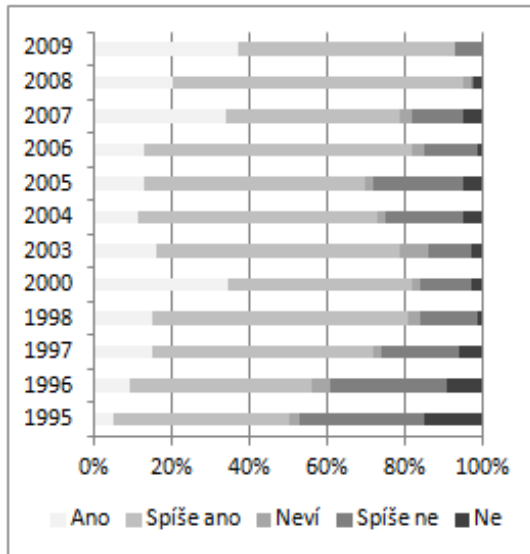
Na pozadí skutečnosti, ke které došlo 11. března 2011 na Jaderné elektrárně Fukushima-Daichi v Japonsku a na základě rozhodnutí Evropské rady, byly na všech elektrárnách nacházejících se na území Evropské unie, provedeny zátěžové testy. Tyto testy měly zhodnotit bezpečnost jaderných elektráren z hlediska tří základních bezpečnostních podmínek při jaderné havárii:

- bezpečné odstavení reaktoru,
- odvod zbytkového tepla z aktivní zóny,
- omezení úniku radioaktivních látek do okolí.

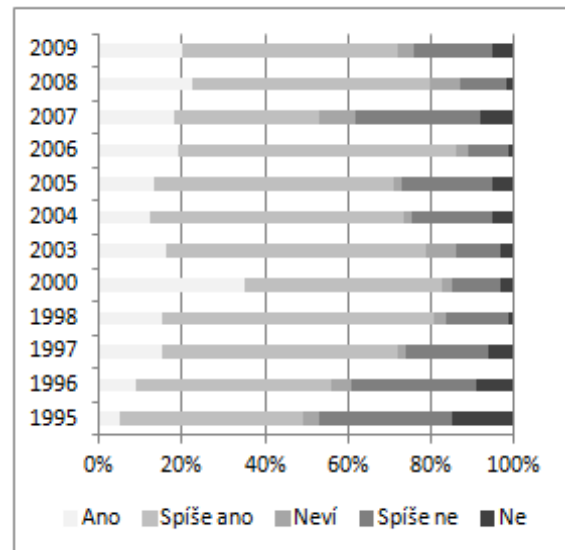
Tyto tři podmínky musí každá elektrárna splňovat za jakékoli kombinace nepříznivých podmínek bez ohledu na její nízkou pravděpodobnost.

Stress testům se nevyhnula ani Jaderná elektrárna Dukovany. I přes vysokou úroveň bezpečnosti elektrárny byla stanovena doporučení vedoucí k dalšímu zvýšení úrovně bezpečnosti a odolnosti čelit extrémním situacím, které mohou s určitou pravděpodobností v elektrárně nastat. Jedním z řešení je koncový jímač tepla pro odvod tepla z hlavního výrobního bloku Jaderné elektrárny Dukovany. Ačkoli se podmínky, které byly na elektrárně simulovány, mohou zdát v této lokalitě velice nepravděpodobné, elektrárna se snaží udržovat svoji pověst mezi lidmi i mezi mezinárodními organizacemi spojenými s jadernou energetikou na vysoké úrovni. Proto tato doporučení neberou provozovatelé elektrárny na lehkou váhu. To, že názory blízkého okolí a akceptovatelnost elektrárny i celé České republiky nejsou provozovatelům elektrárny lhostejné a snaha o podporu okolí je velká, dokazuje podpora elektrárny u obyvatel v regionu v okolí 20 km od elektrárny (obr. 4-1 [23]) a 5 km od elektrárny (obr. 4-2 [23]).

Testy, ze kterých vyplynulo doporučení stavby koncového jímače tepla, oficiálně nazvané Stress testy, proběhly v Jaderné elektrárně Dukovany od 22. června 2011 do 15. července 2011. Byly provedeny nejvýznamnějšími organizacemi zabývajícími se jadernou bezpečností např. firmou Westinghouse a ÚJV Řež. Testy posuzovaly elektrárnu z hlediska výskytu kombinace několika nadprojektových situací, jejichž četnost výskytu je jednou za 1 000 000 let. Zejména se jedná o případy zemětřesení, záplav a extrémních podnebných podmínek. I při těchto situacích musí Jaderná elektrárna Dukovany splňovat definici jaderné bezpečnosti – obsluhující personál musí být schopen bezpečně odstavit jaderný reaktor, zabezpečit odvod zbytkového tepla z aktivní zóny a bazénu skladování vyhořelého paliva a omezit úniku radioaktivních látek do okolí [20].



Obr. 4–1 Podpora elektrárny u obyvatel v regionu 20 km od elektrárny



Obr. 4–2 Podpora elektrárny u obyvatel v regionu 5 km od elektrárny

Výskyt zemětřesení a záplav v takovém rozsahu, který by jadernou bezpečnost Jaderné elektrárny Dukovany ohrozil, je v lokalitě, v jaké se elektrárna nachází, mizivá. Navíc v období minulých třiceti let byla na elektrárně provedena opatření se zesílením odolnosti některých bezpečnostně významných objektů [20]. S poněkud vyšší pravděpodobností se mohou v místě elektrárny objevit extrémní podnebné podmínky, které by mohly její jadernou bezpečnost ohrožovat.

Především událost extrémního větru. Bylo vyhodnoceno, že nápor větru o rychlosti 60,6 m/s, který má pravděpodobnost výskytu v místě elektrárny jednou za 10 000 let, by mohl vést k porušení skořepiny chladicích věží. Dále by došlo k přetrhání linek vedení 400 kV a 100 kV a ke zničení sifonů chlazení systému TVD. Shrnutí: došlo by k celkové ztrátě koncového jímače tepla a zbytkový výkon z aktivní zóny a bazénu skladování vyhořelého paliva by nebylo jak odvádět. V tlakové nádobě by docházelo ke zvyšování teploty a tlaku chladiva. Při nečinnosti obsluhujícího personálu v průběhu 16 hodin by se tlaková nádoba vlivem extrémních parametrů porušila, došlo by k přehřátí a následné destrukci palivového pokrytí a k úniku radioaktivních látek do hermetického prostoru. Při delší nečinnosti obsluhujícího personálu i k úniku radioaktivních látek z elektrárny do okolí [20]. K pádu chladicích věží v elektrárně vlivem extrémního větru již v minulosti došlo v elektrárně Ferrybridge ve Velké Británii v roce 1964 [3]. Nutno podotknout, že pád tří z osmi chladicích věží neměl tragické následky, jelikož se jednalo o klasickou tepelnou elektrárnu.

I přes stále velice nízkou pravděpodobnost této události bylo doporučeno provozovatelům elektrárny tuto skutečnost řešit. Provozovatel, společnost ČEZ a.s., si nechala vypracovat možné varianty řešení [20].

Varianty koncepčního řešení jsou:

- chlazení reaktorových bloků Jaderné elektrárny Dukovany doplňováním surové vody z Čerpací stanice Jihlava,
- zvýšení odolnosti stávajících chladicích věží,
- výstavba nových ventilátorových věží,
- výstavba nových hybridních nebo suchých chladicích věží,
- výstavba sprchových bazénů pro systém TVD.

Jednotlivé varianty byly hodnoceny podle několika kritérií s různou vahou důležitosti. Na základě ohodnocení jednotlivých variant řešení pro daná kritéria byla vybrána varianta s nejvyšším počtem bodů. Ohodnocení variant shrnuje tab. 4-1 [20].

Z tab. 4-1 vyplývá, že nejvhodnějším řešením daného problému je výstavba nových ventilátorových věží.

Tab. 4-1 Varianty koncepčního řešení ztráty koncového jímače tepla

Kritérium	Váha kritéria [%]	V1		V2		V3		V4		V5	
		Hodnocení [body]	Váhové hodnocení [body]	Hodnocení [body]	Váhové hodnocení [body]	Hodnocení [body]	Váhové hodnocení [body]	Hodnocení [body]	Váhové hodnocení [body]	Hodnocení [body]	Váhové hodnocení [body]
		Jaderná bezpečnost, umístění uvnitř chráněné zóny	30	1	0,3	10	3,0	10	3,0	1	0,3
Investiční náklady	10	5	0,5	6	0,6	5	0,5	3	0,3	4	0,4
Dlouhodobější náklady	15	4	0,6	5	0,8	5	0,8	2	0,3	5	0,8
Technická proveditelnost, časové hledisko	10	3	0,3	7	0,7	8	0,8	3	0,3	6	0,6
Ovlivnění provozu, nutnost odstávek, snížení výkonu	25	7	1,8	5	1,3	9	2,3	2	0,5	9	2,3
Možnost znovuuvedení do provozu	10	1	0,1	8	0,8	2	0,2	1	0,1	2	0,2
Celkové zhodnocení	100		3,6		7,1		7,5		1,8		6,3

V1 – chlazení reaktorových bloků Jaderné elektrárny Dukovany doplňováním surové vody z Čerpací stanice Jihlava, V2 – zvýšení odolnosti stávajících chladicích věží, V3 – výstavba nových ventilátorových věží, V4 – výstavba nových hybridních nebo suchých chladicích věží, V5 – výstavba sprchových bazénů pro TVD.

Systém TVD v Jaderné elektrárně Dukovany je chladicí okruh, který odvádí zbytkové teplo ze zařízení bezpečnostních systémů. V případě havárie primárního nebo sekundárního okruhu odvádí zbytkové teplo navíc z aktivní zóny a z bazénu skladování vyhořelého paliva [9]. Pro udržení jaderné bezpečnosti v Jaderné elektrárně Dukovany je tedy jeho funkce nepostradatelná. Současný systém TVD je napojený na chladicí věže výrobních bloků. V případě ztráty těchto chladicích věží a neexistence jiného koncového jímače tepla by nebylo možné odvádět zbytkový výkon z aktivní zóny. Pokud by existoval alternativní koncový jímač tepla, obslužný personál by provedl přemanipulaci systému TVD z chladicích věží výrobního bloku do nového koncového jímače tepla [9]. Nový koncový jímač tepla samozřejmě musí odolat extrémnímu větru a nesmí stát v blízkosti objektů, které by mohly být extrémním větrem zničeny.

Provozovatel požaduje spolehlivost a 100 % funkčnost při dvou variantách iniciačních událostí. Jelikož postup výběru koncového jímače tepla není znám, v této práci bude kontrola výběru

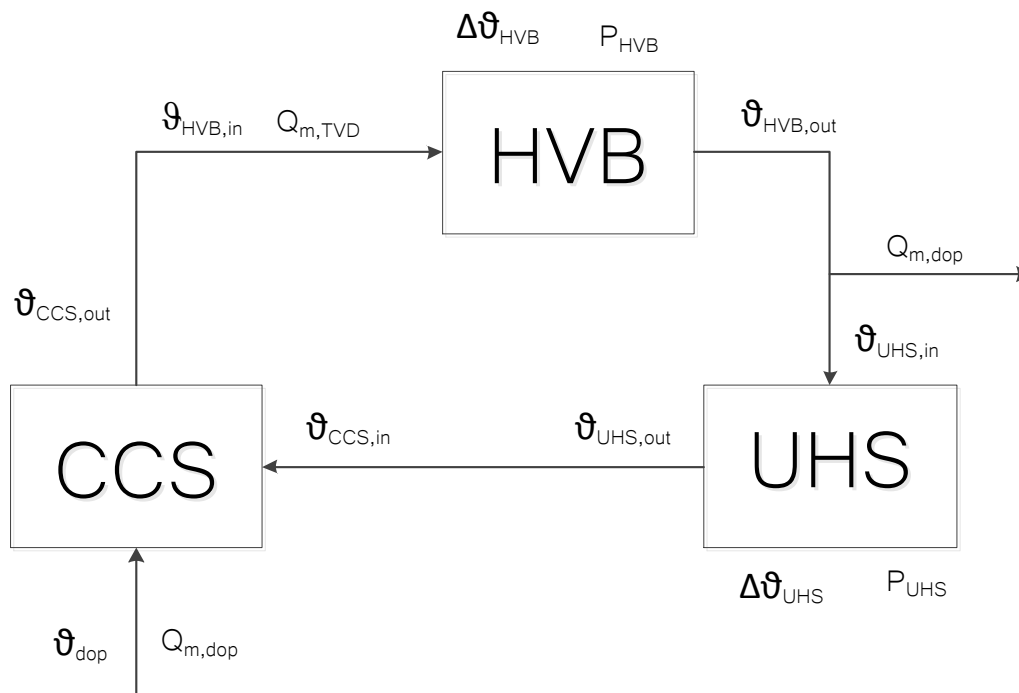
koncového jímače tepla provedena na základě vytvořeného matematického modelu systému TVD. Tento model s vybraným koncovým jímačem tepla bude muset splnit požadované podmínky.

