

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství
Studijní zaměření: Stavba energetických strojů a zařízení

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Modernizace parní turbíny

Autor: **Jiří ŠUMA**

Vedoucí práce: **Ing. Pavel Žitek**

Akademický rok 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jiří ŠUMA**
Osobní číslo: **S13B0270P**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Stavba energetických strojů a zařízení**
Název tématu: **Modernizace parní turbíny**
Zadávací katedra: **Katedra energetických strojů a zařízení**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popis zařízení elektrárny.
2. Zhodnocení aktuálního stavu (uplatnění Reverse Engineeringu).
3. Kritické díly ovlivňující životnost zařízení.
4. Účel modernizace.
5. Doporučení rozsahu modernizace.
6. Zhodnocení ekonomických přínosů.

Rozsah grafických prací: 1 výkres A3
Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran A4
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

- Raček J.: Strojní zařízení elektráren
- Beran M.: Elektrická zařízení tepelných elektráren
- Bečvář J.: Tepelné turbíny
- Ščeglajev A. V.: Parní turbíny
- Leyzerovich A. S.: Steam Turbines for Modern fossil fuel power plants

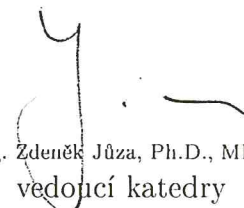
Vedoucí bakalářské práce: Ing. Pavel Žitek
Katedra energetických strojů a zařízení
Konzultant bakalářské práce: Ing. Václav Pankraz
Doosan Škoda Power

Datum zadání bakalářské práce: 2. listopadu 2015
Termín odevzdání bakalářské práce: 20. května 2016



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan

I.S.



Ing. Zdeněk Jůza, Ph.D., MBA
vedoucí katedry

V Plzni dne 30. října 2015

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou/diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou/diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské/diplomové práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat Ing. Václavu Pankrazovi a Ing. Martinu Novákovi ze společnosti Doosan Škoda Power a vedoucímu práce Ing. Pavlu Žitkovi za rady a připomínky při tvorbě této bakalářské práce.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ (BAKALÁŘSKÉ) PRÁCE

AUTOR	Příjmení Šuma	Jméno Jiří	
STUDIJNÍ OBOR	B2301 – Stavba energetických strojů a zařízení		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Žitek	Jméno Pavel	
PRACOVISŤE	ZČU - FST - KKE		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Modernizace parní turbíny		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKE	ROK ODEVZD.	2016
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	40	TEXTOVÁ ČÁST	38	GRAFICKÁ ČÁST	2
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Bakalářská práce obsahuje řešení modernizace parní turbíny. Nejprve jsou popsány hlavní součásti tepelné elektrárny, poté základní princip fungování parní turbíny a jejích částí. Následuje popis procesu zpětného inženýrství (reverse engineering) a návrh modernizace zadané parní turbíny včetně zhodnocení ekonomických přínosů.</p>
<p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA</p>	<p style="text-align: center;">energetika, tepelná elektrárna, parní turbína, modernizace, retrofit, reverse engineering</p>

SUMMARY OF DIPLOMA (BACHELOR) SHEET

AUTHOR	Surname Šuma	Name Jiří		
FIELD OF STUDY	B2301 – Design of power system machines and equipment			
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Žitek	Name Pavel		
INSTITUTION	ZČU - FST - KKE			
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable	
TITLE OF THE WORK	Modernization of steam turbine			

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Power system engineering	SUBMITTED IN	2016
----------------	---------------------------	-------------------	--------------------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	40	TEXT PART	38	GRAPHICAL PART	2
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	<p>This bachelor thesis is focused on modernization of steam turbine. Firstly, main components of a thermal power plant are described, then principles of a steam turbines and their components are explained. This part is followed by description of the process of reverse engineering and making retrofit. Finally, modernized turbine is proposed.</p>
KEY WORDS	<p>Energetics, thermal power plant, steam turbine, modernization, retrofit, reverse engineering</p>

Obsah

1. Úvod	3
2. Popis zařízení elektrárny	4
2.1 Princip fungování elektrárny	4
2.2 Tepelná elektrárna Yatagan	5
2.3 Parní kotel.....	7
2.3.1 Popis parního kotle.....	7
2.3.2 Parní kotel elektrárny Yatagan	7
2.4 Parní turbína.....	8
2.5 Generátor	8
2.6 Kondenzátor.....	9
2.6.1 Princip kondenzátoru.....	9
2.6.2 Konstrukce kondenzátoru.....	10
2.6.3 Pomocná zařízení kondenzátoru.....	10
2.6.4 Kondenzátor elektrárny Yatagan.....	11
2.7 Okruh chladicí vody	11
2.8 Napájecí čerpadlo	12
2.9 Odplyňovák.....	12
3. Parní turbína	13
3.1 Historie.....	13
3.2 Základní princip a rozdělení	14
3.3 Jednotlivé díly parní turbíny	15
3.3.1 Lopatky.....	16
3.3.2 Rotor	18
3.3.3 Skříň (těleso) turbíny	20
3.3.4 Ložiska	21
3.3.5 Těsnící prvky.....	22
3.3.6 Ventily	23
4. Reverse engineering	24
4.1 Úvod.....	24
4.2 Tvorba retrofitu.....	25

5. Analýza současného stavu turbíny 13K215	27
6. Modernizace turbíny	28
6.1 Účel modernizace	28
6.2 Rozsah modernizace turbíny 13K215	29
6.2.1 Teplotně namáhané části	30
6.2.2 Nízkotlaký díl turbíny	30
6.2.3 Nové profily lopatek.....	32
6.2.4 Labyrintové ucpávky	34
6.2.5 Další zařízení turbíny	36
6.3 Zhodnocení ekonomických přínosů.....	37
7. Závěr.....	38
Seznam použité literatury.....	39
Seznam a zdroje obrázků	41
Seznam tabulek.....	44
Seznam příloh	44

1. Úvod

Elektrická energie je už více než jedno století jednou z nejdůležitějších komodit lidstva. Využívání elektrické energie je dnes zakomponováno do činností lidí tak významně, že si bez ní již nedokážeme představit život. Zajištění výroby elektřiny je proto zásadním úkolem každého státu. Spotřeba elektrické energie neustále stoupá, je tedy třeba vyrábět jí stále více, současně však rostou nároky na bezpečnost a ochranu životního prostředí, což neumožňuje používat zastaralé nevyhovující technologie, naopak stále se musíme věnovat rozvoji tohoto oboru a přicházet s novými a lepšími technologiemi, se kterými dosáhneme větších výkonů, šetrnosti vůči životnímu prostředí a pokud možno za nižších vstupních nákladů.

V Československu bylo od počátku rozvoje energetiky majoritním zdrojem pro výrobu elektřiny hnědé uhlí. Česká (Československá) republika nedisponuje významnějšími zásobami ropy a zemního plynu, vzhledem k hornatému charakteru se zde nevyskytují velké vodní toky. Spalování uhlí bez ohledu na životní prostředí způsobilo velké zhoršení kvality ovzduší, zvláště v oblasti severních Čech a severní Moravy.

V druhé polovině 20. století došlo k rozvoji jaderné energetiky (dále JE). I když stavba vyžaduje velmi vysoké finanční náklady, samotná výroba elektrické energie je velmi levná a z dlouhodobého hlediska se tedy jeví jako ekonomicky výhodná. Nedochází k vypouštění škodlivin do atmosféry, stále aktuálním problémem je ovšem nakládání s vyhořelým jaderným palivem, na něž mají i odborníci velmi rozdílné názory. Rozvoj jaderných elektráren významně zpomalila havárie v jaderné elektrárně Černobyl roku 1986 v oblasti dnešní Ukrajiny. Obavy z radiace a z možné havárie způsobily v některých zemích (např. Itálie, Rakousko) zákaz této formy výroby energie. V poslední době se k odklonu od jaderné energetiky přidalo i Německo, které chce do roku 2020 zcela zastavit využití nukleárního paliva. V jiných zemích, včetně České Republiky, je postoj k JE pozitivní a do budoucna se plánuje rozšíření objemu výroby v jaderných elektrárnách.

S přibývajícím dobou se lidstvo začalo více zajímat o kvalitu ovzduší, a vznikl tak požadavek snížit škodlivé emise uhelných elektráren a začít více využívat obnovitelné zdroje energie. Vodní elektrárny se u nás využívají již dlouhou dobu, na celkovém objemu produkce se však podílí jen jednotkami procent. Stejně tak podmínky pro stavbu větrných elektráren zde nejsou příhodné. Nacházejí se hlavně na horách, celkově se však na celkové produkci elektřiny v ČR podílejí jen 0,03 %. Na počátku jednadvacátého století zaznamenaly i díky politické situaci rozmach sluneční (fotovoltaické) elektrárny. [14]

Poměrně novým zdrojem k výrobě elektřiny je biomasa. Podle současných plánů by se biomasa měla stát nejvýznamnějším obnovitelným zdrojem energie v České Republice. Ke spalování biomasy lze využívat klasické tepelné elektrárny spalující dnes hnědé uhlí. Proto lze předpokládat, že tento druh výroby energie se bude do budoucna nejen v Čechách, ale i ve světě, rozšiřovat. Součástí modernizace dosluhujících elektráren se dnes stále častěji přistupuje k přechodu od spalování uhlí ke spalování biomasy.

Dalšími obnovitelnými zdroji energie, které v České Republice nelze využít, je energie mořského přílivu (přílivové elektrárny) a tepelná energie zemského jádra (geotermální elektrárny).

I přes velký pokrok v posledních desetiletích v oblasti využití obnovitelných zdrojů energie, se i v budoucnu budeme spoléhat na využívání uhlí. Právě zásoby uhlí jsou ze všech fosilních paliv celosvětově největší a na rozdíl od ropy a zemního plynu jsou rovnoměrně rozloženy na všech kontinentech. [3]

Na podzim roku 2015 proběhla v Paříži klimatická konference, na které byla přijata opatření, která mají za cíl zásadní snížení emisí skleníkových plynů. Státy se také zavázaly k tomu, že nejpozději do roku 2070 se ukončí používání fosilních paliv, tedy i uhlí. V budoucnu tedy budou klasické tepelné elektrárny omezovány nebo přestavovány např. na elektrárny spalující biomasu, následujících několik desítek let však dle mého názoru budou mít stále hlavní podíl na výrobě elektřiny v České Republice.

2. Popis zařízení elektrárny

2.1 Princip fungování elektrárny

Schéma fungování tepelné elektrárny s kondenzační turbínou je na obrázku č. 2.

Uhlí je ze zásobníku dopraveno pomocí pásových dopravníků do mlýna, kde dochází k mletí na jemný prášek a sušení plynnými spaliny. Součástí elektrárny také musí být velké sklady uhlí, které po určitou dobu pokryjí případný výpadek zásobování¹. Vzhledem k vysoké spotřebě uhlí se pro výstavbu elektráren volí taková místa v blízkosti uhelných dolů, snadno dostupná železniční nebo lodní dopravou.

Vzniklý uhelný prášek se pak dopravuje do hořáků kotle a spalovací komory, kde dochází ke spalování za přívodu předehřátého vzduchu. Spaliny ohřívají přes teplosměnné trubky vodu, která se dodaným teplem mění na páru. Popílek a další škodlivé látky vzniklé při spalování jsou dále odstraňovány – viz kapitola 2.3.1. Nespalitelné zbytky paliva (struska, škvára) jsou shromažďovány pod spalovací komorou a následně dále využity například ve stavebnictví.

V kotli se již předehřátá voda dále ohřívá v ohříváku, poté odpařuje ve výparném systému a nakonec přehřívá v přehříváku. Vzniklá pára o vysokém tlaku je vedena parním potrubím do turbíny. V turbíně pára prochází skrz lopatky, kterým předává svoji energii, a tím pohání hřídel turbíny, na které jsou lopatky připevněny. V turbíně se přeměňuje tepelná energie na mechanickou a v generátoru na elektrickou. Parní turbína v elektrárnách bývá složena z několika dílů (vysokotlaký (VT), středotlaký (ST) a nízkotlaký (NT)), mezi vysokotlakým a středotlakým dochází k opětovnému přihřátí páry (pára je vedena zpět do prostoru kotle), což vede ke zvýšení účinnosti. Po průchodu turbínou má pára mnohonásobně nižší tlak a teplotu

¹ Např. pro elektrárnu o výkonu 330 MW je denní spotřeba uhlí přibližně 6 500 tun, což odpovídá 220 vagonům uhlí denně. Zásobní sklad uhlí má pak kapacitu 40 000 tun. [15]

než na vstupu. Z výstupu nízkotlakého dílu proudí pára do kondenzátoru. V kondenzátoru dochází za stálého nízkého tlaku ke změně skupenství z plynného na kapalné.

Voda z kondenzátoru se pomocí kondenzátních čerpadel dopravuje do nízkotlakých regeneračních ohříváků. Zde se kondenzát ohřívá pomocí páry, která se odebírá z turbíny. Dále kondenzát směřuje do napájecí nádrže s odplynovákem (viz kapitola 2.9). Odtud je napájecí voda čerpána napájecími čerpadly skrz vysokotlakou regeneraci do kotle, kde se parovodní okruh uzavírá.

2.2 Tepelná elektrárna Yatagan

Zadaná turbína LMZ 13K215 je součástí tepelné elektrárny Yatagan ležící v jihozápadní části Turecka poblíž stejnojmenného města, 200 kilometrů od města Izmir. Elektrárna byla postavena v roce 1982 polskou společností Elektrim, má tři výrobní bloky, každý o výkonu 210 MW. Základní parametry elektrárny jsou uvedeny v tabulce č. 1. Podrobnější technická specifikace je dále uvedena u popisu jednotlivých částí elektrárny.

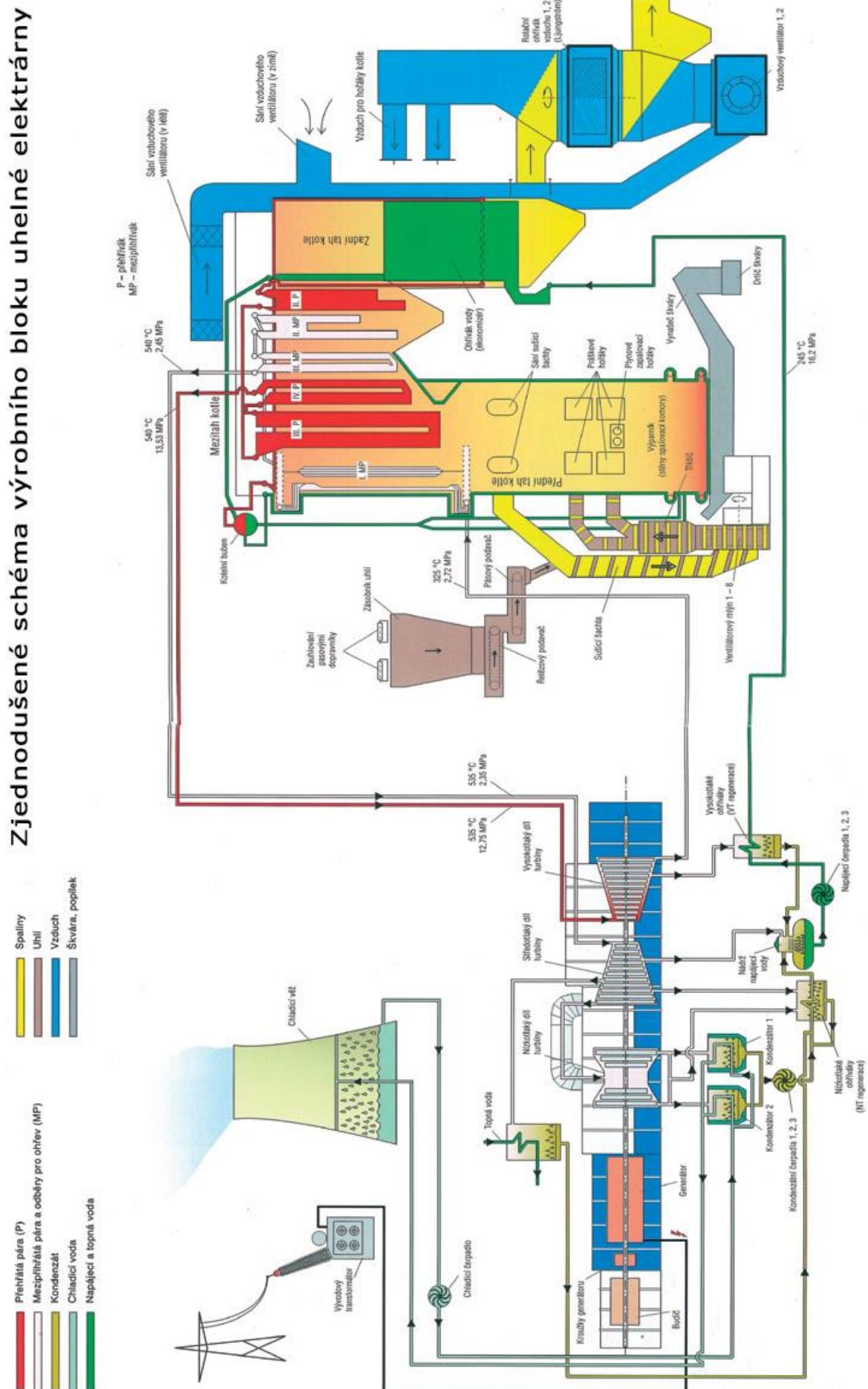


Obrázek č. 1: Fotografie elektrárny Yatagan.

Tabulka č. 1: Základní parametry elektrárny Yatagan.

Nominální výkon bloku	210 MW
Maximální výkon bloku	215 MW
Termická účinnost bloku	44 %
Teplota páry na vstupu do turbíny	535 °C
Tlak páry na vstupu do turbíny	13,0 MPa
Teplota páry na vstupu do kondenzátoru	45°C
Tlak v kondenzátoru	7,3 kPa

Obrázek č. 2: Schéma výrobního bloku uhelné elektrárny.



