



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

MODERNIZACE JADERNÉ ELEKTRÁRNY DUKOVANY

MODERNIZATION THE DUKOVANY NUCLEAR POWER STATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MARTIN KISSLER

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Doc. Ing. JAN FIEDLER, Dr.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Martin Kissler

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Energetické inženýrství (2301T035)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Modernizace Jaderné elektrárny Dukovany

v anglickém jazyce:

Modernization the Dukovany Nuclear Power Station

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zpracujte analýzu provedené modernizace Jaderné elektrárny Dukovany se zaměřením zejména na sekundární okruh elektrárny.

Cíle diplomové práce:

Popis jednotlivých součástí sekundárního okruhu EDU.

Srovnání zařízení, která byla vyměněna během modernizace.

Popis dílčích úprav systému pro jeho optimalizaci na provoz při zvýšeném výkonu.

Zpracujte zjednodušený výpočet tepelného schématu po modernizaci.

Porovnání výpočtů tepelného oběhu před modernizací a současného stavu.

Zhodnocení modernizace a její vliv na celou elektrárnu.

Seznam odborné literatury:

Fiedler, J.: Parní turbíny - návrh a výpočet, CERM- Brno 2004

Škopek, J.: Parní turbína, ZČU Plzeň 2007

Kadrnožka, J.: Tepelné turbíny a turbokompresory, CERM- Brno, 2007

Kolektiv: Strojní zařízení tepelných centrál, PC-DIR, 1999

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Jan Fiedler, Dr.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 10.11.2014

L.S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
Ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan fakulty

Abstrakt

Diplomová práce se zaměřuje na detailní technický popis všech důležitých částí sekundárního okruhu Jaderné elektrárny Dukovany a jejich návazností na ostatní systémy elektrárny. V práci jsou analyzovány významné úpravy, které byly provedeny v průběhu celého provozu jaderné elektrárny, mezi něž patří především akce související s projektem Využití projektových rezerv bloků EDU. V hlavní části práce jsou provedeny výpočty výkonů elektrárny pro stavy před a po modernizaci a je zde analyzován vliv jednotlivých změn na celou elektrárnu. Tyto změny jsou s celým sekundárním okruhem zakresleny do T-s diagramu.

Abstract

Thesis focuses on a detailed technical description of all important parts of secondary circuit in Dukovany power plant and its connection to other systems of power plant. In thesis are analyzed significant adjustments which have been made during the entire operation of power plant including in particular the actions associated with project called Utilization of project reserves of units EDU. In the main part of the thesis were carried out calculations of the power plant's power for states before and after the modernization and there is also analyzed the impact of individual changes on the whole power plant. These changes are with the entire secondary circuit drawn in the T-s diagram.

Klíčová slova

Jaderná elektrárna Dukovany, modernizace, jaderné palivo, sekundární okruh, parní generátor, parní turbína, nízkotlaký díl, vysokotlaký díl, kondenzátor, generátor, transformátor, výkon.

Keywords

Nuclear power station Dukovany, modernization, nuclear fuel, secondary circuit, steam generators, steam turbine, low pressure part, high pressure part, condensers, power generators, transformer, power.

Bibliografická citace

KISSELER, Martin. *Modernizace Jaderné elektrárny Dukovany*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 67 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jan Fiedler, Dr.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci *Modernizace Jaderné elektrárny Dukovany* vypracoval samostatně pod vedením pana doc. Ing. Jana Fiedlera, Dr. s použitím podkladů uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Brně dne 26. května 2015

.....
Bc. Martin Kissler

Poděkování

Zde bych chtěl poděkovat svému vedoucímu diplomové práce, doc. Ing. Janu Fiedlerovi, Dr., za odborné vedení, cenné rady a věnovaný čas při zpracování mé diplomové práce. Dále bych chtěl také poděkovat své rodině za podporu, kterou mi poskytla v průběhu mého studia.

OBSAH

ÚVOD	11
1 VYUŽITÍ PROJEKTOVÝCH REZERV BLOKŮ EDU	12
1.1 ZAHRANIČNÍ ZKUŠENOSTI.....	15
2 JADERNÉ PALIVO V EDU	16
3 HLAVNÍ ČÁSTI SEKUNDÁRNÍHO OKRUHU	18
3.1 PARNÍ GENERÁTOR.....	18
3.1.1 <i>Systém odluhů a odkalů</i>	<i>20</i>
3.2 PARNÍ TURBÍNA	20
3.2.1 <i>Parní turbína ŠKODA K 220-44</i>	<i>21</i>
3.2.2 <i>Vysokotlaký díl turbíny</i>	<i>21</i>
3.2.3 <i>Separátor - přehříváč</i>	<i>24</i>
3.2.4 <i>Nízkotlaký díl turbíny</i>	<i>25</i>
3.3 KONDENZÁTOR.....	28
3.4 KONDENZÁTNÍ ČERPADLA	29
3.4.1 <i>Kondenzátní čerpadla 1°</i>	<i>29</i>
3.4.2 <i>Kondenzátní čerpadla 2°</i>	<i>30</i>
3.5 REGENERAČNÍ OHŘÍVÁKY	30
3.5.1 <i>Nízkotlaká regenerace</i>	<i>30</i>
3.6 NAPÁJECÍ NÁDRŽ	32
3.6.1 <i>Odplynovač</i>	<i>32</i>
3.6.2 <i>Nádrž</i>	<i>32</i>
3.7 NAPÁJECÍ ČERPADLA.....	33
3.8 VYSOKOTLAKÁ REGENERACE.....	33
4 ELEKTRICKÁ ČÁST EDU	35
4.1 GENERÁTOR.....	35
4.2 REKONSTRUKCE VYVEDENÍ VÝKONU	36
4.3 MODERNIZACE BLOKOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ	38
5 ÚPRAVY SYSTÉMU PRO OPTIMALIZOVANÝ PROVOZ	41
5.1 VÝMĚNA MĚŘÍCÍCH DÝŽ.....	41
5.2 VÝMĚNA ODLUČOVAČŮ NEČISTOT A VODY.....	41
5.3 ZVÝŠENÍ TLAKU V KOLEKTORU 0,7 MPA	41
5.4 NOVÉ VTO.....	42
5.5 ZVÝŠENÍ TLAKU V HPK.....	43
5.6 ZVÝŠENÍ HLTNOSTI PSK.....	43
5.7 ROZDÍL TEPLŮ SVRŠEK - SPODEK NA VT DÍLU	44
6 VÝPOČET VÝKONU EDU	45
6.1 TEORETICKÝ VÝPOČET	45
6.2 ČÍSELNÝ VÝPOČET	46
6.2.1 <i>Výpočet pro původních 100 % výkonu reaktoru</i>	<i>46</i>
6.2.2 <i>Výpočet pro současný stav 105 % výkonu reaktoru</i>	<i>48</i>
6.2.3 <i>Výpočet pro možný budoucí stav 107 % výkonu reaktoru</i>	<i>51</i>
6.3 HODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	53
7 HODNOCENÍ MODERNIZACE A JEJÍ VLIV NA CELOU ELEKTRÁRNU	54
7.1 VÝČET VŠECH OPATŘENÍ, KTERÁ MĚLA VLIV NA CELKOVOU EKONOMIKU PROVOZU A ZVÝŠENÍ VÝKONU	55
7.2 ZNÁZORNĚNÍ VLIVU HLAVNÍCH MODIFIKACÍ	57
ZÁVĚR	59
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	60



SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	62
SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK	64
SEZNAM PŘÍLOH.....	65

ÚVOD

V České republice se nacházejí dvě jaderné elektrárny, z nichž ta starší a po stránce technického vývoje zkušenější je Jaderná elektrárna Dukovany. Tato jaderná elektrárna provozuje čtyři bloky VVER 440 s reaktory typu 213 a její uvedení do provozu proběhlo v letech 1985–1987.

Tato diplomová práce se zaměřuje na významné události v třicetiletém provozu Jaderné elektrárny Dukovany, které měly vliv na výkon, účinnost či spolehlivost všech jejích bloků. Největší pozornost je věnována projektu Využití projektových rezerv a všem akcím s ním souvisejících.

V první části práce je představení problematiky modernizace a její historický vývoj. Také je zmíněna historie jaderného paliva využívaného právě v Jaderné elektrárně Dukovany, které přispělo k možnosti zvýšení výkonu reaktoru.

V dalších kapitolách jsou detailněji popsány všechny části sekundárního okruhu a u těch, které prodělaly v průběhu provozu zásadní změny vyvolané jejich technickým stavem, anebo snahou zlepšit ekonomiku provozu, jsou popsána všechna realizovaná opatření a důvody pro jejich uskutečnění. V kapitole Úpravy systému pro optimalizovaný provoz jsou zmíněny úpravy, které bylo nutné provést pro účinnější a bezpečnější provoz bloků při zvýšeném výkonu.

V šesté kapitole jsou provedeny výpočty výkonů pro stav elektrárny při jejím spuštění, dále pro současný stav po všech modernizacích a výpočty pro možné budoucí zvýšení výkonu reaktoru o další 2 %. Nejpodstatnější část práce je shrnuta v závěrečné části a to hodnocení modernizace, analyzování vlivu jednotlivých částí a vliv modernizace na celou elektrárnu.

Hlavním úkolem této práce bylo dosažení stanovených cílů, mezi něž patří zpracování zjednodušených výpočtů pro tři stavy elektrárny a také celkové zhodnocení modernizace a jejího vlivu na celou elektrárnu.

Vzhledem k současné nízké ceně silové elektřiny na burze a k velice nákladné výstavbě nových zdrojů, si autor vybral toto téma diplomové práce jako jednu z mála možností jak ekonomicky únosně zvýšit instalovaný výkon, neboť náklady na zvýšení výkonu jsou významně nižší než náklady na výkon nově instalovaný.

1 VYUŽITÍ PROJEKTOVÝCH REZERV BLOKŮ EDU

Na Jaderné elektrárně Dukovany (EDU) bylo po patnácti letech provozu nutné řešit postupné dočerpávání provozních hodin některých zařízení zejména nízkotlakých (NT) dílů turbín. Na těchto zařízeních se i po opakovaných kontrolách jejich stavu začali postupně projevovat závady.

Z těchto důvodů došlo v roce 2001 ke schválení podnikatelského záměru, který měl za cíl zajistit obnovení životnosti a spolehlivého provozu turbosoustrojí do konce plánované životnosti EDU a to minimálně do roku 2027. Společně s obnovou zastaralých NT dílů si tento záměr kladl jako podmínku umožnit, v případě budoucí potřeby, trvalé zvýšení elektrického výkonu turbosoustrojí. Proto byly nové NT díly projektovány pro možnost pojmut o 7% více páry, než byl původní stav.

Souhrn dílčích akcí, které následovaly a byly pojmenovány jako **Využití projektových rezerv bloků EDU (VPR)**, navazuje na ostatní projekty modifikací a obnovy zařízení Jaderné elektrárny Dukovany. VPR využívá provozní zkušenosti a provedené bezpečnostní analýzy ke zlepšení technickoekonomických ukazatelů výroby a tím i ke zvýšení konkurenceschopnosti jaderné elektrárny.

Při projektování elektrárny Dukovany byly v 70. letech v projektech systémů s jadernými reaktory vytvářeny výkonové rezervy ve spojitosti s určitým konzervatismem dřívějších výpočtových modelů. Během posledních let byly zejména zásluhou rychlého rozvoje výpočetní techniky značně zpřesněny neutronově-fyzikální a termo-hydraulické modely reaktorů a parogenerátorů. Velký kvalitativní skok zaznamenaly také zařízení pro kontrolu a sledování důležitých parametrů zejména v aktivní zóně.

Tyto nové skutečnosti umožnily společně s novým designem a větším obohacením paliva zvýšit výkon reaktoru EDU z 1375 MWt na 1444 MWt po dobu celé kampaně.

Pro zvýšení výkonu bylo nutné dodržet několik základních podmínek a omezení:

- projektové rezervy rozhodujících zařízení mohly být využity pouze do úrovně zachovávající nezbytné bezpečnostní rezervy
- podmínky stavebního úřadu pro provoz na zvýšeném výkonu
- podmínky licenčního povolení Státního úřadu pro jadernou bezpečnost (SÚJB) pro provoz na zvýšeném výkonu
- zachování projektové životnosti bloků¹ a možnosti prodloužení provozu EDU na 40 let
- omezení daná stávajícím stavem hlavního cirkulačního čerpadla (HCČ) [15]

Z předchozích bodů je patrné, že při zvyšování výkonu, byla na prvním místě bezpečnost a nutnost dodržet všechny podmínky a doporučení rozhodčích úřadů. Pro společnost ČEZ bylo důležité zachovat stav, při kterém nebudou zařízení příliš namáhána, a tím nebude docházet k čerpání jejich životnosti. Bylo stanoveno, že HCČ, která zajišťují cirkulaci chladící vody v primárním okruhu, budou i po modernizaci zachovány v původním stavu.

Požadované řešení VPR bylo vytvořeno za respektování všech předchozích podmínek a založeno na následujících zásadách:

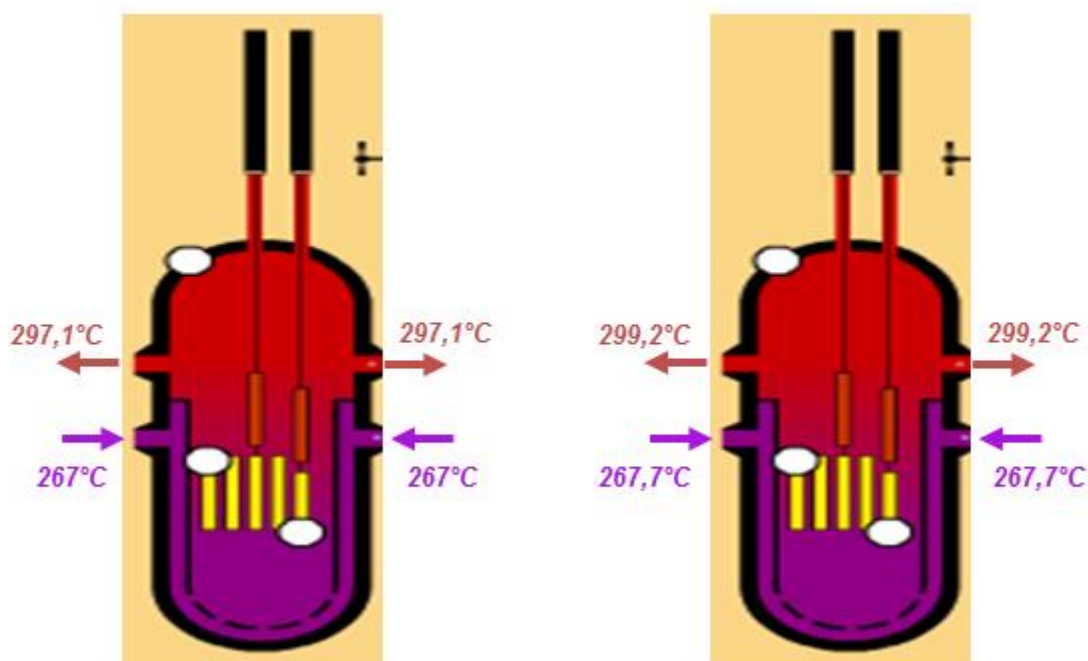
- Provozní parametry využívají projektové rezervy rozhodujících systémů a komponent ke zvýšení výkonu jednotlivých bloků EDU při zachování bezpečnostních rezerv.
- Zvýšení výkonu je dosaženo zvýšením parametrů primárního okruhu a přizpůsobením sekundárního.

¹ Jedná se především o zachování životnosti rozhodujících komponent, jako jsou například reaktorové nádoby a parní generátory.

- Jednotlivá zařízení případně podsystémy jsou modifikovány ve vazbě na projektové rezervy rozhodujících zařízení.

Z požadovaného řešení tedy vyplývá, že při zvyšování výkonu v EDU došlo ke zvýšení parametrů a optimalizaci primárního okruhu a k následnému přizpůsobení sekundárního okruhu.

Pomocí podrobných výpočtů a analýz bylo doloženo, že nebyla nutnost přistoupit k modernizaci jednotlivých zařízení primárního okruhu pro jeho schopnost přenést zvýšený tepelný výkon do sekundárního okruhu. Přenesení tohoto zvýšeného tepelného výkonu bylo dosaženo zvětšením rozdílu teplot na studené a horké větvi primárního okruhu asi o 1,5 °C (viz obrázek 2.1 a obrázek 2.2). Některá zařízení sekundárního okruhu by však nebyla schopna přenést zvýšený výkon, a tak bylo nutné provést jejich úpravu nebo výměnu, čímž bylo současně dosaženo také zvýšení jejich účinností a prodloužení životností. [12] [15]



Obrázek 1.1: Výkon reaktoru 100 % (1375 MW) [10] Obrázek 1.2: Výkon reaktoru 105 % (1444 MW) [10]

Projekt VPR se skládal z následujících částí, které byly realizovány na sekundárním okruhu:

- **Výměna průtočných částí VT dílů turbín**, která zahrnovala nové rotory, rozváděcí kola a vnitřní tělesa VT dílů. Dále došlo k výměně případně repasi vnějších VT těles, repasi ložisek a výměně ucpávek regulačních ventilů. Díky těmto změnám, při kterých se využilo moderních metod tvarování lopatek, nových konstrukčních prvků a špičkových materiálů, došlo ke zvýšení termodynamické účinnosti VT dílů ze 77,5 % na 84 %.
- **Úprava statorů generátorů**, při které došlo ke zvýšení jmenovitého výkonu generátorů z původních 259 MVA na 300 MVA.
- **Náhrada měřících dýz a vysokotlakých odlučovačů na parovodech**, tato akce měla za cíl snížení ztrát v parním potrubí na trase z parních generátorů.

- **Rekonstrukce vyvedení výkonu**, u nichž bylo upraveno připojení generátorových vypínačů a blokových transformátorů na zapouzdřené vodiče. Došlo k rozšíření kompenzace zapouzdřených vodičů na celou délku vedení.
- **Modernizace blokových transformátorů** měla za cíl provést úpravy pro zajištění spolehlivého vyvedení zvýšeného výkonu generátorů a současně dosáhnout snížení ztrát. Jmenovitý výkon modernizovaných transformátorů byl zvýšen z původních 250 MVA na nových 300 MVA. [15]

Samotná realizace VPR byla zahájena v roce 2007 a to výměnou měřících dýz a odlučovačů vlhkosti v parním potrubí za parními generátory. V roce 2008 následovala výměna první dvojce blokových transformátorů. Teprve poté se uskutečnilo provedení celého rozsahu modifikací všech dotčených zařízení, které proběhlo v prodloužených odstávkách při tzv. generálních opravách (GO) jednotlivých bloků v letech 2009 až 2012. [14]

Tabulka 1.1: Porovnání parametrů EDU pro původní a současný výkon reaktoru [4]

Jaderná elektrárna Dukovany			
	Původní stav	Současný stav	
Tepelný výkon aktivní zóny	100	105	%
	1375	1444	MWt
Hmotnostní průtok chladiva reaktorem	8783,7	8765,9	kg/s
Střední teplota na vstupu do reaktoru	267	267,7	°C
Střední teplota na výstupu z reaktoru	297,1	299,2	°C
Střední ohřev chladiva na reaktoru	30,1	31,5	°C
Jmenovitý výkon TG	220	250	MWe
Jmenovitý hmotnostní průtok páry	1350	1417,5	t/h
Teplota chladicí vody	20	20	°C
Tlak páry na vstupu do turbíny	4,315	4,318	MPa
Teplota páry na vstupu do turbíny	254,86	254,9	°C

VPR bylo ve svém počátku ovlivněno dobou, kdy byl v ČR přebytek elektrické energie a tak se společnost ČEZ rozhodovala, jestli se budou některé bloky odstavovat a případně které. Tím byl ovlivněn celý proces tvorby projektu. Proto byla i veřejná obchodní soutěž nejprve vypsaná ve dvou variantách, pro rekonstrukci dvou nebo čtyř bloků EDU.

Zvyšování výkonu stávajících jaderných elektráren je cestou zvyšování konkurenceschopnosti jaderných zdrojů, kterou uplatnila řada elektrárenských společností v celém světě. Míra zvýšení výkonu se u jednotlivých jaderných elektráren liší ve vazbě na typ elektrárny, původní projektové řešení a provedené modifikace. Zvýšení výkonu se pohybuje mezi 1 až 9 %. Náklady na zvýšení výkonu jsou významně nižší než náklady na nově instalovaný výkon.