#### 4.1 Matematický model systému TVD

Základní model systému TVD v Jaderné elektrárně Dukovany se skládá ze tří částí navzájem spojených potrubím:

- všechna zařízení hlavního výrobního bloku chlazená systémem TVD,
- nový koncový jímač tepla,
- centrální čerpací stanice,

a je ukázán na obr. 4-3 ( $Q_{m,TVD}$  – hmotnostní průtok chladicí vody systému TVD; HVB – hlavní výrobní blok;  $\vartheta_{HVB,in}$  – teplota vstupní chladicí vody systému TVD do hlavního výrobního bloku;  $\vartheta_{HVB,out}$  – teplota výstupní chladicí vody systému TVD z hlavního výrobního bloku;  $P_{HVB}$  – zbytkový výkon zařízení hlavního výrobního bloku předaný chladicí vodě systému TVD;  $\Delta\vartheta_{HVB}$  – změna teploty chladicí vody systému TVD způsobená zbytkovým výkonem zařízení hlavního výrobního bloku;  $Q_{m,dop}$  – hmotnostní průtok doplňování surové vody v centrální čerpací stanici;  $\vartheta_{dop}$  – teplota doplňované surové vody do centrální čerpací stanice; UHS – nový koncový jímač tepla;  $\vartheta_{UHS,in}$  – teplota chladicí vody systému TVD na vstupu do koncového jímače tepla;  $\vartheta_{UHS,out}$  – teplota chladicí vody systému TVD na výstupu z koncového jímače tepla;  $P_{UHS}$  – chladicí výkon koncového jímače tepla;  $\Delta\vartheta_{UHS}$  – změna teploty chladicí vody systému TVD způsobená chladicím výkonem koncového jímače tepla; CCS – centrální čerpací stanice;  $\vartheta_{CCS,in}$  – teplota vstupní chladicí vody systému TVD do centrální čerpací stanice;  $\vartheta_{CCS,out}$  – teplota výstupní chladicí vody systému TVD do centrální čerpací stanice).



Obr. 4–3 Základní blokové schéma systému TVD v Jaderné elektrárně Dukovany

V případě normálního provozu se předpokládá, že zbytkový výkon ze systému TVD je z 10 % odváděn přímo pomocí nového koncového jímače tepla, 90 % se chladí dodáváním surové chladicí vody v centrální čerpací stanici. Stejné množství vody se odvádí ze systému před vstupem do koncového jímače tepla. Pro případ havárie ztráty chladicích věží se uvažuje i se ztrátou funkčnosti tohoto přívodního potrubí, takže doplňování surové vody ve výpočtech není uvažováno [1].

Základní podmínkou zadavatele je, aby maximální teplota chladicí vody systému TVD na vstupu do hlavního výrobního bloku byla  $\vartheta_{HVB,in,max} = 33 \text{ °C}$  [1]. Z obr. 4-3 je patrné, že se teplota chladicí vody systému TVD na vstupu do hlavního výrobního bloku rovná teplotě chladicí vody systému TVD na výstupu z centrální čerpací stanice.

$$\vartheta_{HVB,in} = \vartheta_{CCS,out} \quad (5.1)$$

Tepelná kapacita chladiva se ve vratné potrubní trase z centrální čerpací stanice do hlavního výrobního bloku projevuje dopravním zpožděním teploty chladiva. Tepelná kapacita tedy způsobí zpoždění změny teploty chladiva na vstupu do hlavního výrobního bloku vůči teplotě chladiva na výstupu z centrální čerpací stanice. Toto dopravní zpoždění lze vypočítat podle vztahu (5.2) [1].

$$\Delta t_{DZ,vrat} = \frac{m_{p,vrat}}{Q_{m,TVD}} \quad (5.2)$$

- $m_{p,vrat}$  je hmotnost chladiva ve vratných potrubních trasách mezi centrální čerpací stanicí a hlavním výrobním blokem,
- $Q_{m,TVD}$  je hmotnostní průtok chladicí vody systému TVD.

Hmotnost chladiva ve vratných potrubních trasách mezi centrální čerpací stanicí a hlavním výrobním blokem lze vypočítat podle vztahu (5.3).

$$m_{p,vrat} = \rho_{33} \cdot V_{p,vrat} \quad (5.3)$$

- $\rho_{33}$  je hustota vody při maximální dovolené teplotě 33 °C,
- $V_{p,vrat}$  je celkový objem chladiva ve vratných potrubních trasách mezi centrální čerpací stanicí a hlavním výrobním blokem.

Jímky TVD v centrální čerpací stanici tlumí nárůst teploty chladicí vody systému TVD [1]. Teplotu chladicí vody na výstupu z centrální čerpací stanice lze spočítat ze vztahu (5.4).

$$\vartheta_{CCS,out} = \frac{m_{TVD} \cdot \vartheta_{UHS,out} + (m_{CCS} - m_{TVD}) \cdot \vartheta'_{CCS,out}}{m_{CCS}} \quad (5.4)$$

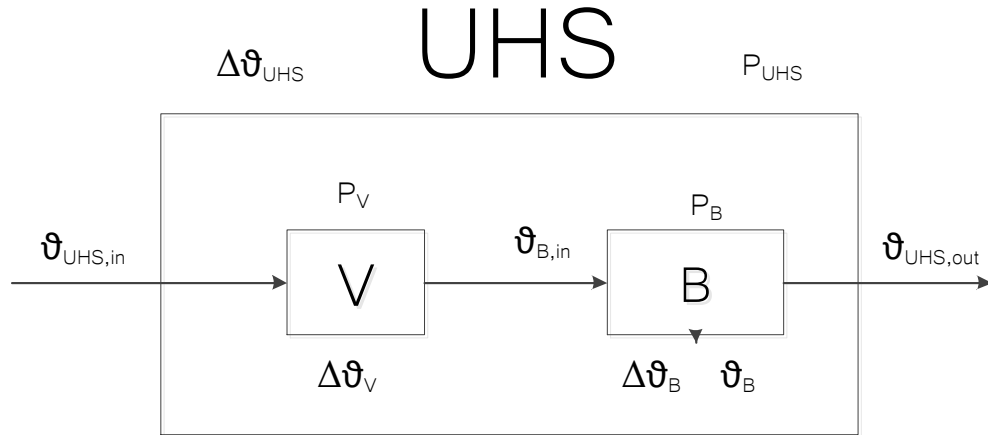
- $m_{TVD}$  je hmotnost chladicí vody systému TVD, která přiteče do jímky TVD v centrální čerpací stanici za časový krok  $\Delta t$ ,
- $\vartheta_{UHS,out}$  je teplota chladicí vody systému TVD na výstupu z koncového jímače tepla,
- $m_{CCS}$  je celková hmotnost chladicí vody v jímce TVD v centrální čerpací stanici,
- $\vartheta'_{CCS,out}$  je teplota chladicí vody systému TVD na výstupu z centrální čerpací stanice z předchozího časového kroku.

Hmotnost chladicí vody systému TVD, která přiteče do jímky TVD v centrální čerpací stanici za časový krok  $\Delta t$  je dána vztahem (5.5)

$$m_{TVD} = Q_{m,TVD} \cdot \Delta t \quad (5.5)$$

- $Q_{m,TVD}$  je hmotnostní průtok chladicí vody systému TVD,
- $\Delta t$  je časový krok simulace.

Blokové schéma koncového jímáče tepla je na obr. 4-4.



Obr. 4-4 Blokové schéma koncového jímáče tepla

Teplotu chladicí vody systému TVD na výstupu z koncového jímáče tepla při uvažování nezávislosti měrné tepelné kapacity na teplotě určíme z (5.6).

$$\vartheta_{UHS,out} = \frac{m_{TVD} \cdot \vartheta_{V,out} + (m_B - m_{TVD}) \cdot \vartheta'_{UHS,out}}{m_B} \quad (5.6)$$

- $m_{TVD}$  je hmotnost chladicí vody systému TVD, která přiteče do jímky TVD v centrální čerpací stanici za časový krok  $\Delta t$ ,
- $\vartheta_{V,out}$  je teplota chladicí vody systému TVD na výstupu z ventilátoru koncového jímáče tepla,
- $m_B$  je celková hmotnost chladicí vody v jímce bazénu koncového jímáče tepla,
- $\vartheta'_{UHS,out}$  je teplota chladicí vody systému TVD na výstupu z koncového jímáče tepla z předchozího časového kroku.

Hmotnost chladicí vody v jímkách TVD v centrální čerpací stanici se spočítá z rovnice (5.7).

$$m_{CCS} = \rho_{33} \cdot V_{CCS} \quad (5.7)$$

- $\rho_{33}$  je hustota vody při 33 °C,
- $V_{CCS}$  je objem chladicí vody v jímkách TVD v centrální čerpací stanici.

Teplota chladicí vody systému TVD na výstupu z ventilátoru koncového jímáče tepla je dána součtem teploty chladicí vody systému TVD na vstupu do koncového jímáče tepla a její změny v koncovém jímáči tepla. Spočte se podle vztahu (5.8).

$$\vartheta_{V,out} = \vartheta_{UHS,in} + \Delta\vartheta_V \quad (5.8)$$

- $\vartheta_{UHS,in}$  je teplota chladicí vody systému TVD na vstupu do koncového jímáče tepla,
- $\Delta\vartheta_V$  je změna teploty v koncovém jímáči tepla způsobená jeho chladicím výkonem.

Hmotnost chladicí vody v bazénu pod koncovým jímáčem tepla se spočítá z rovnice (5.9).

$$m_B = \rho_{33} \cdot V_B \quad (5.9)$$

- $\rho_{33}$  je hmotnostní průtok chladicí vody systému TVD,

- $V_B$  je objem chladicí vody v bazénu koncového jímače tepla.

Změna teploty v koncovém jímači tepla způsobená jeho chladicím výkonem je závislá také na průtoku chladicí vody systému TVD a spočítá se z rovnice (5.10).

$$\Delta\vartheta_V = \frac{P_V}{Q_{m,TVD} \cdot c_{33}} \quad (5.10)$$

- $P_V$  je chladicí výkon ventilátoru koncového jímače tepla,
- $Q_{m,TVD}$  je hmotnostní průtok chladicí vody systému TVD,
- $c_{33}$  tepelná kapacita vody při teplotě 33 °C.

Chladicí výkon koncového jímače tepla byl odečten z chladicích křivek ventilátorové chladicí věže [1] a může být aproximován rovnicí (5.11).

$$P_{UHS} = \alpha_{UHS} + \beta_{UHS} \cdot \vartheta_{UHS,in} \quad (5.11)$$

- $\vartheta_{UHS,in}$  je teplota chladicí vody systému TVD na vstupu do koncového jímače tepla,
- koeficienty  $\alpha_{UHS}$  a  $\beta_{UHS}$  jsou určeny z chladicích křivek ventilátorové chladicí věže zvoleného koncového jímače tepla.