2.3 Parní kotel [6, 10]

2.3.1 Popis parního kotle

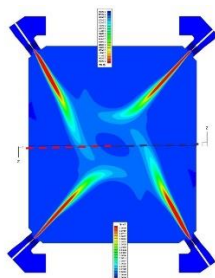
Parní kotel je zařízení, které slouží k ohřívání napájecí vody a její přeměně ve vodní páru, která dále pohání turbínu. V uhelných elektrárnách se teplo pro ohřev vody získává převážně z hnědého uhlí. Kotel se skládá ze spalovacího zařízení a parního generátoru. Spalovací zařízení tvoří ohniště, hořáky, rošt, ohříváky vzduchu, vzduchové a sací ventilátory a zařízení k odvodu tuhých nespalitelných zbytků. Parní generátor tvoří teplosměnné části (trubky) pro ohřev vody (ekonomizér), pro odpařování vody (výparník), přehřívání páry (přehřívák) a pro ohřev páry mezi VT a ST dílem přihřívák. Samotný přenos tepla ze spalín do vody probíhá sáláním a konvekcí.

Kotle lze třídit podle celé řady kritérií. Z hlediska druhu paliva se v České Republice setkáváme téměř výhradně s tuhými palivy, dále rozlišujeme ještě paliva kapalná a plynná. Ohniště mohou být roštová, prášková, granulační, cyklonová, fluidní a další. Podle oběhu vody rozlišujeme kotle s přirozeným oběhem vody, s nuceným oběhem vody, s nuceným průtokem vody nebo se superponovanou cirkulací vody.

Vývoj kotlů se v současné době zaměřuje na zvyšování účinnosti, zvyšování parametrů páry a zejména na odstraňování škodlivin během spalování, nebo ještě lépe předcházení vzniku škodlivin. Kromě tuhých emisí (popílku) vznikají při spalování uhlí škodlivé plyny – oxidy síry, oxidy dusíku a oxid uhličitý. Odstraňují se často chemickou reakcí s vhodným činidlem – přidáním vápence k odstranění oxidů síry, přidáním čpavku k odstranění oxidů dusíku nebo přidáním alkalického sorpčního roztoku k odstranění oxidu uhličitého. Jako primární opatření, které zamezí samotnému vzniku škodlivých plynů, se upravují podmínky hoření, např. přívodem jen malého množství kyslíku do ohniště a snížením teploty lze zamezit vzniku oxidů dusíku.

2.3.2 Parní kotel elektrárny Yatagan [9]

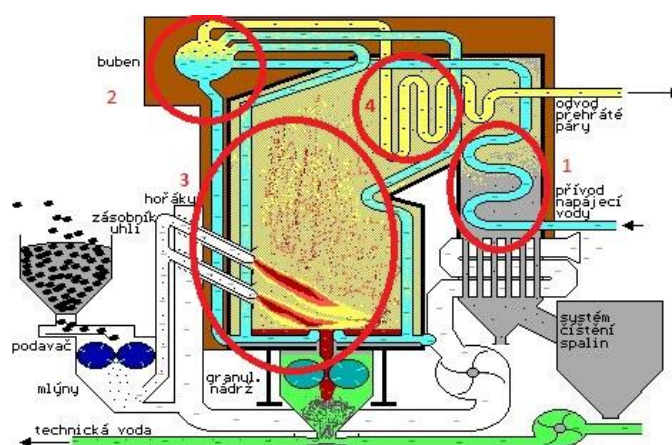
Jedná se o vodotrubnatý kotel s přirozenou cirkulací vody – cirkulace vody ve výparníku je dána rozdílnou hustotou vody a parovodní směsí v systému výparníku. Z ekonomizéru (1 – viz obrázek č. 4) je voda přiváděna do bubnu (2), odkud se vede do trubek výparníku (3), odkud už v podobě vodní páry ústí zpět do bubnu a dále do přehříváku (4). Spalovací komora kotle má šest hořáků uspořádaných tangenciálně (viz obrázek č. 3). Technické parametry kotle (při výkonu turbíny 210 MW) a paliva jsou uvedeny v tabulce č. 2.



Obrázek č. 3: Tangenciální uspořádání hořáků.

Tabulka č. 2: Parametry kotle a paliva.

Parametry kotle			
Vstupní teplota napájecí vody	245 °C	Tlak na vstupu do přehříváku	2,6 MPa
Vstupní tlak napájecí vody	15,8 MPa	Teplota na vstupu do přehříváku	313 °C
Výstupní teplota přehřáté páry	540 °C	Tlak na výstupu z přehříváku	2,4 MPa
Výstupní tlak přehřáté páry	13,9 MPa	Teplota na výstupu z přehříváku	540 °C
Produkce páry v přehříváku	660 t/hod	Produkce páry v přehříváku	555 t/hod
Spotřeba uhlí	560 t/hod		
Parametry paliva			
Použité palivo	Lignit ²	Zrnitost	0-40 mm
Výhřevnost paliva	8790 kJ/kg	Množství nespalitelných zbytků	28-35%



Obrázek č. 4: Kotel s přirozeným oběhem vody. 1-ekonomizér, 2-buben, 3-výparník, 4-přehřívák.

2.4 Parní turbína

Parní turbíně je věnována celá kapitola 3.

2.5 Generátor [5, 8, 9]

Elektrárenský generátor je stroj, který přeměňuje mechanickou energii na energii elektrickou. Skládá se z rotoru, který je spojen s hřídelí parní turbíny a vytváří točivé magnetické pole, a ze statoru, který je tvořen cívkami, ve kterých se indukují elektrické napětí. Rotor bývá výkovek z vysokolegované oceli. Na povrchu válce jsou vyfrézované podélné drážky, ve kterých jsou uloženy budící cívky zapojené tak, aby se zavedením stejnosměrného proudu vytvořil z rotoru elektromagnet s póly na obvodu válce. Protože je požadavek, aby se ve statorovém vinutí indukoval třífázový proud o frekvenci 50 Hz, cívky jsou zapojeny tak, aby se rotor choval jako elektromagnet se dvěma (pro 3000 otáček za minutu) nebo čtyřmi póly (pro 1500 otáček za minutu).

Elektrárenský generátor vytváří střídavé elektrické pole, jedná se tedy o alternátor. Z alternátoru se vyrobená elektrická energie přenáší do hlavního transformátoru a dále do sítě.

² Lignit je druh hnědého uhlí, které je nejmladší a nejméně prouhelněné tzn. nejméně kvalitní. Jedná se o uhlí třetihorního původu. Obsahuje zachované kmeny a menší či větší úlomky dřev. [20]

Část vyrobené elektřiny je vynaloženo na pokrytí vlastní spotřeby – napájení elektromotorů (napájecí čerpadla, kondenzátní čerpadla, čerpadla pro chladící vodu), záložních akumulátorů, osvětlení a dalších zařízení.



Obrázek č. 5: Stator (a) a rotor (b) generátoru.

Elektrárna Yatagan používá trojfázový dvoupólový generátor TWW-215-2 se státorem i rotorem chlazeným vodíkem. Jádro statoru je zhotoveno z 0,5 mm tlustých plechů z magnetické oceli s radiálně uspořádanými chladícími kanálky, vinutí tvoří měděné dráty. Rotor je vykován z jednoho kusu, jeho chlazení zajišťují dva axiálně uspořádané ventilátory. Technické údaje poskytuje tabulka č. 3.

Tabulka č. 3: Technické parametry generátoru TWW-215-2.

Výkon	210 MW	Frekvence	50 Hz
Účinník ³	0,85	Proud ve statoru	9 056 A
Napětí ve statoru	15 750 V ± 5%	Účinnost	98,6 %

2.6 Kondenzátor [4,5,11]

2.6.1 Princip kondenzátoru

Kondenzátor je zařízení sloužící k odvodu tepla z pracovní látky. Jedná se o tepelný výměník, ve kterém pára vystupující z turbíny předává teplo chladící vodě při teoreticky stálém tlaku a teplotě. Během tohoto procesu se (v ideálním případě) sytá pára přeměňuje na sytou kapalinu. V elektrárenském oběhu však do kondenzátoru vstupuje mokrá pára. Přestup tepla probíhá skrz teplosměnné plochy, na jejichž povrchu pára kondenzuje. Teplosměnné plochy tvoří systém trubek (řádově desetitisíce), kterými protéká chladící voda. Protože chladící voda bývá v přírodním stavu (voda z řeky, mořská voda), je nutné trubky zcela utěsnit, aby se tato voda nedostala do demineralizované vody pracovního oběhu a neznečišťovala ji.

V kondenzátoru je velmi nízký tlak (jednotky kPa), ten je dán teplotou chladící vody, která je většinou dána geografickými podmínkami. Výhodnější je vždy co nejnižší teplota chladící vody, protože s klesající teplotou roste celková termická účinnost bloku.

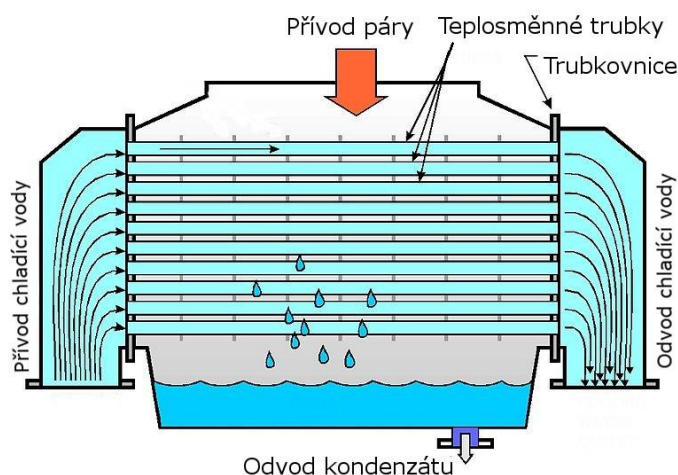
³ Účinník ($\cos \phi$) je poměr činného (skutečného) výkonu a celkového spotřebovaného výkonu (zdánlivého výkonu). Účinník vyjadřuje, jak efektivně je elektrická energie spotřebována. V tomto případě je jalový výkon 247 MVA.

2.6.2 Konstrukce kondenzátoru

Plášť kondenzátoru je svařen z ocelového plechu. Plášť může mít válcový tvar nebo, u turbín velkých výkonů, tvar hranatý. Ve vnitřním prostoru se nacházejí tzv. trubkovnice (ocelové plechy, případně mosazné pro chlazení mořskou vodou), do kterých jsou zaválcovány na obou koncích chladicí trubky. Ke zvýšení těsnosti zaválcování se používají nátěry na bázi latexu nebo epoxidových pryskyřic. Kondenzát, který se sráží na vnějších plochách trubek, stéká do sběrače kondenzátu pod spodní částí parního prostoru, odtud je kondenzátními čerpadly dopraven do napájecí nádrže (přes nízkotlaký ohřívací systém a odplynovák).

Chladicí trubky mají stěny tlusté 1 mm a vnější průměr mezi 20 a 30 mm. Při použití znečištěné vody, kde je zvýšené zanášení trubek, se volí průměr větší. Trubky jsou vyráběny z hliníkové mosazi, která má větší korozivzdornost než trubky z uhlíkové oceli. Do mosazi se kromě fosforu, antimonu nebo křemíku přidává i arsen, který zabraňuje odzinkování mosazi, ke kterému docházelo vlivem agresivní mořské vody. Délka trubek se v závislosti na výkonu turbíny pohybuje od 2500 mm u malých turbín do 10 000 mm u turbín velkých výkonů. Prostorové uspořádání trubek je obvykle v kosočtvercové síti.

Kondenzátor může být umístěn za turbínou v osovém směru, nebo u velkých turbín je umístěn pod turbínou a samotná turbína se pak nachází na betonovém podstavci (stolu).



Obrázek č. 6: Schéma kondenzátoru.

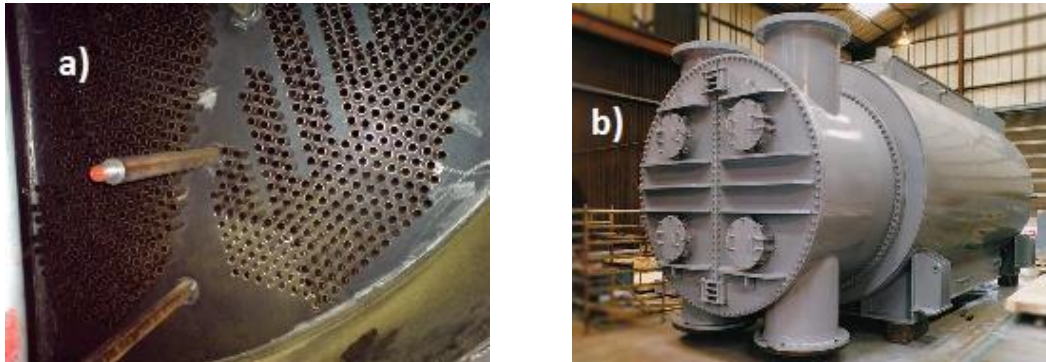
2.6.3 Pomocná zařízení kondenzátoru

Součástí kondenzátoru je vývěva, která zajišťuje odsávání vzduchu a plynů unikajících do kondenzátoru netěsnostmi nebo společně s párou, a udržuje tak stálý podtlak v kondenzátoru. Vnitřní prostor chrání proti nepřipustnému zvýšení tlaku membránová pojistka.

Součástí chladicího okruhu jsou čerpadla chladicí vody (rotační čerpadla diagonální nebo vrtulová s vertikální orientací). Na potrubí hlavního proudu kondenzátu jsou kondenzátní čerpadla (vícestupňová odstředivá čerpadla). Čerpadla jsou vždy zálohovaná.

2.6.4 Kondenzátor elektrárny Yatagan [9]

Kondenzátor elektrárny Yatagan tvoří dva identické bloky, do kterých proudí pára z dvou výstupních hrdel NT dílu. Dopravu kondenzátu zajišťují tři kondenzátní čerpadla v zapojení 3x50%. Přehled technických parametrů poskytuje tabulka č. 4.



Obrázek č. 7: Trubkovnice (a) a těleso (b) kondenzátoru.

Tabulka č. 4: Technické parametry kondenzátoru elektrárny Yatagan.⁴

Celková chladicí plocha	11 420 m ²	Teplota chladicí vody na vstupu	27 °C
Průměr trubek	30 mm	Teplota chladicí vody na výstupu	34,1 °C
Materiál trubek	CuZn29Sn	Vstupní teplota mokré páry	45°C
Tlak v kondenzátoru	7,3 kPa	Průtok chladicí vody	32 000 t/hod
Průtok páry			432 t/hod
Váha kondenzátoru (naplněného vodou)			700,5 t
Váha prázdného kondenzátoru			260 t

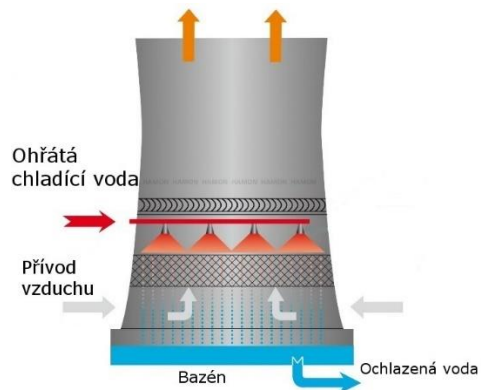
2.7 Okruh chladicí vody [6,7,10]

Pro přeměnu páry na vodu v kondenzátoru je třeba páře odebrat teplo. Tento odběr zajišťuje chladicí voda. Na chladicí vodu se nekladou požadavky na demineralizaci, proto lze využít vodu z běžných vodních toků. Pokud se elektrárna nachází v přítomnosti vodního toku, použije se průtočný chladicí systém (otevřený okruh). Voda, která přijme teplo odebrané páře, se vrací zpět do vodního toku.

V případě velkých elektráren však přírodní zdroje vody nejsou dostačující, používá se uzavřeného (cirkulačního) systému chlazení. Součástí tohoto chlazení jsou chladicí věže, ve kterých se teplo odvádí přímo do atmosféry. Princip chlazení je patrný z obrázku č. 8. Ohřátá voda je přivedena do horní části chladicí věže, kde je tryskami rozprášena na velmi malé kapičky. Ty padají z výšky několika desítek metrů a proudícím vzduchem se ochlazují. Část vody se odpaří do vzduchu, který stoupá chladicí věží vzhůru a kontaktem s okolním vzduchem se ochladí a vodní pára obsažená ve vzduchu zkondenzuje, a proto pozorujeme oblaka bílé mlhy stoupající z chladících věží. Ochlazená voda se shromažďuje v bazénu pod věží, odkud se pomocí čerpadel vede zpět do kondenzátoru. Množství vody, které se vypařilo, je po odstranění nečistot a úpravě do bazénu doplněno ze zásobních nádrží.

⁴ Hodnoty platí pro výkon 210 MW a teplotu chladicí vody 27 °C.

Zdrojem chladící vody pro elektrárnu Yatagan je řeka Dipsiz, která se nachází ve vzdálenosti 5 km od elektrárny. Voda z řeky je přiváděna potrubím do areálu elektrárny (průtok 2 400 m³/hod) do železobetonové nádrže o kapacitě 6 000 m³, odkud se část čerpá do systému čištění vody (písková filtrace a ošetření chlorem) a část do systému požární ochrany. Voda je čištěna pískovou filtrací a ošetřena chlorem a dále je čerpána třemi čerpadly (z nichž je jedno záložní) do okruhu chladící vody. Chladící voda se kromě kondenzátoru používá také ke chlazení olejového systému, generátoru, motoru čerpadel a dalších komponent. Samotné chladicí věže jsou zhotoveny z železobetonu s přidanými azbestocementovými plechy. Maximálního výkonu 215 MW lze dosáhnout při teplotě chladící vody maximálně 22° C.