Tabulka 1.2: Data o projektu Využití projektových rezerv [15]

Využití projektových rezerv	
Generální dodavatel	ŠKODA PRAHA Invest s.r.o.
Investor	ČEZ, a.s.
Doba realizace	2006 – 2012
Cíl projektu	Zvýšení výkonu čtyř bloků EDU z výkonu 1882 MWe na 1997 MWe.

1.1 Zahraniční zkušenosti

Zvýšení výkonu Jaderné elektrárny Dukovany nebylo ve světě ojedinělou akcí, naopak navazovalo na pozitivní zkušenosti při zvyšování výkonu v elektrárnách z celého světa. Možnost zvýšení výkonu již provozovaných elektráren se osvědčilo u více elektrárenských společností a to hlavně z důvodu, že náklady při modernizaci jsou na získaný výkon výrazně nižší než náklady na vybudování nového zdroje téhož výkonu.

Touto cestou se vydaly americké elektrárny s tlakovodními reaktory, ale také evropské elektrárny přímo s reaktory VVER 440.

Elektrárnami, které využily svých projektových rezerv, jsou například tyto:

- LOVIISA - Finsko; 440 MWe, zvýšení o 5,68 % (465 MWe)
- KOLA - Rusko; 440 MWe, zvýšení postupně až o 7 % (470 MWe)
- PAKS - Maďarsko, až o 8 % [4]

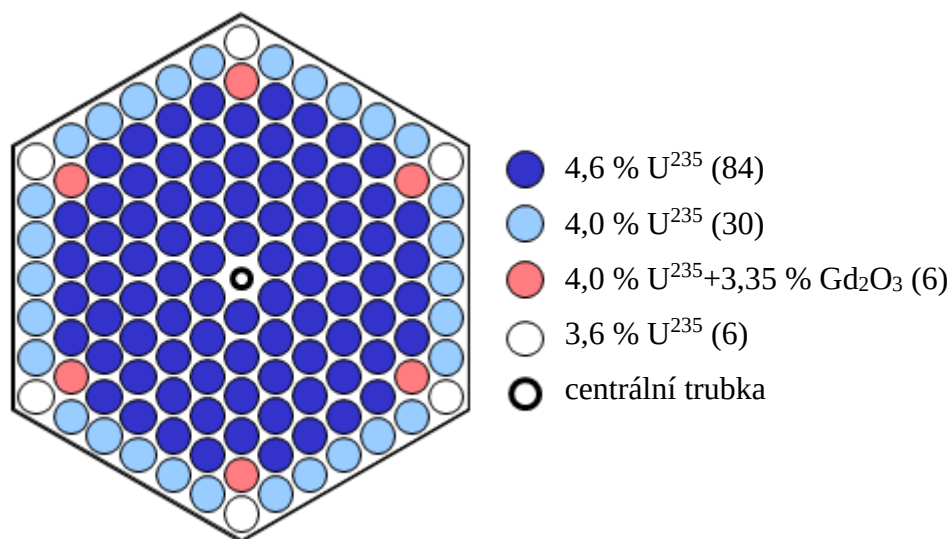
2 JADERNÉ PALIVO V EDU

Palivo na Jaderné elektrárně Dukovany prošlo v průběhu provozu elektrárny mnoha obměnami, které umožnily například prodloužení kampaně, zvýšení výkonu reaktoru a v neposlední řadě přispěly i ke zvýšení spolehlivosti provozu elektrárny. EDU je, co se týče paliva, dlouhodobým zákazníkem společnosti TVEL, která patří k největším výrobcům jaderného paliva na světě. Česká elektrárna je v pozici, kdy patří k prvním mimoruským uživatelům reaktoru VVER 440, do kterých společnost TVEL dodává nejnovější modely paliva. [2]

Úplně první palivo, které Dukovanská elektrárna využívala, mělo obohacení 3,6 % U^{235} v pracovních a 2,4 % v regulačních palivových souborech. U tohoto paliva byla nevýhoda, že bylo nutné každý rok vyměnit třetinu z celkových 349 palivových kazet, ale hlavně docházelo k vysokým neutronovým tokům do reaktorové nádoby. Tyto vysoké neutronové toky měli velký vliv na životnost nádoby a byly způsobeny zavážením čerstvého paliva na okraj aktivní zóny.

V roce 1998 došlo k nahrazení původního paliva palivem profilovaným se středním obohacením 3,82 %. K následné obměně pak došlo roku 2003, kdy se začalo využívat gadolinia jako vyhořívajícího absorbátoru. Toto palivo nazývané Gd-1 umožnilo zavést na elektrárně pětiletý palivový cyklus.

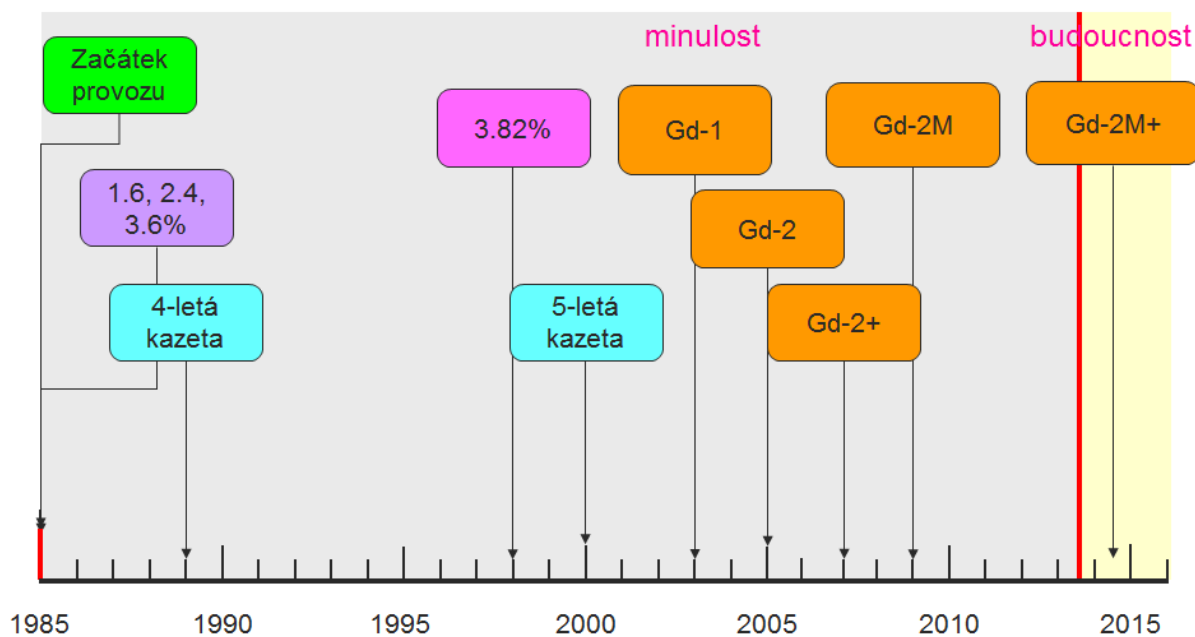
Dalšími používanými palivy byly Gd-2, Gd-2+ a Gd-2M. Došlo zde k prodloužení palivového sloupce o 6 cm a ke zmenšení tloušťky obálek palivových souborů. Nová konstrukce paliva a jeho obohacení na 4,38 % U^{235} umožnila zvýšit výkon reaktoru na 1444 MWt po celou dobu kampaně. [1] [2]



Obrázek 2.1: Palivo Gd-2M [1]

V září loňského roku byl na první blok Dukovanské elektrárny zavezen nejnovější model paliva nazývaný jako Gd-2M+. U tohoto paliva byla optimalizována konstrukce palivového proutku. Palivová tableta byla mírně zvětšena a je vyráběna bez centrálního otvoru, čímž se zvětšilo množství uranu v palivovém proutku o 9 kg. Obohacení tohoto paliva dosahuje 4,75 %. Nové palivo umožní prodloužit jednotlivé kampaně vlivem zkrácení odstávek i při zachování pětiletého palivového cyklu. [1] [2]

Toto nové palivo Gd-2M+ by mělo být také schopné zajistit budoucí možné zvýšení výkonu reaktoru o další 2 %.



Obrázek 2.2: Historický vývoj paliva užívaného v EDU [1]

3 HLAVNÍ ČÁSTI SEKUNDÁRNÍHO OKRUHU

3.1 Parní generátor

Sekundární okruh jaderné elektrárny začíná právě v parním generátoru (PG), kde se vyrábí pára pro parní turbínu, pomocí radioaktivní horké vody přicházející z jaderného reaktoru.

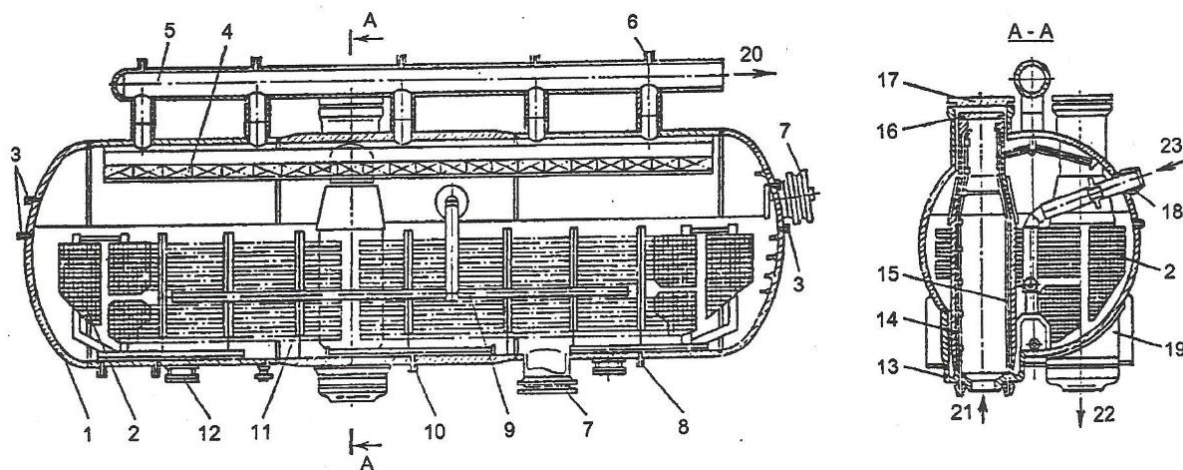
PG je výměník tepla, který slouží k přenosu tepla z media o vyšší teplotě do media o nižší teplotě. Výměníky tepla se podle mechanismů přenosu tepla dělí na tři základní typy: rekuperační, regenerační a směšovací. U PG v jaderných elektrárnách se z důvodů jaderné bezpečnosti používají výhradně výměníky rekuperační. [9]

V Jaderné elektrárně Dukovany s tlakovodními reaktory VVER se pro jeden reaktorový blok nachází 6 PG, které zabezpečují přenos tepla z primárního do sekundárního okruhu a oddělují radioaktivní primární okruh od neradioaktivního sekundárního okruhu. Z těchto důvodů jsou na ně kladeny vysoké požadavky z hlediska těsnosti. Jako PG se zde používá horizontální tepelný výměník se zaplavenou teplosměnnou plochou a jeho součástí jsou zabudované odlučovány vlhkosti.



Obrázek 3.1: Parní generátor [4]

Jako chlazené teponosné médium slouží voda primárního okruhu. Její teplota na vstupu do PG při jmenovitém výkonu reaktoru je asi 297 °C. Přiváděná voda proudí do horkého kolektoru, který slouží jako rozdělovač média do teplosměnné plochy. Tato plocha je tvořena 5536 trubkami o průměru 16 mm a tloušťce stěny 1,4 mm, které jsou vyrobeny z austenitické oceli. Průchodem přes teplosměnnou plochu předává primární voda svoji tepelnou energii vodě sekundárního okruhu, přičemž se ochlazuje na teplotu 267 °C. Předanou tepelnou energií se voda sekundárního okruhu o vstupní teplotě 227 °C mění v sytou páru o tlaku 4,85 MPa a teplotě 262 °C. Pára, která se uvolňuje z hladiny, prochází přes žaluziový separátor z děrovaného plechu, který se nachází v horní části PG. Žaluzie mají za cíl zbavit páru vody. Sytá pára odchází pěti nátrubky do sběrného potrubí syté páry a pokračuje směrem k parní turbíně. Vlhkost páry na výstupu z PG nesmí přesáhnout 0,25 %. [4]



Obrázek 3.2: Parní generátor [13]

1 - tělo PG, 2 - svazek trubek teplosměnné plochy, 3 - nátrubky hladinoměru, 4 - žaluziový odlučovač, 5 - kolektor syté páry, 6 - odvodušňovací nátrubek, 7 - průlez, 8 - nátrubek nepřetržitěho odluhu, 9 - rozdělovací kolektor sekundární vody, 10 - nátrubek periodického odkalu, 11 - opěrné stojny svazku trubek, 12 - vrchní část podpěry PG, 13 - vstupní kolektor primární vody, 14 - trubka odvodušnění kolektoru, 15 - trubka odvodu úniku vody, 16 - víko kolektoru, 17 - víko průlezu, 18 - nátrubek vstupu sekundární vody, 19 - výstupní kolektor primární vody, 20 - výstup syté páry, 21 - vstup primární vody, 22 - výstup primární vody, 23 - vstup sekundární napájecí vody

Ochlazená primární voda proudí z teplosměnné plochy PG do studeného kolektoru, který ji dále přivádí na sání HCC. Toto čerpadlo zajišťuje její cirkulaci v primárním okruhu elektrárny.

Parní generátor je horizontální válcová nádoba s délkou 11,8 m a průměrem 3,2 m. Jeho plášť tvoří nádoba, která je svařena ze dvou středních kroužků o síle stěny 135 mm a dvou krajních kroužků s tloušťkou 75 mm. Ke krajním kroužkům jsou přivařena eliptická dna o tloušťce 84 mm. PG je přes podpěry zavěšen na betonový strop tak, aby se mohl kývat při vyrovnávání teplotních dilatací připojených potrubí.

Teplosměnná plocha PG je tvořena vodorovnými svazky trubek tvaru U. Trubky vycházejí ze svislého vstupního kolektoru primární vody a končí ve svislém výstupním kolektoru. Trubky jsou v kolektorech zaválcovány výbuchem a následně přivařeny pomocí poloautomatů. Svazky trubek jsou ponořeny pod hladinou sekundární vody. Sekundární voda přirozeně cirkuluje mezi trubkami s proudící primární vodou. Maximální výsledný součinitel přenosu tepla lze ovlivnit především zvýšením rychlosti proudící vody, což zajišťuje HCC primárního okruhu. V PG dochází k ochlazení primární vody pouze o 30 °C, proto je nutné, aby její průtok byl mnohonásobně větší, než je množství vyráběné vodní páry. [4]

Tabulka 3.1: Základní údaje o parním generátoru [4]

Parní generátor	
Jmenovitý výkon	475 t/h (při 0,25 % vlhkosti)
Vstupní teplota primární vody	297 °C
Výstupní teplota primárního vody	267 °C
Vstupní teplota napájecí vody	228 °C
Výstupní teplota syté páry	262 °C

Parní generátor	
Provozní tlak primárního okruhu	12,27 MPa
Vnitřní průměr PG	3210 mm
Délka tělesa PG	11800 mm
Hmotnost prázdného PG	169000 kg
Hmotnost plného PG	261 000 kg
Materiál pláště PG	22K
Materiál teplosměnné plochy	08Ch18N10T

3.1.1 Systém odluhů a odkalů

Udržení chemického režimu kotlové vody je velmi důležité pro spolehlivý provoz všech zařízení v sekundárním okruhu elektrárny. K tomu účelu slouží systém odluhů a odkalů, pomocí kterých se z tělesa PG odvádí zahuštěná voda.

Odluhy odvádí vodu pomocí dvou nátrubků, z nichž jeden je vyveden ze dna PG a druhý odvádí zahuštěnou vodu z prostoru cca 200 mm pod úrovní hladiny vody. Systém odkalů odvádí zahuštěnou vodu z meziprostoru primárních kolektorů a pláště PG. Každý meziprostor je odkalován cca 30 minut během každých 24 hodin. [4]

3.2 Parní turbína

Parní turbíny jsou lopatkové stroje, které pracují na základě kontinuální změny tepelné a tlakové energie (entalpie) na kinetickou energii proudící páry. Silovým působením páry (změna hybnosti pracovní látky) na profily rotorových lopatek vzniká krouticí moment na rotoru stroje.

Při výrobě elektrické energie v jaderných elektrárnách se v budoucnu předpokládá využití jak turbín parních tak i plynových. V současnosti ale stále platí, že jaderné energetice vládnou turbíny parní a to především turbíny na sytou páru, které mají pro použití v jaderných elektrárnách mnohá specifika. [5]

Parní turbíny v jaderných elektrárnách s reaktory VVER pracují až na výjimky pouze se sytou párou. U těchto turbín je k dispozici pouze malý tepelný spád, který může být i poloviční proti tepelnému spádu na turbínách klasických elektráren. Z tohoto důvodu expanduje pára v turbínách na sytou páru pouze ve vysokotlaké a nízkotlaké části, středotlaká část se nepoužívá. V těchto turbínách se většina tepelného spádu zpracovává v nízkotlaké části, která má tak mnohem větší vliv na celkovou ekonomičnost provozu, a proto je zde také kladen mnohem větší důraz na kvalitu a účinnost nízkotlakých částí než u turbín na páru přehřátou. [13]

Turbíny na sytou páru musejí mít čtyřikrát až šestkrát větší objemový průtok páry k tomu, aby dosáhly stejného výkonu. To je z důvodů nižších vstupních parametrů, menšího tepelného spádu a s tím souvisejících nižších účinností. S množstvím páry rostou rozměry turbíny a její části jsou konstruovány jako dvouproudé s větším počtem stupňů. Pro snížení napětí na dlouhé lopatky posledních stupňů se volí větší počet proudů a tím větší počet nízkotlakých částí. [13]

Dalším specifikem těchto turbín je, že prakticky 80 % expanze probíhá v oblasti mokré páry, a aby se zlepšila jejich účinnost, zavádí se vlhká pára do separátoru a přehříváče, kde se oddělí největší vlhkost a po přehřátí se zavádí do další části turbíny. S vlhkostí páry souvisí i nutnost speciálních opatření ke zmenšení eroze lopatek a ostatních částí turbíny. [5]

Jaderné elektrárny nejsou určeny pro pokrývání denních špiček spotřeby elektrické energie, ale naopak převážně pracují při jmenovitém zatížení. Proto jsou turbíny v jaderných elektrárnách konstruovány s jednodušší škrtící regulací, jako například na Jaderné elektrárně Dukovany. V posledních letech kdy vinou obnovitelných zdrojů energie dochází k náhlým změnám množství energie, jsou v ojedinělých případech nuceny i jaderné elektrárny regulovat a snižovat elektrický výkon podle požadavků sítě.

3.2.1 Parní turbína ŠKODA K 220-44

V Jaderné elektrárně Dukovany jsou použity dvě stejné parní turbíny pro jeden reaktorový blok a to třítělesové složené z jednoho vysokotlakého (VT) dílu a dvou NT dílů. V elektrárně je tedy osm stejných parních turbín, které společně s dalšími částmi sekundárního okruhu prošly v letech 2009–2012 postupnou modernizací. U parní turbíny původně označované jako Škoda K 220-44 s elektrickým výkonem 220 MW byli v průběhu několika let postupně vyměněny všechny průtočné části a po modernizaci vzrostl její výkon na 250 MW. [7]

Úkolem turbíny v EDU je přeměňovat tepelnou energii, která se získává během štěpení jaderného paliva, na energii mechanickou. Turbína je s generátorem, který přeměňuje mechanickou energii na energii elektrickou, umístěna na společné hřídeli a celé zařízení se nazývá turbogenerátor (TG).