Z obr. 4-3 je patrné, že teplota chladicí vody systému TVD na vstupu do koncového jímače tepla je rovna teplotě chladicí vody systému TVD na výstupu z hlavního výrobního bloku (5.12).

$$\vartheta_{UHS,in} = \vartheta_{HVB,out} \quad (5.12)$$

Tepelná kapacita chladiva v přívodní trase z hlavního výrobního bloku do koncového jímače tepla se projevuje dopravním zpožděním teploty chladiva. Tepelná kapacita tedy způsobí zpoždění změny teploty chladiva na vstupu do koncového jímače tepla vůči teplotě chladiva na výstupu z hlavního výrobního bloku. Toto dopravní zpoždění lze vypočítat podle vztahu (5.13) [1].

$$\Delta t_{DZ,priv} = \frac{m_{p,priv}}{Q_{m,TVD}} \quad (5.13)$$

- $m_{p,priv}$  je hmotnost chladiva v přívodních potrubních trasách mezi hlavním výrobním blokem a koncovým jímačem tepla spočtený ze vztahu,
- $Q_{m,TVD}$  je hmotnostní průtok chladicí vody systému TVD.

Hmotnost chladiva v přívodních potrubních trasách mezi hlavním výrobním blokem a koncovým jímačem tepla lze vypočítat podle vztahu (5.14).

$$m_{p,priv} = \rho_{33} \cdot V_{p,priv} \quad (5.14)$$

- $\rho_{33}$  je hustota vody teplotě 33 °C,
- $V_{p,priv}$  je celkový objem chladiva v přívodních potrubních trasách mezi hlavním výrobním blokem a koncovým jímačem tepla.

Teplota chladicí vody na výstupu z hlavního výrobního bloku se spočítá ze vztahu (5.15).

$$\vartheta_{HVB,out} = \vartheta'_{HVB,in} + \Delta\vartheta_{HVB} \quad (5.15)$$

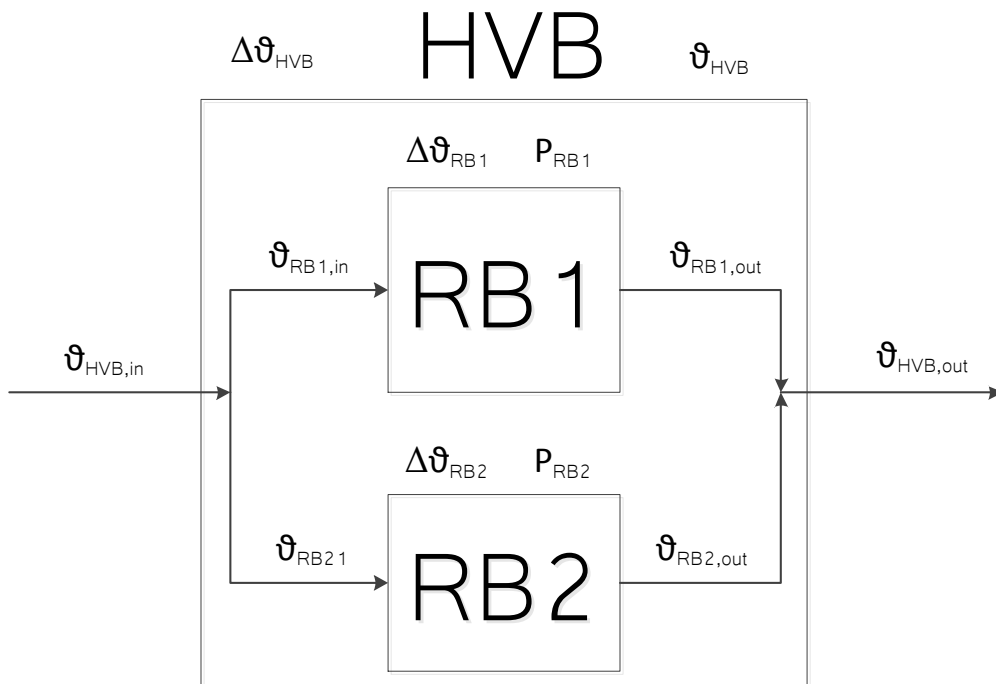
- $\vartheta'_{UHS,in}$  je teplota chladicí vody systému TVD na vstupu do hlavního výrobního bloku z předchozího časového kroku.
- $\Delta\vartheta_{HVB}$  je změna teploty chladicí vody systému TVD způsobená ztrátovým výkonem všech chlazených zařízení.

V případě uvažování měrné tepelné kapacity chladicí vody nezávislé její teplotě lze tuto změnu určit z (5.16).

$$\Delta\vartheta_{HVB} = \frac{P_{HVB}}{Q_{m,TVD} \cdot c_{33}} \quad (5.16)$$

- $P_{HVB}$  je tepelný výkon všech zařízení hlavního výrobního bloku chlazených systémem TVD,
- $Q_{m,TVD}$  je hmotnostní průtok chladicí vody systému TVD,
- $c_{33}$  je měrná tepelná kapacita vody při teplotě 33 °C.

Hlavní výrobní blok se skládá ze dvou reaktorových bloků, jak je naznačeno na obr. 4-5 (RB1, RB2 – reaktorové bloky;  $\vartheta_{RB1,in}$ ,  $\vartheta_{RB2,in}$  – vstupní teploty chladicí vody systému TVD do reaktorových bloků;  $\vartheta_{RB1,out}$ ,  $\vartheta_{RB2,out}$  – výstupní teploty chladicí vody systému TVD z reaktorových bloků;  $P_{RB1}$ ,  $P_{RB2}$  – zbytkové výkony zařízení reaktorových bloků;  $\Delta\vartheta_{RB1}$ ,  $\Delta\vartheta_{RB2}$  – změny teplot chladicí vody zbytkovým výkonem zařízení reaktorových bloků; význam ostatních veličin jako na obr. 4-3).

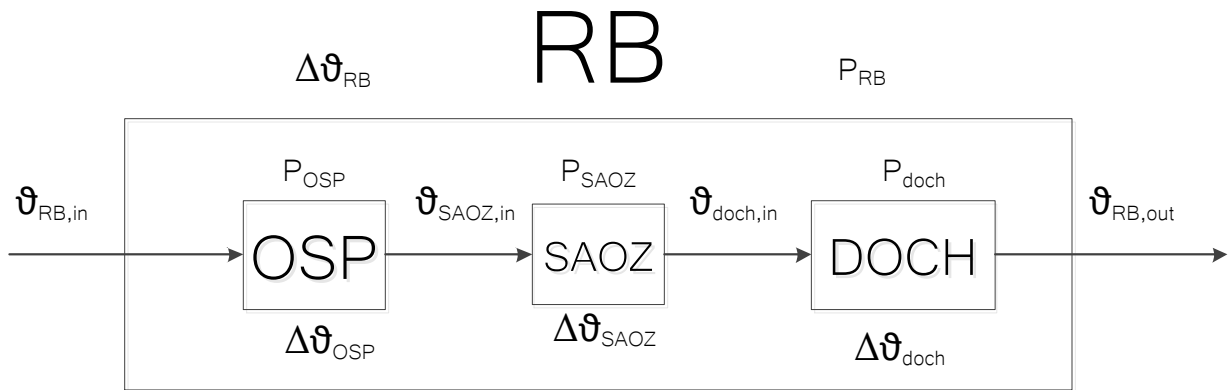


Obr. 4–5 Schéma hlavního výrobního bloku Jaderné elektrárny Dukovany

Tepelný výkon všech zařízení hlavního výrobního bloku chlazených systémem TVD je dán součtem výkonů zařízení obou reaktorových bloků chlazených systémem TVD podle rovnice (5.17).

$$P_{HVB} = P_{RB1} + P_{RB2} \quad (5.17)$$

- $P_{RB1}$  je tepelný výkon všech zařízení 1. reaktorového bloku chlazených systémem TVD,
- $P_{RB2}$  je tepelný výkon všech zařízení 2. reaktorového bloku chlazených systémem TVD.



Obr. 4–6 Schéma reaktorového bloku

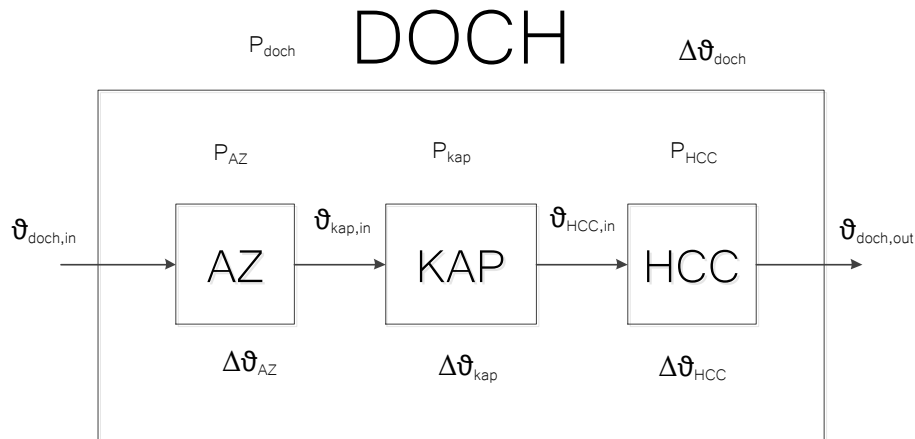
Odváděný tepelný výkon všech zařízení reaktorového bloku se skládá z tepelného výkonu:

- sprchového výměníku havarijního chlazení aktivní zóny,
- dochlazování reaktorového bloku,
- ostatních zařízení chlazených systémem TVD,

jak ukazuje obr. 4-6 (OSP - ostatní spotřebiče napojené na systém TVD;  $\vartheta_{OSP}$  – teplota chladicí vody na vstupu ostatních spotřebičů napojených na systém TVD;  $P_{OSP}$  – zbytkový výkon ostatních spotřebičů napojených na systém TVD předaný chladicí vodě systému TVD;  $\Delta\vartheta_{OSP}$  – změna teploty chladicí vody systému TVD následkem zbytkového výkonu ostatních spotřebičů napojených na systém TVD;  $\vartheta_{SAOZ,in}$  – teplota chladicí vody na vstupu sprchového výměníku havarijního chlazení aktivní zóny při události LOCA;  $P_{SAOZ}$  – zbytkový výkon sprchového výměníku havarijního chlazení aktivní zóny při události LOCA předaný chladicí vodě systému TVD;  $\Delta\vartheta_{SAOZ}$  – změna teploty chladicí vody systému TVD následkem zbytkového výkonu sprchového výměníku systému havarijního chlazení aktivní zóny při události LOCA;  $\vartheta_{doch,in}$  – teplota chladicí vody na vstupu zařízení dochlazujících reaktorový blok;  $P_{doch}$  – zbytkový výkon zařízení dochlazujících reaktorový blok předaný chladicí vodě systému TVD;  $\Delta\vartheta_{doch}$  – změna teploty chladicí vody systému TVD následkem zbytkového výkonu zařízení dochlazujících reaktorový blok; význam ostatních veličin jako na obr. 4-5) a spočítá se z rovnice (5.18).

$$P_{RB} = P_{SAOZ} + P_{doch} + P_{OSP} \quad (5.18)$$

- $P_{SAOZ}$  je zbytkový výkon tepelného výměníku systému havarijního chlazení aktivní zóny,
- $P_{doch}$  je tepelný výkon předávaný systému TVD při dochlazování reaktorového bloku,
- $P_{OSP}$  je tepelný výkon ostatních spotřebičů reaktorového bloku chlazených systémem TVD.



