

## UČEBNÍ TEXTY VYSOKÝCH ŠKOL

---

Vysoké učení technické v Brně

Fakulta strojního inženýrství

**Ing. Libor Kornia**

# PARNÍ TURBÍNY

## Provozní zkušenosti

## **PŘEDMLUVA**

Cílem této práce je popsat práci zkušebního technika parních turbín s řešením možných základních problémů při uvádění nových turbín (také turbín po GO) do provozu.

V teoretické části je na úvod popsána historie parních turbín a jejich provozování, důležité základní části parní turbíny mající vliv na bezporuchový chod a výkon turbíny.

Brno, prosinec 2019

Ing. Libor Kornia  
Zkušební technik parních turbín



## **PODĚKOVÁNÍ**

Na tomto místě bych rád poděkoval doc. Ing. Janu Fiedlerovi, Dr. za cenné připomínky a odborné rady, kterými přispěl k vypracování tohoto skriptu, dále pak Ing. Veronice Slabé za přepis a korektury textu.

# OBSAH

1	ENERGETIKA.....	6
1.1	Budoucnost energetiky v ČR.....	6
1.2	Základní pojmy energetiky.....	6
1.3	Proč se k dálkovému přenosu elektrické energie používá co nejvyšší napětí?.....	7
1.4	Proč se k dálkovému přenosu energie běžně nepoužívá napětí vyšší než 400kV?.....	8
1.5	Co je to BLACKOUT?.....	8
2	ELEKTROENERGETIKA.....	9
2.1	Výroba energie .....	9
2.2	Tepelné elektrárny .....	13
2.3	Vodní elektrárny.....	19
2.4	Větrné elektrárny .....	21
2.5	Sluneční elektrárny.....	23
2.6	Jaderné elektrárny.....	24
2.7	Paroplynové elektrárny.....	25
2.8	Parní turbíny .....	27
3	UVÁDĚNÍ NOVÉ TURBÍNY DO PROVOZU .....	45
4	ZASOLOVÁNÍ TURBÍN .....	51
4.1	Napájecí voda.....	51
4.2	Zasolování .....	51
4.3	Způsoby odstraňování solí.....	52
5	CHVĚNÍ TURBÍN (VIBRACE).....	54
6	VYVAŽOVÁNÍ ROTORŮ.....	56
7	ZKOUŠKA VAKUA A SYSTÉMU UCPÁVKOVÉ PÁRY (turbína odstavena).....	56
8	PŘIHRÍVÁNÍ PÁRY .....	58
9	REGENERACE TEPLA .....	58
10	NAVRHOVÁNÍ CYKLU .....	59
11	ZÁVĚR.....	61
11.1	Praktické poznámky a zkušenosti z provozu parních turbín .....	61
11.2	Správný prohřev je základem pro další provozování turbíny.....	64
12	PŘÍLOHY .....	67
13	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	76

# 1 ENERGETIKA

## 1.1 Budoucnost energetiky v ČR

Česká republika zatím vytváří více elektřiny, než spotřebuje. Největší množství české elektřiny bylo exportováno do Rakouska a Slovenska, naopak klesl export elektřiny do Německa (uvedená fakta jsou ze zdroje Energetického regulačního úřadu – ERU).

Nutno podotknout, že do exportu elektřiny se také započítává veškerá elektrická energie, která prochází Českou republikou, tudíž se nejedná o zvýšení čistého exportu.

V posledních letech je dán zvýšený důraz na mezinárodní a politický aspekt energetiky. Řada problematických zemí se snaží využívat energetiku jako nástroj k ofenzivnímu prosazování politických cílů.

Budoucnost energetiky v ČR – bez uhlí či jádra se neobejdeme.

Počítá se s dostavbou bloků jaderných elektráren Dukovany a Temelín. Lze také předvídat prolomení územně ekologických limitů těžby uhlí. Je dále velice diskutabilní vydávání emisních povolenek. Ministerstvo průmyslu a obchodu (MPO) – tuto část problematiky nechme na politických „odbornících“. Plánovat v takto dynamickém odvětví jakoukoliv investici s perspektivou 20–30 let je riskantní, ale lze jednoznačně říci, že zatím bez fosilních paliv se energetika neobejde.

Pozn.:

Je všeobecně známo, že na spalování uhlí, ropy a zemního plynu se vynakládají značné dotace, a to včetně externích sociálních a environmentálních nákladů.

Studie Centra pro otázky životního prostředí Univerzity Karlovy uvádí, že externí náklady spojené s domácími uhelnými elektrárnami přesahují 50 miliard korun ročně.

Jisté instituce upozorňují na nebezpečí vyčerpání všech zásob fosilních paliv dokonce již během 30 let.

Václav Smil – jeden z nejznámějších vědců věří, že zdroje lidstvu jen tak nedojdou: že bychom fyzicky vytěžili všechna fosilní paliva je úplný nesmysl.

A takto bychom mohli pokračovat s dalšími protichůdnými zprávami a výroky, avšak toto téma není předmětem těchto učebních textů.

## 1.2 Základní pojmy energetiky

### Elektrizační soustava

- je vzájemně propojený technický soubor zařízení pro výrobu, přenos, transformaci a distribuci elektřiny
- elektrizační soustavu dále členíme na *přenosovou* a *distribuční* soustavu.

*Přenosová soustava* je charakterizována:

- zasmyčkovanou sítí o napětí 400kV a 220kV
- vyvedením výkonů velkých elektráren
- propojením do soustav sousedních států pomocí hraničních vedení
- spolehlivostí přenosu
- stabilitou přenosu i při mimořádných stavech
- regulací frekvence (v Evropě 50 Hz)

*Distribuční soustava* je charakterizována:

- napěťovými úrovněmi od 110kV až po sítě nízkého napětí (nn)
- jsou z ní zásobováni odběratelé
- jsou do ní vyvedeny zdroje nižšího výkonu (řádově do výkonu desítek MW)

#### Distribuční síť

V transformační stanici se velmi vysoké napětí (VVN) transformuje na vysoké napětí (VN) 110kV, část elektrické energie se převádí do velkých podniků těžkého průmyslu a do měníren pro usměrňování střídavého proudu na stejnosměrný, nejčastěji pro potřeby napájení stejnosměrných trakčních vozidel (lokomotivy, tramvaje, trolejbusy).

Zbývající část se distribuuje k dalším spotřebitelům (lehký průmysl, města, obce), kde se transformuje na napětí 22kV. K poslední transformaci na nízké napětí (NN) 230 V a 400 V dochází v samotných podnicích, obcích a městských čtvrtích. Do našich domácností tak přichází elektrický proud (NN) nízkého napětí.

Elektrárny vyrábějí střídavý proud o napětí několik tisíc voltů. Pro přenos na velké vzdálenosti se toto napětí přímo v elektrárně transformuje na VVN 110kV, 220kV nebo 400kV. Spojovacím prvkem mezi přenosovou a distribuční částí rozvodné sítě jsou transformační stanice.

#### Transformátor

- je netočivý elektrický stroj pracující na principu elektromagnetické indukce, který přeměňuje střídavý proud o určitém napětí na střídavý proud o jiném napětí, při jeho nezměněném kmitočtu.

### **1.3 Proč se k dálkovému přenosu elektrické energie používá co nejvyšší napětí?**

Důvodem je snížení ztrát při přenosu. I nejlepší vodiče kladou elektrického proudu odpor  $R$ , průchodem proudu se vodič zahřívá a část elektrické energie se mění na teplo. Velikost tepelných ztrát  $Q$  závisí nejen na odporu vodiče, ale především na druhém mocnině procházejícího proudu (viz vztah:  $Q = R \cdot I^2$ )

Pro výpočet elektrického výkonu platí vztah:  $P = U \cdot I$

$P$  – výkon ve wattech [W]

$U$  – napětí ve voltech [V]

$I$  – proud v ampérech [A]

Dalším důvodem, proč měnit napětí je uveden v následujícím příkladu:

- Proud z velkého alternátoru může mít hodnotu více než 2000 A.
- Pro vedení takto vysokého proudu bychom potřebovali vodiče velkých průřezů s velkými ztrátami (velký úbytek napětí na vedení a tím značný úbytek výkonu). Proto se využívá transformátoru ke zvýšení napětí a snížení proudu. Poté může být energie rozvedena slabšími, lehčími a levnějšími kabely s min. ztrátami.
- Výhodou střídavého proudu oproti stejnosměrnému je možnost transformace. Když při přenášení stejného výkonu zvýšíme transformátorem napětí jen desetkrát, klesne proud v ampérech na desetinu a ztráty způsobené odporem poklesnou na setinu ( $P = U \cdot I$ ).

Pozn.: Je známo, když proud prochází supravodivou látkou, nevzniká teplo. Supravodivými jsou některé kovy v blízkosti absolutní nuly ( $-273^\circ = 0^\circ\text{K}$ ), kdy nemají žádný odpor.

## **1.4 Proč se k dálkovému přenosu energie běžně nepoužívá napětí vyšší než 400kV?**

Důvodem je elektrické pole kolem vodičů, které je při vyšších napětí už tak silné, že zejména na hrotech a ohybech malých poloměrů vzniká tzv. korona (samovolný výboj). Zvláště ve vlhkém počasí tato korona způsobuje sršení (slyšitelné jako praskot a viditelné jako světélkování v okolí vodičů) a toto výrazně zvyšuje ztráty elektrické energie.

Pozn.: Výpočet počáteční hodnoty fázového napětí (kritického napětí  $u_k$ ), kdy nastává výboj je dán vzorcem, uvedeným v příloze vyhlášky č. 153/2001 Sb.

## **1.5 Co je to BLACKOUT?**

- Je totální výpadek dodávky elektrické energie z přenosové soustavy nebo rozsáhlé systémové poruchy těchto soustav.
- Důsledkem jsou vysoké ekonomické ztráty, ohrožení zdraví života a majetku obyvatel, kolaps v dopravě, nárůst kriminality
- Poslední případy BLACKOUT: r. 2015 – Amsterdam, Istanbul



## 2 ELEKTROENERGETIKA

### 2.1 Výroba energie

Hlavní podíl spotřeby energie ve světě, zhruba 85 %, je v současné době získáván z fosilních paliv (jedná se o tzv. vyčerpatelné zdroje energie – černé a hnědé uhlí, ropa, zemní plyn, uran – jaderná paliva).

U zemního plynu je však nebezpečná zvyšující se závislost na dovozech těchto energetických produktů.

Výstavby velkých uhelných elektráren byly vázány na blízkost uhelných dolů ale i většího zdroje vody a také blízkost rozvodné (přenosové) sítě.

Výroba elektrické energie v tepelných elektrárnách je složitý proces, který se uskutečňuje v základní výrobní jednotce tzv. bloku: kotel – turbína – alternátor.

Bližší popis práce turbína – alternátor bude v odstavci „TURBÍNY“.