Tabulka 3.2: Základní údaje o parní turbíně [4]

Parní turbína	
Typ	ŠKODA K 220-44
Výkon	250 MW
Průtok páry do VT dílů	1407,8 t/h
Tlak před RZV	4,382 MPa
Tlak na výstupu z VT	0,503 MPa
Jmenovité otáčky	3 000 ot/min
Jmenovitá teplota admisní páry	256 °C
Jmenovitý tlak před NT klapkami	0,37 MPa
Jmenovitá teplota páry před NT klapkami	216,5 °C
Jmenovitá teplota chladicí vody	20 °C
Maximální teplota chladicí vody	33 °C
Smysl otáčení TG	levotočivý - při pohledu od generátoru
Systém regulace	elektronicko-hydraulická
Soustava turbíny	Třítělesová s jedním VT a dvěma NT díly. Všechna tělesa jsou dvouproudová.

3.2.2 Vysokotlaký díl turbíny

Díly parních turbín se dělí na vysokotlaké, středotlaké a nízkotlaké podle parametrů páry před rychlozávěrným ventilem (RZV) turbíny. Aby mohl být některý díl turbíny zařazen mezi vysokotlaké, je nutné, aby dosahovaný tlak páry na vstupu byl alespoň 5 MPa. Pára

vystupující z parogenerátorů v EDU dosahuje tlaku kolem 4,75 MPa a než se tato sytá pára dostane k turbíně, tak vlivem hydraulických ztrát klesne její tlak na hodnotu 4,382 MPa. Z těchto hodnot je patrné, že v EDU se vlastně nachází jeden středotlaký (ST) díl a dva NT díly. Z historického hlediska zaběhlého názvosloví se o tomto dílu vždy mluví jako o vysokotlakém.

Pára vyrobená v šesti PG proudí za nominálních podmínek do hlavního parního kolektoru, ze kterého pokračuje dvěma parovody do parní turbíny. Ještě před turbínou se z páry odstraňuje vlhkost ve VT odlučovačích. Následně pára proudí přes dva RZV a čtveřici regulačních ventilů (RV), které regulují výkon nebo otáčky parní turbíny. Ve VT dílu parní turbíny se průchodem páry pracovním prostorem přemění asi 44 % z celkové energie, která se na svorkách generátoru projeví jako 250 MW elektrických.

Pro dosažení co nejlepších výsledků akce VPR bylo nutné modifikovat i parní turbínu a její pomocné systémy. Původní VT díly parní turbíny už byly u konce své životnosti a nebyly projektovány pro mírně zvýšené parametry pracovního media a hlavně pro provoz odpovídající vyšším průtokům páry. Hlavním cílem při modernizaci VT dílů bylo zajistit jejich dlouhodobý provoz při zvýšeném výkonu reaktoru o 5 % s požadovanou přetížitelností o další 2 %.

Pro modifikaci VT dílů turbíny byly stanoveny základní požadované body:

- zajištění provozu bloku s výkonem reaktoru 105%
- zajištění technické a provozní bezpečnosti
- zvýšení svorkového výkonu TG na hodnotu 250 MW
- zvýšení účinnosti VT dílu TG na hodnotu 84% z původní účinnosti 77,5 %
- zvýšení spolehlivosti dodávky elektrické energie
- zabezpečit životnosti VT těles na 250 000 provozních hodin alespoň do roku 2035 [4]

Pro provoz modifikovaných VT dílů turbíny na zvýšeném výkonu reaktoru a splnění všech požadavků došlo k uskutečnění následujících kroků:

- výměna VT rotoru s novou hřídelí a kompletním olopatkováním
- celková výměna rozváděcích kol s novými 3D profily a moderním zatěsněním pomocí voštinového těsnění
- kompletní sada ucpávkových kroužků - vnější, vnitřní
- pořízení nového vnitřního tělesa
- výměna olejových těsnících břitů
- repase ložisek
- výměna vnitřních částí regulačních ventilů pro zvýšení hltnosti stroje [4]

Vzhledem k okolnostem, že uskutečněná modifikace dílčích částí turbosoustrojí, především průtočných částí, se zachováním vnějších těles, ložisek a dalších návazností, bylo nutné, aby modifikované díly turbosoustrojí byly plně slučitelné s ostatními částmi, které zůstaly v původním stavu.

VT těleso turbíny s vyměněnou průtočnou částí je dvouproudé a v každém proudě má šest pracovních stupňů. Pro první stupně má VT těleso dvouplášťovou konstrukci. Vnitřní i vnější tělesa jsou dělena horizontální dělicí rovinou. Vstupní partie vnitřního tělesa tvoří okružní kanál pro totální ostřik prvních stupňů, který je vhodný pro škrtící regulaci. Rozváděcí kola dalších stupňů jsou uložena ve vnějším tělese a jejich uložení je symetrické pro oba proudy. Mezi rozváděcími koly je umožněno vyvedení potrubí neregulovaných odběrů. Rozváděcí kola jednotlivých stupňů jsou vzájemně sešroubována, tím se brání prošlehávání a zvyšuje se tak těsnící tlak. VT těleso je opatřeno labyrintovými ucpávkami, které zabraňují zkratovému proudění páry šterbinou mezi kruhy rozváděcích kol a rotorem.

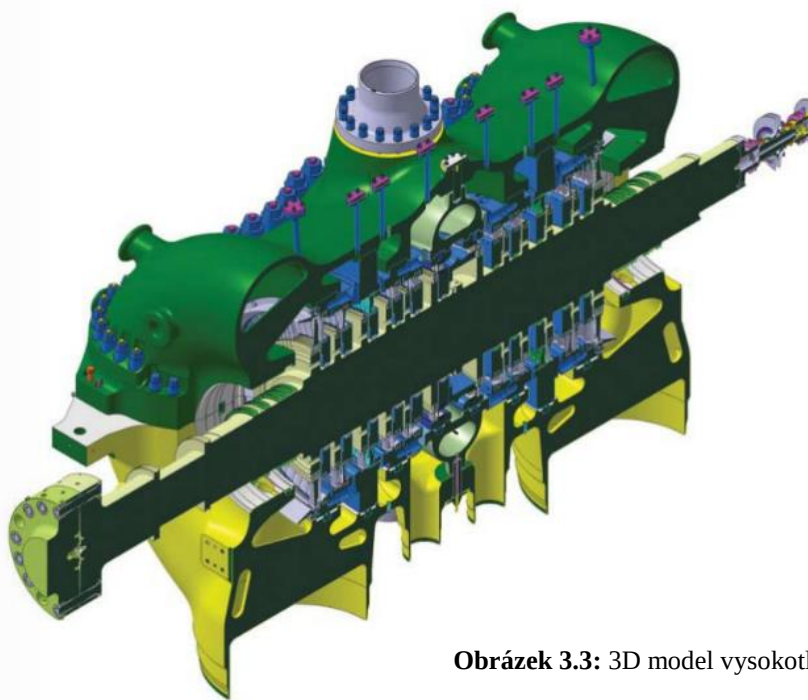
Z VT tělesa je odváděna pára neregulovanými odběry pro zvýšení účinnosti regenerací a pro další technologické potřeby. [4]

Pára je odváděna z každého proudu VT dílu.

- Za oběžným kolem 1. stupně se nachází VIII. neregulovaný odběr určený pro napájení vysokotlakého ohříváku (VTO) 2 a přehříváče páry za VT dílem.
- Za oběžným kolem 2. stupně se nachází VII. neregulovaný odběr určený pro napájení VTO 1 a přehříváče páry za VT dílem.
- Za oběžným kolem 4. stupně se nachází VI. neregulovaný odběr určený pro termické odplynění v napájecí nádrži.
- V. neregulovaný odběr je vyveden z výstupního potrubí za VT dílem a je určen pro nízkotlaký ohřívák (NTO) 5.

Na všech odběrech jsou instalovány odběrové klapky, které při havarijním stavu zabraňují zpětnému proudění páry od spotřebičů. V případě nefunkčnosti těchto klapek by mohlo dojít k přetočení turbíny a její havárii.

VT těleso je symetrické v podélné i svislé ose. Je dělené vodorovnou rovinou. Obě poloviny jsou spojeny šrouby procházejícími vodorovnými přírubami. Jednoduché tvary těles usnadňují rovnoměrné prohřívání při najiždění. [4]



Obrázek 3.3: 3D model vysokotlakého dílu [17]

VT rotor je složen z hřídele a z oběžných lopatek. Na hřídeli, který je celokovaný s patním průměrem 1050 mm, je ve střední části vykováno třináct disků. Prostřední disk je umístěn v rovině souměrnosti a po obou stranách tohoto disku je umístěno dalších šest a šest disků, které tvoří základ oběžných kol. Oběžné lopatky prvních pěti stupňů jsou ke hřídeli připevněny ozubenými T nožkami, pouze u posledního 6. stupně je použit vidličkový závěs. Pro připojení NT rotoru je na zadní části VT rotoru umístěn kotouč pevné spojky. Uložení VT rotoru je provedeno ve dvou radiálních ložiscích s citronovým vrtáním pánve. Ložiska jsou upravena pro nadzvedávání rotoru tlakovým olejem od vysokotlakých nadlehčovacích čerpadel. Pro zachycení axiálních sil působících na rotor je mezi vysokotlakým a prvním nízkotlakým dílem umístěno dvoustranné axiální ložisko. Mazací olej je do ložisek přiváděn přes magnetické filtry pro zachycení nečistot v oleji. [4]



Obrázek 3.4: Vysokotlaký rotor turbíny [4]

3.2.3 Separátor - přehříváč

Pro radikální snížení obsahu vody v oběhu se sytou párou, se pára po částečné expanzi ve VT dílu turbíny zavádí do separátoru a přehříváče páry.

Pro odloučení neboli separaci páry je možné použít několika principů separace páry. Například to mohou být cyklóny, štěrby, difuzorové lopatky, žaluzie, anebo síťové odlučovačky. U odlučovačů je ovšem důležité aby dosahovali co nejmenší tlakové ztráty.

Přehřívání páry je jednou ze základních možností jak zvýšit účinnost Rankin - Clausiova cyklu. Ovšem u jaderných elektráren, které přehřívají pomocí páry, která je vyvedena z odběrů parní turbíny, nedochází ke zlepšení tepelné účinnosti přímo přehřevem. Tepelně by přehřívání znamenalo spíše ztrátu. Přehřívání u elektráren s tlakovodními reaktory dosahuje pozitivního výsledku tím, že dojde ke snížení vlhkosti páry a tím selepší termodynamická účinnost stupňů turbíny za přehříváčem. [5]

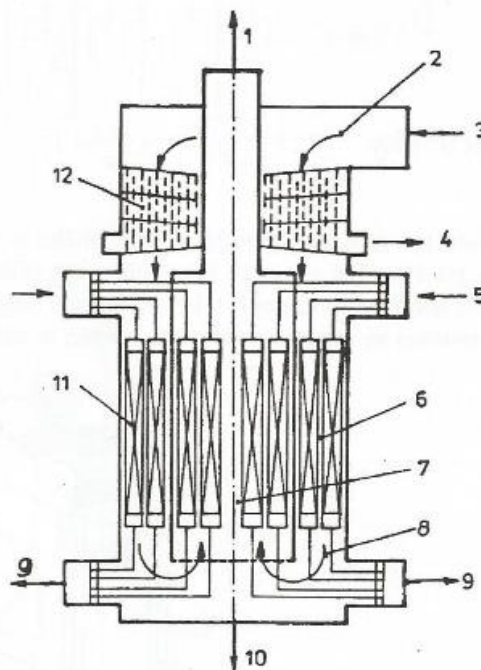
V současné době se používá kombinovaných konstrukcí separátor - přehříváč. Tak je tomu i na Jaderné elektrárně Dukovany, kde je využito vertikální koncepce s přívodem a odvodem páry v horní části. Pro každou turbínu jsou zde dvě nádoby se separátor - přehříváčem, které mají průměr 3,48 m a jejich celková výška je 10,3 m. [13]

Tabulka 3.3: Separátor – přehříváč [4]

Separátor - přehříváč	
Teplosměnná plocha 1°	692 m ²
Teplosměnná plocha 2°	685 m ²
Maximální objem	90 m ³
Průměr	3,48 m
Výška	10,3 m
Hmotnost	113 461 kg
Materiál trubek	12022,1

Obrázek 3.5: Náčrten kombinovaného
separátor – přehříváče [13]

1 - výstup přehřáté páry, 2 - vstup do žaluziových
odlučovačů, 3 - vstup mokré páry, 4 - odloučená voda,
5 - vstup topné páry, 6 - první stupeň přehřívání,
7 - druhý stupeň přehřívání, 8 - obratová část, 9 - výstup
topné páry, 10 - drenáž, 11 - svazky topných trubek, 12
- žaluziové odlučovače



Vstupující mokrá pracovní pára z VT dílu je zbavena vlhkosti mezi žaluziemi ze zvlněného plechu, které mají tloušťku 1 mm a jsou z nerezové oceli. Po odloučení vlhkosti pára prochází přes dvoustupňový přehřívák, kde jde pára nejprve dolů. Prochází kolem trubkových svazků, ve kterých proudí pára ze sedmého neregulovaného odběru. Poté se pára otočí a jde zpět kolem svazků trubek, kde je přehřívána odběrovou parou z osmého odběru turbíny. Oba stupně přehříváče jsou vytvořeny z ocelových trubek s navařenými podélnými žebry přivařenými k ocelovým trubkovicím. [4]

Pára je přehřívána nad teplotu sytosti a proudí potrubím směrem k NT dílům turbíny. Zachycená voda z pracovní páry a topná pára zkondenzovaná uvnitř trubek jsou kaskádovány do sběrače separátu a do sběrače kondenzátu.

3.2.4 Nízkotlaký díl turbíny

Rekonstrukce NT dílů turbíny nebyla přímo součástí projektu VPR, ale vzhledem k rychlému dočerpávání provozních hodin těchto částí bylo nutné pro NT díly zpracovat samostatný projekt, který rychleji řešil problém jejich životnosti. Cílem bylo zajistit spolehlivý provoz turboskupin po dobu projektované a plánované životnosti reaktorových bloků EDU a zároveň schopnost inovované části turbíny zpracovat původní tepelný výkon reaktoru s vyšší účinností než před rekonstrukcí.

Během přípravy této akce se také počítalo se současně probíhající přípravou projektu VPR a bylo nutné navrhnout modernizované NT díly tak, aby v případě potřeby byly schopné pojmout o 5 % více páry než byl aktuální stav.

Technická úroveň parních turbín instalovaných v EDU odpovídala svou koncepcí turbínám vyráběným na počátku 70. let minulého století. Před modernizací byl stav opotřebení nejvíce poznamenán silnou erozí lopatek posledních stupňů NT dílů a erozí odtokových hran u pat lopatek posledních stupňů NT dílů.

Výrobce turbín Škoda Power byla z důvodu neprovedení dlouhodobých testů materiálů lopatek udávána jejich životnost 100 000 provozních hodin. Prodloužení doby provozu NT rotorů na 120 000 – 130 000 provozních hodin bylo možné až na základě ověření skutečného stavu po 100 000 odpracovaných hodinách a za podmínek, že byly prováděny pravidelné defektoskopické kontroly stavu posledních stupňů oběžných lopatek. [4]

Pro modernizované NT díly byly stanoveny požadované body řešení:

- Zajistit životnost a spolehlivý provozu turboskupin do konce plánované životnosti EDU minimálně do roku 2027.
- Umožnit, v případě budoucí potřeby, trvalé zvýšení elektrického výkonu turbosoustrojí.
- Zabezpečit stejnou funkci navazujícího zařízení, například odběr páry z neregulovaných odběrů.
- Provést optimalizaci pracovního bodu NT dílů na 100 % původního výkonu reaktoru.
- **Využít rezervy původního konstrukčního řešení, které jsou v následujících oblastech:**
 - Použít 3D návrhu pro tvarování statorových a rotorových lopatek a zmenšení profilových ztrát.
 - Zlepšit vstupní a výstupní části, odklon od obracení proudu páry.
 - Nahradit původní skládaný rotor, u kterého je nebezpečí koroze pod napětím, celokovaným rotorem.
 - Zlepšit těsnost mezi statorovými a rotorovými částmi.
 - Odstranit vázací a tlumící prvky v proudu páry. [4]

NT tělesa jsou stejně jako VT tělesa dvouproudá a v každém proudu mají pět pracovních stupňů. Tělesa jsou také dvouplášťová, kde vnitřní tělesa jsou pro možnost endoskopické kontroly rotorů vybavena otvory. Na koncích vnitřních těles jsou umístěny výstupní difuzory s odsáváním vlhkosti. Spodní část vnějšího tělesa je pro oba NT díly společná.

První dva stupně mají ocelová kola kolíkované konstrukce a jejich lopatky s integrovanými bandážemi jsou upevněny pomocí kolíků do hlav a disků rozváděcích kol. Další rozváděcí kola jsou ocelová, svařovaná a lopatky jsou vevářeny do hlav a disků rozváděcích kol. Odvádění vlhkosti z průtočné části NT dílů je zajištěno vhodnou konstrukcí hlav rozváděcích kol. U posledního a předposledního rozváděcího kola je odvod vody zajištěn štěrbinou v hlavové části kola mezi rozváděcí a oběžnou lopatkou. Duté rozváděcí lopatky posledních NT stupňů umožňují odvádět část vodní vrstvy z povrchu lopatek dovnitř. Odkud je voda odvedena mimo rozváděcí kola a pomocí dvouplášťového difuzoru je za posledním oběžným kolem vyvedena zpět do proudu páry. [4]

Odběry jsou u NT dílů provedeny symetricky, pro omezení axiálních sil, ale mezi jednotlivými NT díly se odběry liší pro dosažení ideálních hodnot pro regeneraci.

Odběry u NT 1 jsou vyvedeny za:

- oběžným kolem 1. stupně pro NTO 4
- oběžným kolem 3. stupně pro NTO 2
- oběžným kolem 4. stupně pro NTO 1

Odběry u NT 2 jsou vyvedeny za:

- oběžným kolem 2. stupně pro NTO 3
- oběžným kolem 4. stupně pro NTO 1

Tabulka 3.4: Parametry jednotlivých odběrů [4]

Parametry neregulovaných odběrů			
	T [°C]	P [MPa]	M [kg/s]
I	56	0,016	4,27
II	81	0,049	10,33
III	100	0,101	8,87

Parametry neregulovaných odběrů			
	T [°C]	P [MPa]	M [kg/s]
IV	150	0,216	10
V	150	0,474	15,96
VI	180	1	12,14
VII	195	1,412	32,95
VIII	232	2,893	48,08

NT rotor je složen z hřídele a oběžných lopatek. Při rekonstrukci NT částí byl původní skládaný rotor nahrazen rotorem z monoblokového výkovku. Rotory jsou uloženy v radiálních kluzných ložiscích a všechny jsou spojeny pevnými spojkami. Spojkové kotouče jsou kovány společně s rotorem. NT díly jsou vzájemně zaměnitelné, a proto je na všech rotorech umístěn kotouč s ozubením pro otáčecí zařízení. [4]



Obrázek 3.6: Nový nízkotlaký rotor [4]

V každém proudu NT dílů se nachází pět stupňů oběžných lopatek se zkroucenými profily. U lopatek všech stupňů kromě posledního je použito vidličkových závěsů. Obloukové stromečkové nožky se tedy nachází pouze u lopatek posledních stupňů. Oběžné lopatky prvních třech stupňů jsou opatřeny integrálními bandážemi, které slouží ke zvýšení tuhosti lopatek a pro vytvoření nadbandážové ucpávky.

Během výměny NT rotorů byla zachována délka lopatky posledního stupně 840 mm. Jejich počet se z původních 80 lopatek se snížil na pouhých 45. Nové lopatky posledního stupně jsou ovšem velmi robustní a jejich hmotnost z původních 9,4 kg narostla na hmotnost 42,4 kg jedné lopatky. Náběžné hrany lopatek posledních NT stupňů jsou proti erozi chráněny povrchovým kalením. Tyto lopatky s moderními transsonickými profily jsou volné, bez vazby. [4]

3.3 Kondenzátor

Za provozu turbíny slouží kondenzátor ke zkondenzování páry vystupující z NT dílů TG a při najíždění, odstavování a při poruchových stavech je do kondenzátoru přiváděna pára prostřednictvím přepouštěcí stanice do kondenzátoru (PSK) z hlavního parního kolektoru (HPK).