Obr. 4-7 Blokové schéma dochlazování reaktorového bloku

Odváděný tepelný výkon při dochlazování reaktorového bloku se dále skládá:

- ze zbytkového výkonu aktivní zóny,
- z kapacitního výkonu primárního okruhu předávaného systému TVD při dochlazování reaktorového bloku,
- z tepelného výkonu dodávaného do chladicí vody prací hlavních cirkulačních čerpadel [4],

jak ukazuje obr. 4-7 (AZ – aktivní zóna reaktoru;  $P_{AZ}$  - zbytkový výkon aktivní zóny;  $\Delta\theta_{AZ}$  – změna teploty chladicí vody systému TVD způsobená zbytkovým výkonem aktivní zóny; KAP – celková tepelná kapacita chladiva a konstrukčních materiálů primárního okruhu, parního generátoru a potrubních systémů ostré páry na trase mezi parním generátorem a technologickým kondenzátorem; HCC – hlavní cirkulační čerpadla;  $P_{kap}$  - zbytkový výkon celkové tepelné kapacity KAP;  $\Delta\theta_{kap}$  - změna teploty chladicí vody systému TVD způsobená zbytkovým výkonem KAP;  $P_{HCC}$  – tepelný výkon dodávaný do chladicí vody prací hlavních cirkulačních čerpadel;  $\Delta\theta_{HCC}$  - oteplení způsobené tepelným výkonem hlavních cirkulačních čerpadel; význam ostatních veličin jako na obr. 4-6) a spočítá ze vztahu (5.19).

$$P_{doch} = P_{AZ} + P_{kap} + P_{HCC} \quad (5.19)$$

- $P_{AZ}$  je zbytkový výkon aktivní zóny,
- $P_{kap}$  je kapacitní výkon primárního okruhu předávaný systému TVD při dochlazování reaktorového bloku,
- $P_{HCC}$  je zbytkový výkon prací hlavních cirkulačních čerpadel dodávaný do chladicí vody systému TVD.

Zbytkový výkon ostatních spotřebičů napojených na systém TVD je aproximován vztahem (5.20) [1].

$$P_{OSP} = P_{OSP,n} \cdot \frac{\Delta\theta_{I.O.,TVD}}{\Delta\theta_{I.O.,TVD,n}} \quad (5.20)$$

- $P_{OSP,n}$  je zbytkový výkon ostatních spotřebičů při nominálním rozdílu teploty chladiva primárního okruhu a chladicí vody systému TVD,
- $\Delta\theta_{I.O.,TVD}$  je rozdíl teplot chladiva primárního okruhu a chladicí vody systému TVD,
- $\Delta\theta_{I.O.,TVD,n}$  je rozdíl teploty chladicí vody systému TVD a teploty chladiva primárního okruhu za normálního provozu.

Zbytkový výkon aktivní zóny můžeme aproximovat časovou závislostí podle rovnice (5.21).

$$P_{AZ} = \alpha_{AZ} \cdot e^{\frac{\beta_{AZ}}{t}} + \gamma_{AZ} \quad (5.21)$$

- $t$  je počet sekund od odstavení reaktoru,
- $\alpha_{AZ}$ ,  $\beta_{AZ}$  a  $\gamma_{AZ}$  jsou aproximační koeficienty vychlazování aktivní zóny.

Zbytkový kapacitní výkon je závislý na trendu vychlazování primárního okruhu a je aproximován vztahem (5.22) [1].

$$P_{kap} = C_{I.O.} \cdot \frac{\partial \vartheta_{doch}}{\partial t} \quad (5.22)$$

- $C_{I.O.}$  je celková tepelná kapacita chladiva a konstrukčních materiálů primárního okruhu, parního generátoru a potrubních systémů ostré páry na trase mezi parním generátorem a technologickým kondenzátorem,
- $\frac{\partial \vartheta_{doch}}{\partial t}$  je rychlost vychlazování primárního okruhu.

Výkon odváděný prací hlavních cirkulačních čerpadel se uvažuje nezávislý na teplotě chladicí vody systému TVD. Celkový zbytkový výkon odváděný do chladicí vody systému TVD prací hlavních cirkulačních čerpadel je dán vztahem (5.23).

$$P_{HCC} = N_{HCC} \cdot P_{1HCC} \quad (5.23)$$

- $N_{HCC}$  je počet současně pracujících hlavních cirkulačních čerpadel při dochlazování bloku,
- $P_{1HCC}$  je výkon jednoho hlavního cirkulačního čerpadla chlazený systémem TVD.

Tepelná kapacita chladiva primárního okruhu je závislá na střední teplotě chladiva primárního okruhu. Tato závislost se dá aproximovat parabolou podle rovnice (5.24).

$$C_{I.O.} = \alpha_{C,I.O.} + \beta_{C,I.O.} \cdot \vartheta_{I.O.} + \gamma_{C,I.O.} \cdot \vartheta_{I.O.}^2 \quad (5.24)$$

- $\vartheta_{I.O.}$  je střední teplota chladiva primárního okruhu,
- $\alpha_{C,I.O.}$ ,  $\beta_{C,I.O.}$  a  $\gamma_{C,I.O.}$  jsou aproximační koeficienty závislosti tepelné kapacity  $C_{I.O.}$  na střední teplotě chladiva primárního okruhu

Časovou závislost střední teploty chladiva primárního okruhu můžeme vyjádřit aproximačním vztahem (5.25).

$$\vartheta_{I.O.} = \alpha_{\vartheta,I.O.} + \beta_{\vartheta,I.O.} \cdot t \quad (5.25)$$

- $t$  je počet sekund od odstavení reaktoru,
- $\alpha_{\vartheta,I.O.}$  a  $\beta_{\vartheta,I.O.}$  jsou koeficienty závislosti střední teploty primárního okruhu na čase od odstavení reaktoru.

Časovou osu iniciačních událostí shrnuje tab. 4-2 [1], okrajové podmínky iniciačních událostí jsou uvedeny v tab. P-1 [1] a základní parametry vybrané ventilátorové věže jsou uvedeny v tab. 4-3 [1].

Tab. 4–2 Časová osa iniciačních událostí

	1. varianta		2. varianta	
	RB1	RB2	RB1	RB2
Začátek chlazení sprchového výměníku při události LOCA [s]	-	1550	-	-
Konec chlazení sprchového výměníku při události LOCA [s]	-	-	-	-
Začátek dochlazování reaktorového bloku přes systém TVD [s]	7200	-	7200	7200
Konec dochlazování reaktorového bloku přes systém TVD [s]	27720	-	27720	27720

Tab. 4–3 Parametry referenční chladicí věže GEA Energietechnik GmbH 43473-D-KON-00-0002

Celkový počet buněk ventilátorové věže	6
Maximální počet chladicích buněk pro jeden podsystém TVD	2
Celkový průtok TVD na chladicí věž	11760 t · h <sup>-1</sup>
Průtok TVD na jednom podsystému (2 buňky)	3920 t · h <sup>-1</sup>
Teplota vstupní TVD při normálním provozu	44,2 °C
Teplota výstupní TVD při normálním provozu	23,2 °C
Chladicí výkon při normálním provozu a konfiguraci věže 3x2	51,4 MW
Chladicí výkon při normálním provozu a konfiguraci věže 3x1	25,7 MW
Ztráta vody odparem (% průtoku TVD na věž)	2,801 %
Ztráta vody úletem	0,001 %
Teplota vzduchu (suchý teploměr)	15,0 °C
Relativní vlhkost vzduchu	70 %
Teplota mokrého teploměru	11,9 °C
Atmosférický tlak	980,6 hPa

## 4.2 Vyhodnocení

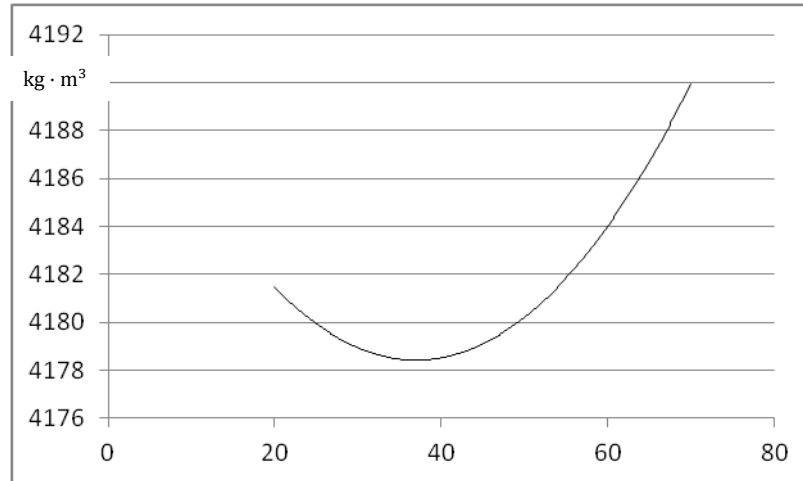
Těžištěm této práce byla kontrola výběru nového koncového jímače tepla pro případ ztráty současného jímače – chladicích věží terciárního okruhu vlivem extrémního větru. Zadavatelem byla požadována maximální teplota chladicí vody systému TVD na vstupu do koncového jímače tepla  $\vartheta_{HVB,in,max} = 33$  °C při požadovaných iniciačních událostech a zadaných vnějších podmínkách. Zařízení chlazená chladicí vodou o této teplotě jsou dostatečně chlazená a celá elektrárna splňuje tři základní podmínky pro bezpečný chod jaderné elektrárny při jaderné havárii, tj. bezpečné odstavení reaktoru, odvod zbytkového tepla z aktivního prostoru a vyhořelého paliva a omezení úniku radioaktivních látek do okolí.

Pro řešení této kontroly byl vypracován matematický model systému TVD se všemi zařízeními napojenými na tento systém. Model se skládá ze tří částí: hlavního výrobního bloku, kontrolovaného koncového jímače tepla a centrální čerpací stanice. Tyto bloky jsou spojeny potrubím systému TVD. Zařízení hlavního výrobního bloku chlazená systémem TVD tuto chladicí vodu ohřívají. Tato voda je ochlazována v koncovém jímači tepla, dále je čerpána do centrální čerpací stanice, kde probíhá směšování v jímkách systému TVD. Z těchto jímek je

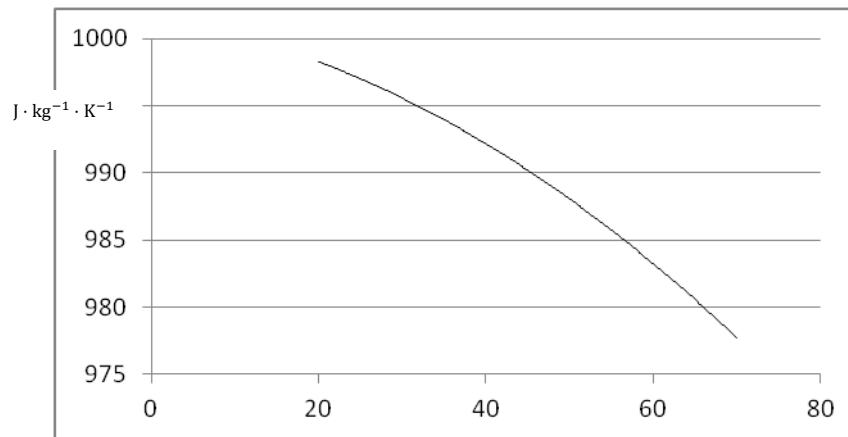
chladičí voda čerpána zpět do hlavního výrobního bloku, aby znovu ochlazovala jednotlivá zařízení.

Z popisu je zřejmé, že se jedná o uzavřený okruh. Pro uzavřené okruhy platí, že parametry na začátku okruhu jsou ovlivňovány změnami parametrů okruhu z předchozího časového kroku. Zadány byly tedy teploty a změny teplot v různých místech okruhu z nominálního provozu. Aplikací 1. termodynamického zákona a kalorimetrické rovnice byly sestaveny rovnice popisující časový průběh výkonů jednotlivých zařízení a změny teplot způsobené tímto výkonem. Analytické řešení celého okruhu je možné, nicméně některé zadané chlazené tepelné výkony (tepelného výměníku systému havárního chlazení aktivní zóny a dochlazování bloku) jsou chlazeny pouze v určitém časovém intervalu, ne v nekonečně dlouhém časovém období, tudíž jsou v časové oblasti analyticky nepopsatelné. Nabízí se možnost analytického řešení s využitím Laplaceovy transformace s obrazy funkcí jednotkových skoků. Výsledným obrazem řešení by ovšem byla tak složitá závislost  $f(p)$ , že zpětná transformace do časové oblasti by byla nemožná. Jedinou možností analytického řešení je rozdělení celého kontrolovaného časového období na jednotlivé časové intervaly, ve kterých jsou jednotlivé závislosti výkonů na čase analyticky popsateľné. Vzhledem k tomu, že by těchto intervalů muselo být kvůli složitosti zadání pět, byla zvolena metoda numerického řešení. Celkové časové období kontroly teplot 10 hodin bylo simulováno po časových krocích 5 s. Vhodným programem pro numerické řešení termohydraulického návrhu je použitý program Microsoft Excel 2007. Časové kroky řešení jsou zobrazeny jako jednotlivé řádky. Do programu stačí zadat závislosti pro první časový krok a nakopírováním tohoto řádku do dalších vznikne celková časová simulace.