Obrázek č. 8: Schéma chlazení v chladicí věži.

2.8 Napájecí čerpadlo [4,9]

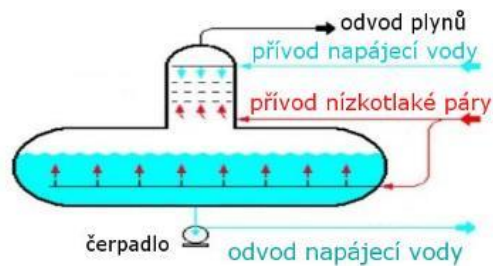
Napájecí čerpadlo zajišťuje transport vody do parního kotle. V elektrárnách se nejčastěji používají vysokotlaká odstředivá čerpadla. Napájecí čerpadlo je kritické zařízení, u nějž musí být zajištěna vysoká spolehlivost. Při jeho poruše by totiž mohlo dojít k poškození tlakového systému kotle. Celkový výkon čerpadel musí zajistit bezproblémový provoz kotle i v případě, že dojde k výpadku jednoho z čerpadel. Pro pohon napájecích čerpadel se používá elektromotor, u velkých bloků pak samostatná parní turbína. Turbínový pohon je energeticky výhodný a umožňuje snadnou regulaci výkonu čerpadla změnou otáček turbíny.

V elektrárně Yatagan se nachází tři čerpadla napájecí vody, dvě z nich zajišťují napájení kotle potřebným množstvím vody, třetí čerpadlo slouží jako záložní. Použitá čerpadla jsou osmistupňová membránová čerpadla chlazená olejem. Každé čerpadlo je poháněno elektromotorem o výkonu 3 150 kW, se kterým je spojeno hydraulickou spojkou, která umožňuje plynulou regulaci otáček čerpadla, a tím změnu výkonu kotle a celé turbíny. Hmotnostní průtok čerpadlem je 360 t/hod, vstupní teplota napájecí vody 158 °C a účinnost čerpadla 79%.

2.9 Odplyňovák [6]

Kyslík a oxid uhličitý, který se ve vodě při styku se vzduchem rozpouští, způsobují korozi, proto se musí z vody odstraňovat. V elektrárnách se používá fyzikální metoda termického odplynění v odplyňováku. Jedná se o tlakovou nádobu, ve které jsou umístěny trysky pro rozprášení vody na co nejmenší kapičky. Do odplyňováku se shora přivádí kondenzát, proti němu zespoda proudí pára, která vodu ohřívá a na principu difuze odstraňuje

rozpuštěné plyny. Z horní části odplynováku jsou pak plyny odváděny do atmosféry. Schéma odplynováku ukazuje obrázek č. 9.



Obrázek č. 9: Schéma odplynováku.

3. Parní turbína

3.1 Historie [2,3]

Hlavní komponentou tepelné elektrárny je parní turbína. Slouží jako hnací zařízení (motor). Hlavní využití nalézá ve výrobě elektřiny v elektrárnách, ale též slouží jako hnací jednotka pro pohon lodí, kompresorů, čerpadel nebo velkých strojů v papírenském a cukrovarském průmyslu.

Parní turbína nahradila svého předchůdce – parní stroj, jehož objev se připisuje Jamesi Wattovi, který svůj první fungující parní stroj postavil v roce 1774, a odstartoval tak průmyslovou revoluci a období nazývané „Století páry“. Používal se jako pohon strojů, čerpadel a také v dopravě – parní lokomotiva. Nedovoloval však výrobu elektrické energie.

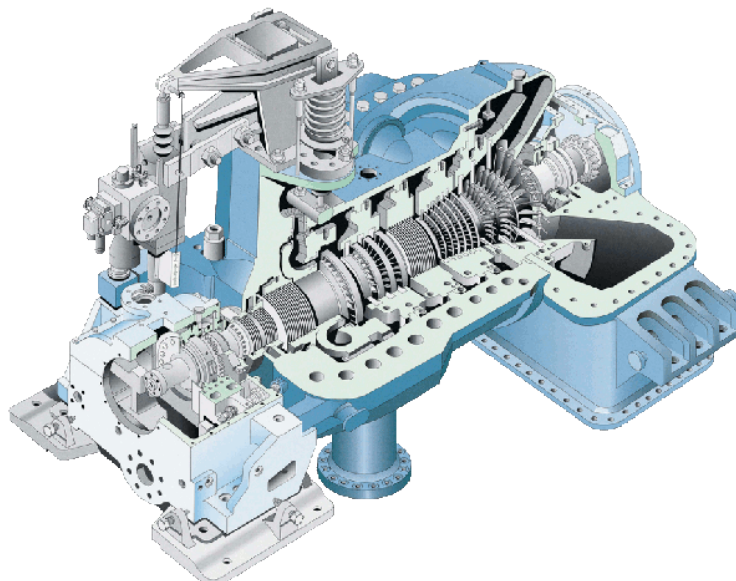
Tento nedostatek odstranil jeho nástupce – parní turbína. Oproti parnímu stroji měla i další výhody – umožňuje realizovat stroj velkého výkonu, dosáhnout vyšší tepelné účinnosti (díky možnosti použít vysoké tlaky a teploty páry na vstupu) a v neposlední řadě využít výstupní páry pro vytápění měst a obcí.

První parní turbína byla sestrojena v roce 1883 švédským inženýrem C. G. de Lavalem, jednalo se o rovnotlakou turbínu (vysvětleno v kapitole 3.2). Jen jeden rok poté byla představena turbína přetlakového provedení Angličanem Ch. A. Parsonsem. První sestrojené turbíny se vyznačovaly vysokými otáčkami (25 000 – 27 000 ot/min) a velmi nízkými výkony v řádu jednotek až desítek kW.

Cílem dalších let bylo samozřejmě zvyšování výkonu a účinnosti, v polovině dvacátého století se výkony pohybovaly běžně mezi 50 až 100 MW. Se vzrůstajícím výkonem přibývaly také problémy. Zvyšování vstupních teplot a tlaků, snižování tlaků v kondenzátorech (nutnost větších délek koncových lopatek) si žádalo vyvíjení nových žárupevných materiálů s vysokou pevností, nových technologií tepelného zpracování. S rozvojem výpočetní techniky se otevřely široké možnosti zdokonalování turbín – grafické simulace proudění, výpočty a simulace nových profilů lopatek apod.

Dnes se používají elektrárny o výkonu až 1600 MW výkonu s otáčkami 3000 nebo 3600 za minutu (odpovídá síťové frekvenci 50 Hz resp. 60 Hz). Samotný výkon dnes už není limitujícím faktorem. Bylo by možné sestrojít turbínu i o výkonu až 4000 MW, na takový výkon

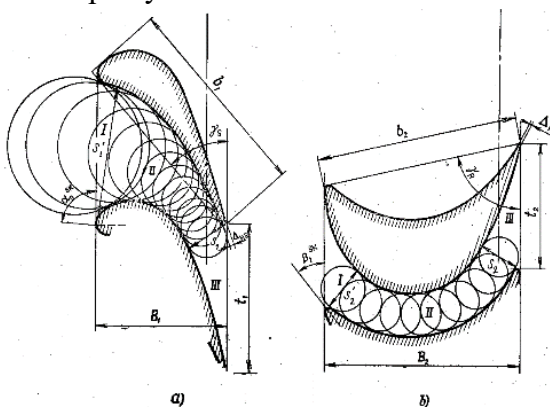
ale v blízké době nelze čekat poptávku. Takové koncentrace výkonů nejsou žádoucí z důvodů velikosti celkového instalovaného výkonu ani z hlediska zdroje chladicí vody pro kondenzátory.



Obrázek č. 10: Model parní turbíny.

3.2 Základní princip a rozdělení [1,2]

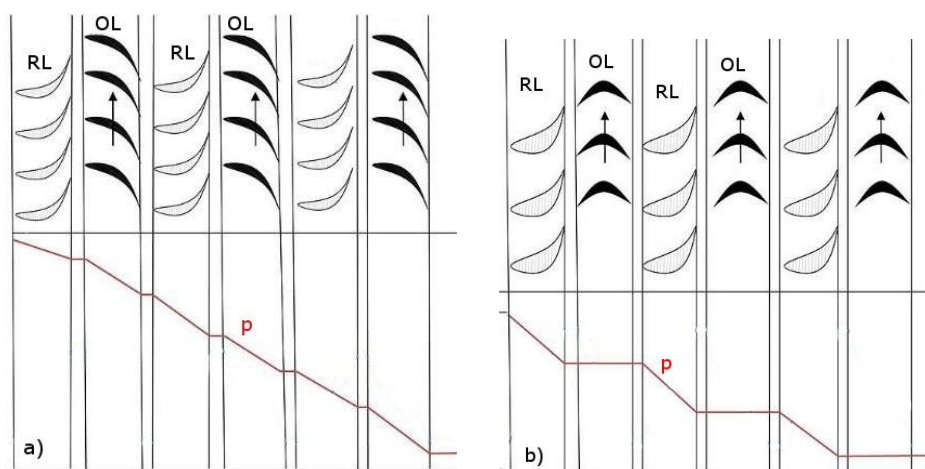
Jedná se o rotační lopatkový parní motor. Její podstatou je transformace tlakové a kinetické energie páry, která se přivádí z parního kotle, na energii mechanickou (rotace hřídele), která se dále v elektrickém generátoru mění na energii elektrickou nebo se používá pro pohon strojů. Princip transformace je následující – do parní turbíny se z parního kotle přivádí vodní pára o vysokém tlaku a teplotě⁵ do prostoru turbíny, kde dojde k expanzi v jednom nebo několika turbínových stupních. Každý turbínový stupeň se skládá z rozváděcího a oběžného kola. Rozváděcí lopatky umístěné v rozváděcím kole se nepohybují, zatímco pohyblivé oběžné lopatky jsou spojeny s rotorem. Lopatky rozváděcího a oběžného kola mají rozdílný tvar.



Obrázek č. 11: Tvar rozváděcích (a) a oběžných (b) lopatek (rovnotlakého stupně).

⁵ Např. pro parní turbínu ŠKODA o výkonu 200MW jsou vstupní parametry vodní páry: tlak $p_1=16,7\text{MPa}$ a teplota $T_1=538^\circ\text{C}$. [3]

V lopatkách rozváděcího kola díky tvaru rozváděcích lopatek dojde k zakřivení směru proudění páry, která dopadá pod optimálním úhlem na lopatky oběžného kola. Jejich tvar způsobuje nárůst obvodové složky rychlosti ve směru rotace oběžného kola. Vlivem tvaru oběžných lopatek se dopadající proud páry mění na mechanickou energii, která otáčí rotorem. Zvýšením rychlosti páry v rozváděcích lopatkách, které je dáno zužujícím se mezilopátkovým kanálem (viz obrázek č. 11), musí podle Bernoulliho rovnice dojít k poklesu tlaku, a důsledkem toho k expanzi a poklesu teploty. Pokud se tlak snižuje pouze v rozváděcím kole a nikoli v kole oběžném, jedná se o stupeň rovnotlaký. Pokud pára expanduje i v oběžném kole, mluvíme o stupni přetlakovém. Lopatky oběžného kola rovnotlakého stupně mají oproti oběžným lopatkám stupně přetlakového odlišný tvar (viz obrázek č.12). Mezilopátkový kanál rovnotlakého stupně má konstantní průřez, proto v něm nedochází k urychlování proudu ve směru toku páry, a tedy k poklesu tlaku.



Obrázek č. 12: Porovnání přetlakového (a) a rovnotlakého stupně (b). RL – rozváděcí lopatky, OL – oběžné lopatky, p – průběh tlaku.

Podle tlaku za posledním stupněm rozlišujeme dva druhy turbín – kondenzační a protitlaké. Oba dva druhy turbín mohou být doplněny odběrem páry pro další účely. Kondenzační turbína je nejčastější typ pro elektrárenské bloky velkých výkonů. Pára na konci expanze má nízký tlak (jednotky kPa), ochladí se v kondenzátoru a dále pokračuje přes další zařízení zpět do kotle. V případě turbíny protitlaké má pára opouštějící turbínu vyšší tlak než atmosférický. Množství páry je dáno potřebami odběratele tepla. Pára z turbíny nepokračuje do kondenzátoru, ale vede se potrubím ke spotřebiteli tepla, např. pro vytápění domácností (přes tepelné výměníky). Tento typ turbín se proto používá v teplárnách. Kombinaci výroby tepla a elektrické energie umožňuje turbína s regulovaným odběrem páry. V letním období může být provozována jako kondenzační, zatímco v zimě jako čistě protitlaková

3.3 Jednotlivé díly parní turbíny

V následující kapitole budou popsány jednotlivé díly parní turbíny s přihlédnutím k jejich namáhání, opotřebení a materiálům.

3.3.1 Lopatky [1,2,5]

3.3.1.1 Konstrukce lopatek

V každém stupni turbíny nalezneme nepohyblivé (rozdávěcí) a rotující (oběžné) lopatkové mříže. Každá lopatková mříž je kruhová, tvořená stejnými lopatkami se stejným úhlem nastavení a ve stejné vzdálenosti jedna od druhé. Rozdávěcí lopatky jsou zasazeny buď přímo do tělesa turbíny (u přetlakového stupně) nebo v rozváděcích kolech zasazených do tělesa turbíny (v případě rovnotlakého stupně).

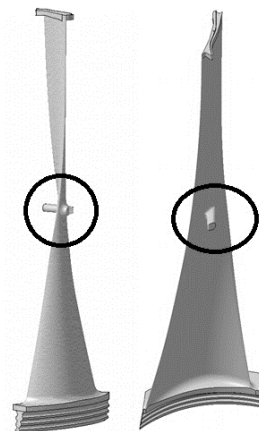
Volba tvaru profilu lopatky výrazně ovlivňuje expanzi páry v turbíně a je třeba jí věnovat značnou pozornost. Jejich poruchy totiž mohou vyřadit z provozu celou turbínu na dlouhou dobu. Tvar musí zajistit malé ztráty při jeho obtékání a splňovat materiálové, pevnostní a spolehlivostní požadavky. Proudění by mělo být pokud možno co nejméně vířivé. To je ovlivněno umístěním a natočením lopatky do proudového pole. Ideální obtékání by nastalo při teoreticky nulovém zaoblení koncové špičky lopatky, což je ale z konstrukčních a výrobních důvodů nereálné.

Lopatky oběžných kol mají podobný princip jako křídlo letadla. Vypuklá část profilu se nazývá podtlaková, vydutá část přetlaková. Při umístění lopatky do proudového pole pára proudí rychleji po vypuklé části, tedy podle rovnice kontinuity je zde nižší tlak a tento rozdílný tlak nad a pod profilem lopatky uvede otočné kolo s lopatkami do pohybu. Pohybu lopatek přispívá také tlaková síla páry na lopatky.

Lopátka oběžného kola se skládá z listu, nožky (závěsu) a bandáže (viz obrázek č. 13). Bandáž snižuje únik páry a zvyšuje tuhost lopatkování (zvyšuje tedy účinnost stupně). Dlouhé lopatky se většinou zhotovují bez obvodové bandáže. Koncové lopatky jsou proto často opatřeny ještě tzv. zámky (viz obrázek č. 14), výstupky na listech lopatky, které v klidovém stavu mají mezi sebou danou vůli v řádu milimetrů. Při roztočení lopatky vlivem odstředivých sil začnou kmitat a rozpínat se a plochy zámků na sebe dolehnou, a dojde tak k vyztužení (zamknutí) celého kola. Jiný způsob zvýšení tuhosti dlouhých lopatek je použití tlumících drátů. Dráty jsou volně provlečeny otvory v lopatkách a při rotaci turbíny vlivem odstředivých sil přilehnou k lopatkám a díky vzniklému tření tlumí jejich kmitání.



Obrázek č. 13: Oběžná lopatka.



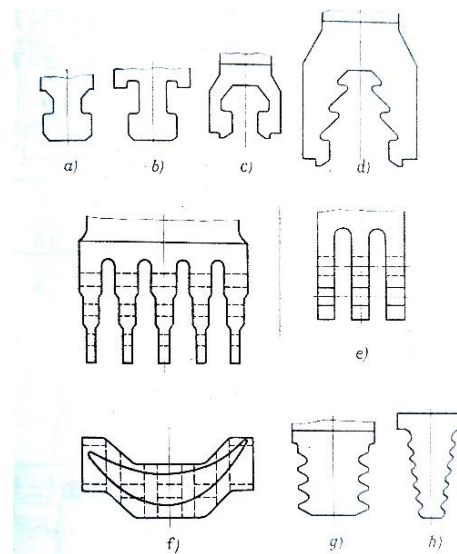
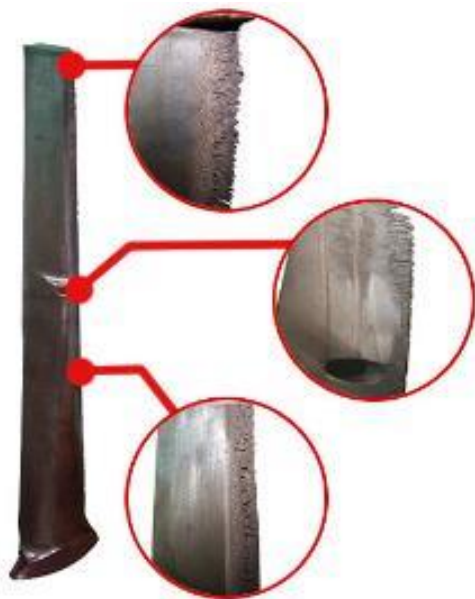
Obrázek č. 14: Zámek lopatky.