Pára po expanzi v turbíně vstupuje radiálně do dvou kondenzátorů. Kondenzátory jsou chlazeny cirkulující vodou, která proudí uvnitř trubek a odvádí teplo uvolněné při kondenzaci páry. Cirkulující chladicí voda o celkovém množství 9722 kg/s proudí dvěma potrubími nejprve přes oddělené poloviny prvního kondenzátoru, kde se ohřeje asi o 6 °C. Dále po projití propojovacím potrubím proudí přes oddělené poloviny druhého kondenzátoru. Chladicí voda se ve druhém kondenzátoru ohřeje o dalších asi 5 °C a pomocí vratného kolektoru je odváděna do chladících věží. Následkem postupného chlazení kondenzátorů dochází k odlišným teplotám cirkulační vody v jednotlivých kondenzátorech, což způsobuje rozdílné tlaky a tím i entalpii páry v parních prostorách obou kondenzátorů.

V prostoru kondenzující páry je za provozu udržováno vakuum, které vzniká v důsledku odvodu tepla chladicí vodou a je držené vodoproudými vývěvami. Vývěvy odsávají z parního prostoru kondenzátoru nezkondenzovatelné plyny.

Do parního prostoru kondenzátoru je zavedena demivoda, která je zde rozstříkována pomocí trysek. Přiváděná demivoda má za cíl doplňovat ztráty v okruhu a regulace jejího vstřikování je řízena na základě hladiny v napájecí nádrži.

Pro udržení vysoké účinnosti přestupu tepla přes teplosměnné plochy kondenzátorů, je nutné za provozu čistit vnitřní povrch trubek. To je zabezpečeno pomocí systému kontinuálního čištění teplosměnné plochy TAPROGGE. [4]

Výměna teplosměnných trubek kondenzátorů

V jaderné elektrárně Dukovany byla stejně jako v dalších elektrárnách, které využívají pro teplosměnné plochy výměníků slitin mědi, pozorována erozní koroze. Tato koroze vzniká díky rychlosti proudícího prostředí a dochází tak k rozrušování pasivní vrstvy.

Komponenty sekundárního okruhu jsou vyrobeny z uhlíkatých ocelí a v kombinaci s chemickým režimem vody v sekundárním okruhu docházelo k vysoké erozní korozi. Chemický režim pracoval s pH 8,5 – 8,8.

Zásadního snížení vysoké erozní koroze bylo možné dosáhnout pouze výraznou změnou chemického režimu. Došlo ke zvýšení pH na 9,8 čehož se docílilo dávkováním hydroxidu amonného do sekundárního okruhu. Aby bylo možné zvýšit pH cirkulujícího media, muselo dojít ke změně materiálu teplosměnných trubek kondenzátorů. Jako nejvhodnější materiál byl zvolen titan. [4]

Nové teplosměnné trubky z titanu zaválcované a zavařené do titanových trubkovnic zvýšili těsnost a spolehlivost celého zařízení. Rozmístění trubek v kondenzátoru bylo navrženo tak, aby způsobovalo co nejmenší tlakovou ztrátu páry při průtoku svazkem. U nejvíce mechanicky namáhaných krajních řad byly použity trubky o rozměru $\varnothing 22 \times 0,7$ mm a pro méně namáhané části teplosměnné plochy byly zvoleny trubky o $\varnothing 22 \times 0,5$ mm.

Podářilo se také snížit tlak v kondenzátorech, čímž došlo ke zvýšení účinnosti elektrárny. Tato akce byla realizována v roce 1995, což bylo dlouho před samotným VPR, ale společně s VPR měla za cíl dosáhnout dlouhodobého bezpečného provozu elektrárny. [17]

Tabulka 3.5: Kondenzátor parní turbíny [17]

Kondenzátor parní turbíny			
	Před rekonstrukcí	Po rekonstrukci	
Vakuum v kondenzátorech	5,2/6,8	4,6/6,1	kPa
Nárůst výkonu každé turbíny	–	1,65	MW
Tlaková ztráta na vodní straně	70	50	kPa
Podchlazení kondenzátu	>1	<0,5/1,0	°C

3.4 Kondenzátní čerpadla

Kondenzátní čerpadla (KČ) jsou další nedílnou součástí sekundárního okruhu. Slouží k sání kondenzátu z kondenzátoru parní turbíny a přes další pomocná zařízení ho tlačí až do napájecí nádrže. Kondenzátní čerpadla musí být schopna sát z prostoru vysokého vakua.

V Jaderné elektrárně Dukovany se nacházejí dva stupně kondenzátních čerpadel. Postupného čerpání kondenzátu je užito z důvodu omezeného konstrukčního přetlaku na blokové úpravně kondenzátu a také s ohledem na maximální rozdíl tlaků na filtrech. [4]

3.4.1 Kondenzátní čerpadla 1°

Tento stupeň kondenzátních čerpadel je tvořen trojicí paralelně řazených kondenzátních čerpadel. KČ 1° jsou vertikální, nízkotlaká, odstředivá, článková čerpadla, která sají kondenzát ze sběrače kondenzátu kondenzátoru turbíny a přes blokovou úpravnu vody ho dopravují do sání kondenzátních čerpadel 2°. Jsou určena i pro případné vyčerpání obsahu kondenzátoru do chemické úpravy vody.

Část kondenzátu z meziodběrů a výtlaků čerpadel je odebírán i pro další účely. Například při najíždění TG je potřeba část kondenzátu chladit v chladičích vloženého okruhu generátoru, tak aby teplota kondenzátu nepřesáhla dovolenou vstupní teplotu na blokovou úpravnu kondenzátu. [4]

Tabulka 3.6: Charakteristické hodnoty pro KČ 1° [4]

Kondenzátní čerpadlo 1°	
Průtok	562 t/h
Měrná energie	618 J/kg
Tlak v sání	75 kPa (podtlak)
Tlak ve výtlaku	0,5 MPa (přetlak)
Výkon	132 kW
Otáčky čerpadla	990 ot/min
Příkon elektromotoru	200 kW

3.4.2 Kondenzátní čerpadla 2°

Druhý stupeň čerpání kondenzátu je stejně jako první stupeň tvořen trojicí kondenzátních čerpadel. Tato čerpadla 2° dopravují kondenzát přes nízkotlakou regeneraci do napájecích nádrží. Část kondenzátu na výtlaku z KČ 2° je stejně jako u KČ 1° využíván pro další účely, jako jsou například chlazení nízkotlakých tělesa TG.

KČ 2° je horizontální, odstředivé čerpadlo, člankové konstrukce, s oběžnými koly řazenými za sebou do tlakových stupňů. [4]

Tabulka 3.7: Charakteristické hodnoty pro KČ 2° [4]

Kondenzátní čerpadlo 2°	
Průtok	554 t/hod
Měrná energie	1470 J/kg
Tlak v sání	cca 0,3 MPa (přetlak)
Tlak ve výtlaku	cca 1,8 MPa (přetlak)
Příkon čerpadla	430 kW
Otáčky čerpadla	1485 ot/min
Příkon elektromotoru	500 kW

3.5 Regenerační ohříváky

Tepelná účinnost oběhu s vodou a vodní parou je závislá na střední teplotě přívodu tepla. Proto každá možnost zvýšení teploty napájecí vody je přínosná. Jednou z možností jak zvýšit střední teplotu přívodu tepla je využít regeneračního ohřevu. Čímž je možné se přiblížit teoretickému Carnotovu oběhu a to nejlépe přihřátím napájecí vody až na teplotu varu, předtím než ji přivedeme do parního generátoru. K dosažení tak vysoké teploty by bylo potřeba použít velkého počtu regeneračních ohříváků, což by celý oběh komplikovalo a zvyšovalo cenu zařízení. [13]

Odvádění kondenzátu z regeneračních ohříváků je možné provádět dvojím způsobem. Jednodušší je způsob odvodu **kaskádováním**, ale tento způsob je termodynamicky nepříliš vhodný. Jeho nevýhoda spočívá v mísení teplého kondenzátu z výše položeného ohříváku s parou v ohříváku s nižším tlakem. Při malém počtu ohříváků je tak mezi nimi velký tlakový rozdíl a proto dochází ke značné ztrátě nevratným mísením. Tuto ztrátu je ovšem možné částečně snížit použitím dochlazovačů. Druhou možností jak odvádět kondenzát je **přečerpávání**. Při využití tohoto způsobu musí být ohřívák vybaven čerpadlem s regulací hladiny kondenzátu v ohříváku. [16]

Při regeneraci není jediným významným faktorem zvýšení termické účinnosti, ale významnou roli hraje také snížení průtočného množství páry, která prochází posledními stupni parní turbíny. To nám umožňuje při zachování výkonu turbíny zmenšit rozměry posledního stupně anebo při původních rozměrech je možné zvýšit průtočné množství páry v první části turbíny a tím dosáhnout větších výkonů. [16]

3.5.1 Nízkotlaká regenerace

Zařízení nízkotlaké regenerace je určeno pro postupný ohřev hlavního kondenzátu, čerpaného z kondenzátorů turbíny pomocí kondenzátních čerpadel do napájecí nádrže. Ohřev v EDU

probíhá v pěti nízkotlakých ohřívácích parou z neregulovaných odběrů turbíny, čímž dochází ke zvyšování tepelné účinnosti cyklu. Kondenzát je přehříván ještě před nízkotlakou regenerací teplem uvolněným v kondenzátoru komínkových par.

Nízkotlaká regenerace je rozdělena do tří skupin, které jsou na sobě nezávislé, a každou z nich je možné samostatně odstavit pro potřeby opravy poruch. V takovém případě pak hlavní kondenzát protéká příslušným obtokem mimo odstavené NTO.

Samostatné skupiny ohříváků:

- NTO 1 a NTO 2
- NTO 3 a NTO 4
- NTO 5

Nízkotlaký ohřívák **NTO 1** je vertikální výměník tepla, jehož součástí je i podchlazovač kondenzátu (PONTO) který je vytápěn parou z 1. odběru TG. Hlavní kondenzát prochází trubkami trubkového svazku ohříváku a po průchodu tímto svazkem pokračuje k NTO 2. Část kondenzátu je ještě před vstupem do NTO 1 odvedena potrubím do podchlazovače, kde se přehřeje kondenzátem z topné páry NTO 1 a NTO 2, čímž dochází ke zlepšení účinnosti cyklu. Poté je část kondenzátu zavedena zpět do hlavního proudu, ještě před jeho vstupem do NTO 1. Topná pára z neregulovaného odběru vstupuje do mezitrubkového prostoru kde kondenzuje a předává své teplo hlavnímu kondenzátu. Zkondenzovaná pára po průchodu PONTO pokračuje dále do kondenzátoru TG.

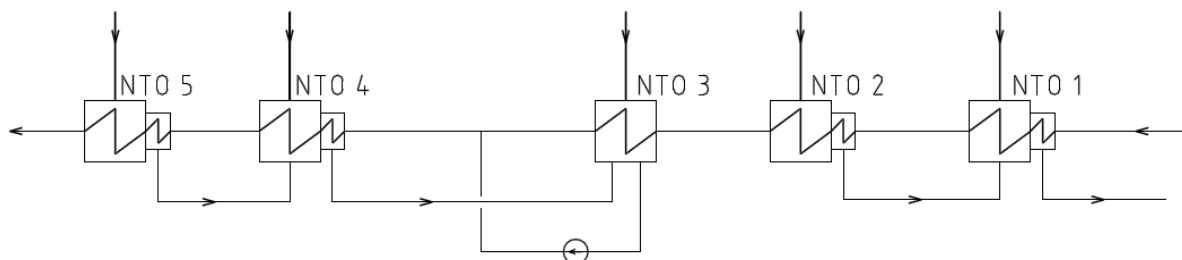
Nízkotlaký ohřívák **NTO 2** a podchlazovač PONTO 2 jsou stejné konstrukce jako je tomu u NTO 1, jediný rozdíl je že jsou vytápěny parou z 2. odběru TG a odsávanou ucpávkovou parou z vysokotlakového tělesa turbíny.

Nízkotlaký ohřívák **NTO 3** je vytápěn parou z 3. odběru TG, tento ohřívák není vybaven podchlazovačem.

Nízkotlaký ohřívák **NTO 4** je vertikální výměník, vytápěný parou ze 4. odběru TG. V případě potřeby je možné do něj přivést páru z kolektoru 0,7 MPa. Topná pára je do parního prostoru přivedena z boku v horní části pláště. Do parního prostoru NTO 4 je také kaskádován kondenzát topné páry z PONTO 5. Topný kondenzát je z NTO 4 odváděn do PONTO 4 a odtud je dále kaskádován do sběrače kondenzátu u NTO 3. Hlavní kondenzát je po průchodu ohřívákem NTO 4 odváděn k NTO 5.

Nízkotlaký ohřívák **NTO 5** je vertikální výměník vyhříváný topnou parou z 5. odběru TG. Podchlazovač PONTO 5 je horizontální výměník stejné konstrukce jako NTO 4.

U nízkotlaké regenerace se využívá obou principů pro odvádění kondenzátu topné páry. Kaskádování je využito u kondenzátů z NTO 5 a 4, které jsou společně s topným kondenzátem z NTO 3 převedeny do nádrže sběrače kondenzátu. Tato nádrž slouží jako zásobní nádrž podávacích čerpadel kondenzátu, odkud je systémem přečerpávání kondenzát zaveden do proudu hlavního kondenzátu za NTO 3. Topný kondenzát z NTO 2 a 1 je kaskádován do kondenzátoru TG. [4]



Obrázek 3.7: Schéma nízkotlaké regenerace

3.6 Napájecí nádrž

Odplyňovače s napájecí nádrží (NN) tvoří samostatnou tlakovou nádobu, kde jsou odplyňovače určeny k termickému odplynění, snížení obsahu plynů O_2 a CO_2 v napájecí vodě parogenerátorů, k zamezení vzniku koroze a NN slouží k vytvoření dostatečné zásoby odplyněné napájecí vody (NV) a k vytvoření požadované nátokové výšky pro hlavní napájecí čerpadlo. [4]

3.6.1 Odplyňovač

Pro zásobování jedné NN jsou umístěny v EDU dva horizontální termické odplyňovače. Na straně vstupu kondenzátu je tvořen dvěma kolektory s atomizačními rozprašovacími elementy a pro jeho správnou funkci je třeba dosáhnout teploty odplynění kondenzátu $167\text{ }^{\circ}\text{C}$, čehož je docíleno přiváděním topné páry z parního kolektoru $0,7\text{ MPa}$.

Při nominálním zatížení turbosoustrojí je na odplyňovače přivedeno asi 1010 t/hod kondenzátu a z toho je odváděno asi $3,5 - 7\text{ t/hod}$ topných par. [4]

3.6.2 Nádrž

NN je horizontální tlaková nádoba válcového tvaru s vestavbou, ve které se shromažďuje odplyněný kondenzát a jeho okamžitá zásoba odplyněné NV představuje cca 5 min. nominálního výkonu turbosoustrojí. Obsahu NV v NN je využíváno při teplém i studeném proplachu nízkotlaké a vysokotlaké regenerace. Při dochlazování bloku plní funkci zásobníku a kompenzátoru objemu.

Do NN je přiváděn přes NT regeneraci hlavní kondenzát a zde se mísí s vodou z dalších technologií, mezi kterou patří například kondenzát ze separátoru a přehříváčů páry, pára z některých ucpávek TG, podchlazený kondenzát topné páry z podchlazovače u VTO 1. Pro udržení požadovaných parametrů je do NN přiváděna pára z kolektoru $0,7\text{ MPa}$, který je při jmenovitých stavech napájen primárně z 6. neregulovaného odběru TG. [4]

Tabulka 3.8: Charakteristické hodnoty napájecí nádrže [4]

Napájecí nádrž	
Pracovní objem	150 m^3
Maximální objem	168 m^3
Provozní přetlak	$0,6\text{ MPa}$
Provozní teplota	$167\text{ }^{\circ}\text{C}$
Průměr	3200 mm
Délka	21400 mm
Hmotnost	52200 kg
Médium	napájecí voda

3.7 Napájecí čerpadla

Napájecí čerpadla (NČ) jaderných elektráren zajišťují dodávku napájecí vody do PG. Voda je čerpána z NN přes vysokotlaké ohříváky do parního generátoru. NČ v sekundárním okruhu jaderné elektrárny se od čerpadel v klasických elektrárnách liší a to především menší měrnou energií, ale i podstatně vyšším průtokem napájecí vody. NČ musí být několik, aby v případě poruchy některého z čerpadel, byla ostatní schopná nahradit výpadek odstaveného čerpadla a dodávat potřebné množství napájecí vody. [13]

V EDU je instalováno pět NČ, při plném výkonu bloku pracují čtyři čerpadla a páté tvoří rezervu. Čerpadla jsou periodicky střídána na pozici rezervního, pro jejich rovnoměrné zatěžování a opotřebení. Konstrukce čerpadel počítá s náběhem bez prohřívání a s možným stavem krátkodobého zapaření.

NČ 250 je konstruováno jako článkové, horizontální, odstředivé a je zapouzdřeno v plášti. Skládá se z odlitého pláště čerpadla, do kterého je umístěn vnitřní stator s rotorem. Hydraulická část je uzavřena vysokotlakým víkem.

Všechna NČ jsou poháněna elektromotory. Sací oběžné kolo má oboustranný vstup, což snižuje potřebnou nátokovou výšku a díky tomu není potřeba použít podávací čerpadlo. [13]

Tabulka 3.9: Charakteristické hodnoty pro napájecí čerpadlo [4]

Napájecí čerpadlo	
Dopravované množství	680 t/hod
Počet oběžných kol	4
Tlak v sání	0,84 MPa (přetlak)
Tlak ve výtlaku	6,6 MPa (přetlak)
Měrná energie čerpadla	6450 J/kg
Výkon	1819 kW
Otáčky čerpadla	2975 ot/min
Účinnost čerpadla	77 %
Čerpaná kapalina	napájecí voda
Teplota čerpané kapaliny	167 °C
Druh mazání	turbínový olej
Příkon elektromotoru	2100 kW

3.8 Vysokotlaká regenerace

Zařízení vysokotlaké regenerace slouží pro postupný ohřev napájecí vody, která je čerpána napájecími čerpadly z napájecích nádrží do parogenerátorů. K ohřevu dochází ve dvou vysokotlakých ohřívacích pomocí páry z neregulovaných odběrů TG, čímž dochází ke zvyšování tepelné účinnosti.

Vysokotlaký ohřívák VTO 1 je regenerační, vertikální, vlásenkový výměník, celosvařované konstrukce. Je tvořen parním prostorem válcového tvaru. Uvnitř jsou umístěny trubky trubkového svazku, které jsou zaválcovány a zavařeny těsníci svař v trubkovnici. Ve VTO 1 je napájecí voda ohřívána topnou parou ze 7. odběru TG a kondenzátem z VTO 2.

Vstup topné páry do mezitrubkového prostoru je hrdlem v horní části pláště. Vychlazený kondenzát topné páry z podchlazovače odchází hrdlem ve spodní části ohříváku. Dále je do parní strany VTO 1 přivedena též pára z uvolňovače, kam je zaveden kondenzát topné páry z VTO 2. Kondenzát topné páry z podchlazovače VTO 1 je odváděn do napájecí nádrže.

Vysokotlaký ohřívák **VTO 2** je stejné konstrukce jako VTO 1. Vyhříván je topnou parou z 8. odběru TG. Kondenzát topné páry po výstupu z ohříváku a podchlazovače je kaskádován do uvolňovače páry před VTO 1.

Z výtlačku napájecích čerpadel je napájecí voda tlačena dvěma paralelními potrubími do podchlazovače kondenzátu u VTO 1 a dále k sériově zařazené kondenzační teplosměnné ploše VTO 1. Napájecí voda je ve VTO 1 ohřáta topnou parou ze 7. odběru TG na teplotu cca 191 °C. Dále pokračuje přes podchlazovač do VTO 2, který je vyhříván parou z 8. neregulovaného odběru TG. Ohřátá napájecí voda na cca 227 °C vystupuje z VTO 2 a dvěma paralelními potrubími je přiváděna k napájecímu kolektoru PG. [4]



Obrázek 3.8: Vysokotlaký ohřívák [19]

4 ELEKTRICKÁ ČÁST EDU

Tato část se věnuje částem elektrárny od transformace mechanické energie na elektrickou až po její spolehlivé vyvedení do sítě. Jsou zde popsány jednotlivé zařízení, jejich specifikace a akce, které proběhly pro umožnění vyvedení zvýšeného výkonu elektrárny.