Některé tepelné elektrárny mají rovněž funkci tepláren, protože kromě elektrické energie dodávají tepelnou energii (teplo) pro technologické účely, otop či ohřev topné a užitkové vody.

#### Poznámky ve stručnosti:

Lignit – Hnědé uhlí – těžba v povrchových dole (Mostecká a Sokolská pánev)

Antracit – Černé uhlí – těžba v hlubinných dolech (Karvinsko, Ostravsko)

Vytěžená hmota v povrchových dolech neobsahuje pouze uhlí, ale i příměsi, např. v Mostecké pánvi se musí vytěžit cca 5-7 m<sup>3</sup> na jednu tunu uhlí (nutnost třídění a odstranění příměsí).

*Výhřevnost černého uhlí* je přibližně 30MJ/kg v závislosti na kvalitě uhlí. Černé uhlí obsahuje více uhlíku a méně popelovin, síry a těkavých látek

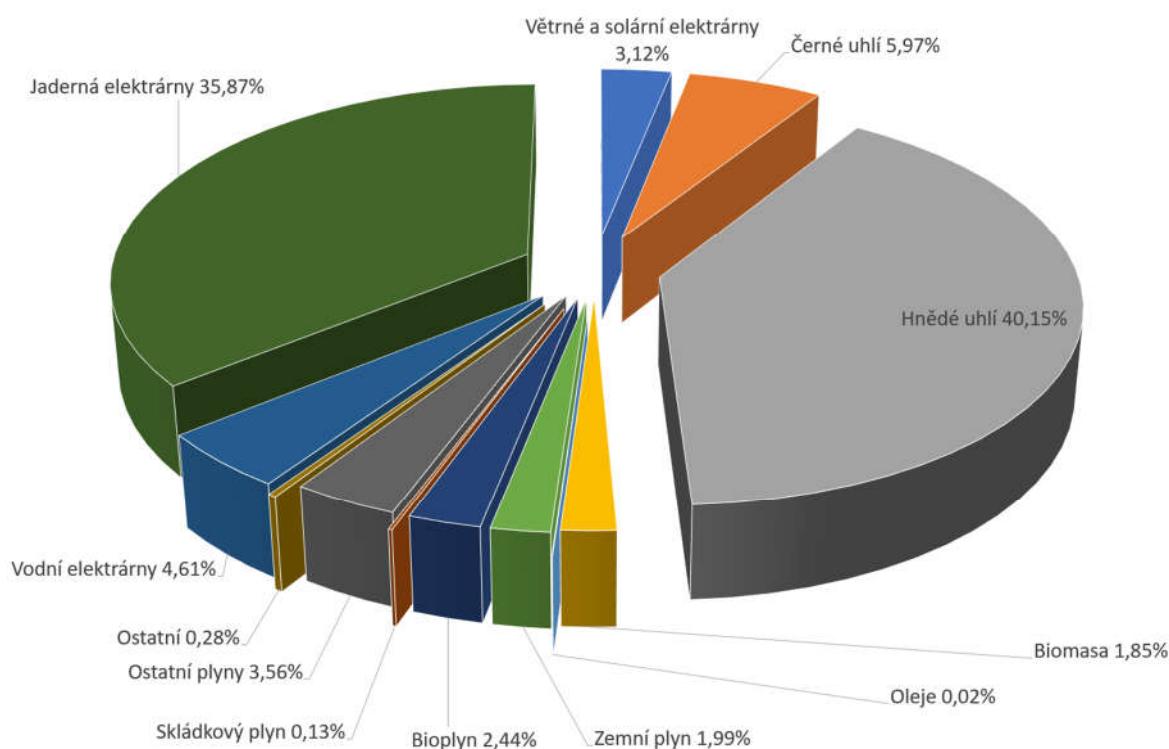
*Výhřevnost hnědého uhlí* je přibližně 18MJ/kg v závislosti na kvalitě uhlí. Hnědé uhlí obsahuje méně uhlíku a více popelovin, síry a těkavých látek.

Elektrárny spotřebují část energie na samotný výrobní proces. Pokud od hrubé výroby elektrárny odečteme elektřinu odebranou při samotné výrobě, dostaneme čistou výrobu elektřiny, tedy množství energie, které skutečně můžeme použít – viz Tab. 1.

Tab. 1 Vlastní spotřeba na výrobu elektřiny (jako % z celkového množství vyrobené elektřiny daným způsobem)

Druh paliva	% z celkového množství vyrobené elektřiny
Oleje	15,2 %
Hnědé uhlí	9,6 %
Biomasa	9,2 %
Černé uhlí	7,9 %
Bioplyn	7,5 %
Skládkový plyn	6,0 %
Jaderné elektrárny	5,7 %
Zemní plyn	3,9 %
Ostatní plyny	3,6 %
Solární elektrárny	0,9 %
Větrné elektrárny	0,9 %
Vodní elektrárny	0,8 %

Dle zpracované studie Centra pro otázky životního prostředí Univerzity Karlovy v Praze vyplývá, že měrné náklady na výrobu elektřiny z uhlí dosahují v ČR průměrné hodnoty 1,4 Kč/KW. Emisní povolenky však tuto cenu v roce 2019 zvyšují.



Obr. 1 Čistá výroba elektřiny podle paliva v ČR

Spotřeba energie v domácnosti:

- Vytápění cca 63 %
- Ohřev vody cca 20 %
- Spotřeba elektřiny (osvětlení, chlazení, pračka, myčka, příprava pokrmů) 17 %

Výhřevnost je vlastnost paliva, která udává, kolik energie se uvolní úplným spálením 1 kg paliv. Proti spálenému teplu není v hodnotě zahrnuto měrné skupenské teplo páry obsažené ve spalinách

Matematicky:  $H = Q/m$  [J.kg<sup>-1</sup>]

Q = uvolněné teplo

m = hmotnost paliva

Informativní srovnání výhřevnosti různých paliv v [kJ/kg] (při 20°):

- Vodík: 119 550
- Methan: 50 010
- Ethan: 47 800
- Propan: 46 360
- Butan: 45 750
- Ethanol: 28 860
- Smrk: 13 100
- Jedle: 14 000

- Borovice: 13 600
- Hnědé uhlí: 12 000 – 18 000
- Černé uhlí: 22 000 – 30 000
- Koks: 32 000

*Karbonizace uhlí* – koksování se provádí ohřevem za nepřístupu vzduchu.

Hutní koks o velké mechanické pevnosti, vhodný pro vysoké pece, se získává vysokoteplotním koksováním černého uhlí při teplotě 900–1200°C. Méně kvalitní černé nebo hnědé uhlí se karbonizuje spíše při nižších teplotách 500-750 °C a pevným produktem je bezdýmové palivo – polokoks.

V současné době koksovný zajišťují výrobu koksu již téměř výhradně pro metalurgii.

#### Generátorový plyn

- Je plynné palivo z koksu vyráběné v tzv. generátorech
- Jednoduché generátory vypadaly jako konvenční kamna s vrstvou žhavého koksu, kterou se protahoval vzduch
- Při prvním kontaktu dochází k exotermické oxidaci uhlíku  
 $C + O_2 \rightarrow CO_2$
- Ale při vyšší teplotě reaguje  $CO_2$  endotermně s dalším uhlíkem žhavého koksu  
 $CO_2 + C \rightarrow 2CO$
- Vzniklá směs, CO a zbylého  $N_2$  ze vzduchu je nízkovýhřevné palivo nazývané *generátorový plyn*

Uhelné elektrárny mají účinnost do 35 %, moderní uhelné elektrárny až 42 %.

Každá uhelná elektrárna si pro případ přerušení dodávek uhlí musí udržovat zásobu alespoň na několikadenní provoz. Energetické uhlí je náchylné k samovznícení, ke kterému dochází oxidací, tedy probíhá děj exotermický, tj. že se při něm uvolňuje teplo. Pokud tento děj nastane za vhodných podmínek (dostatečný rozsah oxidace a nedostatečný odvod tepla), pak se teplo hromadí a uhlí se samovolně zahřívá, což může nakonec vyústit až k jeho vznícení.

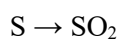
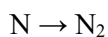
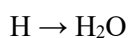
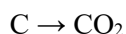
Důležitý je také správný obsah vlhkosti. Voda přes své vodíkové můstky pomáhá přenášet elektrony během těchto oxidačních reakcí (podobně jako při korozi železa).

U suchého uhlí proto samovznícení prakticky nehrozí, jelikož oxidace je pomalá. Pro samovznícení uhlí tedy existuje určitá optimální vlhkost.

Již v počátečních dobách provozu uhelných elektráren provozovatelé získali zkušenosti, že k samovznícení, ke kterému dochází oxidací, často docházelo, při vyšší vlhkosti ovzduší, jakmile výška haldy uhlí jako zásoba přesáhne 6 – 8m výšky. Proto byly haldy protaženy spíše do šířky a délky a zhutňovaly se pásy buldozérů, aby se drobné uhlí co nejméně ocitlo ve styku se vzduchem.

Pozn.: Velko-elektrárna s několika bloky o celkovém výkonu 100MW spálí ročně kolem 3 milionů tun uhlí, tj. 60 tisíc vagonů. Při jeho skladování a manipulaci se počítá se ztrátou 1 až 4% paliva.

Spalování paliv je oxidace, v ideálním případě dokonalá oxidace, při které prvky paliva přejdou:



### Stručně o spalování uhelného paliva v kotli

U elektrárenských kotlů je nutno rozptýlit částice paliva do potřebného objemu vzduchu, při čemž topeniště musí být tak veliké, aby celé hoření proběhlo dříve než částice a její popelový zbytek dopadl na dno topeniště. Rychlému pádu větších částic na dno se dá zabránit vzestupným proudem vzduchu, čímž se částice běžných rozměrů (10–20 mm) dostanou do vznosu a dojde k tzv. *fluidnímu spalování*. Fluidní topeniště vyžaduje výkonné ventilátory pro dmýchání vzduchu, částice paliva jsou tak trvale oplachované vzduchem a při tom z nich opadáva nehořlavý zbytek, která jako polétavý popílek je zachycován v mechanických nebo elektrostatických filtrech, které jsou umístěny v prostorách před komínem.

Těžší ložový popel se vypouští spodem topeniště.

Fluidní topeniště umožňuje přidávat do prostoru i další přísady, nejčastěji vápenec pro odsiřování, neboť váže  $\text{SO}_2$  z plyných emisí méně kvalitních paliv.

Velké elektrárny jsou z ekologického hlediska problematické, neboť produkují velký objem škodlivých emisí:

- Oxid dusíku  $\text{NO}_x$
- Oxid siřičitý  $\text{SO}_2$
- Oxid uhličitý  $\text{CO}_2$  (podílí se na vzniku tzv. skleníkového efektu)
- Prachové částice

Proto jsou všechny elektrárny povinně vybaveny odlučovači popílku a odsiřovacími jednotkami, které snižují množství emisí vypouštěných do ovzduší.