3.3.1.2 Namáhání a materiály lopatek

Lopatky se liší délkou i vlastnostmi v závislosti na umístění v systému parní turbíny. Ve vysokotlakém dílu pára vstupuje do prostoru turbíny pod velkým tlakem, lopatky proto stačí krátké, a tedy nejsou příliš namáhány od odstředivých sil. Vstupní teploty páry se pohybují mezi 500-600 °C, proto musí lopatky vykazovat vysokou odolnost proti teplotnímu namáhání a také proti tečení⁶. Statické rozváděcí lopatky musí navíc splňovat požadavky na vysokou pevnost v ohybu a krutu, protože jsou namáhány tlakem proudící páry.

V koncových částech lopatky, v nízkotlakém dílu, naproti tomu má pára teplotu nižší než 100°C, a tlak je zde o několik řádů nižší, tedy měrný objem páry významně roste. Pro roztáčení rotoru je proto třeba dlouhých lopatek. Koncové lopatky mohou dosahovat délky i více než 1 000 mm, což způsobuje vznik velkých odstředivých sil⁷, a proto tyto lopatky musí vykazovat vysokou pevnost. Také uchycení těchto lopatek vyžaduje větší únosnost; v tomto případě se proto užívá stromečkových závěsů.

Pára na konci nízkotlakého stupně se již nachází v oblasti mokré páry. Dochází zde k nárazům malých kapiček vody na lopatky, což způsobuje vznik kavit (viz obrázek č. 15) a erozního opotřebení, jež nepříznivě působí na mechanické vlastnosti lopatkových listů, zvláště pak na náběžných hranách a negativně ovlivňují životnost i celkovou účinnost turbíny.



Obrázek č. 15: Eroze koncové lopatky.

Obrázek č. 16: Různé typy a tvary nožky oběžných lopatek.

Jednou z možností ochrany před erozí je vytvoření tenké tvrdé povrchové vrstvy v okolí náběžné hrany. Tato vrstva je velmi tenká a křehká, a proto se v praxi neosvědčila. Další možností je kalení náběžné hrany indukčním způsobem. Nejúčinnější metodou ochrany je však připájení destiček tvrdokovů (na bázi CoCrW) na náběžné hrany. Problémy zde ale přináší

⁶ Odolností proti tečení (creepu) se rozumí odolnost proti statickému zatěžování materiálu za vysokých teplot. Materiál se působením napětí trvale deformuje (protahuje, stlačuje, ohýbá, zkracuje). [10]

⁷ Např. pro turbínu ŠKODA 200MW s délkou lopatky 950 mm je odstředivá síla 850 kN. U lopatky délky 1050 mm je odstředivá síla již větší než 2000 kN. [5]

samotné pájení. Dochází při něm totiž k ohřevu povrchových částí lopatky i pájené destičky. Vzhledem k rozdílné tepelné roztažnosti obou materiálů se v místě pájení koncentruje napětí a může tak dojít k odprýsknutí tvrdokovových destiček. Jinou konstrukční variantou je odvod vlhkosti z koncového prostoru turbíny.

Současným trendem je vývoj nových materiálů, které budou tepelnému i mechanickému namáhání lépe odolávat. V současných turbínách se pro žárupevné lopatky využívají modifikované vysokochromové oceli (Cr12 a Cr13). Na koncové lopatky pak korozivzdorné oceli třídy 17 s dobrými únavovými vlastnostmi a mezí pevnosti až 1300 MPa. Během modernizace turbíny ocelové koncové lopatky začínají nahrazovat titanové – viz kapitola 6.2.3.

3.3.1.3 Uchycení lopatek

Typ a tvar uchycení lopatek závisí na pevnostních požadavcích na nožku i oběžné kolo, a také na možnosti vyměnitelnosti lopatek. Pro malé délky lopatek se používají T nožky (obr. č. 16-a), zazubené nožky (b), obkročné nožky (c) nebo nožky s více ozuby (g). Rozváděcí lopatky na rozdíl od oběžných mají 2 závěsy do rozváděcího kola.

Čím je lopatka delší, tím roste odstředivá síla, a je nutno použít vidlicové nožky; čím delší lopatka, tím vícekrát rozvidlené (obr. č. 16-e,f). Dlouhé lopatky koncových stupňů používají nejčastěji stromečkovou nožku (h).

3.3.1.4 Výroba lopatek

Lopatky se v současnosti vyrábí frézováním na pětiosých obráběcích centrech. Používají se tvarové frézy, většinou speciálně vyvinuté pro jednotlivé tvarové prvky lopatky.

Každá lopatka má vlivem nepřesností při výrobě mírně odlišné tvary, rozměry, a tedy i hmotnost. Proto umístění lopatek v kole není náhodné. Nejprve se musí všechny lopatky pro jedno kolo zvážit, a poté se umísťují v takovém pořadí, aby kolo bylo co nejvíce vyvážené. Cílem je, aby těžiště rotoru s lopatkami bylo v jeho geometrické ose a aby se zajistil klidný chod stroje. K tomu slouží vyvažování rotoru pomocí malých závaží, která se zasouvají do otvorů umístěných po obvodu rotoru.

3.3.2 Rotor [4,5]

3.3.2.1 Konstrukce rotoru

Rotor zajišťuje přenos točivého momentu od lopatek ke generátoru. Můžou mít rozdílné konstrukce. Oběžná kola můžou být na hřídeli nasazena, nebo jsou vykovány z jednoho kusu společně s rotorem. Vykovaná kola se používají ve vysokotlakých a středotlakých dílech, kde jsou průměry kol menší. V nízkotlakých dílech dříve bývala oběžná kola na hřídel nasazena. Nasazení je s přesahem a kroutící moment z kol je pak přenášen pomocí pera. Nasazovaná kola mají vnitřní osazení, aby jejich nasazování bylo snazší. U rotorů s nasazovanými koly je větší namáhání rotoru, jeho kovárenská výroba je však jednodušší. Dnes se již téměř výhradně používá celokovaná konstrukce rotoru.

Dalším konstrukčním typem rotoru je rotor bubnový, dříve používaný zejména v nízkotlaké části. Dnes se používá u některých přetlakových turbín.

Mezi oběžnými koly jsou na rotoru zhotoveny těsnící břity labyrintového těsnění mezi rotorem a rozváděcími koly (viz kapitola 3.3.5). Dále jsou na rotoru plochy pro radiální nosná ložiska a další osazení (např. opěrný kotouč pro axiální ložisko).

Rotor není tvořen jen jedním hřídelem; takový by musel být velmi dlouhý a bylo by u něj obtížné zajistit nízkou toleranci házení, dále by mohlo dojít k prohýbání od vlastní tíhy a nakonec i jeho doprava a manipulace by byla problematická. Proto vysokotlaká, středotlaká i nízkotlaká část je tvořena samostatnými hřídeli, které jsou vzájemně propojeny spojkami. Spojkové kotouče můžou být vykovány v celku společně s rotorem, nebo se na hřídel nasazují zvlášť.

Nejjednodušším typem spojky je pevná spojka, ta přenáší kroutící i ohybový moment, vyžaduje přesné vyrovnání hřídelů. Používají se pro větší výkony. Spojky zubové jsou svojí konstrukcí složitější, ale navíc dovolují malé odchylky ve vystředění jednotlivých hřídelů. Ještě větší vychýlení os hřídelů dovolují vlnovcové spojky. Tyto spojky se často používají také pro přenos kroutícího momentu z rotoru turbíny na rotor generátoru.

Rotor je uložen v ložiskách, která zachycují radiální i axiální síly (viz kapitola 3.3.4).

3.3.2.2 Namáhání a materiály

Na rotor parní turbíny jsou kladeny mimořádně vysoké požadavky a jeho deformace by mohla způsobit vznik vážných havárií. Požadovaná je odolnost proti tečení i vysoká mez pevnosti při tečení⁸. Dále je nutná vysoká mez kluzu a pevnosti, protože na rotor jsou přenášeny velké odstředivé síly rotujících lopatek. Důležité je také zajistit maximální stejnorodost vlastností v celém materiálu

Při spouštění turbíny musí být zajištěno pozvolné ohřívání rotoru. Vzhledem k vysoké hmotnosti a průměru rotoru by při rychlém ohřívání byla teplota povrchových částí a jádra rotoru značně rozdílná, v materiálu by vznikalo pnutí, a mohlo by tak po určité době dojít ke vzniku trhlin od tepelné únavy⁹.

Oceli pro turbínové rotory se legují zejména chromem (zvyšuje korozní odolnost proti působení vodíku), molybdenem, vanadem a niklem. Pro výrobu se používají oceli třídy 15 a 17.

3.3.2.3 Výroba

Rotory se zhotovují kováním. Dříve se u celokovaných rotorů dělal osový vývrt pro kontrolu jakosti materiálu ve středu výkovku. Dnes už toto z důvodu pokročilejších technologií není nutné. Z důvodu vysokého namáhání popsaného v předcházející kapitole se musí při tavení a odlévání oceli pro rotory použít speciální technologie, jako vakuové nebo elektrostruskové

⁸ Mez pevnosti při tečení je napětí, při jehož trvalém působení při teplotě T je střední doba do lomu t .

⁹ Při vystavení materiálu náhlým, opakovaným změnám teploty, vznikají tepelná pnutí a dochází k porušení materiálu. Porušení pak nastává při nižším zatížení, než by nastalo při cyklickém zatěžování za konstantní teploty. [5]

přetavování, odlévání ve vakuu, ochranné atmosféře (aby se předešlo výskytu plynů v kovu). Před obrobením se výkovky zkoušejí ultrazvukem na čistotu a stejnorodost materiálu.

Obrábění rotoru se z velké části odehrává na soustruhu. Drážky závěsů pro upevnění lopatek se vyrábějí frézováním. U skládaných rotorů lze drážky lopatkových závěsů zhotovit protahováním.



Obrázek č. 17: Celokovaný rotor.

3.3.3 Skříň (těleso) turbíny [1,4,5]

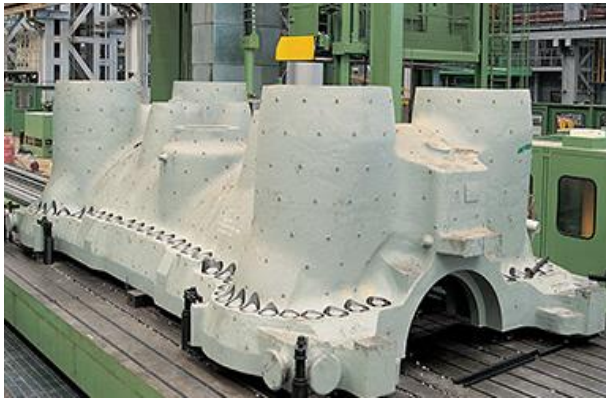
Skříň turbíny se zpravidla skládá ze dvou částí rozdělených vodorovnou rovinou, které jsou spojeny poměrně masivními šrouby s vysokými požadavky. Její konstrukce by měla být jednoduchých tvarů s rovnoměrným rozptřením materiálu, aby její prohřívání a chladnutí bylo rovnoměrné a nevznikaly deformace, příp. trhliny. Účelem skříně je udržení páry v prostoru turbíny a tlumení rázů.

Na tělese turbíny je několik potrubí, pomocí kterých se odebírá pára, která slouží k ohřevu napájecí vody ještě před vstupem do prostoru kotle. Jedná se o tzv. regeneraci tepla, která zvyšuje celkovou účinnost elektrárny tím, že se určitá část tepla expandované páry vrací s ohřátou vodou zpět do kotle, takže se tím sníží množství spotřebovaného paliva v kotli.

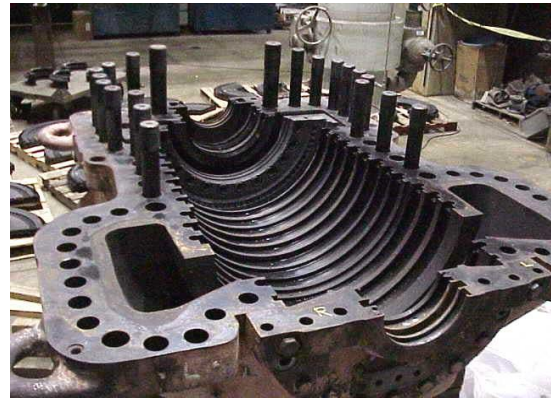
Rozváděcí lopatková kola mohou být umístěna přímo v tělese, nebo na nosičích, kde na každém nosiči je umístěno několik rozváděcích kol. Tento typ konstrukce se používá pro turbíny s odběrem páry pro regeneraci.

Konstrukce skříně může být jednovlášťová nebo dvouvlášťová. Dvouvlášťová slouží k rozdělení tlakových a teplených spádů mezi vnitřní a vnější část skříně, a tedy dochází k menším deformacím. Dvouvlášťové skříně se používají zejména ve vysokotlaké části, z důvodu vysokých vstupních teplot.

Skříň se zhotovuje jako odlitek z legovaných ocelí (třídy 17 legovaných Cr, Mo, W a V) nebo litiny (pro nízkotlakou část). Po odlití se tělesa austenitizačně žihají a popouští, aby bylo dosaženo lepší homogenity, která je po odlévání nízká. Požadavky na skříň jsou žárupevnost, dobré slévárenské vlastnosti nebo odolnost proti únavě. Skříně nízkotlakého dílu a výstupní hrdla bývají svařované z plechů z uhlíkové oceli



Obrázek č. 18: Horní část tělesa turbíny.



Obrázek č. 19: Spodní část tělesa turbíny.

3.3.4 Ložiska [3,4,13]

3.3.4.1 Radiální (nosná) ložiska

Radiální ložiska přenášejí síly od rotoru a další doplňkové síly, které mohou vznikat např. při nevyváženosti rotoru. Používají se kluzná ložiska s trvalou dodávkou oleje. Ložiskové pánve jsou vyrobeny z lité oceli s kompozitovou výstelkou, obsahující 80% cínu. Dvě poloviny ložiskových pánví jsou sešroubovány a jejich vzájemná poloha zajištěna kolíky nebo lícovanými šrouby. Ložiska jsou uložena v ložiskových stojanech mimo skříně turbíny. Nutné je pojištění pánví v ložiskových stojanech proti pootočení, aby nedošlo k zamezení přítoku oleje a poškození ložiska.

3.3.4.2 Axiální (osová) ložiska

Osová síly vznikají působením tlaku páry na lopatky, přes které se síly přenášejí do rotoru turbíny. K zachycení osových sil a ustavení rotoru v osovém směru slouží axiální ložisko. U axiálních ložisek se počítá s velkými silovými rezervami, protože skutečná osová síla může být podstatně vyšší než vypočtená (zvětšení vůlí v ucpávkách rozváděcích kol, zanesení mezilopátkových kanálů atd.). Z důvodu teplotní roztažnosti je umístěno jen na jedné straně turbíny.

Pro zachycení axiálních sil jsou používána segmentová ložiska (opěrná plocha je rozdělena na několik částí viz obrázek č. 20-b). Je nutné zajistit axiální polohu rotoru i v druhém směru. Axiální ložisko má proto segmenty i z druhé strany, které mohou být krátkodobě zatíženy při změně výkonu stroje. Tyto pomocné segmenty bývají většinou rozměrově menší, u některých turbín jsou však segmenty na obou stranách stejně velké. Segmenty ložisek mohou být vyrobeny z kompozitních materiálů nebo z bronzu.

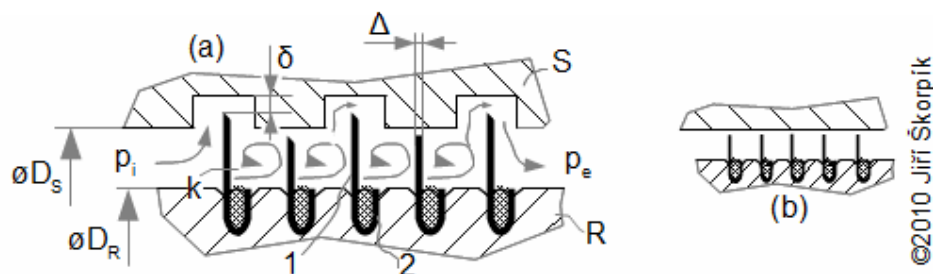
Axiální i radiální ložiska se umísťují v turbíně vedle sebe, často se proto používá kombinované radiálně – axiální ložisko s jedním společným uložením.



Obrázek č. 20: Radiální (a) a segmentové axiální (b) ložisko pro uložení rotoru.

3.3.5 Těsnící prvky [1,3,11]

Aby pára procházela turbínou skrz lopatky a neobcházela lopatky po jejich obvodu, je třeba mezery mezi rotorem a statorem utěsnit. Nejběžnějším typem těsnění jsou bezdotykové labyrintové ucpávky, u kterých nevznikají žádné ztráty třením, jsou bezúdržbová a mají teoreticky neomezenou životnost. Princip těsnění spočívá v prudkém poklesu tlaku v zúženém místě mezi břitem a statorem (příp. rotorem) a následné expanzi v komůrkách mezi břity. V zúženém místě se podle Bernoulliho rovnice sníží tlak a zvýší rychlost, v následném rozšíření se tlak opět zvýší a rychlost sníží a dojde k zahlcení prostoru mezi břity a vznik vířivých proudů, které znesnadňují průchod páry (viz obrázek č. 21-a).



Obrázek č. 21: Pravé (a) a nepravé (b) labyrintové těsnění.

Vnitřní labyrintové těsnění se nachází mezi vnitřním obvodem rozváděcího kola (statorem) a rotorem turbíny. Někdy může být také mezi vnějším obvodem oběžného kola a statorem. V tom případě jsou ostré břity zhotoveny na bandáži oběžného kola.