4.1 Generátor

V řetězci zařízení, které bylo potřebné modifikovat, v důsledku zvýšení výkonu Jaderné elektrárny Dukovany jsou i generátory 220 MW.

Generátor je točivý stroj, který umožňuje přeměnu mechanické energie turbíny na energii elektrickou. Parní turbína otáčí rotorem generátoru, na kterém je budícím proudem vytvořen dvoupólový elektromagnet. Při otáčení rotoru se do cívek statoru vlivem elektromagnetické indukce indukuje elektrické napětí. Takto vyrobená elektrická energie je z generátoru odváděna přes jeho svorky ke generátorovému vypínači.

V EDU se pro tento účel nachází 8 stejných synchronních střídavých generátorů s kombinovaným chlazením vodík-voda. Kondenzát zajišťuje chlazení vinutí statoru a vodíkem je chlazen magnetický obvod a rotor generátoru. Každý generátor má pod sebou umístěné své olejové, vodní a vodíkové hospodářství. Rotor generátoru je pomocí spojky pevně spojen s rotorem turbíny.

Původní generátory nevyhovovaly požadavkům na zvýšení elektrického výkonu elektrárny, neboť izolace rotorového a statorového vinutí byli u konce své životnosti. Dle doporučení výrobce BRUSH² bylo pro dlouhodobou spolehlivost, zvýšení výkonu a prodloužení životnosti celé elektrárny nutné provést kompletní převinutí statorového vinutí do nové mědi, protože životnost vinutí byla vyčerpána a jiným způsobem nebylo možné zajistit dlouhodobý bezporuchový chod generátoru při zvýšeném výkonu.

Modernizovaný generátor je schopen při nominálním provozu dosahovat elektrického výkonu přesahující 250 MW a pracovat s účinností přeměny energie 99,72 %. Nejtěžším zařízením, kterým se během modernizace na strojovně manipulovalo, byl stator generátoru a pro jeho transport bylo nutné spráhnout dva jeřáby, každý má nosnost 125 tun. [4]

Popis modifikovaného generátoru

Stator generátoru je dělen na vnitřní a vnější kostru, což je výhodné zejména z montážních a dopravních důvodů. Kvůli dopravě je vnější část rozdělena na další čtyři části. Střední část tvoří vlastní statorovou kostru a je složena ze dvou prstenců. Aktivní železo statoru je připevněno mezi dvě nemagnetické desky. Svařovaná konstrukce vnitřní kostry tvoří společně s paketem plechů a statorovým vinutím montážní a dopravní celek o hmotnosti 190 tun.

Statorové vinutí je dvouvrstvé se zkráceným krokem. Jednotlivé vodiče jsou permutovány a na čelech jádra jsou použity měděné stínící desky pro maximální potlačení přídavných ztrát. Celé vinutí je navrženo tak, že je praktický zkratuvzdorné.

Rotor generátoru je vyroben z jednodílného výkovku z chrom-nikl-molybden-vanadiové oceli. Cívky rotorového vinutí jsou připevněny na obruče z nemagnetické austenitické oceli, se zvýšenou odolností proti korozi pod mechanickým napětím.

Vinutí rotoru je z dutých vodičů z elektrolytické mědi legované stříbrem. Průřez vodiče je obdélníkový s eliptickou dutinou. Cívky vodičů se skládají z půlzavitů, do kterých je umožněn přímý vstup chladicího vodíku.

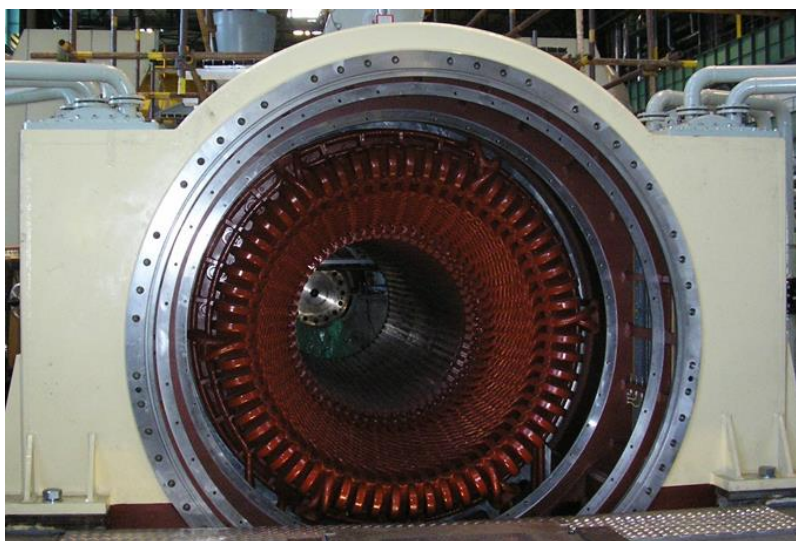
² Firma BRUSH SEM s.r.o je od roku 2001 nástupnickou organizací závodu Elektrické stroje podniku Škoda Energo a v současné době má veškeré know-how ke generátorům vyrobeným ve firmě Škoda.

Chlazení generátoru je rozděleno na dva okruhy. První okruh zajišťuje chlazení satorového vinutí pomocí demineralizované vody. Potřebné průtočné množství chladícího kondenzátu je 120 m³/hod při teplotě 34 °C.

Rotor, satorové železo a čelní části satoru se chladí přetlakovým vodíkem, jenž prochází dutými vodiči rotorového vinutí. Za normálního provozu dosahuje chladící vodík ve stroji přetlaku 0,3 MPa a maximální teploty 42 °C. Chlazení vodíku v chladiči zprostředkovává kondenzát o teplotě 34 °C. [4]

Tabulka 4.1: Srovnání vlastností původního a modernizovaného generátoru [14]

	Generátor		
	Původní stav	Současný stav	
Jmenovitý výkon generátoru	259	300	MVA
Činný výkon	220	255	MW
cos φ	0,85	0,85	–
Jmenovité napětí	15,75	15,75	kV
Jmenovitý proud satoru	9,5	11	kA
Jmenovitý kmitočet	50	50	Hz
Jmenovité otáčky	3000	3000	min ⁻¹



Obrázek 4.1: Stator generátoru [18]

4.2 Rekonstrukce vyvedení výkonu

Rekonstrukce vyvedení výkonu neboli rekonstrukce zapouzdřených vodičů nebyla vyvolána technickým stavem zařízení, ale jako následek změny výkonu generátorů. Po výsledcích analýzy provedené v elektrické části elektrárny, bylo nutné provést nezbytná technická opatření pro zvýšení parametrů zařízení pro nový výkon generátoru 300 MVA.

**Obrázek 4.2:** Zapouzdřené vodiče [18]

Na všech blocích EDU byla provedena kompletní repase případně výměna zapouzdřených vodičů a všech jeho součástí. Od připojovacích částí generátorů až po připojovací části k blokovým transformátorům.

Systém vyvedení výkonu je určen k přenosu trojfázového elektrického výkonu generátoru k blokovému transformátoru a případně k pracovnímu napájení odbočkového transformátoru. Vlastní zapouzdřený vodič (ZV) je speciální typ vodiče umožňující přenést vysoké hodnoty střídavého proudu a zkratových výkonů a je určen pro vyvedení výkonu z generátoru. ZV je složen z fázového vodiče umístěného v ose pouzdra, které je vyrobeno z elektrovedného hliníku. Proti erozivním účinkům magnetizačního proudu jsou podpěry pro upevnění pouzdra provedeny izolovaně a celé pouzdro je uzemněno pouze jedním strojeným svodem. [4]

Tabulka 4.2: Charakteristické vlastnosti pro zapouzdřené vodiče [4]

Zapouzdřené vodiče	
Výrobce	ENERGOVOD České Budějovice
Chlazení	Přirozené vzduchové
Jmenovitý proud	11 kA
Jmenovité napětí	15 kV
Základní rozteč fází	1000 mm

Zapouzdřené vodiče	
Vodič	
materiál	E-Al 99,5
průměr	350 mm
tloušťka stěny	16 mm
Pouzdro	
materiál	E-Al 99,5
průměr	730 mm
tloušťka stěny	6 mm

4.3 Modernizace blokových transformátorů

Na jaderné elektrárně Dukovany se od jejího spuštění nacházelo celkem 9 blokových transformátorů dvojího typu. Na 2. – 4. reaktorovém bloku byly transformátory ŠKODA 250 MVA s nuceným průtokem oleje vinutím a vzduchovými chladiči. Na 1. reaktorovém bloku se nacházely transformátory typu Záporožtransformátor uzpůsobeny pro přirozený průtok oleje vinutím. Tento typ byl umístěn i na stanovišti pro náhradní transformátor.

Blokové transformátory na EDU slouží:

- k transformaci elektrické energie přiváděné zapouzdřenými vodiči od generátorů o napětí 15,75 kV na napětí 420 kV.
- k vyvedení elektrické energie do elektrizační soustavy.
- k přivedení elektrické energie z elektrizační soustavy pro umožnění napájení vlastní spotřeby.

Projektová životnost transformátorů byla po jejich dvacetiletém provozu na parametrech blízkých jmenovitým takřka vyčerpána a pro další až čtyřicetiletý provoz elektrárny byl jejich stav nevyhovující. Současně jejich stav neumožňoval provoz se zvýšeným výkonem reaktoru o 5 % při současné modifikaci TG s vyšší účinností NT a VT dílů o dalších asi 10 %.

Pro další bezpečný provoz a možnost zvýšení výkonu jaderné elektrárny Dukovany byla zvolena varianta, při které došlo ke kompletní modernizaci všech blokových transformátorů typu ŠKODA 250 MVA a k nahrazení původních transformátorů typu Záporožtransformátor za nové, stejné koncepce jako jsou modernizované transformátory ŠKODA. Rekonstrukci a dodávku nových transformátorů provedla společnost ETD TRANSFORMÁTORY³.

Při modernizaci blokových transformátorů bylo možné použitím moderních technologií významným způsobem snížit ztráty nakrátko, čímž došlo k dalšímu zvýšení výkonu. [4]

Cíle technické změny:

- Umožnit spolehlivé vyvedení výkonu po zvýšení původního činného výkonu generátoru na předpokládaných 110 % a současné vytvoření dostatečné rezervy pro možnost dalšího zvýšení přenášeného výkonu způsobené dalšími změnami primárního nebo sekundárního okruhu v budoucnu.

³ ETD TRANSFORMÁTORY a.s. je člen skupiny BEZ Bratislava, která je nástupnickou organizací závodu Škoda Plzeň. V současné době je dodavatelem oprav transformátorů pro EDU. Má veškeré know-how k transformátorům vyrobeným ve firmě Škoda.

- Obnovit životnost izolačního systému po jeho dvacetiletém provozu na jmenovitých parametrech pro zajištění spolehlivých dodávek elektrické energie v horizontu dalších 20 až 40 let.
- Snížit ztráty vinutí blokových transformátorů a tím dosáhnout zvýšení zisku, u kterého se za 30 let provozu předpokládá dosažení stejné hodnoty, jaké je třeba vynaložit na modernizaci transformátorů.

Během modernizace blokových transformátorů bylo nainstalováno nové vinutí z transponovaných vodičů plněných epoxidovou pryskyřicí, která je během výrobního procesu vytvrzena a tím je dosaženo značné odolnosti vůči zkratovým silám působícím na vodiče vinutí. Transformátory byly také vybaveny plně automatickým chlazením. Ventilátory chladičů pracují s frekvenčním řízením otáček pro minimalizaci teplotních změn na izolační systém.

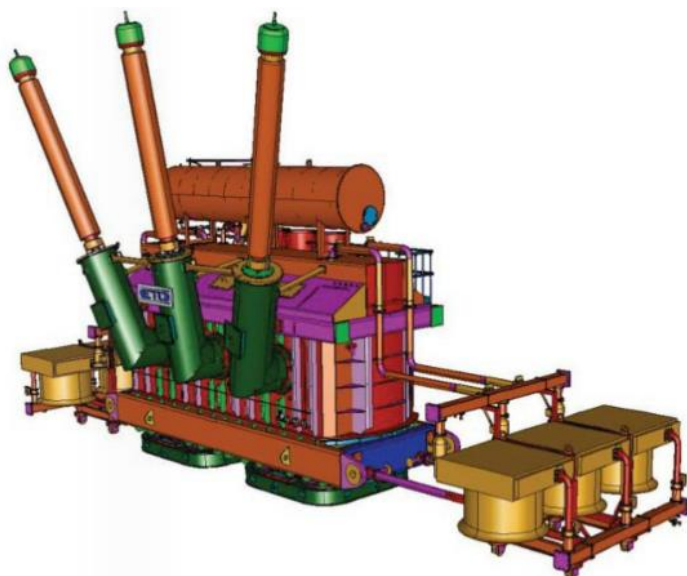
Další z úprav na původních transformátorech spočívala v náročné repasi nádoby samotného transformátoru, kde byly přesunuty původní vývody pro 420 kV průchodky z horní části stroje na boční stěnu. Důvodem této úpravy byla snaha zamezit případným přeskokům mezi vynutím a vývodem vysokého napětí, který je po úpravě proveden přímo ze středu vinutí na průchodku. Tato úprava docílila především větší bezpečnosti transformátorů.



Obrázek 4.3: Blokový transformátor [18]

Popis modernizovaných zařízení

Blokové transformátory v EDU jsou třífázové zvonového provedení s nucenou cirkulací oleje. Olej slouží ke chlazení vinutí a pětijádrového magnetického obvodu. K nádobě transformátoru je připevněna dilatační nádoba, ovládací a záskoková skříň chlazení. Chladiče oleje obsahující ventilátory a olejová čerpadla nejsou součástí transformátorů, ale jsou umístěny zvlášť na samostatných podvozcích. Do dilatační nádoby připevněné k horní části nádoby jsou přes Buchholzovo relé přiváděny plyny vznikající v transformátoru. Dilatační nádoba je vybavena olejznakem, vakem a vysoušečem, který nasává vzduch a odstraňuje z něj vlhkost.



Obrázek 4.4: Model blokového transformátoru [3]

Na straně od generátoru, kde je nižší napětí, je transformátor připojen přes průchodky k zapouzdřeným vodičům a na straně vyššího napětí je k blokovému transformátoru přes kondenzátorové průchodky připojeno lanové vedení 400 kV do rozvodny Slavětice.

Blokové transformátory se nachází u stěny strojovny a od svého okolí jsou odděleny betonovými případně ocelovými protipožárními přepážkami. Kolem transformátorů je nainstalováno stabilní hasicí zařízení pracující s vodní mlhou. [4]

Tabulka 4.3: Charakteristické vlastnosti blokového transformátoru [14]

Blokový transformátor			
	Původní stroj	Původní stroj	Rekonstruovaný (nový)
Výrobce	ZÁPOROŽ- TRANSFORMÁTOR	ŠKODA PLZEŇ	ETD TRANSFORMÁTORY
Jmenovitý výkon	250 MVA	250 MVA	300 MVA
Jmenovité napětí	420 / 15,75 kV	420 / 15,75 kV	420 / 15,75 kV
Jmenovitý proud	412 / 10997 A	412 / 10997 A	412 / 10997 A
Kmitočet	50 Hz	50 Hz	50 Hz
Spojení	YNd1	YNd1	YNd1
Napětí nakrátko	13,3 %	13,7 %	17,5±7,5 %
Chlazení	OFAF ⁴	ODAF ⁵	ODAF
Hmotnost	248 t	280 t	252,3 t
Hmotnost oleje	41,8 t	51 t	46 t

⁴ OFAF je systém chlazení s **přirozeným** průtokem oleje vinutím a nuceným ofukem vzduchových chladičů

⁵ ODAF je systém chlazení s **nuceným řízeným** průtokem oleje vinutím a nuceným ofukem vzduchových chladičů.

5 ÚPRAVY SYSTÉMU PRO OPTIMALIZOVANÝ PROVOZ

Během realizace a po ukončení projektu Využití projektových rezerv byla analyzována slabá místa a zařízení, která nevyhovovala požadavkům na co nejbezpečnější, nejspolehlivější a nejekonomičtější provoz EDU na zvýšeném výkonu. V této kapitole jsou zmíněny úpravy, které přispěly k vyšší bezpečnosti elektrárny, ale také k její vyšší účinnosti při provozu se zvýšeným výkonem.

5.1 Výměna měřících dýz

V parovodech mezi parním generátorem a HPK a dále od HPK k parní turbíně docházelo k vysokým tlakovým ztrátám a to právě vlivem měřících dýz.

Původní zařízení měřících dýz mělo konfuzor přivařený mezi předním a zadním tělesem jedním mohutným svarem, který způsoboval přenášení pnutí při jeho svařování a tím deformaci konfuzoru. Došlo tak ke zhoršení přesnosti měření ihned po výrobě a během celého provozu elektrárny.

Nový konfuzor je v tělese potrubí upevněn opřením o vnitřní kroužek a zajištěn malým odpruženým svarem, který nepřenáší pnutí a nevzniká tak žádná deformace. Nový typ konfuzoru má zvětšený poměr d_{20}/D_{20} , díky kterému došlo ke snížení rozdílu tlaků a tím i trvalé tlakové ztráty.

Průžné upevnění zvýšilo celkovou přesnost měření a přispělo ke snížení tlakové ztráty parovodů, která na trase z PG k HPK klesla z 51,8 kPa na 19,1 kPa a na trase z HPK k turbíně z 58,9 kPa na 21,6 kPa. [11]

5.2 Výměna odlučovačů nečistot a vody

Cílem výměny odlučovačů nečistot před vstupem do turbíny bylo dosáhnout menší tlakové ztráty odlučovače.

Původní kulový odlučovač s vloženým sítím měl vysokou tlakovou ztrátu a další nedostatky. Například síť v odlučovači úspěšně odstraňovalo lehké objemné nečistoty, ale zhoršovalo účinnost odlučování vody, která po zkondenzování na stěnách byla na síť opět rozprášena a unášena párou do turbíny.

Pro odstranění všech nedostatků původního odlučovače byl nový vyroben jako rohový s dynamickým kalníkem. Do tohoto odlučovače jsou nečistoty a voda směřovány šikmým odrazným přechodovým kusem a po jejich zachycení jsou ukládány do hlubokého kalníku s kontinuálním odvodem vody.

V EDU byly namontovány čtyři nové rohové odlučovače s vodorovným a svislým vstupem směrem vzhůru, díky kterým došlo ke snížení tlakové ztráty ze 107 kPa na 22 kPa a došlo také ke zvýšení celkové spolehlivosti a snížení obsahu vstupujícího kondenzátu do turbíny, což má příznivý vliv na zvýšení životnosti lopatek turbíny. [11]

5.3 Zvýšení tlaku v kolektoru 0,7 MPa

Před zahájením samotné modernizace a s tím související zvýšení výkonu reaktoru na 105 % tj. 1444 MWt, byly všechny stavy simulovány ve výpočtových programech. Z těchto analýz bylo zjištěno, že zvýšení výkonu bude mít největší dopad na tepelné zatížení kondenzační plochy VTO 1, které se zvýší o 6,1 %.

S rostoucím přetížením kondenzačních ploch VTO 1 dochází ke zkrácení jeho životnosti. Aby se předešlo vysokým hodnotám tepelného namáhání kondenzační plochy tohoto ohříváku, bylo zvoleno opatření, kterým se dosáhlo zvýšení teploty napájecí vody do VTO 1 ze současných 165,3 °C na novou hodnotu 167,3 °C.

Maximálního odlehčení tepelného namáhání bylo docíleno zvýšením tlaku v kolektoru 0,7 MPa, tím vzrostl i tlak v NN z původní hodnoty 0,69 MPa na novou hodnotu 0,72 MPa. Současně s nárůstem tlaku v NN vzrostla i teplota napájecí vody proudící z NN do VTO1.

Kolektor 0,7 MPa je potrubí, které slouží jako zdroj páry pro zařízení sekundárního okruhu. Dodává páru například pro zahlcení ucpávek parní turbíny a také slouží pro udržování požadovaného tlaku v NN. Kolektor 0,7 MPa je napájen především párou z 6. nebo 7. neregulovaného odběru TG a při nejmenovitých stavech může být napájen přímo ostrou párou z parního kolektoru. Během odstavování nebo náběhu bloku je kolektor 0,7 MPa zásobován ze sousedního bloku. [4]

5.4 Nové VTO

Původní zařízení VTO v EDU byly v provozu bez větších úprav od spuštění jednotlivých bloků, tzn. cca 23 let. Jejich výrobcem byla První brněnská strojírna, která dodala pro každý TG dva kusy VTO 1 a VTO 2, celkem tedy 16 kusů vysokotlakých ohříváků.