Nevýhodou tohoto programu je hardwarová náročnost. Námí vytvořený matematický model obsahuje 44 rovnic pro jeden časový krok. Shodně výsledek každé rovnice je uložen v jedné buňce listu MS Excel. Při zvoleném časovém kroku 5 s a dobou simulace 10 hodin se jedná celkově o  $10 \cdot 3600/5 = 7200$  řádků. Každý řádek obsahuje 44 výpočtů a simulovány jsou 4 iniciační události. Celkově to dělá 1 267 200 kroků výpočtu. Jedná se pouze o velice zjednodušený model. Původním záměrem bylo vytvoření modelu reálněji popisujícího průběhy teplot tím způsobem, že byla počítána hustota chladičí vody systému TVD a její měrná tepelná kapacita v závislosti na její teplotě v místě výpočtu. Tento model obsahoval celkově 133 rovnic na jeden řádek a výpočet byl příliš hardwarově náročný. Otázkou zůstává, jaká je chyba výpočtu způsobená zjednodušením, že hustotu a měrnou tepelnou kapacitu chladičí vody uvažujeme v celém okruhu a celém časovém období konstantní. Z obr. 4-8 a obr. 4-9 vyplývá, že pro simulované rozmezí teplot od 25 °C do 80 °C se skutečné hodnoty od použitých hodnot liší maximálně o 20 kg · m<sup>-3</sup>, resp. 26 J · kg<sup>-1</sup> · K<sup>-1</sup>, procentuálně 2 % resp. 0,6 %. Chyba je tedy zanedbatelná.



Obr. 4–8 Měrná tepelná kapacita vody v závislosti na její teplotě



Obr. 4–9 Hustota vody v závislosti na její teplotě

Dalším zjednodušením byl předpoklad, že všechna zařízení hlavního výrobního bloku byla chlazená vodou systému TVD o stejné teplotě a to teplotě na vstupu do hlavního výrobního bloku – nebylo uvažováno postupné ohřívání chladicí vody. Výkon předávaný chladicí vodě systému TVD ostatními spotřebiči a kapacitním výkonem primárního okruhu je závislý na teplotě chladicího média. Postupné ohřívání chladicí vody způsobí, že rozdíl skutečné teploty na vstupu do ostatních spotřebičů napojených na systému TVD a teploty uvažované může činit až  $6^\circ\text{C}$ . Z rovnice (5.20) je zřejmé, že i při této odchylce může dělat rozdíl skutečného a teoretického výkonu předaného chladicí vodě systému TVD 100 kW. Relativní chyba je tedy 1,4 %.

## 4.2.1 Výsledky simulace

### 4.2.1.1 Varianta 1, konfigurace chladicí věže 3x2 chladicí buňky

Časový průběh výkonů na obr. P-4 ukazuje, že v čase  $t = 1\,550\text{ s}$  dochází k prudkému nárůstu chlazeného výkonu systémem TVD na  $P_{HVB} = 68,5\text{ MW}$ . Tento nárůst je způsoben začátkem chlazení tepelného výměníku systému havarijního chlazení aktivní zóny. V důsledku toho vzroste teplota chladicí vody systému TVD na vstupu do hlavního výrobního bloku na hodnotu  $\vartheta_{HVB,in} = 29,6^\circ\text{C}$ . V čase  $t = 7\,200\text{ s}$  nastává další nárůst chlazeného výkonu tentokrát způsobený začátkem dochlazování bloku přes technologický kondenzátor a jeho chlazení systémem TVD. Chlazený výkon z hlavního výrobního bloku v tomto čase je  $P_{HVB} = 140\text{ MW}$ .

Chladicí výkon ventilátorové věže s určitým zpožděním kopíruje časový průběh ztrátového výkonu hlavního výrobního bloku, stíhá tedy tento výkon odvádět do atmosféry. V čase  $t = 15\,010$  s dosahuje teplota  $\vartheta_{HVB,in}$  maximální hodnoty  $\vartheta_{HVB,in,max} = 31,8$  °C. Základní podmínka udržení této teploty pod hodnotou 33 °C je tedy pro tuto variantu a konfiguraci ventilátorové věže splněna.

#### 4.2.1.2 Varianta 1, konfigurace chladicí věže 3x1 chladicí buňky

Jedná se opět o variantu 1, takže časový průběh  $P_{HVB}$  je přibližně shodný jako ve variantě s konfigurací věže 3x2 chladicí buňky. Z obr. P-6 je ale zřejmé, že časový průběh teploty není ani zdaleka stejný. Chladicí výkon ventilátorové věže při této konfiguraci není schopen odvádět takové množství zbytkového výkonu při požadované teplotě  $\vartheta_{HVB,in,max}$ . Obr. P-7 sice ukazuje, že chladicí výkon ventilátorové věže  $P_{UHS}$  se v čase přibližně  $t = 20\,000$  s přibližně vyrovnal aktuálnímu výkonu  $P_{HVB}$ , ale výkon  $P_{UHS}$  je funkcí vstupní teploty do koncového jímače tepla  $\vartheta_{UHS,in}$  a tato teplota překročila podmínku  $\vartheta_{HVB,in,max} = 33$  °C. Pro 1. variantu je chladicí výkon věže s konfigurací jedné chladicí buňky na jeden podsystém TVD nedostačující.

#### 4.2.1.3 Varianta 2, konfigurace chladicí věže 3x2 chladicí buňky

Druhá varianta uvažuje začátek dochlazování obou reaktorových bloků v čase  $t = 7\,200$  s. Na obr. P-8 je znázorněn časový průběh teploty při druhé variantě zadání a při konfiguraci chladicí věže 3x2 chladicí buňky. Od času  $t = 614$  s dochází k pozvolnému zvyšování teploty změnou odváděného výkonu z hlavního výrobního bloku. Dopravní zpoždění ve vratných potrubních trasách systému TVD mezi centrální čerpací stanicí a hlavním výrobním blokem zapříčiňuje, že se tato změna neprojeví okamžitě. Jak je vidět z obr. P-9, v čase  $t = 7\,200$  s dochází k obrovskému nárůstu odváděného výkonu z hlavního výrobního bloku způsobený právě dochlazováním obou reaktorových bloků. Celkový výkon  $P_{HVB}$  na začátku dochlazování je  $P_{HVB} = 152,09$  MW. Během časového období 305 s (dopravní zpoždění na přívodních trasách systému TVD mezi hlavním výrobním blokem a ventilátorovou věží) dochází ke zvýšení chladicího výkonu ventilátorové věže  $P_{UHS}$  a v čase  $t = 12\,000$  s k přibližnému vyrovnání těchto výkonů. Přitom maximální teplota na vstupu do hlavního výrobního bloku nepřesahuje  $\vartheta_{HVB,in,max} = 32,3$  °C. Tedy i pro druhou variantu byla splněna zadaná podmínka  $\vartheta_{HVB,in,max} = 33,0$  °C. V 1. variantě a stejné konfiguraci věže dosahovala maximální teplota na vstupu do hlavního výrobního bloku teplotu  $\vartheta_{HVB,in,max} = 31,8$  °C. Z tohoto pohledu je 2. varianta náročnější na dochlazování než varianta 1.

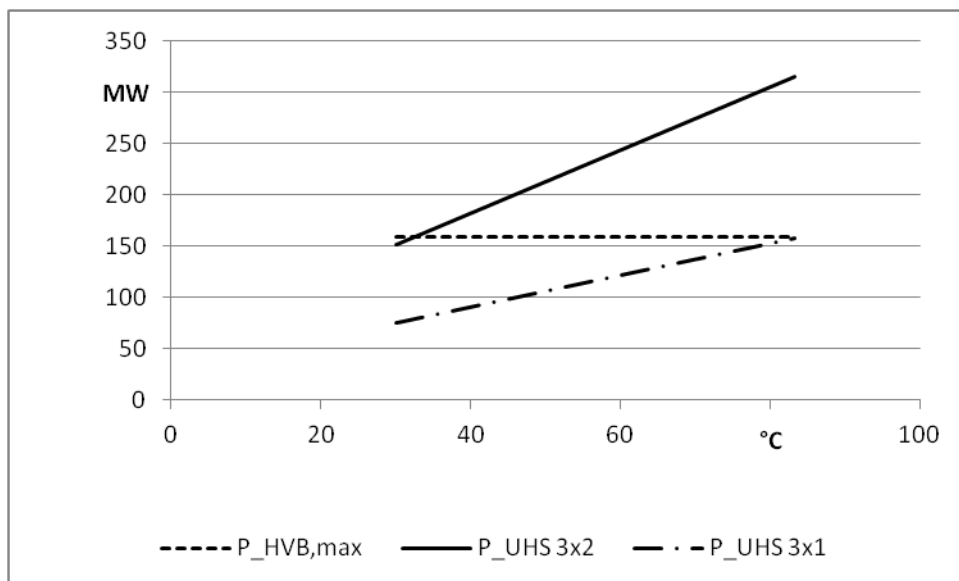
#### 4.2.1.4 Varianta 2, konfigurace chladicí věže 3x1 chladicí buňky

Na obr. P-10 a obr. P-11 jsou znázorněny časové průběhy  $\vartheta_{HVB,in}$  a výkony  $P_{HVB}$  a  $P_{UHS}$ . Teplota na vstupu do hlavního výrobního bloku při této variantě a této konfiguraci věže dosahuje v čase  $t = 24\,000$  s hodnoty  $\vartheta_{HVB,in} = 78,3$  °C, což je o více než 55 °C více než je podmínka zadavatele. Ani při druhé variantě není ventilátorová věž při konfiguraci tří chladicích buněk schopna odvádět veškeré ztrátové teplo z hlavního výrobního bloku. Dokonce v čase  $t = 27\,725$  s v matematickém modelu dochází k chlazení chladicí vody systému TVD zařízeními hlavního výrobního bloku vlivem předpokládaného trendu vychlazování  $\partial\vartheta_{kap}/\partial t = 30$  °C · h<sup>-1</sup>. Tento stav je v rozporu s 2. termodynamickým zákonem, neboť se uvažuje, že ztrátový výkon těchto zařízení se jinou cestou než systémem TVD nepředává. Nicméně to dokazuje, že tímto trendem není ani zdaleka možné aktivní zónu vychlazovat.

Na obr. P-12 jsou pro zopakování zobrazeny všechny časové závislosti teplot na vstupu do hlavního výrobního bloku (křivka V1 3x2 – 1. varianta a konfigurace ventilátorové věže se šesti chladicími buňkami; křivka V1 3x1 – 1. varianta a konfigurace ventilátorové věže se třemi chladicími buňkami; křivka V2 3x2 – 2. varianta a konfigurace ventilátorové věže se šesti chladicími buňkami; křivka V2 3x1 – 2. varianta a konfigurace ventilátorové věže se třemi chladicími buňkami).