Mezera mezi těsnícím břitem a statorem musí být velmi malá, avšak nesmí dojít ke vzájemnému kontaktu obou částí (vůle by měla být v řádech desetin milimetru). K tomu by mohlo dojít například při najíždění turbíny z důvodu nerovnoměrného ohřívání nebo vlivem nedokonalého vyvážení rotoru a lopatkování. Z tohoto důvodu se břity zhotovují s velmi ostrým koncem z měkké oceli, který se v případě kontaktu se statorovou plochou rychle zbrousí, a zabrání tak vzniku velkého tření a přílišnému zahřátí rotoru, které by mohlo způsobit jeho prohnutí. Čím je větší tlakový spád, tím musí být délka labyrintových ucpávek větší. V labyrintových ucpávkách vznikají axiální síly, které je třeba znát při dimenzování axiálních ložisek.

Vnitřní labyrintové ucpávky zamezují průchodu páry po obvodu kol. Také je třeba zamezit, aby pára neodcházela pryč z prostoru turbíny, k tomu slouží vnější labyrintové ucpávky. Na vstupní straně do turbíny je tlak páry v turbíně vyšší než vně turbíny, pára tedy bude mít tendenci z prostoru turbíny skrze labyrintové těsnění unikat. Proto je tato pára z ucpávek odsávána do kondenzátoru ucpávkové páry. Naopak na koncové straně turbíny je tlak uvnitř turbíny mnohonásobně nižší, než je okolní (atmosférický) tlak, a hrozí tak nasávání okolního vzduchu do turbíny. Zde je naopak nutné do prostoru labyrintu páru přivádět (tzv. zahlcovací pára). Aby neunikala mimo turbínu, tak se následně opět odsává do kondenzátoru ucpávkové páry.

Břity labyrintového těsnění bývají vysoustruženy přímo na hřídeli, ve statoru pak bývají uloženy v samostatném ucpávkovém pouzdru a v radiálním směru jsou od tělesa odtlačovány plochou pružinou. Druhou možností je použití tenkých kovových břitů, které jsou přidělány do zápichů v rotoru.

Labyrintové ucpávky mohou být pravé nebo nepravé – viz obrázek č. 21. Pravé ucpávky mají na hřídeli těsnící břity proti výstupkům v tělese ucpávky (nebo opačně). V případě nepravých ucpávek je břity opatřena pouze jedna z částí, druhá je hladká. Tento typ je výrobně jednodušší, ale není dostatečně účinný pro velké tlakové spády.



Obrázek č. 22: Těleso s těsnícími břity.



Obrázek č. 23: Regulační ventily.

3.3.6 Ventily [1,2,13]

3.3.6.1 Regulační ventily

Přehřátá pára je z kotle potrubím dopravována do turbíny. Aby bylo možné regulovat množství páry vstupující do turbíny (a tím i celkový výkon), jsou před turbínou umístěny regulační ventily. Dnes se používají hlavně jednosedlové ventily s kuželkou, která je ovládána hydraulicky pomocí motoru umístěného nad ventilem.

Existují tři základní způsoby regulace výkonu turbíny. Prvním způsobem je regulace škrcením – pomocí jednoho regulačního ventilu (nebo pomocí více ventilů ovládaných současně). Průtok páry se zmenšuje snížením tlaku, tím se snižuje i tepelný spád a tedy celková účinnost turbíny. Výhodou tohoto typu regulace je rychlá odezva.

Při tzv. skupinové regulaci je před turbínou umístěno několik regulačních ventilů (zpravidla 3 – 6), které se otevírají nebo zavírají postupně podle zatížení turbíny. Výhodou je,

že ztráty škrcením postihují pouze tu část páry, která protéká částečně otevřeným ventilem, ale páry protékající již otevřenými ventily se ztráty škrcením netýkají. Do turbíny vstupuje tedy několik proudů páry, každý do příslušného dýzového segmentu tzv. regulačního stupně, který má za úkol jednotlivé proudy s rozdílnými parametry promístit. Skupinová regulace je pomalejší, má však oproti regulaci škrcením vyšší účinnost a používá se u turbín pracujících s velkými tlakovými spády.

Posledním typem regulace je regulace klouzavým tlakem, kdy se celkový výkon reguluje změnou příkonu čerpadla napájecí vody. U toho způsobu nejsou žádné ztráty, regulace je však nejpomalejší.

3.3.6.2 Rychlozávěrné ventily

Rychlozávěrný ventil slouží k okamžitému zastavení přívodu páry do turbíny. Ventil se udržuje v otevřené poloze působením tlaku oleje na píst servomotoru proti síle pružin. Servomotor je umístěn pod ventilem a olej působí na spodní stranu pístu. Při poruše dojde k vysmeknutí pojistného regulátoru, olej se vylije z prostoru pod pístem a pružiny ventil uzavrou. To vše musí proběhnout v řádu desetin sekundy.

4. Reverse engineering

4.1 Úvod

Parní turbína, tak jako každé jiné strojní zařízení, má určitou omezenou dobu životnosti. Životnost průtočné části parní turbíny se uvádí mezi 150 000 a 200 000 hodin, což odpovídá 22 až 30 letům provozu. Po této době je třeba zvážit, jak postupovat dál. Otázkou je, zda opravit a modernizovat původní turbínu, nebo ji celou odstavit a instalovat zcela novou. Životnost ostatních, méně namáhaných částí, ještě nemusí být zdaleka naplněna. Například životnost tělesa turbíny se udává až 700 000 hodin provozu [12]. Proto je možné pouze některé části původní turbíny vyměnit za nové a výkonnější a zbylé části používat dalších několik desítek let.

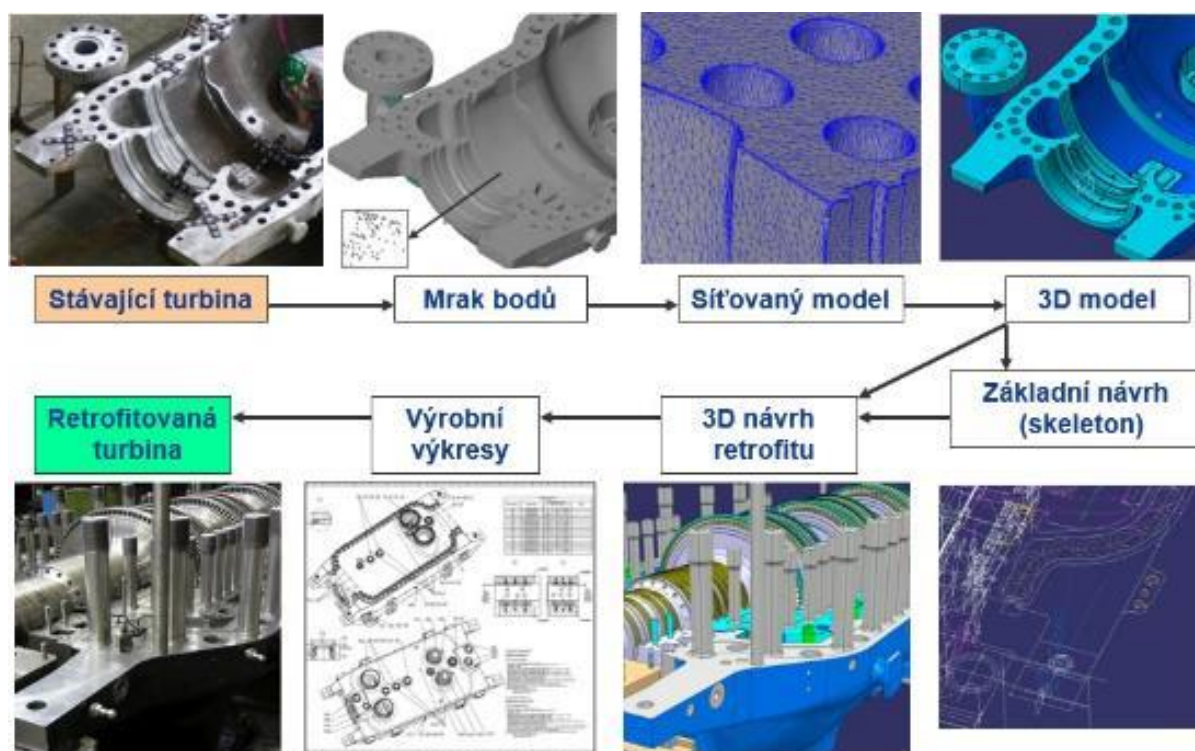
Boom parních turbín nastal v 60. letech minulého století, na konci století se jejich životnost chýlila ke konci a vyvstala otázka, jak se starými turbínami naložit. Problémem starších turbín často bývá, že původní výrobci zanikli, již neexistuje podrobná technická dokumentace nebo je neúplná, není známé chemické složení a fyzikální vlastnosti použitých materiálů, technické výkresy a další důležité údaje. Během desítek let provozu původních turbín došlo k výměně či byly provedeny úpravy určitých částí, a tak i existující původní dokumentace nemusí být věrohodná a nemusí korespondovat se současným stavem turbíny. Proto při modernizaci turbín využíváme reverse engineering.

Reverse engineering, česky zpětné inženýrství, se zabývá tím, že na základě současného fungujícího modelu se snaží pochopit logiku původní konstrukce daného zařízení, způsoby namáhání a opotřebení při provozu a získat další potřebné parametry, na základě kterých je možné sestavit podobně fungující zařízení nebo vylepšit některé jeho parametry a dále zařízení provozovat na původním základu. Výsledkem reverse engineeringu je zhotovení

tzv. retrofitu, tedy zpětně zhotoveného modelu již existujícího zařízení, ze kterého pak bude vycházet návrh na modernizaci.

4.2 Tvorba retrofitu [9]

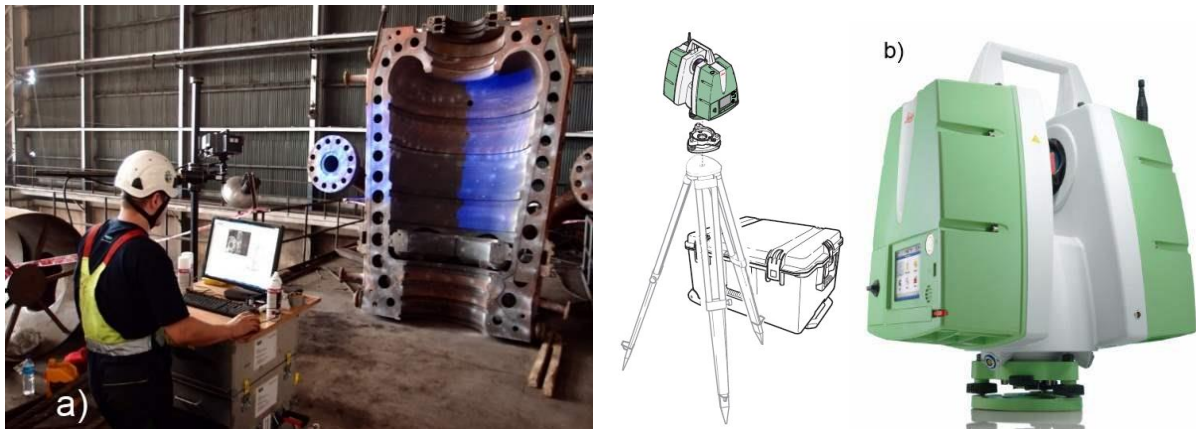
Nejčastěji používanou metodou tvorby retrofitu je skenování původní turbíny. Jedná se o 3D skenování, které umožňuje nasnímat prostorové objekty a přenést je do 3D CAD modelu. Rozlišujeme dva základní druhy – optická fotometrie a laserové skenování. V případě optické fotometrie se využívá stereo snímkování skenovaného předmětu, na který je promítána určitá geometrie a z těchto snímků se pak počítačově dopočítávají body této geometrie. Principem laserového skenování je měření času odrazu laserového paprsku od přístroje k objektu a zpět. Výsledkem je mřížka bodů nasnímaných v zorném poli skeneru (tzv. mračno bodů), u kterých známe jejich prostorovou polohu (tedy směr a vzdálenost od přístroje). Získaná data je pak možné transformovat na síťový model a dále na 3D model v běžně používaných formátech. Na základě 3D modelu už je možné provádět různé simulace, zhotovit přesnou animaci chodu turbíny nebo provádět pevnostní analýzy, a tím tak získat co nejvíce potřebných informací, ze kterých si lze udělat představu o vlastnostech původní turbíny. Průběh vzniku retrofitu je znázorněn na obrázku č. 24.



Obrázek č. 24: Proces vzniku retrofitu.

Skenovat lze buď jednotlivé části turbíny (viz obrázek č. 25-a) nebo celý prostor strojovny. V druhém případě skenování probíhá na několika stanovištích. Nejprve je nutné umístit a zaměřit měřící terče, pak následuje fotografování a samotné skenování. Skenování na jednom stanovišti zabere přibližně 20 až 30 minut. Při skenování celého prostoru elektrárny může počet stanovišť dosahovat i několik stovek, celkové skenování tedy zabere i několik týdnů. Po naskenování následuje zpracování dat, během kterého se kontrolují pozice a zaměření

terčů, skeny se obarvují, spojují a umisťují do souřadnicového pole a nakonec exportují do CAD formátů. Zpracování trvá přibližně stejnou dobu jako proces skenování a výsledkem je značné množství dat¹⁰.



Obrázek č. 25: Skenování tělesa turbíny (a) a skenovací zařízení Leica (b).

Skenovací přístroje prochází neustálým vývojem a jejich parametry se neustále vylepšují. Pro základní představu jsou v tabulce č. 5 uvedeny parametry skenovacího zařízení Leica P20, které je používáno pro skenování celého prostoru strojovny a je zobrazeno na obrázku č. 25-b.

Tabulka č. 5: Parametry skenovacího zařízení Leica P20. [9]

Rychlost skenování	Až 1 milion bodů / s
Horizontální zorný úhel	360°
Vertikální zorný úhel	270°
Měřicí rozsah vzdáleností	0,4 – 120 m
Přesnost 3D pozice (ve vzdálenosti 50 m)	3 mm
Přesnost 3D pozice (ve vzdálenosti 100 m)	6 mm
Provozní teploty	-20° C až +50° C

Vytvořením retrofitu se získá představa o rozměrových a geometrických parametrech turbíny (příp. celé elektrárny). Dalším úkolem je zjištění materiálových vlastností – mez kluzu, mez pevnosti při normálních i zvýšených teplotách nebo např. přechodová teplota¹¹. Provádí se nedestruktivní zkoušky sloužící k odhalení skrytých podpovrchových vad jako např. kapilární zkoušky nebo magnetická defektoskopie. Dále je třeba provést chemické analýzy použitých materiálů. Laboratorními testy se pomocí mikroskopů zkoumá struktura krystalové mřížky, její poruchy a případné odchylky. Provést je třeba i destruktivní mechanické zkoušky, jako jsou např. vnikací zkoušky ke zjištění tvrdosti. Tyto zkoušky se provádí v místech, kde otisky po vnikacím zařízení nijak neovlivní chování součásti (viz obrázek č. 26).

¹⁰ Např. skenování strojovny elektrárny Ledvice o celkovém výkonu 330MW si vyžádalo 250 měřících stanovišť, doba skenování činila 15 dní, stejně jako doba následného zpracování, získaný objem dat tvořil 80 GB. [9]

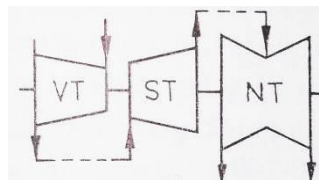
¹¹ Přechodová teplota je teplota, při které se mění křehký lom na houževnatý.



Obrázek č. 26: Místa pro odběr vzorků.

5. Analýza současného stavu turbíny 13K215 [9]

V elektrárně Yatagan je použita třítělesová kondenzační turbína rovnotlakého typu (výkres turbíny v příloze). V turbíně je použit systém odběru páry pro ohřívání napájecí vody (regenerace), který tvoří celkem sedm odběrů páry – 3 odběry pro vysokotlaké ohříváky a 4 pro nízkotlaké ohříváky. Turbína je složena z vysokotlakého (VT), středotlakého (ST) a nízkotlakého (NT) tělesa, do kterého se přivádí pára doprostřed a dále expanduje na obě strany. Tímto konstrukčním uspořádáním se sníží axiální síly působící na ložiska. Další eliminaci výsledné axiální síly zajišťuje opačná orientace proudu ve VT a ST dílu. Schéma tohoto uspořádání je na obrázku č. 27. Rotor vysokotlakého dílu je spojen s rotorem ST dílu pevnou spojkou, rotor ST a NT dílu je pak spojen spojkou pružnou (vlnovcovou), stejně jako rotor NT dílu a generátoru.



Obrázek č. 27: Uspořádání turbínových stupňů turbíny 13K215.

Skříň VT tělesa je koncipována jako dvouplášťová, vstup páry do tělesa se uskutečňuje přes čtyři dýzové segmenty. Vnější plášť středotlakého dílu se skládá ze dvou samostatných částí. Přední část ST tělesa je odlitek a zadní část svařenec, zatímco NT díl je svařovaný celý. Rotor VT části je vykován vcelku s oběžnými koly, u ST části je 7 kol vykováno společně s rotorem, další čtyři kola jsou na rotor namontována. Na rotor NT části jsou pak všechna kola nasazena. Rotor je usazen ve čtyřech radiálních ložiscích a jednom radiálně-axiálním, které je umístěno mezi VT a ST dílem.

Lopatky jsou zhotoveny jako výkovek z tyče nebo v případě koncových lopatek zápustkovým kováním. Lopatky v celém VT dílu a v prvních třech stupních ST dílu mají konstantní průřez po celé délce, ostatní stupně už mají průřez proměnný. Koncové lopatky jsou chráněny proti erozi navařenou vrstvou stelitu¹². Lopatky prvních stupňů VT a ST dílu jsou

¹² Stelit je austenitická slitina kobaltu, wolframu, chromu, železa příp. dalších prvků. V houževnaté matici jsou jemně rozptýleny karbidy způsobující vysokou tvrdost a odolnost proti opotřebení. [10]

vyrobeny z oceli ČSN 17 134 (legovaná Cr, Mo, V), koncové stupně VT a ST dílu a nízkotlaké lopatky jsou vyrobeny z oceli 17 022 (legovaná Cr).