VTO představovali kritické místo a pro dosažení co nejmenší spotřeby tepla na výrobu elektrické energie a k prodloužení životnosti zařízení byla jejich výměna plánována na všech blocích do roku 2017. Při změření netěsností teplosměnných trubek v místě trubka-trubkovnice, byly při tlakových zkouškách zjištěny nevyhovující hodnoty. Případná možnost opravy byla komplikovaná skutečností, že trubkovnice byla z černého materiálu a trubky z austenitu.

Vysokotlaká regenerace není nepostradatelné zařízení pro provoz jaderné elektrárny a při jejím provozu bez VTO 1 a VTO 2 dochází na TG ke ztrátě přibližně 5 MWe. EDU vyrábí elektřinu asi 8000 hodin ročně, čímž by na jednom TG došlo ke ztrátě 40 000 MWh. Finanční ztráta při provozu elektrárny bez nevyhovujících VTO by pro jeden TG znamenala cca 40 mil. Kč/rok. [4]



Obrázek 5.1: Transport vysokotlakého ohříváku [19]

Důvody pro výměnu VTO:

- Špatný technický stav stávajících vysokotlakých ohříváků VTO 1 a VTO 2.
- Zvýšení projektové životnosti VTO na 280 000 provozních hodin, při výkonové hladině reaktoru 105 % (1444 MWt) případně 105+2 %.
- Zvýšení spolehlivosti dodávky elektrické energie, při současném snížení nákladů na údržbu.
- Dosažení co nejmenší spotřeby tepla na výrobu elektrické energie. [4]

Podmínkou při návrhu konstrukce nových ohříváků byl požadavek, zachování konstrukčního řešení inovovaných VTO 1 a VTO 2, tak aby odpovídaly původnímu stavu zařízení. Důvod podmínky byl zachování připojovacích rozměrů. Také vnější rozměry pláště nesměly být větší než původní, kvůli možnosti uložení na stejný základ.

Po zjištění netěsností byl celý projekt výměny VTO urychlen a k výměně posledního VTO došlo v roce 2013. Při následném kontrolním měření bylo zjištěno, že došlo ke zvýšení výkonu asi o 2 MW na každé turbíně. [4]

5.5 Zvýšení tlaku v HPK

Hlavní parní kolektor je zařízení, do kterého je přiváděna pára ze všech parních generátorů a je z něj dále vedena k vstupním hrdlům parních turbín.

Po akci VPR a výměně VTO byl po náběhu 4. reaktorového bloku diagnostikován problém před RV TG. Při původním nominálním přetlaku v HPK 4,39 MPa se vlivem hydraulických ztrát nedařilo docílit projektového přetlaku před RV TG 4,282 MPa. To mělo za následek větší objemové množství páry, než které byla parní turbína schopna pojmout a do vyřešení problému nebylo možné, aby reaktor pracoval na zvýšeném výkonu 105 %.

Příčinou těchto problémů byl projektem chybně určený referenční tlak v HPK pro dané hydraulické ztráty na trase od PG k RV TG a jako řešení bylo stanoveno zvýšení přetlaku v HPK z původních 4,39 MPa na nových 4,47 MPa.

Z důvodu ověření nastalých skutečností a ověření navrženého řešení došlo na 4. reaktorovém bloku k měření průtočných charakteristik TG se změnou tlaku v HPK. Pomocí výsledků bylo potvrzeno, že původní přetlak v HPK 4,39 MPa neplní požadavky projektu pro získání požadovaného tlaku před RV TG. Dále bylo zjištěno, že rozdíl elektrických výkonů mezi stavy přetlaků páry v HPK 4,39 MPa a 4,47 MPa je asi 3 MW na jeden reaktorový blok. Také bylo pomocí měření ověřeno, že zvýšení tlaku v HPK nebude mít nepřijatelný vliv na působení ochranných a bezpečnostních systémů bloku.

Dané řešení bylo schváleno a postupně aplikováno v celé elektrárně. Do budoucna bylo stanoveno, že případné další zvýšení výkonu reaktoru se neobejde bez opětovného zvýšení přetlaku v HPK a to alespoň na hodnotu 4,53 MPa. [4]

5.6 Zvýšení hltlosti PSK

Hlavní parní kolektor je pro havarijní případy uzavření rychlozávěrných ventilů před TG vybaven systémy jako jsou přepouštěcí stanice do kondenzátorů a přepouštěcí stanice do atmosféry (PSA). Na EDU jsou pro každý reaktorový blok k dispozici čtyři PSK a dvě PSA, které umožňují, odvod páry z HPK při odstavení turbín.

V případě náhlého uzavření RZV, tak jako následek nárůstu tlaku dojde nejprve k otevření PSK, a po dosažení určitého tlaku se uvolní i PSA. To může nastat například z důvodů, kdy nedošlo k otevření PSK nebo pokud by jeho hltlost nebyla dostačující. Současně s otevřením PSA dochází ke snížení výkonu reaktoru až na hladinu zregulování na vlastní spotřebu. V případě dosažení ještě vyššího tlaku dojde k úplnému a rychlému odstavení reaktoru. Při události otevření PSA je pára vyvedena do výfuku na střeše a dochází

k jejímu vypuštění do atmosféry. Je snaha co nejvíce eliminovat nutnost snížení výkonu reaktoru, či dokonce jeho odstavení. Proto je nutné zajistit správnou funkci PSK.

Technologický uzel PSK byl na EDU provozován bez technických úprav od spuštění jednotlivých bloků. Hodnoty projektované hltnosti 440 t/h nebylo nikdy dosaženo. Naopak měření, která se uskutečnila během provozu, bylo stanoveno, že maximální hltnost jednotlivých větví činí 380 – 410 t/h.

Během akce VPR a tím zvýšení tepleného výkonu reaktoru o 5 %, byly analyzovány jednotlivé přechodové a abnormální stavy. Z těchto analýz bylo zjištěno, že po uzavření RZV TG a následném otevření pouze jedné PSK dojde k nežádoucímu zásahu limitačních systémů, které způsobí havarijní ostavení bloku. Na EDU bylo rozhodnuto, že nutnost snížení výkonu při neotevření PSK na jednom TG, je z hlediska kultury provozu elektrárny neakceptovatelná. Jako řešení bylo zvoleno zvýšení hltnosti každé větve PSK na hodnotu 480 t/h při přetlaku v HPK 4,39 MPa, což splňuje požadavek aby, v případě neotevření jedné PSK nedošlo k zásahu limitačních systémů.

Pro zvýšení hltnosti PSK pomocí technických úprav vnitřní vestavby bylo nutné co nejvíce optimalizovat plochy průtočných průřezů a jejich tvar. Došlo k výměně difuzorů a kuželek ventilů. Nové díly byly vyrobeny s co největší průtočnou plochou a úpravou tvarů ploch. Vyměněny byly také síta v deflektoru za nová síta, která mají pro proudění výhodnější tvar a mají větší průtočnou plochu. Nakonec bylo také nutné upravit hydraulické pohony, aby byly schopné zvládat zvýšené silové účinky od zvětšených průřezů kuželek.

Tato úprava systému neměla za cíl dosáhnout lepší ekonomiky provozu stejně jako některé další úpravy v předchozích podkapitolách, ale hlavním důvodem bylo dosažení optimálního fungování všech bezpečnostních systému i po zvýšení výkonu. [4] [14]

5.7 Rozdíl teplot svršek - spodek na VT dílu

Po rekonstrukci sekundárního okruhu se u VT dílů parní turbíny objevil problém s nerovnoměrným vychlazováním horního a spodního tělesa VT dílu TG.

Tento jev byl pozorován při zkoušce zregulování bloku z nominálního výkonu na vlastní spotřebu. Při tomto stavu dochází k odpojení vyvedení výkonu do sítě a dále už se vyrábí elektřina jen pro zajištění vlastní spotřeby elektrárny.

Následkem rychlého přechodu TG z vysoké na nízkou výkonovou hladinu (8 až 20 MW) došlo k nerovnoměrnému vychlazování mezi horním a spodním tělesem VT dílu. Během této zkoušky byl rozdíl větší než 50°C, což vyvolává přechodnou deformaci VT tělesa a může vést k dotyku rotoru s labyrinty mezistupňových ucpávek. Tento stav vede dle technických podmínek pro TG k povinnosti obsluhy odstavit TG. Důsledkem odstavení TG v režimech zregulování bloku na vlastní spotřebu je neplnění požadavků Kodexu přenosové soustavy⁶ a zhoršení bezpečnosti EDU dle ukazatele CDF⁷.

Řešení přineslo doplnění nového regulačního obvodu R17 jenž reguluje tlak za VT dílem TG. Tento regulační obvod je zapnut při zregulování na vlastní spotřebu a má za úkol přivřít ventily na vstupu do NT dílů tak, aby došlo ke zvýšení tlaku páry a rovnoměrnějšímu vychlazení VT dílu. Regulační okruh R17 tedy zajišťuje, že nedojde k nedovolenému nárůstu teplotního rozdílu mezi horním a spodním tělesem VT dílu.

K tomuto řešení bylo možné přistoupit díky náhradě olejové regulace TG za elektronickou regulaci. Tato náhrada proběhla současně s modernizací sekundárního okruhu elektrárny. [4] [7]

⁶ Kodex přenosové soustavy popisuje podmínky poskytování přenosových a systémových služeb, pravidla přípravy provozu a operativního řízení provozu, havarijní plány a metodiky certifikace.

⁷ Pravděpodobnost těžkého poškození aktivní zóny

6 VÝPOČET VÝKONU EDU

6.1 Teoretický výpočet

Výkon parní turbíny se obecně počítá podle vztahu:

$$P = M \cdot H_{iz} \cdot \eta_c = M \cdot H \quad (6.1)$$

Parní turbína v Jaderné elektrárně Dukovany se skládá z 1 VT a 2 NT dílů a mezi VT a NT díly je zapojen separátor páry a přihřívač. Proto je nutné TG počítat odděleně jako VT a NT část. Pára, která slouží pro regeneraci, je z turbíny odváděna za jednotlivými stupni, a pro zpřesnění výpočtu je vhodné počítat s hmotnostními toky a tepelnými spády zvlášť, pro každou část mezi jednotlivými odběry.

Vnitřní výkon turbíny:

$$P_i = \sum_{i=1}^n M_i \cdot H_i \quad (6.2)$$

Vnitřní volumický výkon turbíny:

$$P_{iv} = P_i \cdot \eta_v \quad (6.3)$$

Vnitřní volumický výkon turbíny je vnitřní výkon turbíny snížený o ztrátu způsobenou unikáním páry ucpávkami.

$$\eta_v = \frac{M - M_v}{M} \quad (6.4)$$

Takto vzniklé ztráty charakterizuje volumická účinnost, kterou lze vyjádřit pomocí hmotnostního toku páry vstupujícího do turbíny a hmotnostního toku páry unikajícího ucpávkami.

Výkon na spojce:

$$P_{sp} = P_i \cdot \eta_v \cdot \eta_m \quad (6.5)$$

Spojkový výkon, který je možné odebrat z turbíny, se získá snížením vnitřního výkonu o mechanické ztráty, které jsou vyvolány třením v ložiscích. Poměr spojkového výkonu a vnitřního výkonu se nazývá mechanická účinnost. Mechanická účinnost turbín bývá $\eta_m = 0,97 - 0,996$. [6] [8]

Výkon na svorkách generátoru:

$$P_{sv} = P_{sp} \cdot \eta_g \quad (6.6)$$

Ztráty vznikající v elektrickém generátoru vyjadřuje účinnost elektrického generátoru.

Výkon na prahu elektrárny.

$$P_{pr} = P_{sv} \cdot \eta_{vs} \quad (6.7)$$

Zmenšením svorkového výkonu o takzvanou vlastní spotřebu dostaneme elektrický výkon, který elektrárna skutečně dodává do sítě.

6.2 Číselný výpočet

Pro možnost porovnání výsledků modernizace Jaderné elektrárny Dukovany je v této části proveden třikrát stejný výpočet výkonu parní turbíny EDU.

- 1) Výpočet pro původní stav EDU s tepelným výkonem reaktoru 100 % (1375 MWt) naměřeným při jednom z prvních měření.
- 2) Výpočet pro současný stav EDU po rozsáhlé modernizaci a zvýšení výkonu reaktoru na 105 % (1444 MWt) naměřeným v roce 2011.
- 3) Výpočet pro možné budoucí zvýšení výkonu reaktoru na 107 %.

Číselné hodnoty pro výpočty jsou čerpány z tepelného schématu elektrárny (viz příloha 1 a 2).

6.2.1 Výpočet pro původních 100 % výkonu reaktoru

Vnitřní výkon turbíny:

Výpočet výkonu VT dílu je suma úseků mezi jednotlivými neregulovanými odběry. Tepelné spády jsou rozdíly entalpií na začátcích a koncích jednotlivých úseků a hmotnostní tok je tok na vstupu do turbíny, od kterého se postupně odečítají hmotnostní toky jednotlivých odběrů.

$$P_{iVT}^{100} = \sum_{i=1}^n M_i \cdot H_i$$

$$P_{iVT}^{100} = (370,26 \cdot (2796 - 2735,8)) + (370,26 - 42,72) \cdot (2735,8 - 2630) + (370,26 - 42,72 - 25,27) \cdot (2630 - 2580) + (370,26 - 42,72 - 25,27 - 12,925) \cdot (2580 - 2490,8)$$

$$P_{iVT}^{100} = 97,87 \text{ MW}$$
(6.8)

Výkon v NT dílech turbíny není zcela stejný a to jednak z důvodu nesouměrnosti neregulovaných odběrů na obou NT dílech, ale také proto že v kondenzátorech NT dílů jsou rozdílná vakua. Tento rozdíl je způsoben tím, že chladicí voda proudí nejprve přes kondenzátor NT 2 a poté mírně ohřátý proudí do kondenzátoru NT 1.

Proto je tedy výpočet výkonů NT dílů proveden odděleně. Při tomto výpočtu se předpokládá, že hmotnostní tok páry, který je měřen na společném potrubí před NT díly, se rovnoměrně dělí do obou NT dílů.

$$P_{iNT}^{100} = \sum_{i=1}^n M_i \cdot H_i$$

$$P_{iNT1}^{100} = \frac{240,66}{2} \cdot (2896,4 - 2779,3) + \left(\frac{240,66}{2} - 9,04\right) \cdot (2779,3 - 2557,5) + \left(\frac{240,66}{2} - 9,04 - 8,5\right) \cdot (2557,5 - 2447,3) + \left(\frac{240,66}{2} - 9,04 - 8,5 - \frac{6,85}{2}\right) \cdot (2447,3 - 2343,5)$$

$$P_{iNT1}^{100} = 60,42 \text{ MW}$$
(6.9)

$$P_{iNT2}^{100} = \frac{240,66}{2} \cdot (2896,4 - 2674,8) + \left(\frac{240,66}{2} - 10,795 \right) \cdot (2674,8 - 2447,3) + \left(\frac{240,66}{2} - 10,795 - \frac{6,85}{2} \right) \cdot (2447,3 - 2323) \quad (6.10)$$

$$P_{iNT2}^{100} = 64,77 \text{ MW}$$

$$P_{iNT}^{100} = P_{iNT1}^{100} - P_{iNT2}^{100} = 60,42 - 64,77 = 125,19 \text{ MW} \quad (6.11)$$

I přes to, že rotory a kompletní lopatkování je u obou NT dílů naprosto stejné, dává i tak NT 2 vlivem rozdílných odběrů a rozdílných tlaků v kondenzátorech o více než 4 MW více než NT 1.

Vnitřní výkon turbíny je tedy součet výkonů ve VT a NT dílech.

$$P_i^{100} = P_{iVT}^{100} + P_{iNT}^{100} = 97,87 + 125,19 = 223,06 \text{ MW} \quad (6.12)$$

Z výsledků je patrné, že ve VT dílu je zpracováno necelých 44 % tepelného spádu oproti 56 % zpracovaných v NT dílech.

Vnitřní volumický výkon:

Tento výkon je vnitřní výkon po zahrnutí ztráty způsobené úniky páry v ucpávkách. Pro vyjádření vnitřního volumického výkonu je nutné nejprve určit volumickou účinnost pro VT a NT díly.

$$\eta_{vVT}^{100} = \frac{M_{VT}^{100} - M_{vVT}^{100}}{M_{VT}^{100}} = \frac{370,26 - 0,52}{370,26} = 99,86 \% \quad (6.13)$$

$$\eta_{vNT}^{100} = \frac{M_{NT}^{100} - M_{vNT}^{100}}{M_{NT}^{100}} = \frac{240,66 - 1,26}{240,66} = 99,48 \% \quad (6.14)$$

$$P_{iv}^{100} = P_i \cdot \eta_v = P_{iVT}^{100} \cdot \eta_{vVT}^{100} + P_{iNT}^{100} \cdot \eta_{vNT}^{100} = 97,87 \cdot 0,9986 + 125,19 \cdot 0,9948 \quad (6.15)$$

$$P_{iv}^{100} = 222,26 \text{ MW}$$

Výkon na spojce:

$$P_{sp}^{100} = P_{iv}^{100} \cdot \eta_m^{100} = 222,26 \cdot 0,99 = 220,04 \text{ MW} \quad (6.16)$$

Výkon na svorkách generátoru:

Účinnost původního vodíkem chlazeného generátoru se pohybovala okolo 98,55 %.

$$P_{sv}^{100} = P_{sp}^{100} \cdot \eta_g^{100} = 220,04 \cdot 0,9855 = 216,85 \text{ MW} \quad (6.17)$$

Výkon reaktorového bloku:

Na jednom reaktorovém bloku se nacházejí dva stejné TG.

$$P_{rb}^{100} = P_{sv}^{100} \cdot 2 = 216,85 \cdot 2 = 433,70 \text{ MW} \quad (6.18)$$

Výkon EDU:

V EDU jsou čtyři jaderné reaktory o přibližně stejném výkonu.

$$P_{EDU}^{100} = P_{rb}^{100} \cdot 4 = 433,70 \cdot 4 = 1734,80 \text{ MW} \quad (6.19)$$

Výkon na prahu elektrárny:

Vlastní spotřeba EDU činí asi 5 % vyrobeného výkonu.

$$P_{pr}^{100} = P_{EDU}^{100} \cdot \eta_{vs} = 1734,80 \cdot 0,95 = 1648,06 \text{ MW} \quad (6.20)$$

Tabulka 6.1: Výsledky výpočtů pro původní stav elektrárny

Výsledky výpočtů pro původních 100 % výkonu reaktoru		
P_{iVT}	97,87	MW
P_{iNT1}	60,42	MW
P_{iNT2}	64,77	MW
P_{iNT}	125,19	MW
P_i	223,06	MW
P_{iv}	222,26	MW
P_{sp}	220,04	MW
P_{sv}	216,85	MW
P_{rb}	433,70	MW
P_{EDU}	1734,80	MW
P_{pr}	1648,06	MW

6.2.2 Výpočet pro současný stav 105 % výkonu reaktoru

Výpočet je stejný jako v předchozí části, došlo zde pouze ke změnám většiny hodnot.