Ceny uhlí v Evropě vzrostly během roku 2016 o závratných 69 %.

Producenty uhlí trápí především snižující se poptávka a na základě toho jsou nuceni snižovat těžbu. Tato klesla meziročně o 10 %.

Přímou reakcí je zvyšování ceny uhlí. Lze očekávat, že uhelný byznys bude dále upadat a do čela se budou dostávat obnovitelné zdroje energie, i když tento přechod má v současné době svá negativní úskalí a může trvat několik desetiletí.

Ceny uhlí také později ovlivní tzv. *anti-fosilní zákon*, který by měl platit od roku 2018. Ten chce do budoucna snížit závislost ČR na fosilních palivech, mezi něž patří zejména uhlí, ropa a zemní plyn, na základě speciálního zdanění fosilních paliv.

Anti-fosilní zákon má již delší dobu celá řada evropských zemí. Dle tohoto zákona se má závazně řídit snižování emisí skleníkových plynů.

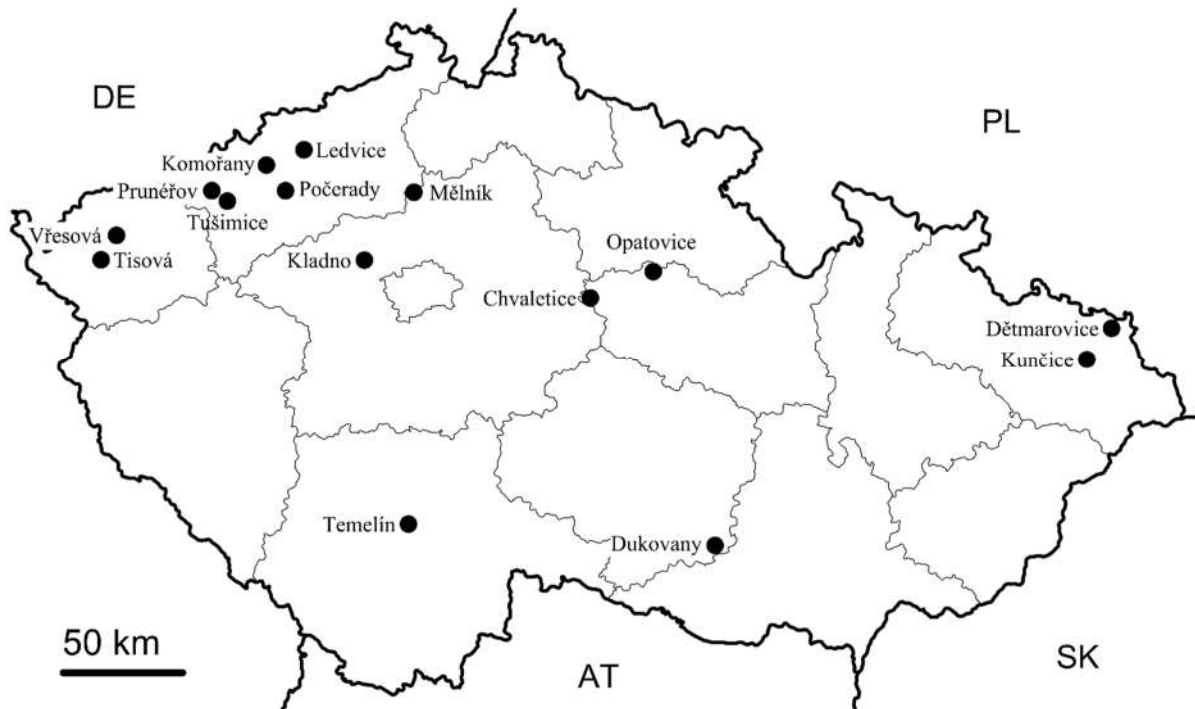
Dalším nástrojem podporující útlum používání uhlí bude tzv. klimatická dohoda, která byla Evropským parlamentem schválena 4.10.2016, a vstoupila v platnost 4.11.2016 což v podstatě znamená boj proti zvyšování emisí skleníkových plynů a tím využívání uhlí v energetice. Tato dohoda znamená začátek konce fosilních závislosti ve výrobě elektrické energie.

Česká republika se zavázala EU v rámci programu snižování emisí  $\text{CO}_2$  k nárůstu výroby energie z OZE (obnovitelné zdroje energie). Zdá se, že OZE je ideálním zdrojem elektrické energie, ale opak je pravdou, OZE je nespolehlivý dodavatel energie. Prostě nedodává energii, kdy potřebujeme, ale pouze pokud je např. dostatek vody, fouká vítr nebo svítí slunce. Někdy je to přesně naopak, než potřebujeme. V zimních měsících, kdy je spotřeba nejvyšší, tak fotovoltaická elektrárna prakticky nevyrábí a v letních měsících opačně.

Kdo tyto nedostatky OZE ignoruje, může neuváženým rozšiřováním OZE poškodit naši přenosovou soustavu s možností vzniku nebezpečí tzv. Blackout, což je totální výpadek celé rozvodné sítě v ČR.

## 2.2 Tepelné elektrárny

V ČR se nachází 10 velkých uhelných elektráren s výrobou nad 200MW a několik desítek dalších menších zdrojů (viz Obr. 2). Z uhelných elektráren také pochází největší podíl vyrobené elektřiny (cca 62 %).



Obr. 2 Mapa velkých tepelných elektráren v ČR

### 2.2.1 Proces výroby energie ve velkých uhelných elektrárnách 100MW a více

#### 1. Úprava uhlí

V *úpravě uhlí* dochází k drčení na uhlý prach, následně je pomocí pásových dopravníků dopravováno do části *zauhlení*, kde je stále udržováno určité množství zásob uhlí. Pod zauhlením se nacházejí zásobníky (násypky), odkud je uhlí mechanicky shrabováno na pásové zásobníky a ty to uhlí transportují do kotelný do tzv. uhelných bunkrů, ze kterých se uhlí dopravuje do mlýna, kde je rozemleto na nejjemnější frakci a spolu s předehřátým vzduchem je foukáno pomocí hořáků přímo do spalovací komory kotle.

#### 2. Spalování

Nadrcený uhlý prach se „vstříkuje“ do kotle kde dochází ke kvalitnímu spalování. Spaliny vzniklé při spalování uhlí, jsou vedeny přes elektrostatický odlučovač prachu a přes filtry k odsíření a poté jdou komínem do ovzduší.

#### 3. Přeměna energie

Teplo vzniklé spalováním uhelného prachu v kotli ohřívá v primárním okruhu upravenou vodu, která se v kotli mění na přehřátou páru a tato je vedena do turbíny v níž roztáčí přes rotorové a statorové lopatky rotor turbíny, který je spojen s alternátorem, ve kterém dochází k výrobě elektrické energie. Tato

elektrina je vedena do blokového transformátoru, který se nachází v blízkosti generátoru. V transformátoru se upravuje napětí na distribuční nebo přenosovou hladinu o napětí 110 až 400 kV a pak je vyvedena do rozvodné sítě.

#### 4. Chlazení

Pára, která v turbíně předala svou energii, je svedena do kondenzátoru, v něm se ochladí a zkondenzuje. Pomocí kondenzátních čerpadel se kondenzát opět vrací do kotle. V kondenzátoru je pára ochlazována surovou (neupravenou) vodou. Tato chladicí voda se zde ohřeje, a proto je z kondenzátoru vedena do chladících věží, kde se ochladí a vrací se zpět do chladicího okruhu – do kondenzátoru. Úbytek chladicí vody vzniklý jejím odpařením v chladicí věži, je doplňován z vodních toků.

#### 5. Účinnost

Účinnost přeměny energie v moderních uhelných elektrárnách se pohybuje kolem 42 %.

Druhým největším zdrojem jsou elektrárny jaderné (cca 35 %).

Ve výrobě elektriny celosvětově převažují tzv. fosilní paliva.

Fosilní proto, že vznikala z fosilií, tedy odumřelých těl živočichů a rostlin z doby prvohor až třetihor. Obsahují velké množství uhlíku (C), jehož sloučeniny se díky podmínkám bez přístupu kyslíku nemohly kompletně rozložit. Mezi fosilní paliva řadíme uhlí, ropu, zemní plyn a také uran pro jaderné elektrárny.

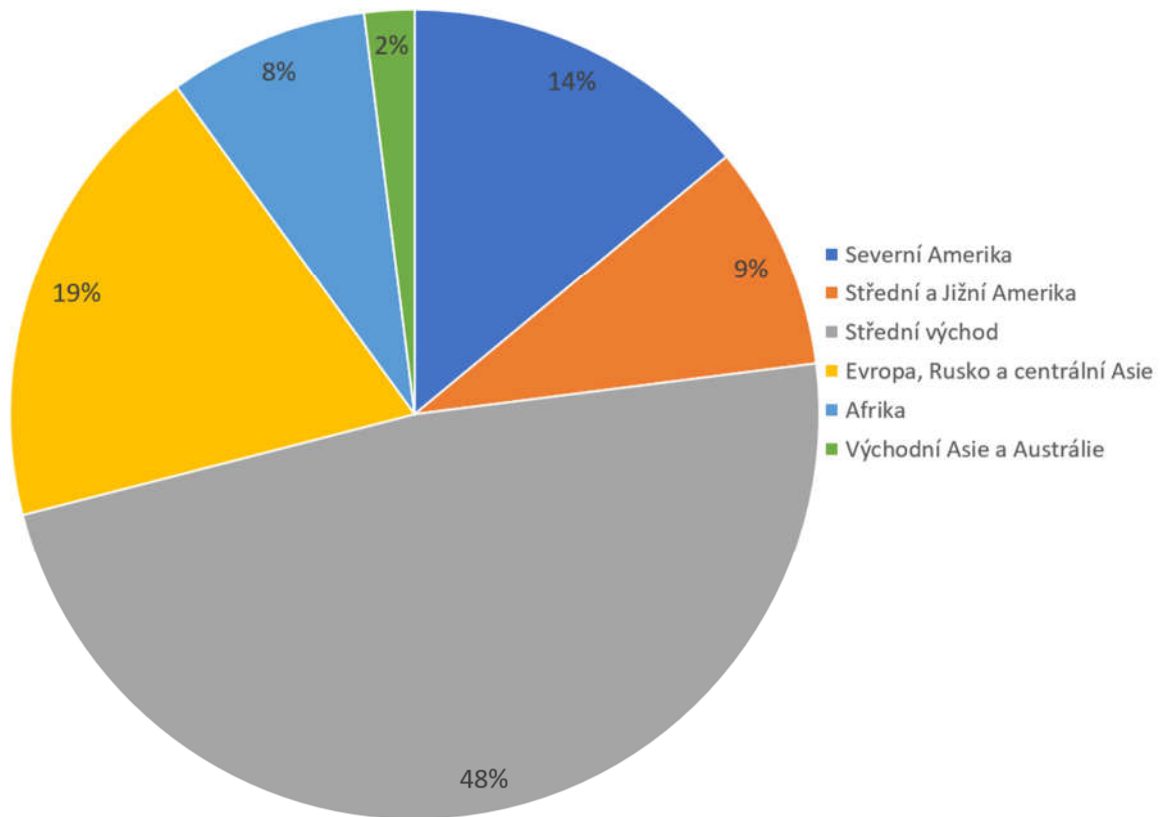
Fosilní paliva jsou neobnovitelné zdroje energie (nemají schopnost obnovy). Otázkou je, kdy k vyčerpání zásob dojde.