Po 200 000 hodinách provozu jsou kritické části turbíny opotřebované a celkový výkon i spolehlivost turbíny poklesly. V současné době jsou na turbíně pozorovány problémy s hydraulikou, což také snižuje maximální dosažitelný výkon. Výkon omezují i turecké emisní limity. Turbína má také problémy s otevíráním ventilů a s těsností (vakuum) uvnitř turbíny. Bude nutné provést revizi chladiče těsnícího oleje, který se nedostává do vizuálně kontrolovaných míst. V izolacích je použit nebezpečný azbest, který bude třeba odstranit specializovanou firmou.

6. Modernizace turbíny

6.1 Účel modernizace [9, 12]

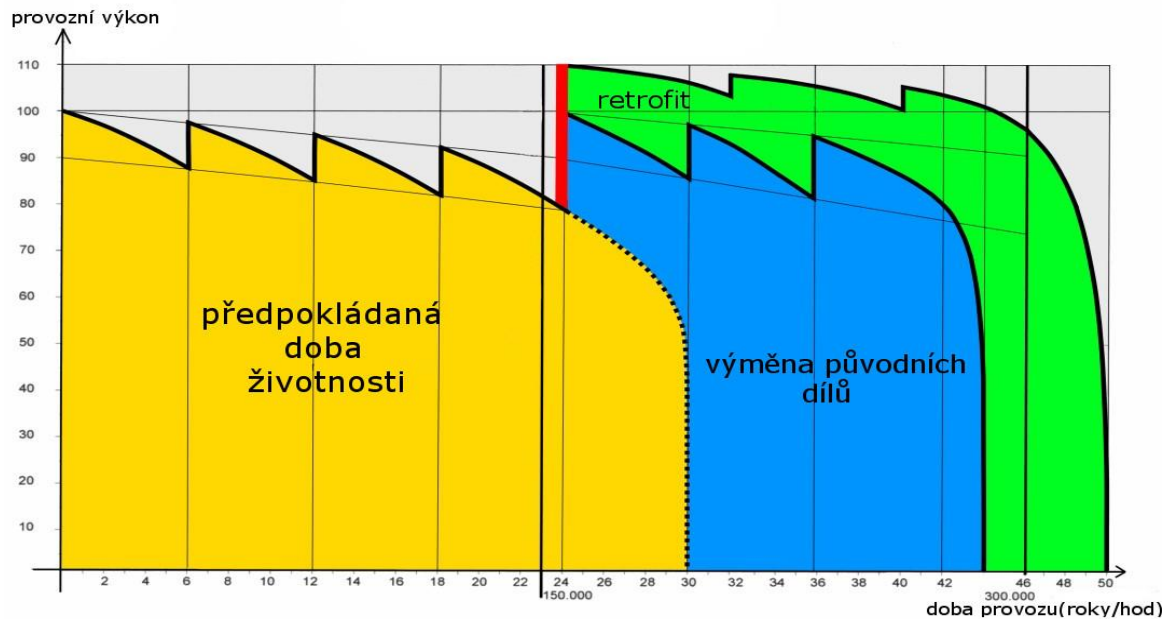
Tvorba retrofitu a následná modernizace ovlivňuje téměř veškeré vlastnosti původního zařízení. Hlavními cíli modernizace je prodloužení životnosti turbíny, zlepšení spolehlivosti, zvýšení termodynamické účinnosti, nárůst elektrického výkonu. Dále je snaha o zvýšení flexibility, což zahrnuje rychlost spouštění (najíždění) turbíny nebo regulaci výkonu. Žádoucí je také snížit spotřebu paliva, tepelné ztráty, co nejvíce omezit provozní náklady i náklady na údržbu a v neposlední řadě snížit produkci škodlivých emisí a snížit dopad na životní prostředí.

Jak již bylo naznačeno v kapitole 4.1, modernizace má oproti instalování nových turbín celou řadu výhod. Je možné nadále využívat některé původní části, jejichž životnost výrazně převyšuje životnost kritických dílů, takže by bylo zbytečné tyto části vyrábět znova. Samozřejmě lze také nadále využívat původní infrastrukturu, pomocná zařízení a budovy strojovny.

Dle literatury [12], modernizací turbín velkých výkonů lze snížit tepelné ztráty až o 4% a výkon lze zvýšit až o 5% při zachování průtočného množství páry. Další zvýšení účinnosti se získá prostřednictvím nových vnitřních částí VT (až 6%), ST (až 1%) a NT (až 2%) dílů. (nárůst celkového výkonu 2%, 1% a 2%). Další nárůst o 0,5% výkonu lze získat modernizací kondenzátoru a nahrazením ohříváků.

Modernizované elektrárny umožňují zásadní prodloužení intervalu pravidelných kontrol a údržby. Interval lze prodloužit ze současných 4-6 let až na 10-12, což se příznivě projeví na snížení nákladů.

Jak se dá prodloužit životnost turbíny, lze pozorovat na obrázku č. 28. Žlutou barvou je znázorněna očekávaná životnost původní turbíny. Výkon turbíny vzhledem k opotřebování jednotlivých částí postupně klesá. Částečně výkon opět zvednou pravidelné údržby. Modrou barvou je zobrazeno prodloužení životnosti, kterého by se dosáhlo při náhradě původních dílů novými díly s původním designem a vlastnostmi. Zelená barva pak ukazuje prodloužení životnosti a také navýšení původního výkonu při použití nových, vylepšených součástí a technologií. Je zde také vidět prodloužení intervalu údržby.



Obrázek č. 28: Prodloužení životnosti turbíny.

Existují dva základní přístupy, jak využít zvýšené účinnosti elektrárenského cyklu. Buď může být zvýšen výkon elektrárny při stejném vstupním množství paliva, nebo zůstane zachován stejný výkon, ale sníží se potřebné vstupní množství paliva.

Modernizace parních turbín má řadu druhotných pozitivních důsledků. Pokud zůstane zachován výkon elektrárny, zvýšení účinnosti se projeví na snížení dopadu na životní prostředí, protože bude potřeba menší množství paliva, tedy do atmosféry bude vypouštěno nižší množství emisí¹³. Pokud se zvýší výkon, sníží se tím potřeba budování dalších elektráren, případně bude možné odstavení starších, méně výkonných a více životní prostředí znečišťujících elektráren.

V současné době se stále častěji modernizace turbíny spojuje s přestavbou elektrárny z původně uhelné na elektrárnu spalující biomasu. V těchto případech se kromě turbíny přestavuje i parní kotel. Další možností přestavby je vytvoření kombinované elektrárny a teplárny, pak je nutné doplnit do turbíny odběry páry pro teplárenské účely. Náhrada nových dílů a zachování původních vždy záleží na přání zákazníka.

Vhodným postupem a návrhem modernizace je možné až zdvojnásobit původně plánovanou životnost turbíny, a tím výrazně ušetřit náklady provozovatele.

6.2 Rozsah modernizace turbíny 13K215

Kritické díly, které je vhodné při modernizaci nahradit, lze rozdělit do dvou kategorií. První tvoří vysoce teplotně namáhané rotační díly, u nichž už je překročena doba životnosti. Druhou kategorií jsou součásti turbíny, které využívají zastaralé technologie a nevyžívají plně energii páry nebo způsobují velké ztráty, a jejich nahrazení by tak vedlo ke zvýšení účinnosti. Tyto součásti je vhodné nahrazovat, i když ještě není dosažena doba jejich životnosti.

¹³ Např. při modernizaci německé elektrárny Mehrum 750 MW se zvýšení termické účinnosti bloku o 2% projevilo na snížení množství vypouštěného oxidu uhličitého o 193 000 tun za rok. [12]

Největší ztráty v turbíně tvoří aerodynamické ztráty při obtékání lopatek, sekundární ztráty (ztráty z důvodu vzniku víření a zpětných proudů za koncovou hranou lopatky), ztráty průchodem páry po obvodu lopatek a únikem páry z prostoru turbíny. Návrh modernizace turbíny by se měl pokusit tyto ztráty snížit.

6.2.1 Teplotně namáhané části

Po dvaceti letech provozu turbíny jsou na poškození nejvíce náchylné teplotně namáhané rotační části – rotor VT a ST dílu. U nich hrozí největší nebezpečí poškození vlivem dlouhodobého působení tlaku, teploty a odstředivých sil. V rotoru můžou vznikat skryté trhliny, které se mohou začít náhle šířit.

Současný rotor turbíny má osový vývrt, který sloužil ke kontrole kvality materiálu. Vývrt má ovšem negativní dopad na namáhání rotoru, protože představuje místo koncentrace napětí, které je zde dvakrát větší než v případě rotoru bez osového vývrtu. Dalším místem velké koncentrace napětí jsou drážky pro oběžné lopatky. Na současný rotor jsou v druhé polovině ST dílu a v celém NT dílu nasazovány disky oběžných kol, které přinesly do rotoru další napětí.

Nově instalovaný rotor VT i ST dílu bude vyroben z oceli legované chromem, molybdenem a vanadem. Chrom zajišťuje vyšší žáruvzdornost a odolnost proti korozi, molybden a vanad pak zvyšují žárupevnost. Rotor bude celokovaný, bez osového vývrtu. Ve VT rotoru budou zhotoveny T-drážky pro lopatky oběžného kola. Tyto drážky musí být vyrobeny přesnými metodami obrábění, aby se dodržel přesný poloměr zaoblení, a minimalizovala se tak koncentrace napětí v těchto drážkách. Ve středotlakém rotoru budou lopatky uloženy ve vidlicových drážkách. Rotory budou mít na koncích pevné spojky a na několika discích budou umístěny otvory pro vyvažování.

Rotory největších rozměrů se většinou dělají svařované z několika výkovek. Rozdělení rotoru na několik svařovaných částí způsobí, že hmotnost jednotlivých výkovek bude menší, a umožní tak jejich přesnější kování a lepší možnost kontroly jakosti materiálu než v případě velkých dílů.

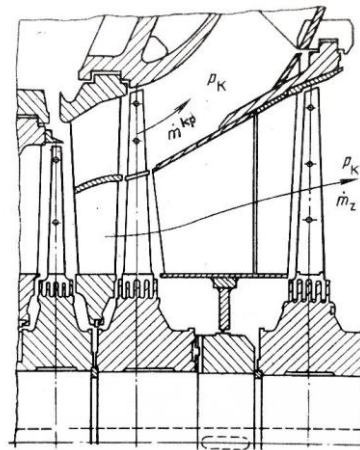
6.2.2 Nízkotlaký díl turbíny [1,9]

Zvýšení účinnosti NT dílu lze dosáhnout zavedením nových profilů lopatek a snížením tepelných ztrát (použitím delších labyrintových těsnění) nebo optimalizací tvaru výstupního hrdla. Výstupní hrdlo v tomto případě zůstane beze změny, z důvodu požadavku provozovatele zachovat původní tělesa turbíny.

Rotor nízkotlaké části není výrazně namáhán vysokou teplotou, ale odstředivými silami a také vlhkostí v posledních stupních, která způsobuje korozi lopatek a rotoru.

V původní turbíně je použita dnes již nevyhovující konstrukce rotoru s nasazovanými koly. U nich hrozí nebezpečí porušení a vzhledem k rychlosti otáčení 3000 otáček za minutu by jejich uvolnění mělo fatální následky. Rotor NT dílu bude tedy také celokovaný, se stromečkovými drážkami pro uchycení dlouhých lopatek. Oproti rotoru VT a ST dílu bude NT rotor navíc legován niklem, který zvyšuje pevnost, která je zde zapotřebí vyšší vzhledem k odstředivým silám.

V době výroby turbíny (v 80. letech 20. století) nebylo vzhledem k materiálům a výrobním technologiím možné vyrábět velmi dlouhé lopatky pro koncové stupně nízkotlakých dílů. V turbíně 13K215 je v nízkotlaké části použita koncepce tzv. Baumannova stupně. Tento speciální stupeň je zařazován jako předposlední stupeň turbíny, má přepážky, které dělí oběžnou i rozváděcí lopatku na dvě patra (viz obrázek č. 29). Před rozdělením na dvě části je tlak v horní i spodní části stejný. Část proudu procházející spodním patrem pokračuje do posledního stupně turbíny, který má na rozdíl od ostatních stupňů prudké rozevření ve špičkové oblasti rozváděcího kola. Tím, že spodním patrem prochází jen část celkového hmotnostního průtoku, zmenší se délka lopatky posledního stupně. Výhodou tohoto stupně je zvětšení hmotnostního průtoku páry nízkotlakým dílem při stejných rozměrech posledního stupně turbíny, a tím zvýšení výkonu turbíny. Také se eliminuje eroze lopatek posledního stupně, protože většina kapiček vody se vlivem odstředivých sil nachází na větším průměru, a tedy se odvedou horním patrem.

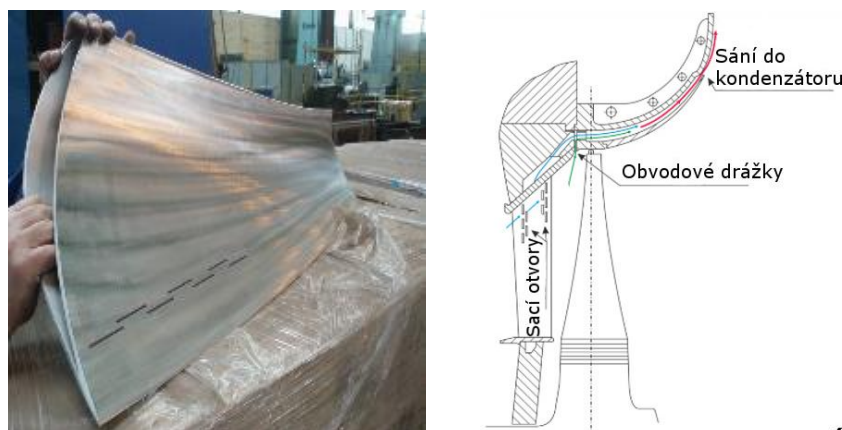


Obrázek č. 29: Použití Baumannova stupně v nízkotlakém dílu turbíny.

Použití Baumannova stupně však způsobovalo řadu problémů. Jeho použitím se zdvojnásobí sekundární ztráty v mříži. Také se objevovalo přetékání páry mezi patry. Aerodynamický návrh profilu mříže v horním patře byl vzhledem k vysokým rychlostem proudu dost problematický. Je také zřejmé, že výroba dvoupatrových lopatek je velmi složitá a při výrobě docházelo k problémům s vyladěním jejich vlastní frekvence.

V současné době už není problém vyrobit velmi dlouhé lopatky (až 1900 mm, viz další kapitola), proto tento stupeň v modernizované verzi turbíny bude zrušen a nahrazen klasickou konstrukcí s použitím jedné dlouhé lopatky, která nahradí poslední dva stupně.

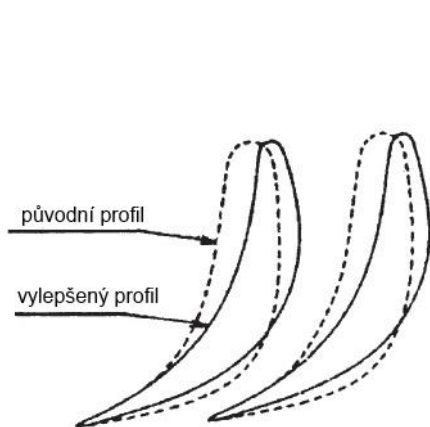
Velkým problémem koncových stupňů turbín bývá vysoká vlhkost páry, která způsobuje erozní poškození lopatek. V NT dílu bude použita nová koncepce odstranění vlhkosti z koncových stupňů. Lopatky rozváděcích kol budou duté (složeny ze dvou částí a svařené) a budou opatřeny úzkými drážkami širokými necelý 1 mm. (viz obrázek č. 30). Tyto drážky slouží jako sací otvory pro odvod vlhkosti, která je odtud vedena do kondenzátoru. Kromě těchto otvorů v lopatkách bude umístěn za rozváděcím kolem ještě další sací otvor. Výrazně se tedy sníží poškození následujících stupňů vlhkostí. Kromě svaření dvou částí lopatek k sobě, které bude použito u této turbíny, je možné vyrobit lopatku z jednoho kusu, a otvory pro odvod vlhkosti do nich vyvrtat.



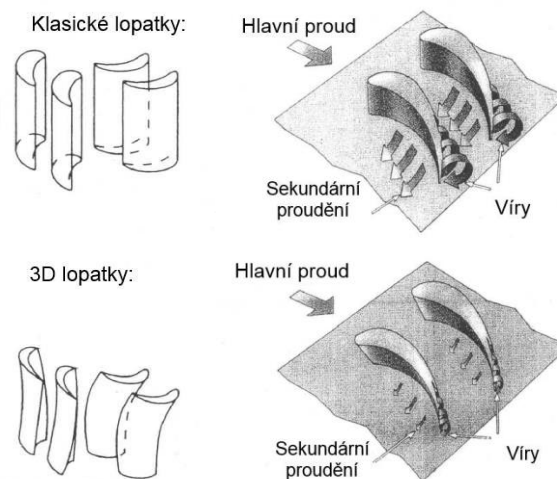
Obrázek č. 30: Odstranění vlhkosti z koncových stupňů turbíny.

6.2.3 Nové profily lopatek [9, 12]

Návrh modernizace lopatek má za cíl navrhnout takové profily lopatek, které budou co nejlépe obtékány, aby za koncovou hranou nevznikaly víry. Při vývoji se ve velké míře uplatňují 3D výpočetní CFD systémy (Computational Fluid Dynamics neboli numerické modelování dynamiky tekutin), které umožňují tvorbu modelů, simulací a analýz. Vývojáři tak dostanou základní přehled o situaci i bez nákladných experimentů, které se provádějí až pro finální, programy již odzkoušené, návrhy. CFD simulace proudění je zobrazena na obrázku č. 34. Experimenty jsou však i nadále nezbytně důležité, protože žádný výpočet nedokáže přesně zahrnout všechny vlivy skutečného provozu.