Vnitřní výkon turbíny:

$$P_{iVT}^{105} = \sum_{i=1}^n M_i \cdot H_i$$

$$P_{iVT}^{105} = (397,75 \cdot (2791 - 2729,8)) + (397,75 - 48,62) \cdot (2729,8 - 2617,4) + (397,75 - 48,62 - 33,17) \cdot (2617,4 - 2566,1) + (397,75 - 48,62 - 33,17 - 10,58) \cdot (2566,1 - 2458,8) \quad (6.21)$$

$$P_{iVT}^{105} = 112,56 \text{ MW}$$

Vnitřní výkon v NT dílech se i zde počítá odděleně.

$$P_{iNT}^{105} = \sum_{i=1}^n M_i \cdot H_i$$

$$P_{iNT1}^{105} = \frac{252,45}{2} \cdot (2900,4 - 2767,9) + \left(\frac{252,45}{2} - 9,84 \right) \cdot (2767,9 - 2548,3) + \left(\frac{252,45}{2} - 9,84 - 10,19 \right) \cdot (2548,3 - 2406) + \left(\frac{252,45}{2} - 9,84 - 10,19 - \frac{4,27}{2} \right) \cdot (2406 - 2308,4)$$

$$P_{iNT1}^{105} = 67,55 \text{ MW}$$

$$P_{iNT2}^{105} = \frac{252,45}{2} \cdot (2900,4 - 2649,6) + \left(\frac{252,45}{2} - 8,69 \right) \cdot (2649,6 - 2406) + \left(\frac{252,45}{2} - 8,69 - \frac{4,27}{2} \right) \cdot (2406 - 2282,5)$$

$$P_{iNT2}^{105} = 74,54 \text{ MW}$$

$$P_{iNT}^{105} = P_{iNT1}^{105} - P_{iNT2}^{105} = 67,55 - 74,54 = 142,09 \text{ MW}$$

Rozdíl ve výkonech obou NT dílů se zde ještě zvětšil, především díky zvýšení hmotnostního toku páry a také mírným zlepšením vakua v kondenzátorech po jejich rekonstrukci. Svoji roli na zvýšení rozdílu má na svědomí i optimalizace jednotlivých neregulovaných odběrů pro regeneraci, která způsobila ještě větší rozdíl hmotnostních toků mezi NT díly. Rozdíl výkonů u NT dílů se z původních 4 MW zvětšil na téměř 7 MW.

Vnitřní výkon turbíny je součet výkonů ve VT a NT dílech.

$$P_i^{105} = P_{iVT}^{105} + P_{iNT}^{105} = 112,56 + 142,09 = 254,65 \text{ MW}$$

Poměr zpracovaných tepelných spádů 44 % ku 56 % zůstal zachován i po modernizaci zařízení.

Vnitřní volumický výkon:

Určení volumické účinnosti pro nové VT a NT díly a následné určení vnitřního volumického výkonu.

$$\eta_{vVT}^{105} = \frac{M_{VT}^{105} - M_{vVT}^{105}}{M_{VT}^{105}} = \frac{397,75 - 0,52}{397,75} = 99,87 \%$$

$$\eta_{vNT}^{105} = \frac{M_{NT}^{105} - M_{vNT}^{105}}{M_{NT}^{105}} = \frac{252,45 - 0,77}{252,45} = 99,69 \%$$

$$P_{iv}^{105} = P_i \cdot \eta_v = P_{iVT}^{105} \cdot \eta_{vVT}^{105} + P_{iNT}^{105} \cdot \eta_{vNT}^{105} = 112,56 \cdot 0,9987 + 142,09 \cdot 0,9969$$

Výkon na spoje:

$$P_{sp}^{105} = P_{iv}^{105} \cdot \eta_m^{105} = 254,07 \cdot 0,99 = 251,53 \text{ MW} \quad (6.29)$$

Výkon na svorkách generátoru:

Účinnost nového vodíkem chlazeného generátoru dosahuje až 99,72 %.

$$P_{sv}^{105} = P_{sp}^{105} \cdot \eta_g^{105} = 251,53 \cdot 0,9972 = 250,83 \text{ MW} \quad (6.30)$$

Výkon reaktorového bloku:

Na jednom reaktorovém bloku se nacházejí dva stejné TG.

$$P_{rb}^{105} = P_{sv}^{105} \cdot 2 = 250,83 \cdot 2 = 501,65 \text{ MW} \quad (6.31)$$

Výkon EDU:

V EDU jsou čtyři jaderné reaktory o přibližně stejném výkonu.

$$P_{EDU}^{105} = P_{rb}^{105} \cdot 4 = 501,65 \cdot 4 = 2006,61 \text{ MW} \quad (6.32)$$

Výkon na prahu elektrárny:

Vlastní spotřeba EDU činí asi 5 % vyrobeného výkonu.

$$P_{pr}^{105} = P_{EDU}^{105} \cdot \eta_{vs} = 2006,61 \cdot 0,95 = 1906,28 \text{ MW} \quad (6.33)$$

Tabulka 6.2: Výsledky výpočtů pro současný stav elektrárny

Výsledky výpočtů pro současný stav 105 % výkonu reaktoru		
P_{iVT}	112,56	MW
P_{iNT1}	67,55	MW
P_{iNT2}	74,54	MW
P_{iNT}	142,09	MW
P_i	254,65	MW
P_{iv}	254,07	MW
P_{sp}	251,53	MW
P_{sv}	250,83	MW
P_{rb}	501,65	MW
P_{EDU}	2006,61	MW
P_{pr}	1906,28	MW

6.2.3 Výpočet pro možný budoucí stav 107 % výkonu reaktoru

Výpočet pro možný budoucí stav je velmi zjednodušený nástin možného budoucího stavu elektrárny. Hodnoty entalpii a účinností jednotlivých zařízení jsou uvažovány pro tento výpočet stejné jako při výpočtu modernizované elektrárny. Zde je uvažováno pouze zvětšení hmotnostních toků páry ve všech místech o 2 %.

Zanedbány jsou vlivy, jako je například nutná změna parametrů páry před turbínou pro dodržení omezené hlnosti VT dílu. V případě dalšího zvýšení výkonu by byla všechna zařízení nucena pracovat při jiných stavech než pro které byla projektována a optimalizována.

Vnitřní výkon turbíny:

Vnitřní výkon ve VT dílu.

$$P_{iVT}^{107} = \sum_{i=1}^n M_i \cdot H_i$$

$$\begin{aligned} P_{iVT}^{107} = & (405,5 \cdot (2791 - 2729,8)) + (405,5 - 49,59) \\ & \cdot (2729,8 - 2617,4) + (405,5 - 49,59 - 33,83) \\ & \cdot (2617,4 - 2566,1) + (405,5 - 49,59 - 33,83 - 10,8) \\ & \cdot (2566,1 - 2458,8) \end{aligned} \quad (6.34)$$

$$P_{iVT}^{107} = 114,83 \text{ MW}$$

Vnitřní výkon v NT dílech.

$$P_{iNT}^{107} = \sum_{i=1}^n M_i \cdot H_i$$

$$\begin{aligned} P_{iNT1}^{107} = & \frac{257,5}{2} \cdot (2900,4 - 2767,9) + \left(\frac{257,5}{2} - 10,04 \right) \\ & \cdot (2767,9 - 2548,3) + \left(\frac{257,5}{2} - 10,04 - 10,4 \right) \\ & \cdot (2548,3 - 2406) + \left(\frac{257,5}{2} - 10,04 - 10,4 - \frac{4,36}{2} \right) \\ & \cdot (2406 - 2308,4) \end{aligned} \quad (6.35)$$

$$P_{iNT1}^{107} = 68,96 \text{ MW}$$

$$\begin{aligned} P_{iNT2}^{107} = & \frac{257,5}{2} \cdot (2900,4 - 2649,6) + \left(\frac{257,5}{2} - 8,86 \right) \\ & \cdot (2649,6 - 2406) + \left(\frac{257,5}{2} - 8,86 - \frac{4,36}{2} \right) \\ & \cdot (2406 - 2282,5) \end{aligned} \quad (6.36)$$

$$P_{iNT2}^{107} = 76,11 \text{ MW}$$

$$P_{iNT}^{107} = P_{iNT1}^{107} - P_{iNT2}^{107} = 68,96 - 76,11 = 145,07 \text{ MW} \quad (6.37)$$

Vnitřní výkon turbíny je součet výkonů ve VT a NT dílech.

$$P_i^{107} = P_{iVT}^{107} + P_{iNT}^{107} = 114,83 + 145,07 = 259,90 \text{ MW} \quad (6.38)$$

Vnitřní volumický výkon:

$$\eta_{vVT}^{107} = \frac{M_{VT}^{107} - M_{vVT}^{107}}{M_{VT}^{107}} = \frac{405,705 - 0,52}{405,705} = 99,87 \% \quad (6.39)$$

$$\eta_{vNT}^{107} = \frac{M_{NT}^{107} - M_{vNT}^{107}}{M_{NT}^{107}} = \frac{257,5 - 0,77}{257,5} = 99,70 \% \quad (6.40)$$

$$\begin{aligned} P_{iv}^{107} &= P_i \cdot \eta_v = P_{iVT}^{107} \cdot \eta_{vVT}^{107} + P_{iNT}^{107} \cdot \eta_{vNT}^{107} \\ &= 114,83 \cdot 0,9987 + 145,07 \cdot 0,9970 \\ P_{iv}^{107} &= 259,31 \text{ MW} \end{aligned} \quad (6.41)$$

Výkon na spojce:

$$P_{sp}^{107} = P_{iv}^{107} \cdot \eta_m^{107} = 259,31 \cdot 0,99 = 256,72 \text{ MW} \quad (6.42)$$

Výkon na svorkách generátoru:

Účinnost vodíkem chlazeného generátoru dosahuje až 99,72 %.

$$P_{sv}^{107} = P_{sp}^{107} \cdot \eta_g^{107} = 256,72 \cdot 0,9972 = 256,00 \text{ MW} \quad (6.43)$$

Výkon reaktorového bloku:

Na jednom reaktorovém bloku se nacházejí dva stejné TG.

$$P_{rb}^{107} = P_{sv}^{107} \cdot 2 = 256,00 \cdot 2 = 512,00 \text{ MW} \quad (6.44)$$

Výkon EDU:

V EDU jsou čtyři jaderné reaktory o přibližně stejném výkonu.

$$P_{EDU}^{107} = P_{rb}^{107} \cdot 4 = 512,00 \cdot 4 = 2048,02 \text{ MW} \quad (6.45)$$

Výkon na prahu elektrárny:

Vlastní spotřeba EDU činí asi 5 % vyrobeného výkonu.

$$P_{pr}^{107} = P_{EDU}^{107} \cdot \eta_{vs} = 2048,02 \cdot 0,95 = 1945,62 \text{ MW} \quad (6.46)$$

Tabulka 6.3: Výsledky výpočtů pro uvažovaných 107 % výkon reaktoru

Výsledky výpočtů pro možný budoucí stav 107 % výkonu reaktoru		
P_{iVT}	114,83	MW
P_{iNT1}	68,96	MW
P_{iNT2}	76,11	MW
P_{iNT}	145,07	MW
P_i	259,90	MW
P_{iv}	259,31	MW

Výsledky výpočtů pro možný budoucí stav 107 % výkonu reaktoru		
P_{sp}	256,72	MW
P_{sv}	256,00	MW
P_{rb}	512,00	MW
P_{EDU}	2048,02	MW
P_{pr}	1945,62	MW

6.3 Hodnocení výsledků

V předchozích kapitolách jsou provedeny výpočty pro tři stavy elektrárny, kde první dva výpočty jsou pro skutečné oběhy a jejich výsledky svorkových výkonů se od naměřených hodnot liší v řádu desetin MW (viz tabulka 6.4 a příloha 1 a 2).

První výpočet je pro elektrárnu krátce po jejím uvedení do provozu, kde výsledek výkonu bloku dokazuje, že elektrárna po svém najetí nedosahovala projektované hodnoty 440 MW. Tento nedostatek byl v průběhu provozu zmírněn výměnou teplosměnných trubek kondenzátorů, které díky nové lepší účinnosti přiblížily elektrárnu k projektovaným hodnotám.

Druhý výpočet s parametry naměřenými při současném stavu elektrárny a s výkonem reaktoru 105 % ukazuje reálný výkon, kterého je na Dukovanské elektrárně v současnosti dosahováno díky modernizacím mnoha zařízení.

Poslední třetí výpočet má jako základ výpočet předchozí, právě proto že uvažuje stejné účinnosti zařízení, jako jsou použity při druhém výpočtu. Jediným rozdílem je předpoklad 107 % výkonu reaktoru. To je budoucí možný stav pro provoz bloků v EDU. Z výsledků je patrné, že výkon elektrárny by mohl být vyšší až o dalších 40 MWe.

Tabulka 6.4: Srovnání výsledků výpočtů

Srovnání výsledků výpočtů				
	100	105	107	%
P_{iVT}	97,87	112,56	114,83	MW
P_{iNT1}	60,42	67,55	68,96	MW
P_{iNT2}	64,77	74,54	76,11	MW
P_{iNT}	125,19	142,09	145,07	MW
P_i	223,06	254,65	259,90	MW
P_{iv}	222,26	254,07	259,31	MW
P_{sp}	220,04	251,53	256,72	MW
P_{sv}	216,85	250,83	256,00	MW
P_{rb}	433,70	501,65	512,00	MW
P_{EDU}	1734,80	2006,61	2048,02	MW
P_{pr}	1648,06	1906,28	1945,62	MW

7 HODNOCENÍ MODERNIZACE A JEJÍ VLIV NA CELOU ELEKTRÁRNU

Jaderná elektrárna Dukovany, ve které byl první blok uveden do zkušebního provozu v roce 1985, patřila od svého spuštění k nejlépe provozovaným jaderným elektrárnám na světě a právě letos po třicetiletém provozu dojde na prvním bloku podle původních představ projektantů a stavitelů k vypršení životnosti a licence udělené od SÚJB pro její další bezpečný provoz. Ovšem díky celé řadě investičních projektů má EDU v plánu vyrábět elektřinu pro české i evropské spotřebitele ještě dalších dvacet až třicet let a to ještě ve větším množství než v průběhu první poloviny svého dosavadního provozu,

V průběhu prvních dvaceti let provozu se uskutečnila pouze jedna významnější modifikace, která měla přímo vliv na její výkon. Jednalo se o výměnu původních teplosměnných trubek kondenzátorů za nové, které jsou vyrobeny z titanu. Tato modifikace umožnila změnu chemického režimu zvýšením pH na 9,8 a tím přispěla k zásadnímu snížení vysoké erozní koroze v sekundárním okruhu elektrárny.

Po dvacetiletém provozu a s blížícím se koncem projektové životnosti bloků EDU, se na elektrárně rozběhlo plánování mnoha akcí, které měly určit budoucí osud elektrárny. Nejaktuálnějším problémem byly rychle stárnoucí NT díly turbín, které působily výpadky ve výrobě a to únavovými lomy lopatek posledních stupňů.

Současně se naplno se rozběhl projekt Bezpečně 16 TERA EDU, jež měl podprojekty VPR a CIK-CAK, který měl za cíl zkrácení odstávek. Vizí projektu 16 TERA EDU bylo od roku 2013 dosahovat roční výroby 16 TWh alespoň dalších 20 let a zachovat bezpečnost provozu elektrárny dle ukazatelů WANO⁸ na úrovni první pětiny světových elektráren s tlakovodními reaktory. Cílem tohoto projektu bylo dosažení zvýšení výkonu na cca 500 MWe, zkrácení celkové doby odstávek v průměru o 35 dní ročně proti roku 2007 a udržení spolehlivosti zařízení na úrovni 99 %.

Po úspěšné výměně NT dílů turbíny následoval projekt VPR, který zvýšil výkon reaktoru o 5 % a upravil zařízení sekundárního okruhu pro zlepšení jejich účinností a pro schopnost přenést zvýšený výkon. Zmodernizované bloky jsou nyní při jmenovitých stavech schopny dosahovat výkonu na svorkách generátorů přes 500 MWe.

Celý projekt VPR se uskutečnil v průběhu několika let a byl zahrnut do běžných odstávek, které se kvůli výměně paliva a revizí zařízení musí dělat pravidelně. Tím se snížily ztráty z nutnosti dlouhodobých přerušení výroby a bylo možné tak lépe analyzovat vlivy jednotlivých modifikací a využít získaných zkušeností při úpravě dalších bloků.

Po ukončení všech realizací proběhlo na 3. reaktorovém bloku garanční a ověřovací měření, které potvrdilo splnění jak požadovaných technických parametrů rozhodujících komponent, tak požadovaných technických a provozně ekonomických parametrů parovodního okruhu bloku. Dále bylo dosaženo zvýšení výkonu a snížení měrné spotřeby tepla.

Dukovanská jaderná elektrárna dosáhla v roce 2013 rekordní výroby a to 15,67 TWh. V roce 2014 se jí nepodařilo rekordní výrobu zopakovat a tak se jí doposud nepodařilo dosáhnout jednoho z hlavních cílů VPR, což je dosažení roční výroby 16 TWh.

⁸ Světové sdružení provozovatelů jaderných elektráren

7.1 Výčet všech opatření, která měla vliv na celkovou ekonomiku provozu a zvýšení výkonu

Zde jsou shrnuty všechny dílčí modifikace v EDU, které měly alespoň nepatrný vliv na celkový výkon elektrárny. Vliv jednotlivých zařízení je znázorněn jako přírůstek výkonu na svorkách generátorů na jednom reaktorovém bloku, za předpokladu neovlivnění dalšími souběžně probíhajícími modifikacemi. Například u nových VT dílů je uvažováno pouze zvýšení jejich účinností a nikoli zvýšení hmotnostního toku páry vyvolaného zvýšením výkonu reaktoru.

Zvýšení výkonu reaktoru bylo opatření, kdy bylo stanoveno, že 100 % výkonu reaktoru není 1375 MWt ale nově 1444 MWt. Byly provedeny bezpečnostní analýzy, které prokázaly, že i při novém výkonu je provoz reaktoru ve všech režimech bezpečný. Pro provoz reaktoru na zvýšeném výkonu během celé kampaně bylo nutné dodat dostatečnou zásobu reaktivity ve formě **nového paliva Gd-2M**. Toto zvýšení výkonu o 5 % na hodnotu 1444 MWt, mělo v konečném důsledku přínos asi 20 MWe na jeden reaktorový blok.

Výměna měřících dýz v parovodech mezi parním generátorem a HPK snížila tlakovou ztrátu asi o 33 kPa a výměna na trase od HPK k turbíně snížila ztrátu o dalších 37 kPa, čímž došlo ke zvýšení výkonu asi o 2 MWe.

Výměna odlučovačů nečistot a vody měla především za cíl snížit obsah kondenzátu vstupujícího do turbíny, ale umožnila také snížení tlakové ztráty o 85 kPa a tím zvýšení výkonu asi o 2,5 MWe.

Zvýšení tlaku v HPK bylo vyvoláno potřebou snížit objemový tok páry na vstupu do VT dílu po zvýšení výkonu reaktoru. Toho bylo docíleno zvýšením přetlaku v HPK ze 4,39 MPa na 4,47 MPa. Při následném měření bylo prokázáno, že toto opatření přineslo zvýšení výkonu na generátoru asi o 3 MWe.

Modernizace parní turbíny byla rozdělena na dvě samostatné akce, při kterých nejprve došlo k výměně rotorů NT dílů a o pár let později byly při akci VPR modernizovány i VT díly. U nových strojů byla naměřena lepší termodynamická účinnost, která se u VT dílů zvýšila ze 77,5 % na 84 % a u NT dílů z 82 % respektive 80,5 % na 86 % a 85,5 %. V konečném důsledku je získaný výkon na VT i NT dílech vlivem lepší termodynamické účinnosti asi 30 MWe na jeden reaktorový blok. U modernizace turbín nešlo jen o dosažení lepší účinnosti, ale za cíl bylo především prodloužení životnosti turbosoustrojí o více než 200 000 pracovních hodin.

Výměna teplosměnných trubek kondenzátorů měla za cíl dosáhnout zásadního snížení vysoké erozní koroze, ale současně s tím bylo dosaženo i zlepšení jejich vakua. Tato modernizace ovšem proběhla dlouho před samotným VPR a pro současný oběh znamená zvýšení výkonu asi o 3 MWe.

Modernizace elektrického generátoru, která se soustředila především na schopnost zvýšení výkonu, dosáhla zlepšení účinnosti přeměny z 98,55 % na hodnotu asi 99,72 %. Tím bylo dosaženo zisku přes 5 MWe na reaktorový blok.

Výměna VTO proběhla jako poslední akce, při níž se zvýšil výkon elektrárny. Tato obměna stejně jako většina ostatních neměla primární cíl zvýšení výkonu, ale byla vyvolána špatným stavem zařízení. Nicméně při následném kontrolním měření bylo zjištěno, že po výměně VTO došlo ke zvýšení výkonu asi o 2 MW na každé turbíně, čímž se výkon reaktorového bloku zvýšil asi o 4 MWe.