#### 4.2.2 Závěr

Konfigurace věže se třemi chladicími buňkami nesplňuje podmínku  $\vartheta_{HVB,max} = 33,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  pro obě varianty. Matematický model dokázal, že tato teplota je závislá na velkém množství faktorů. Hlavním faktorem je bilance mezi výkonem dodávaným chladicí vodě systému TVD v hlavního výrobního bloku a chladicím výkonem ventilátorové věže. Chladicí výkon  $P_{UHS}$  musí být alespoň stejně velký jako  $P_{HVB}$  jelikož neuvažujeme žádné další chlazení. Jímka v centrální čerpací stanici, stejně tak bazén pod ventilátorovou věží pouze tlumí nárůst teploty, její maximální hodnotu, která by byla dosažena za určitý čas, ovšem neovlivní. Z toho vyplývá, že pokud by výkon  $P_{HVB}$  pro danou teplotu  $\vartheta_{HVB,in}$  byl větší než výkon  $P_{UHS}$  pro teplotu  $\vartheta_{UHS,in} = \vartheta_{HVB,in} + \Delta\vartheta_{HVB}$ , docházelo by k neustálému zvyšování teploty. Tuto situaci popisuje obr. 4-10. Je na něm znázorněno, že chladicí výkon ventilátorové věže v konfiguraci 3x2 chladicí buňky dosáhne stejného chladicího výkonu, jako je maximální chlazený výkon  $P_{HVB,max} = 159,02\text{ MW}$ , při teplotě  $\vartheta_{HVB,in}$  nižší než  $33\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Zatímco chladicí výkon ventilátorové věže je stejný jako chlazený výkon hlavního výrobního bloku až při více než  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ . I z tohoto hrubého nástinu celkové výkonové bilance systému TVD je jasná neschopnost chladit tento systém věží v konfiguraci 3x1 chladicí buňka. Chladicí křivky ventilátorové věže jsou ještě závislé na průtoku chladicí vody systému TVD a na okolní teplotě. Zvýšení průtoku je nemožné z hlediska požadavku funkčnosti pouze tří čerpadel. Otázkou zůstává, zda teplota okolí  $\vartheta_o = 39,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  není příliš konzervativní.



Obr. 4-10 Chladicí křivky vybrané ventilátorové věže pro různé konfigurace

Další možností zlepšení výkonové bilance okruhu je snížit chlazený výkon hlavního výrobního bloku. Zde je možnost pouze snížit zadaný trend dochlazování reaktorového bloku. Snížení tohoto trendu na hodnotu, řekněme třetiny požadované hodnoty  $\partial\vartheta'_{kap}/\partial t = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , by

znamenal snížení odváděného kapacitního výkonu na třetinu  $P'_{kap} = 5,833 \text{ 3 MW}$ . Došlo by ke snížení maximálního chlazeného výkonu reaktorového bloku asi o 10 MW, výkonu hlavního reaktorového bloku tedy asi o 20 MW a teplota  $\vartheta_{HVB,in}$ , při které by platila podmínka  $P_{HVB} = P_{UHS}$ , by se snížila asi na 70 °C. I tak by byla stále vyšší než požadovaná teplota.

Byla provedena kontrola ventilátorové věže GEA Energietechnik GmbH typu 43473-D-KON-00-0002 jako nového koncového jímače tepla pro Jadernou elektrárnu Dukovany pro případ zřízení stávajících chladicích věží a konfigurace věže 3x2 chladicí buňky vyhovuje zadaným požadavkům. Konfigurace 3x1 chladicí buňka zadaným požadavkům nevyhovuje.

# PŘÍLOHY

Tab. P-1. Okrajové podmínky iniciačních událostí

Název	Značka	Hodnota
Časový krok	$\Delta t$	5
Nominální teplota chladicí vody systému TVD na vstupu do hlavního výrobního bloku	$\vartheta_{HVB,in,n}$	22,6 °C
Nominální rozdíl střední teploty chladiva primárního okruhu a chladicí vody systému TVD	$\Delta\vartheta_{I.O.,TVD,n}$	261,7 °C
Počáteční střední teplota chladiva primárního okruhu	$\vartheta_{I.O.,n}$	284,3 °C
Konečná střední teplota chladiva primárního okruhu	$\vartheta_{I.O.,inf}$	40,0 °C
Hmotnostní průtok chladicí vody systému TVD	$Q_{m,TVD}$	816,7 kg · s <sup>-1</sup>
Přírůstek hmotnost chladicí vody systému TVD za časový krok	$m_{TVD}$	4 083,3 kg
Nominální chlazený výkon ostatních spotřebičů reaktorového bloku	$P_{OSP,n}$	6 837 kW
Nominální chlazený výkon ostatních spotřebičů reaktorového bloku při události LOCA	$P_{OSP,LOCA}$	3 034 kW
Chlazený výkon sprchového výměníku systému havarijního chlazení aktivní zóny	$P_{SAOZ}$	5 990 kW
Rychlost vychlazování reaktorového bloku	$\frac{\partial\vartheta_{doch}}{\partial t}$	30 °C · h <sup>-1</sup>
Aproximační konstanty zbytkového výkonu aktivní zóny	$\alpha_{AZ}$	3,425 7 · 10 <sup>7</sup> W
	$\beta_{AZ}$	-2,000 0 · 10 <sup>3</sup> s
	$\gamma_{AZ}$	1,477 0 · 10 <sup>7</sup> W
Aproximační konstanty závislosti celkové tepelné kapacity chladiva primárního okruhu na střední teplotě chladiva primárního okruhu	$\alpha_{C,I.O.}$	1,911 9 · 10 <sup>9</sup> J · K <sup>-1</sup>
	$\beta_{C,I.O.}$	-8,000 0 · 10 <sup>5</sup> J · K <sup>-2</sup>
	$\gamma_{C,I.O.}$	9,000 0 · 10 <sup>3</sup> J · K <sup>-3</sup>
Aproximační konstanty závislosti střední teploty chladiva primárního okruhu na čase	$\alpha_{\vartheta,I.O.}$	2,700 0 · 10 <sup>2</sup> °C
	$\beta_{\vartheta,I.O.}$	-8,333 30 · 10 <sup>-3</sup> K · s <sup>-1</sup>
Výkon odváděný prací jednoho hlavního cirkulačního čerpadla do chladicí vody systému TVD	$P_{1HCC}$	1 600 kW
Počet současně pracujících hlavních cirkulačních čerpadel při dochlazování bloku	$N_{HCC}$	3

Nominální změna teploty chladicí vody způsobená ztrátovým výkonem všech zařízení hlavního výrobního bloku	$\Delta\vartheta_{HVB,n}$	5,9 °C
Nominální teplota chladicí vody systému TVD na výstupu do hlavního výrobního bloku	$\vartheta_{HVB,out,n}$	28,5 °C
Dopravní zpoždění změny teploty chladiva na vstupu do koncového jímače tepla vůči teplotě chladiva na výstupu z hlavního výrobního bloku	$t_{DZ,priv}$	304,9 s
Dopravní zpoždění změny teploty chladiva na vstupu do hlavního výrobního bloku vůči teplotě chladiva na výstupu z centrální čerpací stanice	$t_{DZ,vrat}$	610,8 s
Nominální teplota chladicí vody na výstupu z koncového jímače tepla	$\vartheta_{UHS,out}$	25,3 °C
Objem bazénu pod koncovým jímačem tepla	$V_B$	345,6 m <sup>3</sup> *
Hmotnost chladicí vody systému TVD pod koncovým jímačem tepla	$m_B$	343,77 t*
Aproximační konstanty chladicího výkonu koncového jímače tepla	$\alpha_{UHS}$	-8,461 6 · 10 <sup>7</sup> W*
	$\beta_{UHS}$	3,077 0 · 10 <sup>6</sup> W · K <sup>-1</sup> *
Objem jímky TVD v centrální čerpací stanici	$V_{CCS}$	675 m <sup>3</sup>
Hmotnost chladicí vody v jímkách TVD v centrální čerpací stanici	$m_{CCS}$	671,42 t
Nominální změna teploty v jímkách systému TVD způsobená doplňováním surové vody	$\Delta\vartheta_{J,n}$	-2,7 °C
Hustota vody při 33 °C	$\rho_{33}$	994,7 kg · m <sup>-3</sup>
Měrná tepelná kapacita vody při 33 °C	$c_{33}$	4178,8 J · kg <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup>

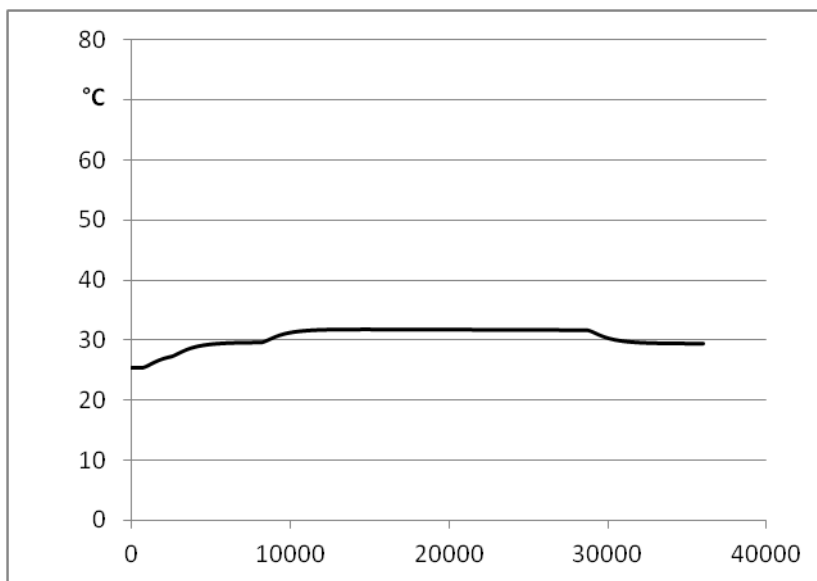
\* hodnoty pro konfiguraci věže 3x2. Pro konfiguraci věže 3x1 jsou  $V_B = 172,8 \text{ m}^3$ ,  $m_B = 171,88 \text{ t}$ ,  $\alpha_{UHS} = -4,230 8 \cdot 10^7 \text{ W}$  a  $\beta_{UHS} = 1,538 5 \cdot 10^6 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1}$ .

Tab. P-2. Návrh jednotlivých změn dob odstávek v letech 2008 až 2010

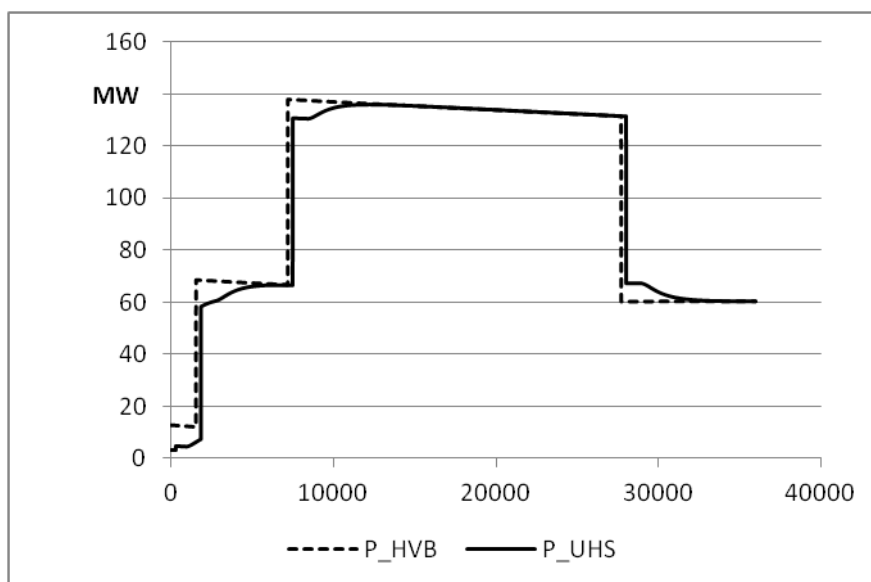
Rok	Blok	Původní plánovaná délka odstávky [dny]	Začátek odstávky	Nově plánovaná délka odstávky [dny]	Plánovaný konec odstávky	Skutečná délka odstávky [dny]	Rozdíl původního a nového plánu [dny]	Aktuální rozdíl původního plánu a nové skutečnosti [dny]	Etapy projektu
2008	třetí	32	2. únor 2008	20	21. únor 2008	21,3	12	10,7	Pilotní projekt 20 dní
	druhý	67	8. březen 2008	67	13. květen 2008	64,6	0	2,4	
	první	32	11. říjen 2008	25	4. listopad 2008	23,5	7	8,5	
	čtvrtý	32	8. listopad 2008	32	9. prosinec 2008	31,2	0	0,8	
Celkově za rok 2008		163		144		140,6	19	22,4	
2009	třetí	85	10. leden 2009	85	4. duben 2009	85,2	0	-0,2	Zvyšování výkonu reaktoru
	druhý	32	12. duben 2009	22	3. květen 2009	22,8	10	9,2	
	první	32	19. září 2009	23	11. říjen 2009	23,8	9	8,2	
	čtvrtý	64	17. říjen 2009	64	19. prosinec 2009	63,3	0	0,7	
Celkově za rok 2009		213		194		195,1	19	17,9	
2010	třetí	32	28. únor 2010	35	3. duben 2010	38	-3	-6	
	druhý	32	18. duben 2010	21	8. květen 2010	21,2	11	10,8	
	první	32	12. září 2010	21	2. říjen 2010	20,9	11	11,1	
	čtvrtý	85	10. říjen 2010	85	2. leden 2011	79,4	-	-	Zvyšování výkonu reaktoru
	třetí	25	30. říjen 2010	25	23. listopad 2010	23,6	-	-	
Celkově za rok 2010		206		187		183,1	19	15,9	