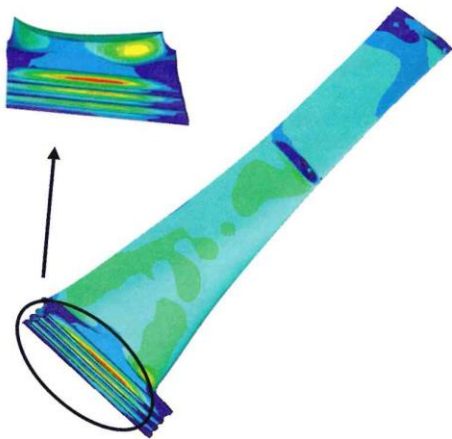
Obrázek č. 31: Původní a vylepšený profil lopatky.



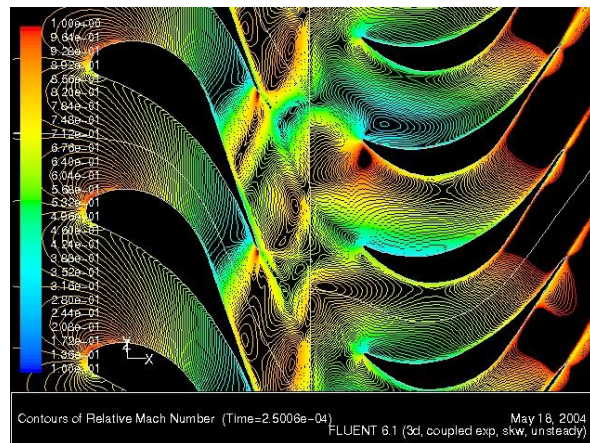
Obrázek č. 32: Porovnání klasického a 3D lopatkování.

Používáním moderních výpočetních systémů se tvary lopatek neustále mění a vylepšují. Příklad původního a vylepšeného tvaru je na obrázku č. 31. Lopatky se celkově zeštíhlují, zavádí se koncepce 3D lopatkování, kdy jsou lopatky různě zkroucené a prohnuté, na rozdíl od dříve používaných profilů s konstantním průřezem. Díky 3D tvarování se podařilo značně snížit víry i nežádoucí sekundární proudění v mezilopátkových kanálech a za nimi (viz obrázek č. 32).

Kromě optimálního tvaru se u lopatek provádí simulace namáhání, kdy se zjišťuje napětové pole v lopatce. Zvláště u dlouhých lopatek je důležité a obtížné jejich správné frekvenční naladění. Vlastní frekvence lopatky nesmí být v blízkosti násobků frekvence otáčení, aby nedošlo k rezonančnímu kmitání lopatek, které může způsobit vznik trhlin a následnou havárii. [19]



Obrázek č. 33: Pevnostní analýza koncové lopatky.



Obrázek č. 34: CFD simulace proudění.

Kritickým místem z hlediska namáhání koncových lopatek je jejich zavěšení do rotoru (viz pevnostní analýza na obrázku č. 33), odstředivé síly dosahují, jak již bylo uvedeno dříve, několika tisíc kN. Použití korozivzdorných ocelí třídy 17 s vysokou mezí pevnosti je zde poměrně problematické, proto se začaly používat titanové slitiny. Titan se vyznačuje poměrně nízkou hustotou ($4\,506\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$), takže titanové lopatky jsou výrazně lehčí než lopatky ocelové (téměř o 60%). Pevnost používaných titanových slitin je okolo 1000 MPa. Titan má celou řadu dalších výhodných vlastností: vynikající korozní odolnost (vzniká stabilní vrstva oxidu titanu), odolnost proti únavovému namáhání nebo nízká tepelná roztažnost. [18]

Nevýhodou je složitost obrábění. Titan se vyznačuje vysokou reaktivitou, takže dochází k rychlému opotřebení rezných nástrojů. Při obrábění vznikají velké rezné síly a vysoké tepelné namáhání v místě řezu, což způsobuje plastickou deformaci břitu. Problematické je také kalení, které je třeba pro zvýšení odolnosti lopatek. Proto se pro zvýšení odolnosti používají speciální laserové nástřiky povrchu lopatky. Cena jednoho kilogramu titanu je sice výrazně vyšší než cena oceli, ovšem jeho životnost je v řádu desítek let, takže z dlouhodobého hlediska se tak jeho použití jeví jako výhodná investice vzhledem k výhodám, které přináší. Titan umožňuje výrobu velmi dlouhých lopatek, ve vývoji je titanová lopatka dlouhá až 1900 mm. Takové rozměry se hodí pro turbíny nejvyšších výkonů, v této turbíně zůstanou i po modernizaci koncové lopatky nadále ocelové, menších rozměrů (viz dále).

Oběžné lopatky VT a ST dílu budou vyrobeny z vysokochromových kovaných ocelových tyčí; nožka, list i bandáž z jednoho kusu materiálu. Zůstane zachován jejich rovnotlakový profil, aplikací koncepce 3D lopatkování dojde ke zvýšení účinnosti oproti původním lopatkám. Na vnějším obvodu bandáže budou zhotoveny dva těsnící břity. Boční plochy T-nožky budou zkoseny vzhledem k ose rotoru, stejně tak budou zkoseny i boční plochy bandáže, ale o jiný úhel. Při nasazení lopatek do lopatkového kola se tyto úhlové vychyly

eliminují, ale do lopatek se vnese předepnutí, které zlepší dynamické vlastnosti lopatek. Tímto opatřením se zabrání vibracím jednotlivých lopatek, lopatky budou pevně spojeny po obvodu, což sníží únik páry mimo lopatkovou oblast a v konečném výsledku v kombinaci s novými profily lopatek zvýší účinnost stupně.

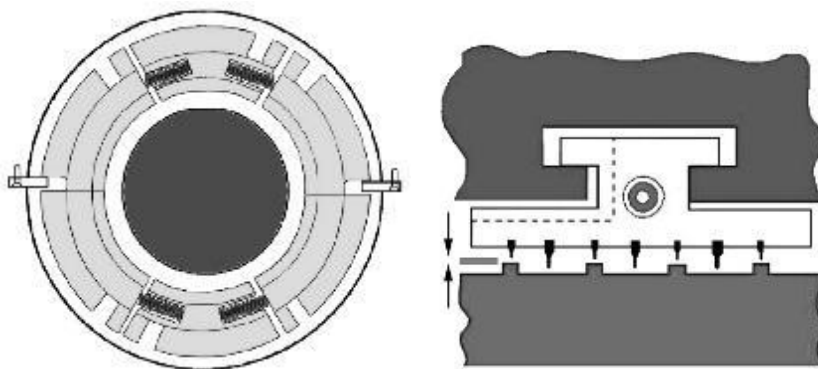
Podobným způsobem budou vyrobeny lopatky rozváděcí, na vnitřním obvodu rozváděcích kol bude vybrání pro umístění ucpávek.

Nízkotlaký díl je symetrický, každá polovina bude obsahovat 3 oběžná a 3 rozváděcí kola. Lopatky prvních dvou stupňů budou vyrobeny jako jeden kus společně s bandáží a zasazeny do rotoru s předepnutím, aby se zlepšily jejich dynamické vlastnosti. U lopatek NT dílu bude použit stromečkový závěs. Poslední stupeň budou tvořit lopatky délky 960 mm, které nahradí původní lopatky Baumanna stupně dlouhé 760 mm.

Původní lopatky v nízkotlaké části jsou opatřeny dvěma až třemi otvory pro výztužné dráty. Ty však zhoršují účinnost stupně, protože představují odpor pro proudění páry. Nové nízkotlaké lopatky budou vyrobeny přesným kováním, bez otvorů pro výztužné dráty. Pro zlepšení mechanických vlastností bude zařazena dokončovací operace kuličkování. Na povrch dopadá pod velkou rychlostí proud malých kuliček, které při dopadu působí na povrch lopatky velkou silou a způsobí plastickou deformaci a vnesou do součásti tlakové napětí. To znamená, že při provozu bude o tuto hodnotu nižší výsledné tahové napětí v lopatkách vzniklé vlivem odstředivých sil (výsledné napětí nejdříve přejde ze záporné hodnoty na nulovou a teprve pak na kladné tahové). Ochrana koncových lopatek proti erozi bude zajištěna kalením náběžné hrany.

6.2.4 Labyrintové ucpávky [9, 12, 16]

Netěsnost labyrintových ucpávek způsobuje značné ztráty. Proto veškeré snahy o jejich modernizaci mají za cíl snížení radiální vůle mezi rotujícími a pevnými částmi. Při zmenšení radiální vůle původních labyrintových ucpávek, popsanych v kapitole 3.3.5, by však hrozilo nebezpečí kontaktu těsnících břitů s rotorem a došlo by k poškození jak ucpávky, tak rotoru. Proto je třeba hledat nové konstrukční varianty labyrintových ucpávek.



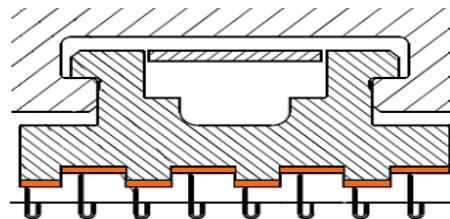
Obrázek č. 35: Labyrintové těsnění s proměnnou radiální vůlí.

Jednou možností je labyrintové těsnění s proměnnou radiální vůlí (tzv. retractable packing). Tento typ těsnění je složený z několika, zpravidla čtyř, segmentů, mezi kterými jsou pružiny (viz obrázek č. 35). Když je turbína v klidu nebo spuštěna při nižších otáčkách, pružiny

tlačí segmenty směrem od sebe, takže jejich radiální vůle narůstá s menšími otáčkami. V každém segmentu je zhotoven otvor, který spojuje prostor před ucpávkou s komorou nad segmenty. Při najíždění turbíny se postupně zvyšuje tlak před ucpávkami a současně také tlak v komoře nad segmenty. Tlak v mezeře mezi ucpávkou a rotorem je přitom nižší než v komoře nad segmenty. Tento tlakový rozdíl způsobuje přitlačování segmentů k sobě (směrem k rotoru) a zmenšování radiální vůle. Výhodou tohoto uspořádání je, že během spouštění turbíny, kdy je největší nebezpečí dotyku těsnění s rotorem (kvůli vibracím a rozdílné teplotní roztažnosti rotoru a tělesa turbíny), je radiální vůle mezi rotorem a těsněním maximální. Při provozních otáčkách dojde k úplnému uzavření mezer mezi segmenty a hodnota radiální vůle se sníží až šestkrát. Díky větší radiální vůli při spouštění se sníží celková doba najíždění. Tento typ těsnění bude použit mezi jednotlivými stupni.



Obrázek č. 36: Kartáčové těsnění.



Obrázek č. 37: Těsnění s nástřikem.

Variantou ucpávek s proměnnou radiální vůlí jsou ucpávky s kartáčovým těsněním. Jeden ocelový břit je nahrazen kartáčem se štětinkami sevřenými mezi dvěma pevnými čely (viz obrázek č. 36). Štětiny jsou vyrobeny z kobaltové slitiny, průměr jedné štětinky se pohybuje od 0,1 do 0,15 mm a společně tvoří překážku unikající páře. Při provozních podmínkách, kdy jsou pružiny mezi segmenty stlačené, je mezi kartáčem a rotorem nulová vůle. Pára tak může unikat jen skrze mezery mezi štětinkami kartáče. Vzhledem k nulové vůli dochází ke kontaktu kartáče a rotoru. Aby vznikalo co nejmenší tření mezi kartáčem a rotorem (a tedy místní tepelné namáhání rotoru), jsou štětiny nakloněny ve směru otáčení rotoru, zpravidla pod úhlem 45°.

Jiným konstrukčním řešením, které bude použito jako vnější těsnění, je opatřit povrch ucpávek speciálním povlakem z měkkého materiálu (tzv. *abradable sealing*). Tyto materiály mají takové vlastnosti, že při kontaktu s řádově tvrdším materiálem nevznikne žádné poškození. Toto opatření zabrání poškození ostrých hran při vzájemném kontaktu a umožní snížit minimální vůli mezi rotorem a statorem, takže se zvýší účinnost labyrintového těsnění (až o 2 %) a sníží mechanické ztráty (uvnitř turbíny zůstane více páry, tedy více páry předává energii lopatkám a podílí se na roztáčení rotoru). Materiály pro nástřiky musí být odolné vůči vysokým teplotám, korozi a cyklickému teplotnímu namáhání. Vhodnými materiály jsou například hliníkové slitiny obsahující polyesterové a silikonové pryskyřice, dále pak nikl-grafitové nebo nikl-chromové kompozitní materiály se silikonovými vlákny. Použití tohoto typu těsnění je znázorněno na obrázku č. 37, místa opatřená nástřiky jsou barevně označena. Pro tuto turbínu bude použit materiál Durabrade (nikl – grafitový kompozit odolný teplotám až do 480 °C).



Obrázek č. 38: Voštinové těsnění.

K utěsnění prostoru mezi oběžnými lopatkami a statorem bude použito voštinové těsnění, které bude připevněné na rozváděcí kola (viz obrázek č. 38). Voštinové těsnění je tvořeno tenkými hliníkovými plechy o tloušťce přibližně 0,1 mm uspořádanými do tvaru pravidelných šestiúhelníků. Při případném kontaktu voštinové ucpávky s břitem na bandáži lopatek se břit zařízne, ale nedojde k ovlivnění funkčnosti těsnění ani rotoru, tedy k žádnému zvýšení ztrát. Voštinové těsnění navíc zabráňuje víření, a tedy pomáhá tlumit vibrace rotoru. [17]

6.2.5 Další zařízení turbíny [9]

Účinnost kondenzátoru oproti počátečnímu stavu poklesla. Na teplosměnných trubkách se postupem času ukládají minerální látky obsažené v chladicí vodě, a to vede ke zhoršení součinitele přestupu tepla trubek, který je důležitý pro účinný odvod tepla. Minerály společně s dalšími nečistotami trubky ucpávají, takže i celková teplosměnná plocha se zmenšuje. Dalším problémem je netěsnost celého systému a nasávání vzduchu, který zhoršuje přestup tepla.

Jak bylo řečeno v kapitole 5, trubky kondenzátoru jsou zanesené nečistotami a celková těsnost kondenzátoru se zhoršila. Plášť kondenzátoru zůstane zachován, kompletní výměnou projdou teplosměnné trubky. Zaveden bude také systém kontinuálního čištění. Tento systém se nazývá Taprogge a spočívá v tom, že se do trubek vhání gumové míčky (o nepatrně větším průměru než je průměr trubky) a ty na sebe nachytávají organické i anorganické nečistoty usazené na povrchu trubek. Tento systém tedy zabráňuje dlouhodobému usazování nečistot, které už pak není možné jednoduše odstranit.

Vyměněny budou i regenerační ohříváky, které se potýkají s podobnými problémy jako kondenzátor.

Za nová budou dále vyměněna ložiska, která budou mít oproti původním silnější vrstvu oleje, aby se snížily třecí ztráty. Ložiska budou nově opatřena systémem měření teploty umístěným ve spodní polovině ložiska. Tento systém umožní při nebezpečném zvýšení teploty zastavit turbínu, a předejít tak případnému poškození. Rozměry a typ ložisek musí zůstat stejný z důvodu požadavku provozovatele na zachování původních těles a ložiskových stojanů.

Renovaci musí projít i řídicí a ochranné systémy turbíny. V osmdesátých letech minulého století byly turbíny vybaveny především mechanicko-hydraulickými řídicími a bezpečnostními systémy. Ty vykazují značně nižší spolehlivost a funkčnost a vyžadují častější

a nákladnější údržbu ve srovnání s novými digitálními automatizovanými elektronickými systémy. Vývojem prošly také monitorovací systémy, které v reálném čase poskytují přehled o aktuálních klíčových parametrech v elektrárně – hodnoty tlaků a teplot páry, stav ventilů, tlak mazacího oleje, výkon a otáčky turbíny apod.

6.3 Zhodnocení ekonomických přínosů [9]

V této kapitole bude uveden základní ekonomický výpočet návratnosti retrofitu turbíny. Tento výpočet je velmi zjednodušený, nezahrnuje například úroky od banky za půjčku k financování retrofitu.

Počet hodin v jednom roce je 8 760, z toho je určitá část vyhrazena na pravidelné odstávky, počet provozních hodin za rok t_p bude proto uvažován 8 000. Náklady N na realizaci retrofitu jednoho bloku elektrárny byly stanoveny na 15 mil. €. V Turecku je cena C za jednu MWh 45 €. Výkon bloku bude navýšen o $\Delta P = 18$ MW, což znamená při zachování vstupních parametrů zvýšení termické účinnosti o 1,1%. Zisk Z z navýšeného výkonu za jeden rok bude:

$$Z = t_p \cdot C \cdot \Delta P,$$

$$Z = 8\,000 \cdot 45 \cdot 18 = 6\,480\,000 \text{ €/rok} = 6,48 \text{ mil. € /rok.}$$

Návratnost investice I pak bude:

$$I = \frac{N}{Z},$$

$$I = \frac{15\,000\,000}{6\,480\,000} = 2,31 \text{ roku.}$$

Při zahrnutí bankovních úroků a dalších přídatných nákladů se tato doba prodlouží, oproti instalaci zcela nového elektrárenského bloku bude však výrazně nižší. U retrofitů bývá obecně návratnost okolo tří let.

Ekonomický přínos je dán vylepšením parametrů elektrárenského bloku, zejména zvýšením termické účinnosti bloku. Dále díky nové koncepci těsnění a použití lepších materiálů bude umožněna kratší doba spouštění a zastavování turbíny, což se pozitivně projeví na snížení ekonomických ztrát způsobených odstávkami. Tyto ztráty se také sníží prodloužením intervalu pravidelných odstávek.