Dle různých odborných institucí a jejich prognóz by situace vyčerpání zásob byla následující (jedná se pouze o odhady):

- Ropa cca 55 let (jedná se o snadno vytěžitelná ložiska)
- Zemní plyn cca 100 let
- Uhlí cca 200 – 300 let

### 2.2.2 Ropa

Ropa je nejvýznamnější strategickou surovinou současnosti, za kterou zatím neexistuje plnohodnotná náhrada (Obr. 3).

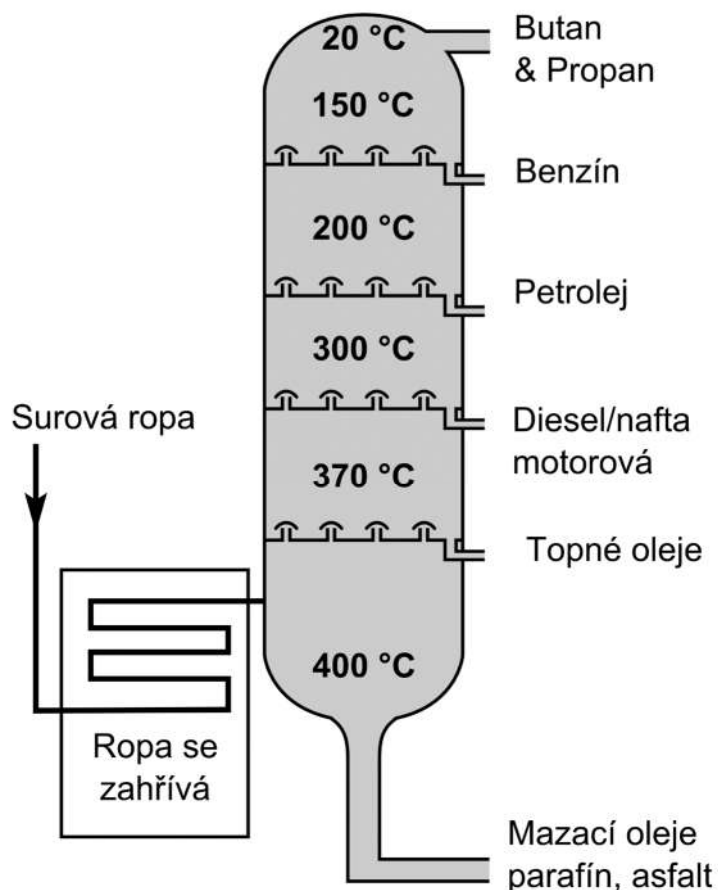


Obr. 3 Těžba ropy ve světě

Ropa se zpravidla nepoužívá přímo jako palivo v energetice. Jejím dělením (destilací) se oddělí zajímavé složky jako motorová paliva, suroviny pro chemický a petrochemický průmysl a také komerčně zajímavé zbytky – známé jako mazut.

Vytěžená ropa obsahuje anorganické soli (hlavně NaCl), které působí korozi. Racionální je zbavit se velkého podílu solí ještě před přepravou (potrubní, tankery, cisternové vagony). Ropa se propírá vodou, přičemž elektrostatickým proudem (asi 20 000 V) se usnadňuje spojování drobných, jemně rozptýlených kapiček, tzv. koalescence.

Základním dělicím procesem pro ropu je *frakční destilace* viz Obr. 4.



### Frakční destilace

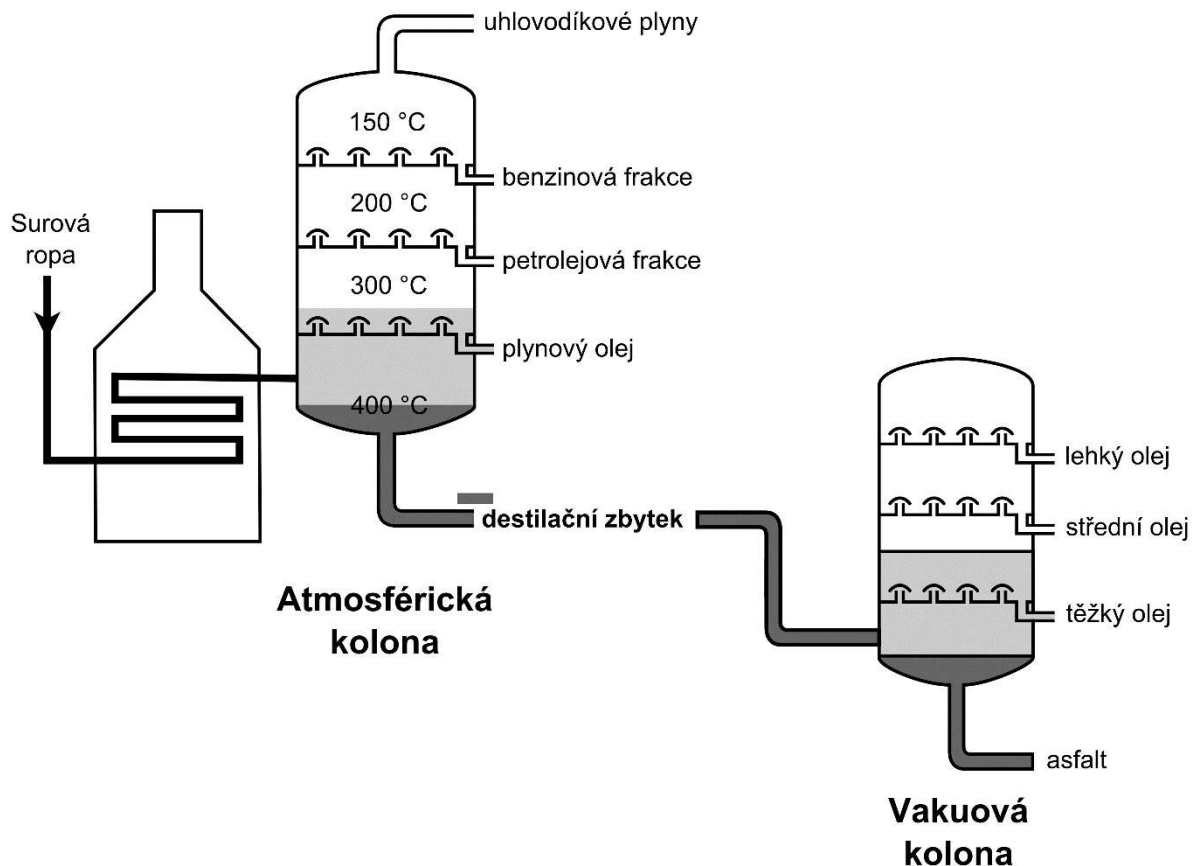
Obr. 4 Frakční destilace ropy

Pokud ropa obsahuje významné množství plynných uhlovodíků, oddělí se tyto lehké složky při poměrně nízké teplotě ve stabilizační koloně. Směs propanu s butanem se dá použít jako motorové palivo LPG (Light Petroleum Gas).

Nejdůležitější dělicí proces nastává v dalších dvou destilacích.

*Atmosférická kolona*, která pracuje při normálním tlaku, oddělí z ropy tři těkavé frakce (složky) je uvedena na obrázku 5.





Obr. 5 Atmosférická a vakuová kolona

Destilační zbytek – mazut – slouží jako tekuté palivo, jinak se z něho v rafinerii získávají další použitelné frakce. Provádí se to ve *vakuové koloně* (viz Obr. 5), kde se využívá toho, že snížením tlaku dojde i ke snížení teploty varu. Frakční destilací se zde získají oleje – *těžké oleje* (bod varu 350 °C–550 °C).

Destilačním zbytkem z vakuové destilace je – asfalt – používaný jako hydroizolační materiál a jako pojivo pro směs na výstavbu asfaltové vozovky.

#### Odsiřování

V ropě je přítomna síra ve formě sloučenin síry. Odsiřování je užitečné nejen pro odstranění emisí z paliv, je to zcela nezbytné při dalším chemickém zpracování jednak s ohledem na funkci katalyzátorů, pro které siřné sloučeniny jsou „jedem“ a také pro omezení koroze zařízení. Obvyklé je odsiřovat jednotlivé ropné frakce po první destilaci.

#### Dosažení kvalitních motorových paliv

- *Krakováním* se štěpí větší uhlovodíkové molekuly složek mazutu a těžkých olejů na kapalné uhlovodíky
- *Reformováním* se zvyšuje podíl uhlovodíků, které zvyšují oktanové číslo. Oktanové číslo označuje, jak je benzin odolný proti předčasnému detonačnímu zážehu (tzv. klepání motoru).

## Co to jsou obnovitelné zdroje energie (nevyčerpatelné zdroje) tzv. OZE

1. Voda
  - významné zdroje ekologické elektřiny jsou převážně na tocích řek Vltavy, Labe, Moravy
2. Vítr
  - vzniká v atmosféře na základě rozdílu atmosférických tlaků v důsledku nerovnoměrného ohřívání Země
3. Biomasa
  - v ní je uložena sluneční energie (popis viz níže)
4. Slunce
  - využití energie slunečního záření, nejjednodušší způsob výroby elektřiny
5. Bioplyn
  - fermentace (kvašení – dochází k rozkladu organických látek za pomoci mikroorganismů bez přístupu vzduchu) bioplynu (kalový plyn) s vysokým obsahem metanu (CH<sub>4</sub>) a oxidu uhličitého (CO<sub>2</sub>).

### **2.2.3 Parní turbíny pro elektrárny na biomasu**

Kromě solární a větrné energie je do kategorie OZE řazena také energie vyráběná spalováním z obnovitelných paliv. Mezi ně lze počítat biomasu speciálně pěstovanou pro účely spalování, jakož i biodpady. Jako paliva lze využít slámu, dřevní štěpky aj. Výroba elektrické energie z výše uvedených paliv je podporována i vládami některých států.

Na parní turbíny, které jsou instalovány v rámci elektráren a tepláren na biomasu, jsou kladeny některé základní požadavky, mezi něž patří především požadavek na max. účinnost parního oběhu. Důvod je ten, že ekonomika a tím i životaschopnost takového zařízení stojí na elektrické energii, kterou elektrárna dodá do rozvodné sítě. Čím nižší je instalovaný výkon, tím nižší je i požadovaná účinnost cyklu. Každý subjekt, který chce inkasovat *zvýhodněnou sazbu*, musí prokázat, že jeho parní oběh vyrobí elektrickou energii s vyšší účinností, než je ustanoveno. V některých zemích EU včetně ČR, je pro investory zajímavá výkonová hladina kolem 5MW. Jedná se však i o praktickou podmínku, vyvolanou především možností zajistit dostatečné množství paliva pro kontinuální provoz elektrárny. Vezmeme-li v úvahu, že pro výrobu 1MW elektrické energie je zapotřebí spálit něco kolem 1,2 tuny dřevního odpadu, není praktické budovat větší energetický zdroj.