Tab. P-3 Návrh jednotlivých změn dob odstávek v letech 2011 až 2012

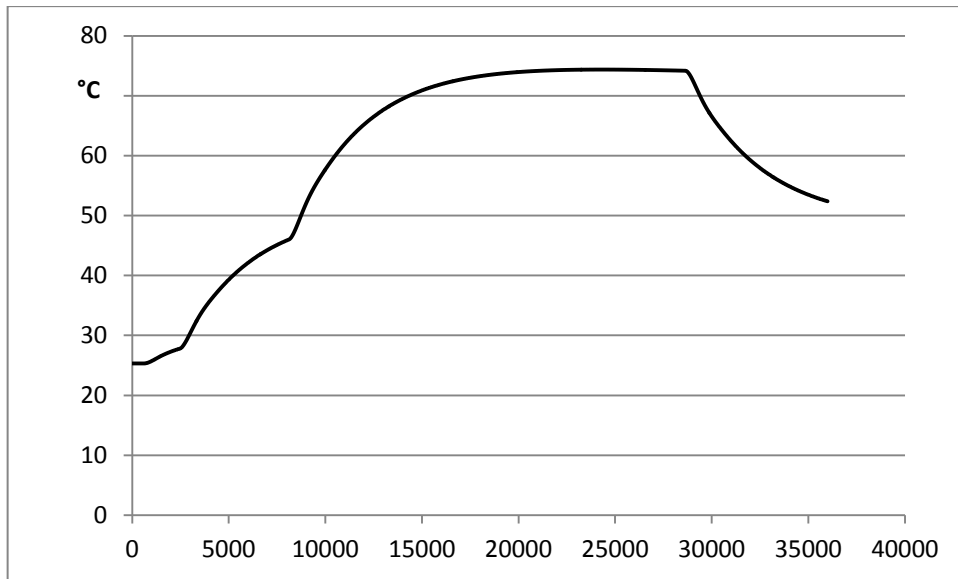
Rok	Blok	Původní plánovaná délka odstávky [dny]	Začátek odstávky	Nově plánovaná délka odstávky [dny]	Plánovaný konec odstávky	Skutečná délka odstávky [dny]	Rozdíl původního a nového plánu [dny]	Aktuální rozdíl původního plánu a nové skutečnosti [dny]	Etapy projektu
2011	třetí	32	20. únor 2011	33	24. březen 2011	-	-1	-	
	druhý	32	27. březen 2011	21	16. duben 2011	-	11	-	
	první	85	28. srpen 2011	89	24. listopad 2011	-	-4	-	Zvyšování výkonu reaktoru
	druhý	25	5. říjen 2011	24	28. říjen 2011	-	1	-	
	čtvrtý	32	27. listopad 2011	20	16. prosinec 2011	-	12	-	
Celkově za rok 2011		206		187		-	19	-	
2012	třetí	32	22. leden 2012	33	23. únor 2012	-	-1	-	
	druhý	85	26. únor 2012	85	20. květen 2012	-	0	-	Zvyšování výkonu reaktoru
	první	32	7. říjen 2012	33	8. listopad 2012	-	-1	-	
	čtvrtý	32	18. listopad 2012	33	20. prosinec 2012	-	-1	-	
Celkově za rok 2012		181		184		-	-3	-	
2013	třetí	58	27. leden 2013	43	10. březen 2013	-	15	-	
	druhý	32	21. duben 2013	21	11. květen 2013	-	11	-	
	první	32	6. říjen 2013	20	25. říjen 2013	-	12	-	
	čtvrtý	32	17. listopad 2013	20	6. prosinec 2013	-	12	-	
Celkově za rok 2013		154		104		-	50	-	16 TWh



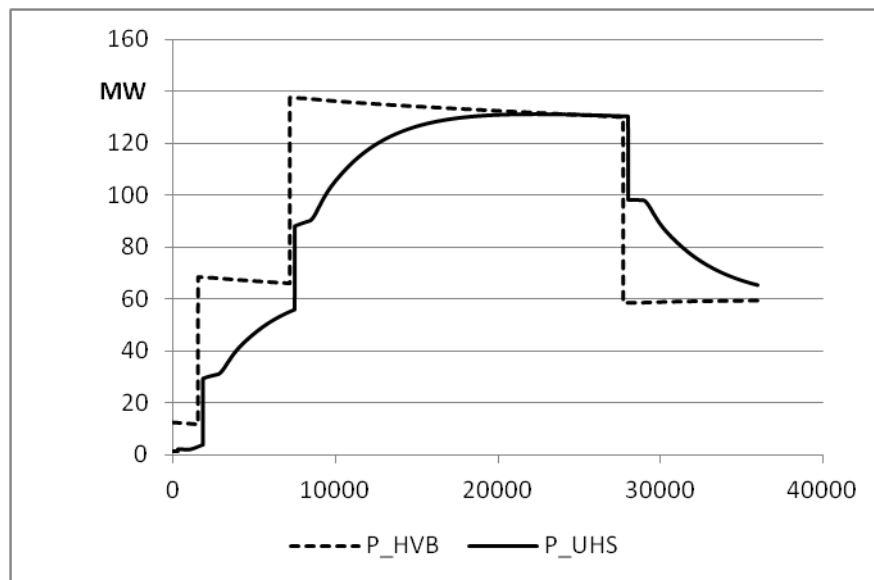
*Obr. P-4 Časový průběh teploty na vstupu do hlavního výrobního bloku pro variantu 1 a konfiguraci věže 3x2 chladicích buněk*



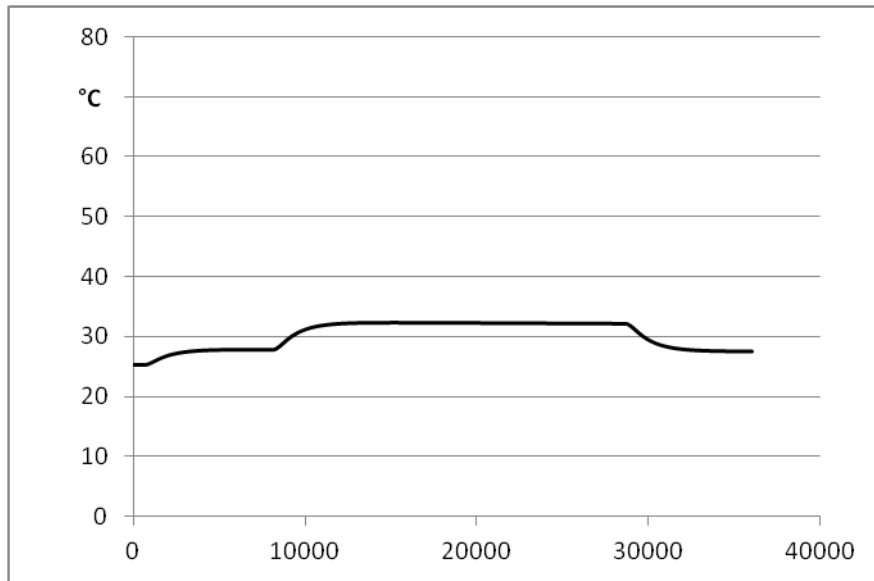
*Obr. P-5 Časový průběh chlazených výkonů zařízení hlavního výrobního bloku ( $P_{HVB}$ ) a chladičho výkonu ventilátorové věže ( $P_{UHS}$ ) pro variantu 1 a konfiguraci věže 3x2 chladicích buněk*



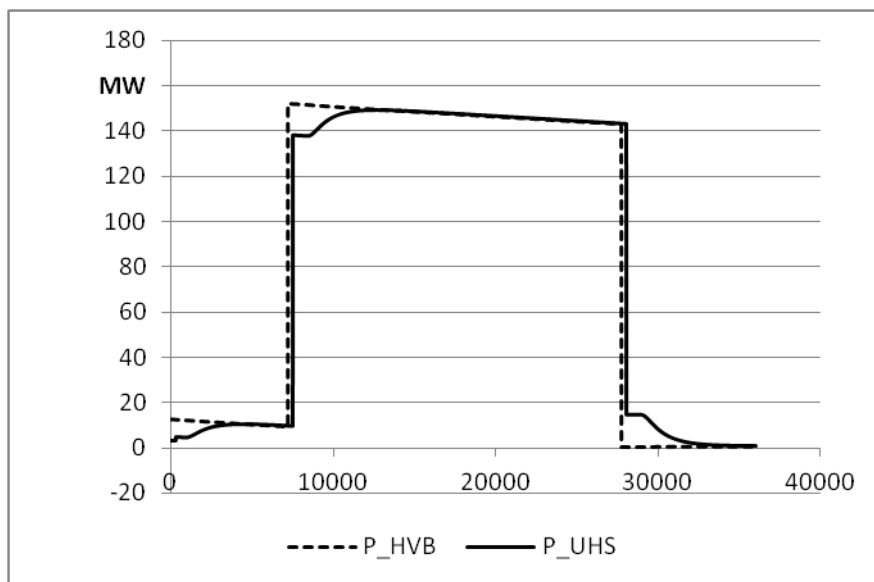
Obr. P-6 Časový průběh teploty na vstupu do hlavního výrobního bloku pro variantu 1 a konfiguraci věže 3x1 chladicích buněk



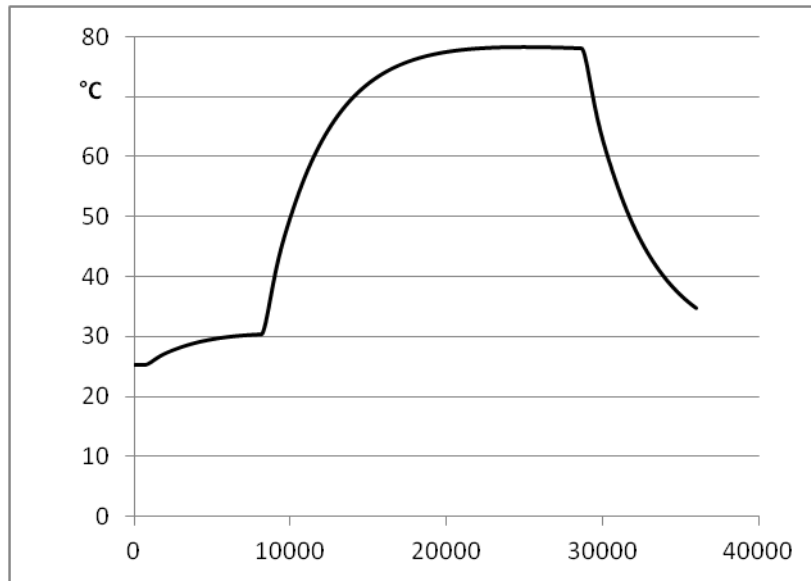
Obr. P-7 Časový průběh chlazených výkonů zařízení hlavního výrobního bloku ( $P_{HVB}$ ) a chladičho výkonu ventilátorové věže ( $P_{UHS}$ ) pro variantu 1 a konfiguraci věže 3x1 chladicích buněk