Ekonomický přínos zajistí i renovace řídicích systémů. Automatizované systémy kontroly a řízení snižují množství potřebné pracovní síly. Teorie dle literatury [12] říkají, že pro spuštění bloku elektrárny bez automatizovaného systému je potřeba dvanácti pracovníků a dva až tři pracovníci jsou potřeba při běžném provozu. Při použití moderních systémů může být celý blok elektrárny obsluhován pouze jedním pracovníkem.

Aby se co nejvíce eliminovaly ztráty způsobené odstávkou elektrárny, instalace retrofitu bude probíhat v době plánované odstávky.

7. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo provést rešerši modernizace parní turbíny rovnotlakého typu instalované v Turecku na elektrárně Yatagan v roce 1982. V první části je proveden stručný obecný popis jednotlivých částí elektrárny, který je doplněn parametry elektrárny Yatagan. Další část se věnuje popisu parní turbíny a jejím částem, kde je kladen důraz na jejich namáhání a opotřebení. V následujících kapitolách je vysvětlen pojem reverse engineering, popsán aktuální stav zadané turbíny a v šesté kapitole je proveden návrh modernizace. Zde byly popsány nové trendy v oblasti vývoji turbín. Téměř veškerá česky psaná literatura o parních turbínách je několik desítek let stará a neexistuje mnoho českých publikací, které by se věnovaly modernizaci starých turbín. Z toho důvodu by tato práce mohla poskytnout českým čtenářům základní přehled o nových koncepcích v oblasti vývoje parních turbín a také o procesu, jak samotná modernizace probíhá a co všechno jí předchází.

Turbína 13K215 byla vyrobena před více než 30 lety, a používá tak řadu dnes již nevyhovujících technologií. Nahrazeny budou rotory všech tří dílů (NT, ST, VT), které budou celokované, což se pozitivně odrazí na jejich namáhání. Nově použité lopatky byly vyvinuty pomocí výpočetních CFD systémů, jsou lépe tvarované a způsobují menší aerodynamické ztráty. Menší únik páry z turbíny zajišťují nová těsnění, která mají při provozních podmínkách menší radiální vůli a umožňují rychlejší spouštění turbíny. V nízkotlakém dílu bude zrušen Baumannův stupeň a odvod vlhkosti zde bude zajištěn pomocí dutých rozváděcích lopatek. Nové budou také systémy kontroly a řízení.

Pro provozovatele elektrárny je nejdůležitějším údajem na celé modernizaci zvýšení účinnosti. Vyšší účinnosti se může využít dvěma způsoby. Buď může být zvýšen výkon elektrárny při stejném vstupním množství paliva, nebo zůstane výkon stejný, ale sníží se potřebné množství paliva. V tomto případě se zvýšení účinnosti o 1,1% projevilo na zvýšení výkonu o 18 MW. Náklady na modernizaci turbíny činí 15 mil. € a provozovateli by se měly vrátit za méně než 3 roky.

V současné době je kladen velký důraz na snižování ekologické zátěže, kterou tepelné elektrárny zcela jistě jsou. I zde se však množství vypouštěných škodlivin oproti předchozímu století výrazně snížilo, aby byly dodrženy stále se zpřísnující emisní normy. V budoucnosti budou postupně tepelné elektrárny omezovány, současnou poptávku po elektrické energii by ale bez nich nebylo možné naplnit.

Seznam použité literatury

- [1] ŠČEGLJAJEV, Andrej Vladimirovič. *Parní turbíny: Teorie tepelného děje a konstrukce turbín. 1. svazek.* 5. vyd. Praha: SNTL, 1983, 367 s.
- [2] ŠKOPEK, Jan. *Tepelné turbíny a turbokompresory.* 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2010, 248 s.
- [3] ŠKOPEK, Jan. *Parní turbína: Tepelný a pevnostní výpočet.* 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2003, 159 s.
- [4] BEČVÁŘ, Josef a kol. *Tepelné turbíny.* Praha: SNTL, 1968, 544 s.
- [5] KOUTSKÝ, Jaroslav. *Materiály tepelně-energetických zařízení.* 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 1991, 119 s.
- [6] IBLER, Zbyněk. *Elektrárny. 1. svazek.* 1. vyd. Plzeň: VŠSE v Plzni – Ediční středisko, 1984, 220 s.
- [7] Online encyklopedie ČEZ [online, cit. 05. 02. 2016]
Dostupné z <https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/index.htm>
- [8] BERAN, Miloš. *Elektrická zařízení tepelných elektráren.* 1. vyd. Plzeň: VŠSE v Plzni – Ediční středisko, 1988, 250 s.
- [9] Interní dokumentace Doosan Škoda Power
- [10] SKÁLOVÁ, Jana. *Fyzikálně metalurgický slovník.* 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2001, 88 s.
- [11] ŠKORPÍK, Jiří. *Škrzení plynů a par, Transformační technologie,* 2006-01. Brno: Jiří Škorpík. [online, cit, 28. 12. 2015]
Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/skrzeni-plynu-a-par.html>.
- [12] LEYZEROVICH, Alexander Shaulovich. *Steam turbines for modern fossil-fuel power plants.* 1. vyd. Lilburn: The Fairmont Press, 2008, 537 s.
- [13] ŠČEGLJAJEV, Andrej Vladimirovič. *Parní turbíny: Teorie tepelného děje a konstrukce turbín. 2. svazek.* 5. vyd. Praha: SNTL, 1983, 272 s.

- [14] Seznam elektráren v Česku. [online, cit. 05. 02. 2016]
Dostupné z:
https://cs.wikipedia.org/wiki/Seznam_elektr%C3%A1ren_v_%C4%8Cesku
- [15] Tiskové zprávy ČEZ. [online, cit. 27. 03. 2016]
Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy/2760.html>
- [16] FLITNEY, Robert. *Seals and Sealing Handbook*. 6. vyd. Oxford: Elsevier, 2014, 648 s.
- [17] FIALA, Jiří. Rekonstrukce strojevný elektrárny Tušimice II. *All for Power*, 04/2009. [online, cit. 04. 04. 2016]
Dostupné z:
http://www.spinvest.cz/files/Projekt_komplexni_obnovy_elektrarny_Tusimice_All_for_Power_4_2009.pdf
- [18] BENEŠ, Libor. Slitiny titanu. [online, cit. 04. 04. 2016]
Dostupné z: http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/matlet/05_Slitiny%20Ti.ppt
- [19] MÍŠEK, Tomáš. Vývoj ultra dlouhé lopatky 1375 mm. *Technický týdeník*, 20.05.2014 [online, cit. 20. 03. 2016]
Dostupné z: http://www.it.cas.cz/files/u1737/TT_luxa_20_5_2014.pdf
- [20] Těžba a využití černého uhlí [online, cit. 22. 04. 2016]
Dostupné z: <http://tezba-a-vyuziti-cerneho-uhli.webnode.cz/uhli/rozdeleni/>

Seznam a zdroje obrázků

Obrázek č. 1:	Fotografie elektrárny Yatagan.	str. 5
Zdroj:	Interní dokumentace Doosan Škoda Power.	
Obrázek č. 2:	Schéma výrobního bloku uhelné elektrárny.	6
Zdroj:	http://www.casopisstavebnictvi.cz/UserFiles/File/img_0704/39_01_b.jpg	
Obrázek č. 3:	Tangenciální uspořádání hořáků.	7
Zdroj:	http://www.ats4i.com.br/wp-content/uploads/2015/10/cases-7-6.jpg	
Obrázek č. 4:	Kotel s přirozeným oběhem vody.	8
Zdroj (upraveno):	http://www.energyweb.cz/web/EE/images/kotel4.gif	
Obrázek č. 5:	Rotor a stator generátoru.	9
Zdroj:	(a): http://www.chems.msu.edu/classes/321/powerplant/gencoil.jpg (b): http://www.chems.msu.edu/classes/321/powerplant/genrotor.jpg	
Obrázek č. 6:	Schéma kondenzátoru.	10
Zdroj (upraveno):	http://ljlunaenergy.weebly.com/uploads/1/5/1/0/15109272/2454214_orig.jpg	
Obrázek č. 7:	Trubkovnice a těleso kondenzátoru.	11
Zdroj:	(a): http://www.pbspe.cz/data/references/429.jpg (b): http://www.greenspower.co.uk/images/surface_condenser.jpg	
Obrázek č. 8:	Schéma chlazení v chladicí věži.	12
Zdroj (upraveno):	http://www.hamon.com/medias/upload/images/NaturalDraft(5).jpg	
Obrázek č. 9:	Schéma odplyňováku.	13
Zdroj (upraveno):	https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/80/Deaerator.png	
Obrázek č. 10:	Model parní turbíny.	14
Zdroj:	http://www.cblade.it/photo/pages/SST.gif	
Obrázek č. 11:	Tvar rozváděcích a oběžných lopatek (rovnotlakého stupně)	14
Zdroj:	[1] – str. 94.	
Obrázek č. 12:	Porovnání tvaru lopatek přetlakového a rovnotlakého stupně.	15
Zdroj (upraveno):	(a): https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/54/Fig6-Subik_Kumar-Schematic_Diagram_of_Pressure_compounded_Reaction_Turbine.jpg (b): https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/80/Fig3-Subik_Kumar-Schematic_Diagram_of_Pressure_compounded_Impulse_Turbine.jpg	
Obrázek č. 13:	Oběžná lopatka.	16
Zdroj (upraveno):	http://componentaperfecta.cz/files/portfolio-images/3111525_lopatka.jpg	
Obrázek č. 14:	Zámek lopatky.	16
Zdroj:	Interní dokumentace Doosan Škoda Power.	
Obrázek č. 15:	Eroze koncové lopatky.	17
Zdroj:	http://turbinass.ru/wp-content/uploads/2014/12/15.jpg	

Obrázek č. 16:	Různé typy a tvary nožky oběžných lopatek.	17
Zdroj:	[1] – str. 261.	
Obrázek č. 17:	Celokovaný rotor.	20
Zdroj:	http://www.doosanheavy.com/common/img/m/products/cast/power03.jpg	
Obrázek č. 18:	Horní část tělesa turbíny.	21
Zdroj:	http://www.doosanheavy.com/common/img/m/products/cast/power04.jpg	
Obrázek č. 19:	Spodní část tělesa turbíny.	21
Zdroj:	http://www.chems.msu.edu/classes/321/powerplant/tophousing.jpg	
Obrázek č. 20:	Radiální a segmentové axiální ložisko pro uložení rotoru.	22
Zdroj:	(a) http://cdn.powermag.com/wp-content/uploads/2008/01/520004dd44f16-51-04.jpg (b) http://www.industrycortex.com/files/1/37356/251779074.jpg	
Obrázek č. 21:	Pravé a nepravé labyrintové těsnění.	22
Zdroj:	http://www.transformacni-technologie.cz/obrazky/943.gif	
Obrázek č. 22:	Těleso s těsníci bříty.	23
Zdroj:	http://www.cholaturbo.com/www.cholaturbo.com/wp-content/uploads/2012/10/Laby-Sealing1.jpg	
Obrázek č. 23:	Regulační ventily.	23
Zdroj:	http://www.chems.msu.edu/classes/321/powerplant/InletValve1.jpg	
Obrázek č. 24:	Proces vzniku retrofitu.	25
Zdroj:	Interní dokumentace Doosan Škoda Power.	
Obrázek č. 25:	Skenování tělesa turbíny a skenovací zařízení Leica.	26
Zdroj:	Interní dokumentace Doosan Škoda Power.	
Obrázek č. 26:	Místa pro odběr vzorků.	27
Zdroj:	Interní dokumentace Doosan Škoda Power.	
Obrázek č. 27:	Uspořádání turbínových stupňů turbíny 13K215.	27
Zdroj:	[13] – str. 459.	
Obrázek č. 28:	Prodloužení životnosti turbíny.	29
Zdroj:	Interní dokumentace Doosan Škoda Power.	
Obrázek č. 29:	Použití Baumannova stupně v nízkotlakém dílu turbíny.	31
Zdroj:	[1] – str. 324.	
Obrázek č. 30:	Odstranění vlhkosti z koncových stupňů turbíny.	32
Zdroj:	Interní dokumentace Doosan Škoda Power.	
Obrázek č. 31:	Původní a vylepšený profil lopatky.	32
Zdroj (upraveno):	[12] – str. 100.	
Obrázek č. 32:	Porovnání klasického a 3D lopatkování.	32
Zdroj (upraveno):	[12] – str. 106.	
Obrázek č. 33:	Pevnostní analýza koncové lopatky.	33
Zdroj:	[19] – str. 1	

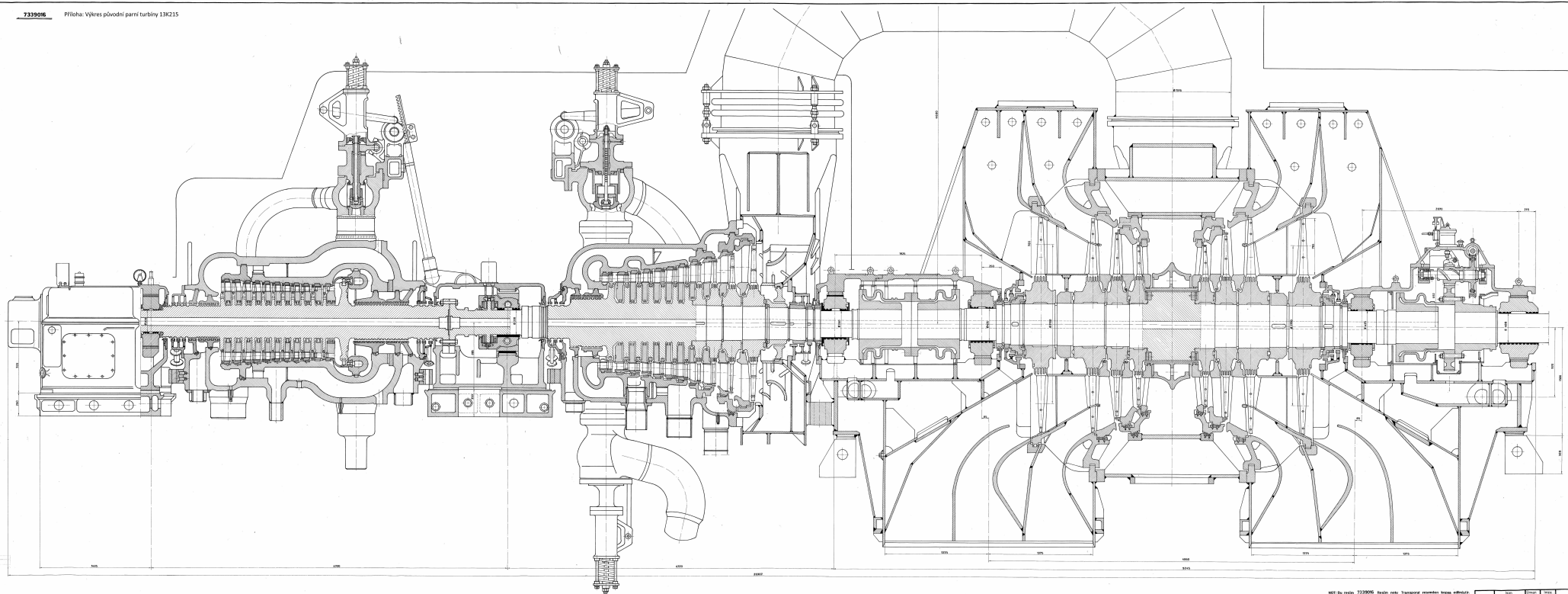
Obrázek č. 34:	CFD simulace proudění.	33
Zdroj:	Interní dokumentace Doosan Škoda Power.	
Obrázek č. 35:	Labyrintové těsnění s proměnnou radiální vůlí.	34
Zdroj:	http://turbolab.tamu.edu/proc/turboproc/T30/t30pg057.pdf – str. 59 a 60.	
Obrázek č. 36:	Kartáčové těsnění.	35
Zdroj:	http://www.ethosenergygroup.com/catalogs/masterpage/ethos/img/slides/Retractable-Packing-slide-2.jpg	
Obrázek č. 37:	Těsnění s povlakem.	35
Zdroj:	Interní dokumentace Doosan Škoda Power.	
Obrázek č. 38:	Voštinové těsnění.	36
Zdroj:	Interní dokumentace Doosan Škoda Power.	

Seznam tabulek

Tabulka č. 1:	Základní parametry elektrárny Yatagan.	str. 5
Tabulka č. 2:	Parametry kotle a paliva.	8
Tabulka č. 3:	Technické parametry generátoru TWW-215-2.	9
Tabulka č. 4:	Technické parametry kondenzátoru elektrárny Yatagan.	11
Tabulka č. 5:	Parametry skenovacího zařízení Leica P20.	26

Seznam příloh

Příloha č. 1:	Výkres původní parní turbíny 13K215.
---------------	--------------------------------------



Mřížový výkres 733806 podle návrhu Transvapor uvedené bezpečnosti

Číslo výkresu	733806	Číslo listu	1/1
Číslo části	733806	Číslo skupiny	01
Číslo dílu	733806	Číslo výroby	0001

TKK
MAGNETNÝ KESIT
KAPITÁLNÍ
KAPITÁLNÍ
KAPITÁLNÍ

733806
1:1
1:1
1:1

TKK
MAGNETNÝ KESIT
KAPITÁLNÍ
KAPITÁLNÍ
KAPITÁLNÍ

TKK
MAGNETNÝ KESIT
KAPITÁLNÍ
KAPITÁLNÍ
KAPITÁLNÍ

TKK
MAGNETNÝ KESIT
KAPITÁLNÍ
KAPITÁLNÍ
KAPITÁLNÍ