Tabulka 7.1: Vliv dílčích modifikací na elektrický výkon bloku

Vliv dílčích modifikací na elektrický výkon jednoho bloku		
Zvýšený výkon reaktoru	20	<i>MW</i>
Výměna měřících dýz na parovodech	2	<i>MW</i>
Výměna odlučovačů nečistot a vody	2,5	<i>MW</i>
Zvýšení tlaku v HPK	3	<i>MW</i>
Modernizace VT dílů	16	<i>MW</i>
Modernizace NT dílů	14	<i>MW</i>
Výměna teplosměnných trubek kondenzátorů	3	<i>MW</i>
Modernizace elektrického generátoru	5	<i>MW</i>
Výměna VTO	4	<i>MW</i>
Σ	69,5	<i>MW</i>

Při jednom z prvních měření na EDU nedosahoval výkon projektovaných hodnot a bylo dosaženo pouze 216,2 MWe (viz příloha 1). Proti tomu při měření v roce 2011 po výměně VTO odpovídal aktuální výkon na svorkách generátoru hodnotě 250,64 MWe (viz příloha 2).

Rozdíl elektrických výkonů získaných na jedné turbíně.

$$\Delta P_{sv} = 250,64 - 216,2 = 34,2 \text{ MW} \quad (7.1)$$

Rozdíl elektrických výkonů pro celý reaktorový blok.

$$\Delta P_{rb} = \Delta P_{sv} \cdot 2 = 34,2 \cdot 2 = \mathbf{68,4 \text{ MW}} \quad (7.2)$$

Ze součtu nárůstů výkonů díky jednotlivým modifikacím (viz tabulka 7.2) a rozdílu výkonů současného a původního stavu elektrárny (viz vzorec 7.2) lze říci, že číselné vyjádření přírůstků výkonů díky jednotlivým opatřením při zanedbání mnoha vlivů je celkem přesné.

7.2 Znázornění vlivu hlavních modifikací

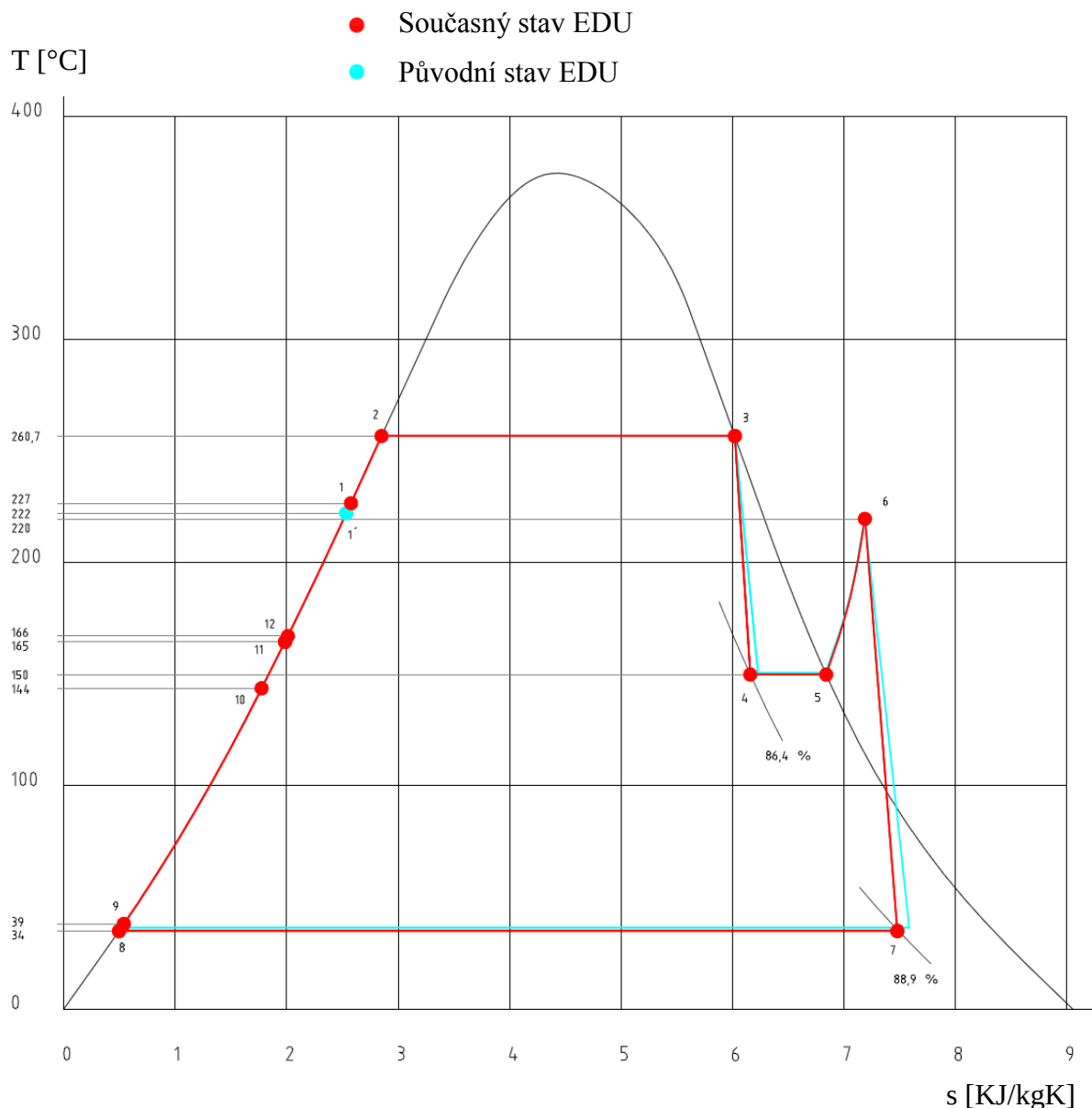
Na parametrech v sekundárním okruhu (viz tabulka 7.1) lze změny proběhlé při modernizaci nejlépe pozorovat na zvýšených hmotnostních tocích ve všech částech okruhu, kromě neregulovaných odběrů. Tento nárůst hmotnostních toků byl vyvolán zvýšením výkonu reaktoru o 5 %. Je zde také vidět výrazné zvýšení účinností VT i NT dílů v podobě větších tepelných spádů zpracovaných v modernizovaných zařízeních.

Tabulka 7.2: Hmotnostní toky a entalpie v tepelném oběhu [4]

	Původní stav při 100 %		Současný stav 105 %	
	kg/s	kJ/kg	kg/s	kJ/kg
HPK	740,5	2796	795,5	2791
před VT	370,26	2796	397,75	2791
za VT	274,5	2490,8	288,19	2458,8
Za SPP	240,66	2896,4	252,45	2900,4
za NT 1	99,675	2343,5	109,11	2308,4
za NT 2	106,42	2323	110,33	2282,5
chladičí voda	9722	20 [°C]	9722	20 [°C]
za kondenzátorem	229,725	138,95	243,95	144,88
za KČ	220,725	157,5	230,64	164,5
za NTO	264,3	611,8	276,9	604,6
za NN	377,12	705,3	406,92	704,4
za VTO	377,12	955	406,92	976
Neregulované odběry				
VIII.	42,72	2735,8	48,62	2779,8
VII.	25,27	2630	33,17	2617,4
VI.	12,925	2580	10,58	2561,1
V.	14,735	2490,8	16,27	2458,8
IV.	9,04	2779,3	9,84	2767,9
III.	10,795	2674,8	8,69	2649,6
II.	8,5	2557,5	10,19	2548,3
I.	6,85	2447,3	4,27	2406

Další modifikací, která se výrazně projevila, je výměna vysokotlakých ohříváků. Nové VTO dosahují lepších účinností a ohřívají napájecí vodu na vyšší teplotu než původní zařízení. Tím se zlepšila účinnost celé elektrárny a to vlivem dohřátí napájecí vody blíže teploty sytosti před vstupem do parních generátorů.

Na dalším obrázku (viz obrázek 7.1) je znázorněn T-s diagram s vyznačeným tepelným oběhem sekundární části EDU. Původní stav elektrárny je znázorněn modrou barvou a současný stav po akci VPR je znázorněn barvou červenou. I v tomto T-s diagramu je jasně vidět, že největších změn bylo docíleno právě vyšší účinností nových VT a NT dílů. V diagramu je znázorněn i vliv nových VT ohříváků a je zde také patrný vliv nových teplosměnných trubek kondenzátorů, které zvýšily jeho vakuum.



Obrázek 7.1: T-s diagram se znázorněným oběhem sekundární části EDU

1–2 ohřev vody v PG na teplotu sytosti, 2–3 přeměna vody na páru v PG, 3–4 expanze páry ve VT dílu turbíny, 4–5 odloučení vody z páry v separátoru, 5–6 přehřátí páry v přehříváči, 6–7 expanze páry v NT dílech turbíny, 7–8 kondenzace páry v kondenzátorech, 8–9 zvýšení teploty kondenzátu prací KČ, 9–10 ohřev kondenzátu v NT regeneraci, 10–11 ohřev vody v NN při tepelné úpravě vody, 11–12 zvýšení teploty vody v NČ, 12–1 ohřev vody ve VT regeneraci

ZÁVĚR

Jaderná elektrárna Dukovany prošla během svého třicetiletého provozu rozsáhlým vývojem, který se netýkal jen technických zařízení, ale také nejrůznějších postupů a systémů řízení.

Jako příklad lze uvést obměnu jaderného paliva za nový typ, která je významnou událostí pro každou jadernou elektrárnu. Dukovanská jaderná elektrárna má v tomto ohledu velké zkušenosti a do jejích reaktorů bylo postupně zaváženo několik typů paliva, jak je blíže popsáno v kapitole 2.

Další z významných kapitol této práce je kapitola 3, jejíž součástí je technický popis všech důležitých částí sekundárního okruhu seřazených za sebou podle směru proudění páry, kondenzátu a napájecí vody. U jednotlivých zařízení jsou analyzovány změny, které daná zařízení v průběhu provozu prodělala, jako například výměna průtočných částí VT a NT dílů turbín. Úpravy proběhlé na zařízeních elektrické části jsou popsány v kapitole 4.

Neopomenutelnou součástí takto rozsáhlé modernizace, která proběhla v letech 2009 až 2012 je i přizpůsobení celého systému pro optimalizovaný provoz a odhalení kritických míst pro bezpečný a spolehlivý chod všech zařízení. Právě tyto opatření vedly mimo jiné k výměně vysokotlakých ohříváků a jejich popis se nachází v kapitole 5.

Úspěšná modernizace Jaderné elektrárny Dukovany přinesla zvýšení výkonu jednoho bloku na 500 MW a ani tato hodnota nemusí být pro elektrárnu konečná. Všechny modernizované části jsou projektovány pro možné přetížení o 2 % a to by za přispění nového typu paliva mohlo zvýšit elektrický výkon jednoho reaktorového bloku i o dalších 10 MW. Právě tato možnost je propočítána v kapitole 6.

V závěrečné části práce je provedeno hodnocení proběhlé modernizace a pro názornou představu o vlivu jednotlivých modifikací na celkový výkon elektrárny je v 7. kapitole proveden výčet všech těchto změn spolu s přírůstky výkonů. Je zde také vytvořen T-s diagram se zakresleným oběhem elektrárny a znázorněnými částmi, které se během jednotlivých modifikací na Jaderné elektrárně změnily.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BAJGL, Josef. ČEZ. *Reaktorová fyzika, palivo*: prezentace pro Letní univerzitu.
- [2] BELÁČ, Josef. Palivový cyklus Jaderné elektrárny Dukovany. *All for Power*. Ostrava: Konstrukce Media, 2014, č. 05, s. 7-9. Dostupné z: 118
- [3] CIESLAR, Stanislav. Výroba a rekonstrukce blokových transformátorů pro Jadernou elektrárnu Dukovany. *All for Power*. Ostrava: Konstrukce Media, 2010, č. 01, s. 25-28. Dostupné z: <http://www.floowie.com/cs/zobrazeni/afp-1-10>
- [4] ČEZ. firemní zdroje.
- [5] DUBŠEK, František. *Projektování jaderných centrál: (především s reaktory VVER)*. Vyd. 1. Brno: Ediční středisko VUT, 1987, 223 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně).
- [6] KADRNOŽKA, Jaroslav. *Projektování tepelných centrál*. 2. vyd. Brno: VUT Brno, 1980, 378 s.
- [7] KISSLER, Martin. *Použití parních turbín*. Brno, 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce doc. Ing. Jan Fiedler, Dr.
- [8] KRBEK, Jaroslav. *Strojní zařízení tepelných centrál: návrh a výpočet*. 1. vyd. Brno: PC-DIR, 1999, 217 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214-1334-4.
- [9] MICHELE, František. *Strojní zařízení jaderných elektráren. Parní a plynové turbíny, parogenerátory, čerpadla*. 1. vyd. Brno: VUT Brno, 1974, 196 s.
- [10] MLČÁK, Roman. ČEZ. *Primární část JE Dukovany*: prezentace pro Letní univerzitu. 2013.
- [11] PAUZER, Václav. Ke zvýšení výkonu jaderné elektrárny přispívá instalace zařízení vedoucích ke snížení tlakových ztrát. *All for Power*. Ostrava: Konstrukce Media, 2010, č. 01, s. 31-34. Dostupné z: <http://www.floowie.com/cs/zobrazeni/afp-1-10>
- [12] PROKOP, Vladimír. Všechny čtyři bloky Jaderné elektrárny na zvýšeném výkonu. *All for Power*. Ostrava: Konstrukce Media, 2012, č. 05, 76–77. Dostupné z: <http://www.floowie.com/cs/zobrazeni/afp-komplet-05-12>
- [13] RAČEK, Jiří. *Energetická zařízení: stroje a zařízení jaderných elektráren*. Vyd. 1. Brno: VUT FEKT, 2004, 165 s. ISBN 80-214-2735-3.
- [14] ŠINDLER, Petr. Využití projektových rezerv bloků Jaderné elektrárny Dukovany. *All for Power*. Ostrava: Konstrukce Media, 2010, č. 01, s. 14-21. Dostupné z: <http://www.floowie.com/cs/zobrazeni/afp-1-10>
- [15] ŠKODA PRAHA INVEST. *Využití projektových rezerv bloků Jaderné elektrárny Dukovany*. 2012, 13 s. Dostupné z: http://www.spininvest.cz/files/PP_Dukovany_2012_CZ.pdf
- [16] ŠKRANC, Karel. *Aplikovaná termomechanika*. Brno: ČEZ, školící a výcvikové středisko, 2004, 87 s.
- [17] ŠNEJDAR, Stanislav. Modernizace turbín a kondenzátorů ŠKODA pro Jadernou elektrárnu Dukovany. *All for Power*. Ostrava: Konstrukce Media, 2010, č. 01, s. 22-24. Dostupné z: <http://www.floowie.com/cs/zobrazeni/afp-1-10>

- [18] TICHÁ, Gabriela. ČEZ. *Elektrická část EDU*: prezentace pro Jadernou maturitu. 2009.
- [19] ŽENÍŠEK. ČEZ. *Cl dnes a zítra*: prezentace pro Letní univerzitu. 2013.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Jednotka	Veličina
H	$[kJ.kg^{-1}]$	entalpický spád
H_{iz}	$[kJ.kg^{-1}]$	izoentalpický spád
M	$[kg.s^{-1}]$	hmotnostní průtok
M_v	$[kg.s^{-1}]$	hmotnostní průtok ucpávkami
P	$[MW]$	výkon
P_{EDU}	$[MW]$	výkon Jaderné elektrárny Dukovany
P_i	$[MW]$	vnitřní výkon
P_{iv}	$[MW]$	vnitřní volumický výkon
P_{rb}	$[MW]$	výkon reaktorového bloku
P_{sp}	$[MW]$	výkon na spojce
P_{sv}	$[MW]$	výkon na svorkách generátoru
η_c	$[-]$	celková účinnost
η_g	$[-]$	účinnost generátoru
η_m	$[-]$	účinnost mechanická
η_v	$[-]$	volumická účinnost
η_{vs}	$[-]$	účinnost vlastní spotřeby
ΔP_{sv}	$[MW]$	rozdíl elektrických výkonů jedné turbíny
ΔP_{rb}	$[MW]$	rozdíl elektrických výkonů reaktorového bloku

Index	Název
NT1	nízkotlaké těleso 1
NT2	nízkotlaké těleso 2
VT	vysokotlaké těleso
100	procentuální výkon reaktoru
105	procentuální výkon reaktoru
107	procentuální výkon reaktoru

Zkratka	Význam
CDF	pravděpodobnost těžkého poškození aktivní zóny
EDU	Jaderná elektrárna Dukovany
GO	generální oprava
HCC	hlavní cirkulační čerpadlo
HPK	hlavní parní kolektor
KČ	kondenzátní čerpadlo
NČ	napájecí čerpadlo
NN	napájecí nádrž
NT	nízkotlaký
NTO	nízkotlaký ohřívák
NV	napájecí voda
PG	parní generátor
PONTO	podchlazovač kondenzátu
PSA	přepouštěcí stanice do atmosféry
PSK	přepouštěcí stanice do kondenzátoru
RV	regulační ventil
RZV	rychlozávěrný ventil
SPP	separátor - přehříváč páry
ST	středotlaký
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
TG	turbogenerátor
VPR	Využití projektových rezerv bloků EDU
VT	vysokotlaký
VTO	vysokotlaký ohřívák
ZV	zapouzďřený vodič

SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Obrázek 1.2: Výkon reaktoru 100 % (1375 MW) [10]	13
Obrázek 1.1: Výkon reaktoru 105 % (1444 MW) [10]	13
Obrázek 2.1: Palivo Gd-2M [1].....	16
Obrázek 2.2: Historický vývoj paliva užívaného v EDU [1]	17
Obrázek 3.1: Parní generátor [4]	18
Obrázek 3.2: Parní generátor [13]	19
Obrázek 3.3: 3D model vysokotlakého dílu [17]	23
Obrázek 3.4: Vysokotlaký rotor turbíny [4]	24
Obrázek 3.5: Náskres kombinovaného separátor – přehříváče [13].....	25
Obrázek 3.6: Nový nízkotlaký rotor [4]	27
Obrázek 3.7: Schéma nízkotlaké regenerace.....	31
Obrázek 3.8: Vysokotlaký ohřívák [19]	34
Obrázek 4.1: Stator generátoru [18]	36
Obrázek 4.2: Zapouzdřené vodiče [18]	37
Obrázek 4.3: Blokový transformátor [18]	39
Obrázek 4.4: Model blokového transformátoru [3]	40
Obrázek 5.1: Transport vysokotlakého ohříváku [19]	42
Obrázek 7.1: T-s diagram se znázorněným oběhem sekundární části EDU	58
Tabulka 1.1: Porovnání parametrů EDU pro původní a současný výkon reaktoru [4].....	14
Tabulka 1.2: Data o projektu Využití projektových rezerv [15]	15
Tabulka 3.1: Základní údaje o parním generátoru [4].....	19
Tabulka 3.2: Základní údaje o parní turbíně [4].....	21
Tabulka 3.3: Separátor – přehříváč [4]	24
Tabulka 3.4: Parametry jednotlivých odběrů [4]	26
Tabulka 3.5: Kondenzátor parní turbíny [17].....	29
Tabulka 3.6: Charakteristické hodnoty pro KČ 1° [4]	29
Tabulka 3.7: Charakteristické hodnoty pro KČ 2° [4]	30
Tabulka 3.8: Charakteristické hodnoty napájecí nádrže [4].....	32
Tabulka 3.9: Charakteristické hodnoty pro napájecí čerpadlo [4]	33
Tabulka 4.1: Srovnání vlastností původního a modernizovaného generátoru [14].....	36
Tabulka 4.2: Charakteristické vlastnosti pro zapouzdřené vodiče [4]	37
Tabulka 4.3: Charakteristické vlastnosti blokového transformátoru [14].....	40
Tabulka 6.1: Výsledky výpočtů pro původní stav elektrárny	48
Tabulka 6.2: Výsledky výpočtů pro současný stav elektrárny	50
Tabulka 6.3: Výsledky výpočtů pro uvažovaných 107 % výkon reaktoru	52
Tabulka 6.4: Srovnání výsledků výpočtů	53
Tabulka 7.1: Vliv dílčích modifikací na elektrický výkon bloku	56
Tabulka 7.2: Hmotnostní toky a entalpie v tepelném oběhu [4]	57

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Tepelné schéma původního stavu Jaderné elektrárny Dukovany [4]

Příloha 2: Tepelné schéma současného stavu Jaderné elektrárny Dukovany [4]