Koncepčně se většinou jedná o parní kondenzační turbínu. Pro optimalizaci parního cyklu elektrárny je využívání tepla odebraného z turbíny pro regeneraci a pro ohřev kondenzátu v napájecí nádrži. Na turbíně je odběr topné páry pro potřeby regenerace řešen neregulovaným odběrem. Kondenzace vyexpedované páry se realizuje jak v kondenzátoru chlazeném vodou, tak též v kondenzátoru vzduchovém. U vodní kondenzace je samozřejmě dosahováno vyšší účinnosti soustrojí, protože na výstupu z turbíny je dosaženo hlubšího vakua.

## 2.3 Vodní elektrárny

### Princip:

- Mechanická energie proudící vody se mění na energii elektrickou
- Voda roztáčí turbínu
- Turbína je na společný hřídeli s elektrickým generátorem – turbogenerátor

### 2.3.1 Typy vodních turbín

#### Francisova turbína

- Přetlaková turbína
- Pracovní kapalina mění tlak během své cesty strojem
- Pro udržení toku vody jsou nutné rozváděcí lopatky (automaticky stavěných regulátorech), kterými je voda směřována na rotor

#### Kaplanova turbína

- Přetlaková axiální turbína s množstvím regulace v širokém rozsahu
- Využití v místech, kde není možné zajistit stálý průtok nebo spád
- Vyšší účinnost než Francisova turbína
- Výrazně složitější a dražší

#### Peltonova turbína

- Rovnotlaká turbína s parciálně tangenciálním ostřikem
- Voda proudí tangenciálně na obvod rotoru pomocí trysek
- Rozvaděčem je dýza na přívodním potrubí
- Lopatky mají lžičkovitý tvar
- Použitý pro větší výkony, velký spád a menší průtok vody

### Pro doplnění

Uvedené elektrárny nejsou využitelné pro vnitrozemské sáty

*Přílivová elektrárna* (využití přílivu a odlivu moře)

*Vlnová elektrárna*

- První vlnová elektrárna je postavena v Západní Austrálii dle nové technologie CETO. Hlavní předností této technologie ve srovnání s fotovoltaickými a větrnými elektrárnami je stabilita, protože nepodléhá povětrnostním vlivům a elektřinu vyrábí nepřetržitě. Zařízení se nachází pod vodou a dle výrobce lépe odolává bouři a korozi. Již byla spuštěna třetí elektrárna, z nichž každá má výkon 240 KW což pokrývá odběr asi tři tisíc domácností. Tři elektrárny tvoří tzv. bóje, které jsou v hloubce 25 až 50 m propojeny s čerpadly, ležícími na dně. Nárazy vln roztácejí turbíny čerpadel a ty pohánějí vodu potrubím pod mořským dnem do pobřežní vodní elektrárny. Tato nová vlnová elektrárna by měla zásobovat čistou elektřinou a pitnou vodou.
- Skotské ministerstvo schválilo plán na výstavbu největší vlnové elektrárny na světě. Skotské pobřeží disponuje ideálními přírodními podmínkami, pod které prakticky spadá desetina pobřeží Evropy. Skotské pobřeží by mělo být v dohledné době osazeno čtyřiceti až padesáti plovoucími turbínami typu Oyster 800 a má být zárukou stabilního výkonu 40 MW, což odpovídá zásobovat levnou elektřinou na 30 tisíc domů.

### Příbojová elektrárna

- jde o vývoj, k přeměně energie mořského vlnění na elektrickou energii. Jedná se o využití kolísajícího vodního sloupce v betonové šachtě, kde vod. sloupec pracuje jako píst – střídavě protlačuje a nasává vzduch přes speciální Wellsovu vzduchovou turbínu. Výkon příbřežních mořských vln: 480KW na 1m délky.

### Další dělení vodních elektráren:

- *Průtočná* (instaluje se přímo na vodním toku, nevýhodou je závislost výkonu na aktuálním průtoku v řece)
- *Akumulační* (je součástí hráze vodního díla, které je zpravidla stavěno právě z důvodu využití vodní energie).
- *Přečerpávací – PVE* (využívá se jako sklad), který částečně řeší rozdílné požadavky na množství energie v závislosti na denní spotřebě. V noční době, kdy je celková spotřeba elektrické energie podstatně nižší a levnější, PVE přečerpává vodu do horní nádrže a v energetické špičce se voda vypouští do spodní nádrže. Při cestě dolů pohání turbínu a vyrábí elektřinu, která je v tu chvíli zapotřebí. Dnes se většinou používají tzv. *reversní turbíny*, v nichž oběžné kolo turbíny vykonává v čerpacím režimu funkci čerpadla.

Ve vývoji reversních turbín u nás se podíleli Ing. V. Hosnedl a akademik M. Nechleba z VUT v Brně.

Jestliže účinnost přečerpávacího cyklu u starších jednotek se pohybovala kolem 50 %, současná soustrojí umožňují akumulaci s účinností až 75 %, tzn., že na uskladnění každé kWh je nutné v čerpacím režimu vynaložit jen asi 1,3kWh. Velmi levné noční kWh se tímto způsobem promění ve špičkové kWh, mající pro energetiku cenu zlata.

Plný výkon jsou moderní PVE schopné dodávat už za 1,5 min po spouštěcím povelu.

Z důvodu zachování krajiny, nebo tam, kde není k dispozici potřebný spád, se budují vodní elektrárny, které využívají jako horní nádrž přírodní jezero, spodní nádrž a strojovna však jsou vybudovány hluboko pod zemí. Když se zvýší např. dnes obvyklé stometrové spády PVE až na 1000 m, klesne při stejném výkonu množství obíhající vody na desetinu a tím se zmenší i rozměry nádrží a stavební náklady.

### Rozdělení vodních elektráren podle spádu:

- *Nízkotlaké průtočné* (spád 10–20 m – na jezích)
- *Středotlaké průtočné* (spád 100 m – přehrady)
- *Vysokotlaké průtočné* (spád větší než 100 m)

### Výhody

- Neznečišťují ovzduší, nedevastují krajinu, nezávislé na dopravě paliv a surovin, vysoká bezpečnost, min. obsluha i údržba (ovládání na dálku), start během několika sekund – max. výkon do 1,5min

### Nevýhody

- Značná cena a čas výstavby
- Nutnost zatopení velkého území
- Závislost na stabilním průtoku vody

## 2.4 Větrné elektrárny

Síla větru pohání rotor, který je opatřen lopatkami, jejichž úhel zakřivení zajišťuje co možná nejefektivnější využití větru. Rotor je napojený přes spojku na generátor, kde je mech. energie přeměněna na energii elektrickou.

### Výhody

- Vyhneme se přenosovým ztrátám
- Žádné škodlivé emise (SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, popel)

### Nevýhody

- Dostatečná síla větru (min. 5 m/s)
- Vysoká hlučnost (vývoj na snížení hlučnosti pod 45 dB)
- Časově a finančně náročná předrealizační fáze
- Vysoké investiční náklady

Účinnost větrné elektrárny: max. 45%

### Typy generátorů:


- *Stejnoseměrné* (pro malé větrné elektrárny)
- *Synchronní* (velká účinnost, pracují s velkým rozsahem rychlostí větru)
- *Asynchronní* (připojení k síti, připojovací systém pouze sleduje otáčky a rozhoduje o okamžiku připojení k síti)

Pozn.: Francouzská firma Eole Water odzkoušela v roce 2009 větrnou turbínu, kterou lze v poušti vyrábět elektrickou energii i vodu.

Př.: větrná turbína o výkonu 30kW vyrobí 1000 l vody/den. Problém nastává, kdy rychlost větru klesne pod 24 km/hod. Zařízení může vodu dodávat i za bezvětří, potřebuje však napájení z externího zdroje proudu (solární panely, elektrická síť, dieselagregát).

Zjednodušeně lze popsat tuto turbínu následovně:

- V místě náboje, na kterém jsou upevněny tři lopatky jest otvor, jímž se vzduch dostává k chladicímu kompresoru, odkud je kondenzát sveden do zásobníku
- Voda se potom ještě filtruje a lze ji využít jako pitnou, užitkovou i pro zemědělské účely.
- Ve skutečnosti se však jedná o poměrně technicky složitě zařízení (viz Obr. 6).




**WMS1000 Wind Turbine**

**Operation process**

- Energy production
- Ambient air suction
- Humid air condensation
- Water production
- Water purification
- Pure drinking water distribution

### WMS1000 Wind Turbine Components



### WMS1000 Wind Turbine Technical Specifications

**GENERAL**

Type: Horizontal axis, open, 3 blades  
 Max height: 30m  
 Nominal wind speed: 3.5m/s  
 Maximal wind speed: 27m/s  
 Max power production: 15kW  
 Max wind speed: 35m/s

**WATER**

Capacity: 120L  
 Nominal rotation speed: 100 RPM  
 Blade material: Fiberglass and carbon fiber  
 Regulation: PLC remote control  
 Blades: Hydraulic pitch table  
 Generator: Permanent Magnet direct drive 400WAC

**WIND CONTROL SYSTEM**

Type: N/A  
 Drilling motor: AC brush motor  
 Blades: DC motor  
 Drilling ring: 6 control points table

**CONTROL & MONITORING**

Monitoring: Programmable Logic Controller  
 Communication: GSM, Blue tooth and local and  
 Human Machine Interface: Touchscreen data working

**Water production in various conditions**

Case	Conditions	WMS1000	WMS1000
Standard case	25°C, 65%RH	1000 kg/day	1000 kg/day
Cold case	15°C, 65%RH	1200 kg/day	1800 kg/day
Hot case	35°C, 65%RH	700 kg/day	1100 kg/day
Sea level	15°C, 65%RH	1000 kg/day	1000 kg/day

**Water maker system description**


Compressor unit: 2x 120W DCDC  
 Refrigerant gas: R410A (CO2 FREE)  
 Air flow generator: 2 x 120W DC  
 Humidity condenser: Four sets of desiccant bed  
 Heat exchanger: Anti-condensate dehumidifier and copper  
 Regulation: Programmable Logic Controller  
 Detection: Remote display operation

**Water treatment**

Water: 10L  
 Carbon block filter: 1 g  
 UV disinfection: 10g  
 UV disinfection: 10g  
 UV disinfection: 10g


### WMS1000 Wind Turbine Benefits

**Be self-sufficient**




Eole Water's systems have been designed to produce water with no external source of energy. No other power but wind is needed to make the system operational. They are suited to be installed quickly in isolated water supply areas with no external electric power needed.