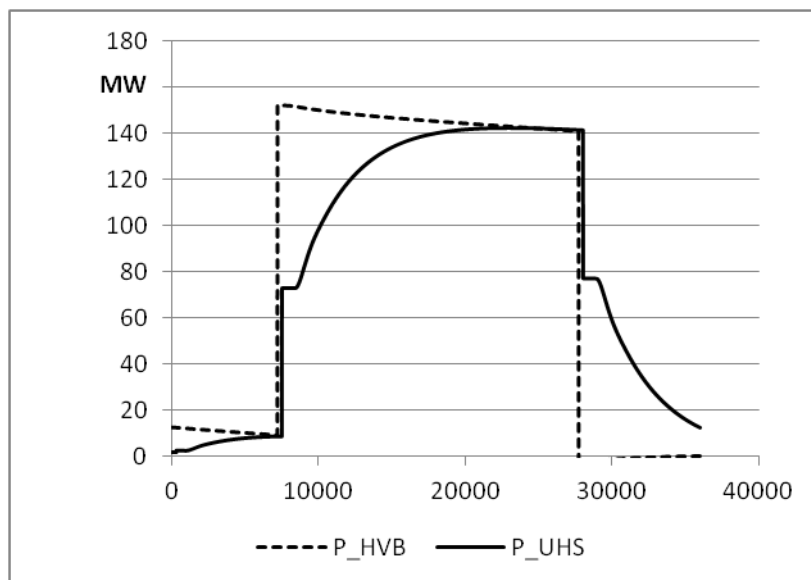
*Obr. P-8 Časový průběh teploty na vstupu do hlavního výrobního bloku pro variantu 2 a konfiguraci věže 3x2 chladicích buněk*



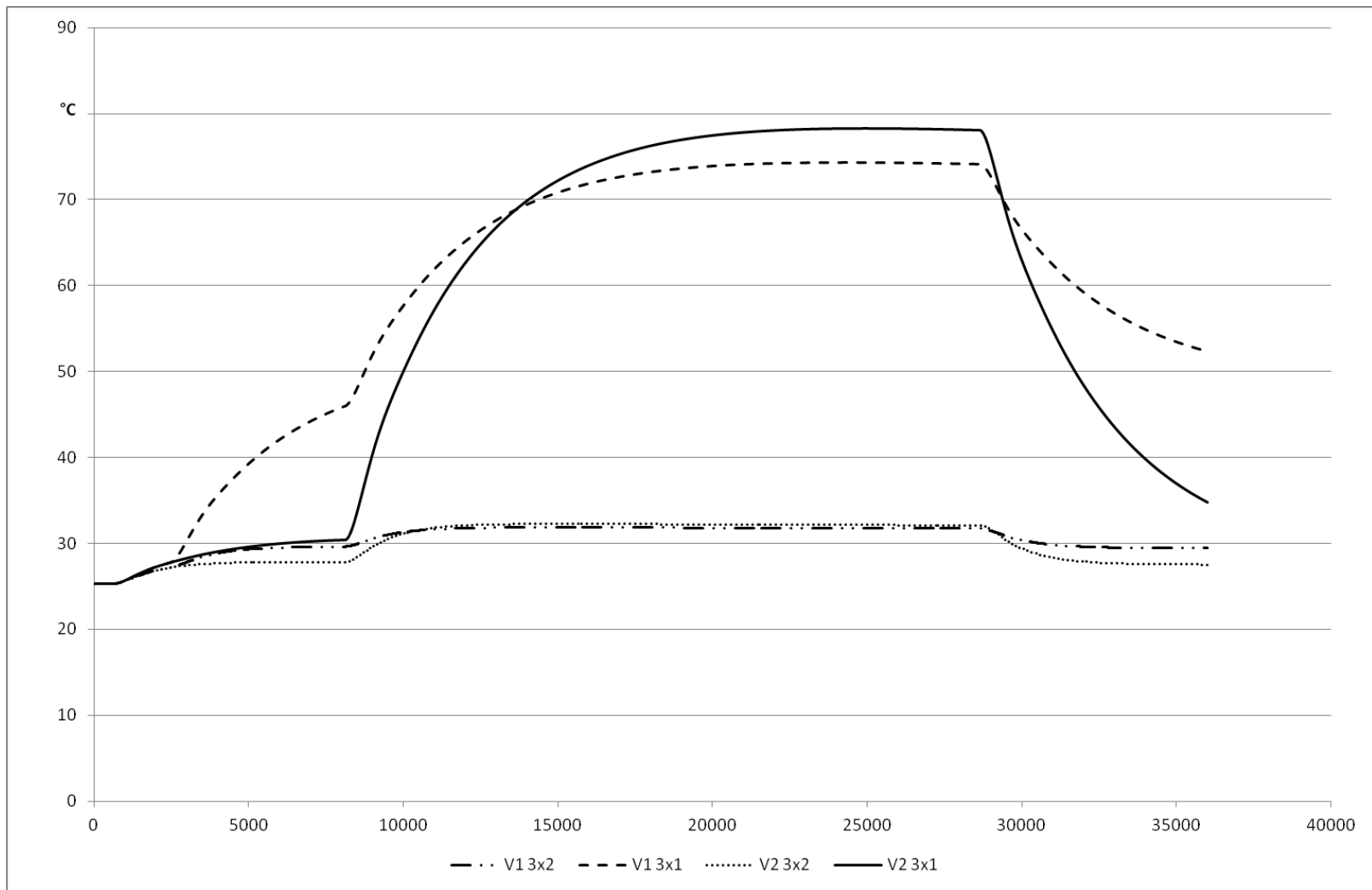
*Obr. P-9 Časový průběh chlazených výkonů zařízení hlavního výrobního bloku ( $P_{HVB}$ ) a chladičho výkonu ventilátorové věže ( $P_{UHS}$ ) pro variantu 2 a konfiguraci věže 3x2 chladicích buněk*



*Obr. P-10 Časový průběh teploty na vstupu do hlavního výrobního bloku pro variantu 2 a konfiguraci věže 3x1 chladicích buněk*



*Obr. P-11 Časový průběh chlazených výkonů zařízení hlavního výrobního bloku ( $P_{HVB}$ ) a chladičho výkonu ventilátorové věže ( $P_{UHS}$ ) pro variantu 2 a konfiguraci věže 3x1 chladicích buněk*



Obr. P-12 Časový průběh teploty chladicí vody systému TVD na vstupu do hlavního výrobního bloku pro kontrolované varianty

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] BLÁHA, Martin, Petr ROUPEC a Tomáš RŮŽIČKA. URČENÍ TEPELNÉHO VÝKONU UHS PRO ODVOD TEPLA Z HVB JE DUKOVANY. Třebíč, 2011.
- [2] Energetický regulační úřad [online]. 2010 [cit. 2011-11-27]. ENERGIE. Dostupné z WWW:  
<[http://www.eru.cz/user\\_data/files/statistika\\_elektro/rocni\\_zprava/2009/pdf/energie.pdf](http://www.eru.cz/user_data/files/statistika_elektro/rocni_zprava/2009/pdf/energie.pdf)>.
- [3] Ferrybridge power stations. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-04-22]. Dostupné z WWW:  
<[http://en.wikipedia.org/wiki/Ferrybridge\\_power\\_stations](http://en.wikipedia.org/wiki/Ferrybridge_power_stations)>
- [4] FRÉLICH, J a M BLÁHA. TES S.R.O. Analýza vychlazování I. O. v režimu přirozené cirkulace bez TF-10. Třebíč, 1999.
- [5] Historie a současnost EDU. Skupina ČEZ [online]. 2012 [cit. 2012-05-10]. Dostupné z WWW:  
<<http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektřiny/jaderna-energetika/jaderne-elektřiny-cez/edu/historie-a-soucasnost.html>>
- [6] Historie a současnost Elektrárny Temelín. Skupina ČEZ [online]. 2012 [cit. 2012-05-10]. Dostupné z:  
<<http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektřiny/jaderna-energetika/jaderne-elektřiny-cez/ete/historie-a-soucasnost.html>>
- [7] MATAL, Oldřich a Hugo ŠEN. JADERNÁ ZAŘÍZENÍ A JEJICH BEZPEČNOST. 1. vyd. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERN, s.r.o. Brno, 2011. ISBN 978-80-214-4349-5.
- [8] PAVELEK, Milan. TERMOMECHANIKA. 3. vyd. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERN, s.r.o. Brno, 2003. ISBN 80-214-2409-5.
- [9] Provozní předpis P002i: Výpadky technologických médií; řízená dokumentace JE Dukovany. 3. vyd. 2010.
- [10] PULEC, J. ŠKODA PRAHA INVEST. Vyhodnocení zkoušek konaných při náběhu 3. bloku EDU v rámci akce VPR. 2009.
- [11] RAČEK, J. ENERGETICKÁ ZAŘÍZENÍ : Stroje a zařízení jaderných elektráren. Vyd. 2. Brno: Ing. Zdeněk Novotný CSc., 2008. 236 s. ISBN 978-80-214-3726-5.
- [12] RAČEK, J. JADERNÁ ZAŘÍZENÍ. Vyd. 1. Brno : Ing. Zdeněk Novotný CSc., 2009. 242 s. ISBN 978-80-214-3961-0.
- [13] RAČEK, J. JADERNÉ ELEKTRÁRNY. Vyd. 1. Brno : Ing. Zdeněk Novotný CSc., 2002. 178 s. ISBN 80-214-2158-4.
- [14] RAČEK, J. Strojní zařízení elektráren. Vyd. 3. Brno : Ing. Zdeněk Novotný CSc., 2007. 194 s. ISBN 987-80-214-3388-5.
- [15] RAČEK, Jiří. TECHNICKÁ MECHANIKA: Mechanika tekutin a termomechanika. 4. vyd. Brno: NOVOPRESS s.r.o., nám. Republiky 15, 614 00 Brno, 2009. ISBN 978-80-214-3881-1.
- [16] RAUS, L. Bezpečně 16 Tera EDU. Dukovany, 2011. 20 s. Záměr Projektů. Dukovany.
- [17] RAUS, L. CIK\_CAK. Dukovany, 2011. 6 s. Vyhodnocení projektu. Dukovany.
- [18] RAUS, L. SAFETY CASE PRO LTO 1. RB EDU. Dukovany, 2010. 46 s. Safety case. Dukovany
- [19] RAUS, L. Využití projektových rezerv bloků EDU. Dukovany, 2011. 123 s. Safety case.

Dukovany.

- [20] ŘEŠENÍ NÁSLEDKŮ VNĚJŠÍCH UDÁLOSTÍ – EXTREMNÍ VÍTR. [online]. 2010[cit. 2012-04-22]. Dostupné z WWW: <[http://www.egpi.cz/download/reseni\\_nasledku\\_Pazdera.pdf](http://www.egpi.cz/download/reseni_nasledku_Pazdera.pdf)>
- [21] Skupina ČEZ [online]. 2011 [cit. 2011-12-05]. Jaderná energetika v České republice. Dostupné z WWW: <<http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/jaderna-energetika/je-v-cr.html>>.
- [22] Skupina ČEZ [online]. 2011 [cit. 2011-12-05]. Jaderná energetika ve světě. Dostupné z WWW: <<http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/jaderna-energetika/je-ve-svete.html>>.
- [23] SPILKA, P. 25 let Jaderné elektrárny Dukovany. Dukovany, 2010. 96 s. Prezentace. Dukovany.
- [24] Škoda JS a.s. [online]. 2011 [cit. 2011-11-27]. MODERNIZACE A REKONSTRUKCE PROVOZOVANÝCH BLOKŮ VVER. Dostupné z WWW: <<http://www.skoda-js.cz/cs/vyroby-a-sluzby/investicni-inzenyring/rekonstrukce-provozovanych-bloku-vver.shtml>>.
- [25] ŠOB, František. HYDROMECHANIKA. 2. vyd. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o. Brno, 2008. ISBN 978-80-214-3578-0.
- [26] WANO [online]. 2011 [cit. 2011-11-27]. Dostupné z WWW: <<http://www.wano.info/>>.
- [27] World Nuclear Association [online]. 2011 [cit. 2011-11-27]. Dostupné z WWW: <<http://www.world-nuclear.org/>>.
- [28] Zákon o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření. In: Sbíрка zákonů. 1997, č. 18. Dostupné z WWW: <[http://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/zakony/Atomovy\\_zakon\\_20120103.pdf](http://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/zakony/Atomovy_zakon_20120103.pdf)>