**Be eco-friendly**




Eole Water proposes an innovative technology in line with the requirements of sustainable development. Wind power is the only source of energy needed to operate our water production turbines with zero CO2 emissions, no water pollution and the lowest possible impact on the environment.

**Sustainable water**



Unlike wells or boreholes, water will always exist in the air. The condenser was designed a reliable technology able to create and collect the available water. After more than ten years of research, the WMS1000 wind turbine now enables people to remove water by access to a sustainable drinking water.

### Hybrid power controller



Obr. 6 Větrná elektrárna

### Geotermální elektrárna

- Staví se zejména ve vulkanicky aktivních oblastech
- Využívají k pohonu turbíny horkou páru stoupající pod tlakem z gejzírů a horkých pramenů
- Počet těchto elektráren v rámci celé Evropy je minimální

## 2.5 Sluneční elektrárny

Přeměna sluneční energie na elektřinu je možná několika způsoby, z nichž některé vyžadují přírodní podmínky našich zeměpisných šířkách nedosažitelné. Na základě principu přeměny energie rozlišujeme elektrárny takto:

- Fotovoltaická elektrárna (FVE)
- Termoelektrická elektrárna (TEE)
- Sluneční tepelná elektrárna (STE)

### 2.5.1 Fotovoltaická elektrárna

Využívá fotovoltaického jevu, známého již od konce 19. století. Fotovoltaické články jsou vyrobeny z polovodiče (obvykle křemík). Při dopadu světla (fotonů) na článek se uvolňují elektrony, čímž vzniká množství kladných a záporných nábojů, tedy elektrické napětí. Fotovoltaické články vyrábějí stejnosměrný proud, který je v měniči konvertován na proud střídavý. Tuto přeměnu realizuje mikroprocesorem řízený měnič.

Absolutní hrozbou pro výkonnost velké části solárních elektráren, a tím i schopnost plnění stanovených obchodních plánů, je zcela přírodní fyzikální jev zvaný *potenciální indukovaná degradace* (PID). Negativní působení PID se začíná projevovat u solárních panelů po 2–4 letech provozu a podle dosavadních zkušeností se může projevit až 70% poklesu výkonu jednotlivých zasažených panelů. U celé elektrárny to pak může znamenat pokles 5–15 %, v extrémních případech i 30 % z původního instalovaného výkonu.

Většina dnes v ČR provozovaných solárních elektráren byla uvedena do provozu v letech 2009 až 2010, takže jsou právě ve fázi, kdy se PID v podobě snížení výkonu začíná v plné míře projevovat.

Příčiny vzniku PID zde dále nebudou uváděny, neboť se jedná o specializaci elektroniky.

Tímto článkem je pouze dáno upozornění, že i obnovitelné zdroje mají své problémy a úskalí.

### 2.5.2 Termoelektrická elektrárna

Je založena na tzv. Seebeckově jevu (v obvodu ze dvou různých vodičů vzniká elektrický proud, pokud jejich spoje mají různou teplotu). Termoelektrický článek je tvořen dvěma, na konci spojenými různými vodiči. Do slunečních sběračů uložený termoelektrický článek pak vyrábí elektrický proud na základě zmíněného Seebeckova jevu. Více termoelektrických článků pohromadě tvoří termoelektrický generátor.

### 2.5.3 Sluneční tepelná elektrárna

Funguje na podobném principu jako tepelné elektrárny. Místo vody se ohřívá olej, který následně předá teplo vodě. Ohřev oleje zajišťuje soustava otáčivých zrcadel (heliostatů), které směřují sluneční paprsky do jednoho ohniska, ve kterém je umístěný kotel naplněný zmíněným olejem.

Velkou nevýhodou je, že jejich provoz nelze nijak řídit – větru ani slunci se prostě nedá poručit.

K *obnovitelným zdrojům energie* se v podmínkách ČR řadí využití energie vody, větru, slunečního záření, geotermální energie a energie kapalných biopaliv.

Biopaliva – dle skupenství dělíme na:

- Tuhá (polena, štěpka, brikety, pelety, piliny, sláma)
- Kapalná (bioetanol vyráběný z kukuřice, obilí, brambor, cukrové třtiny a cukrové řepy)
- Plynná (bioplyn produkovaný přirozeným rozkladem na skládkách odpadu nebo v zemědělství, dřevoplyn – oxid uhelnatý a vodík, vyráběný zplyňováním biomasy).

Studie vědců z Británie, Německa a USA zjistila, že paliva z řepky a kukuřice mohou při spalování produkovat až o 70 % více skleníkových plynů než ropná paliva. Je to kvůli tomu, že při jejich pěstování jsou potřebná dusíkatá hnojiva – spalování produktů z plodin tak vede k tomu, že se uvolňuje *oxid dusný*, známý pod označením „rajský plyn“. Tento plyn má asi 300krát vyšší skleníkový účinek než nejběžnější skleníkový plyn – *oxid uhličitý*.

Skleníkové plyny ze spalování fosilních paliv podle řady vědců vedou k oteplování planety, a právě používání *biopaliv* mělo být jednou z cest k omezení jejich emisí.

Zpráva organizace pro hospodářskou spolupráci a rozvoj (OECD) využívání biopaliv ostře kritizovala a konstatovala, že podpora těmto palivům vede k prudkému růstu cen potravin a k ničení přírody.

V ČR se musí od září 2016 přimíchávat do motorové nafty až 8 procent bionafty.

EU plánuje, že do roku 2020 bude získávat 10 % pohonných hmot z biopaliv.

## 2.6 Jaderné elektrárny

V Česku jsou v provozu dvě jaderné elektrárny (Temelín, Dukovany) s celkovým výkonem 376MW. Pokrývají cca 31% celkové spotřeby elektřiny v Česku. Procesem řízeného rozpadu jádra atomu je uvolňována jaderná energie vázaná v jaderném palivu (uran, plutonium).

Při štěpné reakci vzniká teplo, které je opět využíváno k výrobě vysokotlaké páry, která se přivádí do turbíny, tedy stejně jako u tepelných elektráren.

Odpadem tohoto procesu je pouze teplo a vodní páry.

Jaderné elektrárny mají výborný poměr dodaného paliva k získanému množství energie.

Jejich *nevýhodou* jsou vysoké náklady na výstavbu, produkce radioaktivního odpadu, náročného na získávání paliva a velmi omezené možnosti regulovat výkon (regulace výkonu je sice možná, avšak neekonomická, protože náklady na palivo tvoří jen malou část výrobních nákladů).

Výhody – neprodukuje CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, popílek, nespotřebovává kyslík.



## 2.7 Paroplynové elektrárny

Paroplynové elektrárny se v současné době dostávají do popředí zájmu pro svou vyšší účinnost výroby elektřiny, dosahující nad 50 %, nízkou vlastní spotřebou a pro menší ekologické zatížení prostředí. Je v nich také možno provozovat kombinovanou výrobu tepla a elektřiny.

Na rozšíření paroplynových elektráren budou mít vliv také limity těžby uhlí. Tyto limity stanoví množství uhlí, jež je možno vytěžit a jsou stanoveny z důvodu zabránění škod na životním prostředí, než je nezbytně nutné.

Důležité je podotknout, že paroplynové elektrárny ke své funkci uhlí nepotřebují, na rozdíl od klasických uhelných elektráren. Nebudou-li limity těžby uhlí uvolněny, dojde k útlumu uhelných elektráren a jejich nahrazení paroplynovými.

Výroba elektřiny v paroplynovém cyklu jde o max. účinnou výrobu elektřiny. Samotný výraz „paroplynový cyklus“ je vlastně zjednodušený, protože z technického hlediska se jedná o dva oběhy, parní a plynový, vzájemně propojené spalínovým kotlem, kde je zbytková energie spalin vystupujících z plynové turbíny využita pro vývin páry pro parní turbínu.

Paroplynové elektrárny vykrývají špičky ve spotřebě elektřiny. Tento zdroj může být připojen k síti za několik minut po spuštění. Rychlejší už jsou jen vodní elektrárny.

U spalovacích turbín dochází k vývoji směrem zvyšování teploty spalin na vstupu a tím i zvýšení čisté tepelné účinnosti paroplynového oběhu.

Cena standartních modelů paroplynového zařízení se pohybuje okolo 500 EUR/kW<sub>e</sub>. Doba výstavby se pohybuje v rozpětí 30-40 měsíců, což je výrazně méně než v případě klasických uhelných nebo jaderných elektráren.

Největší elektrárnou s paroplynovým cyklem u nás je elektrárna Počerady s celkovým výkonem 838 MW. Vývodou paroplynových elektráren je schopnost pružně vyrovnávat nesoulad mezi výrobou a spotřebou energie.

Výrazným omezením všech paroplynových cyklů je závislost jejich výkonu na okrajových podmínkách, tedy na okolní venkovní teplotě nasávaného vzduchu, nadmořské výšce a relativní vlhkosti vzduchu.

Nejvýrazněji se projevuje vliv okolní teploty, kdy se vzrůstající teplotou okolí výrazně klesá výkon plynových turbín a mění se parametry výstupních spalin, což ovlivňuje parní část pracovního oběhu. Je to dáno zejména změnou průtoku vzduchu nasávaného kompresorem kvůli měnící se měrné hmotnosti vzduchu.

Pro další zlepšení účinnosti může být zařazen i výměník tepla, ve kterém odcházející spaliny ohřívají přicházející vzduch.

### Pro plynové turbíny dále platí:

- Relativní vlhkost nasávaného vzduchu nemá prakticky vliv na termickou účinnost a dochází k mírnému růstu měrného výkon.
- Vlhkost vzduchu se rozumí jako obsah vodní páry ve vzduchu
- Pokud vyjádříme přímo obsah vody v jednom m<sup>3</sup> vzduch v gramech, mluvíme o *absolutní vlhkosti vzduchu*.
- Jeden m<sup>3</sup> vzduchu o teplotě 30 °C může pojmout nanejvýš 30 g vodní páry, stejný objem vzduchu při teplotě -30 °C může pojmout jen 0,3 gramů vodní páry.
- Pokud zaregistrujeme vlhkost vzduchu vyjádřenou v procentech (např. na grafech automatických stanic) jedná se o *relativní vlhkost*.

### Matematické vyjádření relativní vlhkosti

Je-li ve vzduchu o objemu V obsažená vodní pára hmotnosti m, pak veličina je definována:

$$\phi = \frac{m}{V} [\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$$

- se nazývá absolutní vlhkost vzduchu.

Závislost stavu vodní páry obsažené ve vzduchu od stavu syté páry – proto definujeme relativní vlhkost vzduchu:

$$\varphi = \frac{\phi}{\phi_m} \cdot m \cdot 100 [\%]$$

Nebo:

$$\varphi = \frac{p}{p_s} \cdot 100 [\%]$$

- kde p je tlak vodní páry a  $p_s$  tlak syté vodní páry za téže teploty

Pozn: proto je výhodnější provoz spalovací turbíny v zimním období.

### Výhody paroplynové elektrárny:

- Lepší využití vložené energie a nižší emise spalin
- Je možnost v době oprav plynové turbíny zajistit výrobu elektrické energie parní turbínou cizí párou, je-li v blízkosti teplárna, ze které se přivede pára
- Téměř dvojnásobná účinnost výroby elektrické energie ve srovnání s klasickou uhelnou elektrárnou
- Může být připojena k síti za několik minut po spuštění

## 2.8 Parní turbíny

Parní turbíny jsou zařazeny v tzv. energetickém bloku, který tvoří: kotel – turbína – alternátor a tím je tvořen technologický celek, který vyrábí elektrickou energii následujícím znázorněním toků energie:

- Chemická energie vázaná v palivu
- Tepelná energie spalin a páry
- Tlaková energie páry
- Kinetická energie páry a hřídele
- Elektrická energie alternátoru

Každá parní turbína je zhotovovaná dle zadaných parametrů zákazníkem.

Návrh vlastní turbíny je velice složitý a náročný proces, ve kterém se kloubí mnoho interdisciplinárních problémů jak z hlediska mechanických, hydraulických tak i termomechanických oborů.

Parní turbínová zařízení v průmyslových a kombinovaných teplárnách pokrývají spotřebu technologické, popř. i topné páry a elektřiny v průmyslových komplexech a jsou hlavním mechanickým pohonným zdrojem turbokompresoru, turbodmychadel i čerpadel v technologických systémech.

V posledních letech se hlavní pozornost věnuje nejen na obnovu turbínových zařízení (výměna dožitých částí) ale hlavně na modernizaci a inovaci (tzv. *retro fit\**) s ohledem na další provozní období a morálně technickou životnost zařízení.

\*Pozn.: retro fit – doplnit, vylepšit a moderněji dovybavit

Hlavní směry vývoje par. turbínových zařízení elektrárenských i průmyslových:

- a) Konstrukční koncepce turbosoustrojí s ekonomickou maximální termodynamickou účinností
- b) Dosažení optimálních provozních vlastností (max. provozní spolehlivost, pohotovost, prodloužení doby mezi revizemi, prodloužení životnosti, snížení nákladů na obsluhu, revize a údržbu)
- c) Zvyšování parametrů vstupní páry s cílem zvětšení zpracovaného teplotního spádu pro získání většího podílu využití tepla k výrobě elektrické energie

### 2.8.1 Termodynamické modely parních turbín

Při návrhu, simulaci či optimalizaci kompletního energetického celku, kterým jsou například teplárny, elektrárny, kogenerační zařízení, rafinerie atd., je nutné znát výpočtové modely pro simulaci a optimalizaci jednotlivých dílčí zařízení (jednotek) těchto celků. Takovými jednotkami jsou myšleny kotle, turbíny, čerpadla, kondenzátory, výměníky atd. Znalost simulačních a optimalizačních výpočtových modelů dílčích jednotek nám umožňuje s daleko větší přesností, a v samotném závěru i s větší rychlostí, dosažení optimálních výsledků pro daný celkový proces či výrobu.

#### 2.8.1.1 Energetická bilance parních turbín

Úkolem parní turbíny je přeměna tepelné energie na energii mechanickou. K takové přeměně dochází pomocí expanze páry v turbíně a výsledkem expanze je vykonaná mechanická práce za určitý čas neboli výkon. U reálného stroje je taková přeměna doprovázena určitými ztrátami, které ovlivňují výsledný výkon parní turbíny. Ztráty rozdělujeme na ztráty vnitřní a vnější.

Mezi vnitřní ztráty patří:

- Ztráty lopatkování, které je možné rozdělit na:
  - ztráty třením v rozváděcích a oběžných lopatkách,
  - okrajovou ztrátu, která je nepřímo úměrná délce lopatky,
  - změnu směru proudu páry,

- ráz páry na vstupu do lopatkové mříže,
- vějířovou ztrátu (u posledních stupňů s dlouhými lopatkami),
- ztráty vlhkostí páry (je úměrná vlhkosti),
- ztráty výstupní (kinetická energie páry vystupující z posledního stupně)
- ztráty třením rotoru,
- ztráty ventilační,
- ztráty částečným ostřikem,
- ztrátu vnitřními netěsnostmi.

Mezi vnější ztráty patří:

- ztráty vnějšími ucpávkami (průtok páry ucpávkami bývá 0,5 % až 2 % jmenovitého průtoku admisní páry),
- ztráty mechanické (třením hřídele v ložiskách, příkon olejového čerpadla aj.),
- ztráty tepla do okolí.

Na kvalitní výrobek jako je parní turbína se podílí celá řada různých pracovních profesí, které na sebe vzájemně navazují, jsou to:

1. Výpočtáři
2. Konstrukteři + projektanti
3. Výroba
4. Montáž na dílně výrobce
5. Montáž včetně usazení turbíny, převodovky a generátoru na základovou desku u zákazníka, izolace
6. Práce zkušebního technika, který ve spolupráci s elektrikáři, generátoristy, s pracovníky obsluhující chemickou úpravu vody a spolu s programátorem uvádí jednotlivé okruhy do provozu

## 2.8.2 Izolace skříně parní turbíny

Provádí se izolace parního potrubí a skříně (statoru) turbíny.

*Izolace spodků turbínových skříní* se dříve prováděla jako pevná cpaná izolace do pevné svařované kostry a to tak, že na spodek skříně se navařily trny z drátů o průměru 5–6 mm, na vrcholy trnů se nacpala čedičová, popř. strusková vlna. Tloušťka izolace spodku skříní musela být 1,5krát silnější než izolace vrchní části skříně, protože spodní část skříně je při spouštění studenější.

*Izolace vršku skříně* se provádí snímatelnými, k sobě a k tělesu dobře přiléhajícími rohožemi (polštáři).

Veškeré izolace musí být tak provedeny, aby teplota na povrchu izolace nepřesáhla nikde 50 °C při teplotě okolního vzduchu 25 °C (měřeno dálkovým teploměrem).

Špatně provedená izolace může mít za následek průhyb skříně a s tím související profukování páry dělicí rovinou skříně.

Nepřiléhající izolace může být příčinou havárie lopatkování.

V současné době se na izolace používá skleněná textilie vyráběná ze skleněné příze na bázi B-Al-Si skla typu E s tepelnou odolností do 650 °C. Je dodáván v rozměrech dle přání zákazníka. Skleněnou textilií lze snadno sešívát pro dosažení neomezených rozměrů.

### Současný stav:

*Firma GENERI* – dodává izolační návleky šité přesně na míru. Jsou vyrobeny z hi - tech tkanin, jsou voděodolné, nehořlavé (vydrží teplotu až 1200 °C). Jsou vyrobeny z vodivého materiálu – neindukují statickou elektřinu a je možno je uzemnit. Snadná montáž/demontáž.

Je podstatný rozdíl u turbín dříve vyráběných v 1BZKG Brno, u kterých veškerá regulace včetně ochran byly na základě tlaku mazacího oleje, ze kterého byl tvořen regulační, impulsní a pojistkový olej, což představovalo poměrně velké množství regulačních a ochranných prvků.

*Výhodou* bylo, že všechny tyto prvky byly přednastaveny na zkušebních stolicích ve výrobním závodě. Také smontovaná turbína byla odzkoušena na zkušebně výrobního závodu pro zjištění spolehlivosti mechanického chodu.

*Nevýhodou* byla zvýšená náročnost technické obsluhy turbíny. V dnešní době se turbína po montáži v dílnách výrobce ihned expeduje na místo určení, tudíž bez potřeby vybudování zkušebny.

### **2.8.3 Zapojení parní turbíny do pracovního oběhu tepelné elektrárny**

Na rozšíření tepelných elektráren jak v ČR, tak ve světě bude mít hlavní vliv vzrůstající velikost spotřeby elektrické energie. Pokud bude světová spotřeba elektřiny nadále narůstat, bude možné tento trend kompenzovat jedinečně výstavbou tepelných elektráren, ať již konvenčních či jaderných, protože je možné postavit je teoreticky kdekoliv (voda, připojení sítě), na rozdíl od vodních elektráren, které se stavějí jen na vhodných vodních tocích a také proto, že výkon tepelných elektráren není závislý na počasí, případně na ročním období, jak je tomu u větrných a slunečních elektráren. Největším současným trendem je ekologizace a zvyšování účinnosti elektráren. Pro nově stavěné tepelné elektrárny je typické použití kritických a nadkritických bloků, kogenerace (společná výroba elektřiny a tepla) a užívání čistých uhlí. technologií jako jsou atmosférické fluidní spalování, tlakové fluidní spalování a tlakové fluidní zplyňování.

Pro splnění emisních limitů je výhodná výstavba elektráren s paroplynovým cyklem, kdy palivem nemusí být jen zemní plyn, tedy fosilní palivo, ale také energoplyn vzniklý zplyňováním uhlí, biomasy a jiných paliv. Dochází také k rozvoji *vodíkové energetiky*\*

\* *Vodíková energetika*



Obr. 7 Vlak s vodíkovým zdrojem pohonu

Proběhl neformální summit ministrů energetiky členských zemí EU, kde byla podepsána tzv. Vodíková iniciativa. Jejím cílem je maximalizovat potenciál užívání vodíku jako paliva v dopravě a energetických sektorech. Výše uvedený vlak (Obr. 7) již jezdí v Německu a vyvinula ho francouzská firma ALSTOM. Jezdí po 100 km dlouhé trati a palivové články konvertující vodík a kyslík na elektřinu umožňují jet rychlostí až 140 km/h.

Jedná se o palivové články, kde při chemické reakci vstupních látek – paliva a oksyličovadlo – na elektrodách ponořených do elektrolytu se přeměňuje chemická energie na elektrickou energii.

Palivem bývá čistý vodík.

Tyto články pracují při různých provozních teplotách, od 80 °C po 100°C. Jsou to tzv. články vysokoteplotní. Články s provozními teplotami kolem 100 °C (80 °C až 120°) se nazývají nízkoteplotní.

Např. alkalické palivové články, kde elektrolytem bývá hydroxid sodný nebo hydroxid draselný, mají poměrně vysokou energetickou účinnost, který dosahuje 60 % (použití na kosmické lodi APOLLO).

Tato problematika je specifická a lze konstatovat, že využívání vodíku v energetice má v EU politickou podporu.

Kritické a nadkritické elektrárenské bloky dosahují vyšších účinností než bloky s podkritickými parametry páry. Vysoké parametry páry kritických a nadkritických bloků si žádají použití moderních materiálů při konstrukci kotlů, potrubí a par. turbín. Ty musí odolávat až dvojnásobným tlakům a vyšším teplotám než v případě podkritických bloků. Vhodnými konstrukčními materiály se jeví oceli legované wolframem a slitiny na bázi niklu. Použití moderních typů elektrárenských bloků zvyšuje účinnost výroby elektrické energie.

Podkritické parametry páry – levnější investiční náklady

Nadkritické parametry páry – podstatně vyšší náklady, jsou to parametry nad tzv. kritickým bodem tj.:

- Tlak: 22,1MPa
- Teplota: 374,15°C

Základní princip funkce tepláren je shodný jako klasická elektrárna. Do kotle je přiváděno palivo, které se zde spaluje. Hořením paliva dochází k uvolňování tepla, jež se akumuluje ve vodě protékající kotlem. Z vody se stává pára o potřebné teplotě a tlaku a ta se vede na turbínu. Expandující pára roztáčí rotor turbíny a tím i turboalternátor, který přeměňuje mechanickou energii na elektrickou. Kromě elektrické energie dodávají turbíny tepelnou energii (teplo) – to je možné díky odběrovým turbínám, kdy část páry se z těchto turbín odvádí do kondenzátoru a část páry se z turbíny odebírá a využívá se jako např. topná pára.

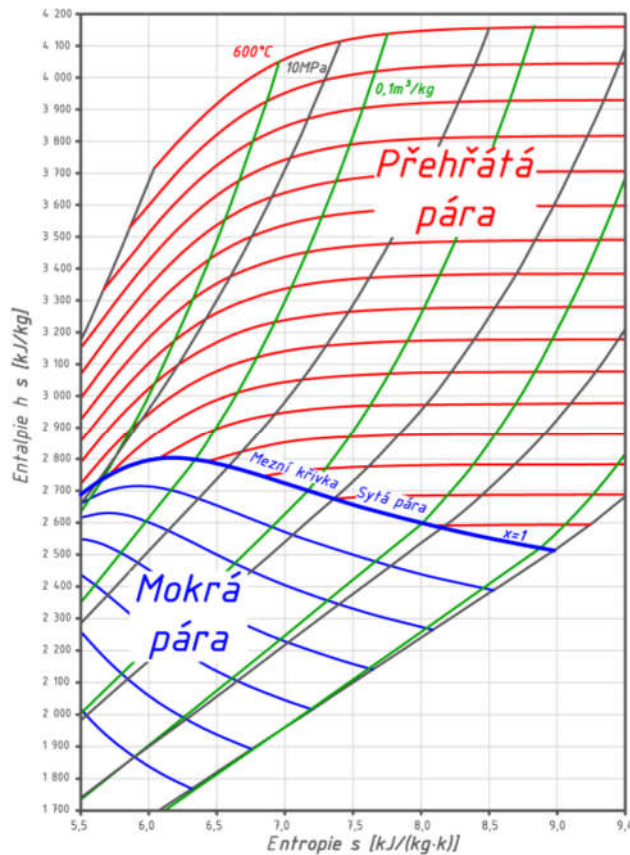
#### **2.8.4 Vodní pára**

Vodní pára vzniká přeměnou vody, tedy změnou skupenství kapalného na skupenství plynné. Tuto přeměnu nazýváme endotermickou (je potřeba dodávat tepelnou energii). Při přeměně páry na vodu je energie odebírána, a proto je přeměna nazývána exotermická.

Důvodem používání vody (páry), jako teplonosného média, jsou její vlastnosti, jako vysoká měrná tepelná kapacita (4,18 kJ.kg<sup>-1</sup>), ideální bod varu (při atmosférickém tlaku 100 °C) a velké měrné skupenské teplo varu (při atmosférickém tlaku 2257 kJ.kg<sup>-1</sup>). Mezi další výhody páry patří její dostupnost, cena a ekologická nezávadnost.

Důležitými kroky pro výpočty s vodní párou bylo zavedení definice entalpie Juliem Emanuelem Clausiem a vytvoření h-s diagramu vodní páry Rudolfem Molliérem, podle kterého nese i název tzv.

Molliérův diagram (Obr. 8). Diagram h-s je ideální grafickým zobrazením stavů vody, a především vodní páry, podle něhož se dá snadno určovat přivedené (odvedené) teplo a další potřebné veličiny, a i pro svou sofistikovanost, je stále nejpoužívanějším diagramem pro tepelné výpočty vodní páry.



Obr. 8 Molliérův diagram vodní páry h-s

Konec 20. století sebou přinesl rozvoj výpočetní techniky, a proto roku 1995 došlo k mezinárodnímu přijetí zpřesněné formulace termodynamických vlastností vody a vodní páry IAPWS-95 pro vědecké účely, a v roce 1997 k přijetí IAPWS-IF97 formulace pro průmyslové potřeby, která je v dnešní době nejpoužívanější formulací pro výpočty s vodní párou. Formulace IAPWS-IF97 nahradila dřívější nejpoužívanější formulaci IFC-67 vydanou organizací ASME v roce 1967.

*Sytá voda* – Voda o teplotě varu při daném tlaku. Libovolný bod na mezní křivce syté vody (levá část mezní křivky sytosti).

*Mokrá pára* – Jako mokrá pára se uvažuje směs jemných kapek syté vody a syté páry, nebo fáze vody uvažovaná odděleně, ale ve společném uzavřeném prostoru.

*Sytá pára* – Pára o teplotě varu za daného tlaku. Její existence je vlastně pouze teoretická, protože jen minimální ohřátí vede k přeměně na přehřátou páru a ochlazení k přeměně na mokrou páru.

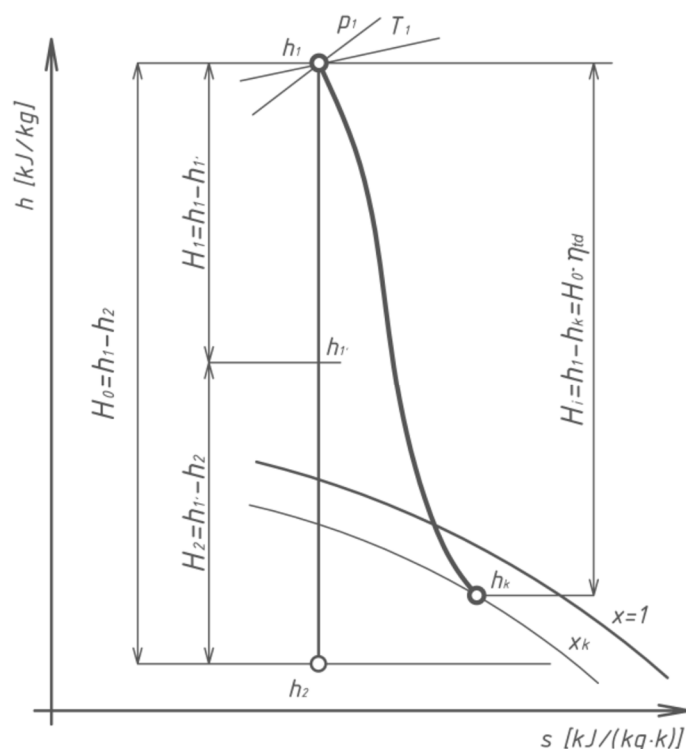
*Přehřátá pára* – Pára o teplotě vyšší než teplota varu za daného tlaku.

*Mezní křivka sytosti* – Označuje všechny stavy syté páry a syté vody při určitých tlacích.

*Kritický bod* – Jedná se o bod, ve kterém mizí rozdíl mezi kapalnou fází a plynou fází látky, pro vodu z:  $T_k = 647,096 \text{ K}$ ,  $\rho_k = 344 \text{ kg.m}^{-3}$  a  $p_k = 22,06 \text{ MPa}$ .

## 2.8.5 Základní princip parní turbíny

Základním principem parní turbíny je přeměna tepelné energie uložené ve vodní páře na mechanickou práci rotoru parní turbíny. Transformace energie páry probíhá díky expanzi páry v rozváděcích lopatkách, při použití přetlakového lopatkování i v oběžných lopatkách. Díky expanzi dochází k přeměně energie tlakové na energii kinetickou, která je předána oběžným lopatkám a kinetická energie se mění na mechanickou práci turbíny. Expanzi páry v turbíně uvažujeme jako izoentropický děj, u kterého je tepelná výměna s okolím rovna nule. Pro výpočet mechanické práce lze tedy použít první zákon termodynamiky pro otevřené soustavy na jeden kilogram pracovní látky rovnice  $(q - a = h_2 - h_1 + \frac{c_2^2}{2} - \frac{c_1^2}{2} + g \cdot (z_2 - z_1))$  (Rovnice 1), ze které se po zjednodušení snadno určí měrná mechanická práce turbíny pro jeden kilogram páry beze ztrát, rovnice  $(a = H_0 = h_1 - h_2)$  (Rovnice 2).



Obr. 9 Průběh expanze páry v h-s diagramu

$$q - a = h_2 - h_1 + \frac{c_2^2}{2} - \frac{c_1^2}{2} + g \cdot (z_2 - z_1) \quad (\text{Rovnice 1})$$

$$a = H_0 = h_1 - h_2 \quad (\text{Rovnice 2})$$

Z rovnice  $(a = H_0 = h_1 - h_2)$  (Rovnice 2) vyplývá, že měrná mechanická práce turbíny je rovna rozdílu měrných entalpií na vstupu a výstupu. Rovnice  $(a = H_0 = h_1 - h_2)$  (Rovnice 2) se také nazývá izoentropický tepelný spád. Ve skutečnosti dochází při expanzi páry v lopatkování (Obr. 9) ke ztrátám, a skutečný izoentropický tepelný spád se zmenší, a to dle rovnice  $(H_i = h_1 - h_k = H_0 \cdot \eta_{td})$  (Rovnice 3), na základě, které lze definovat vnitřní termodynamickou účinnost turbíny  $(\eta_{td} = \frac{H_i}{H_0})$  (Rovnice 4).

$$H_i = h_1 - h_k = H_0 \cdot \eta_{td} \quad (\text{Rovnice 3})$$

$$\eta_{td} = \frac{H_i}{H_0} \quad (\text{Rovnice 4})$$



Při vyšších izoentropických spádech, z důvodů vyšší účinnosti, se používá více stupňů řazených za sebou, které postupně tento spád zpracují. Jednotlivé stupně se skládají z rozvádějících lopatek a lopatek oběžných.

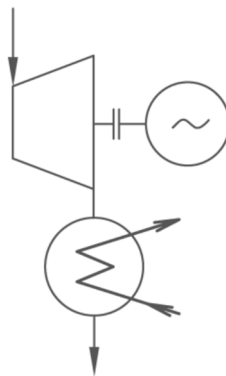
## 2.8.6 Typy turbíny dle konstrukce

### 2.8.6.1 Kondenzační parní turbíny

Pro kondenzační turbíny (Obr. 10) platí, že kondenzátor je přímo zapojen za parní turbínou. Při použití chladicí vody bývají minimální teploty kondenzace, v závislosti na zeměpisné šířce a způsobu kondenzace, až 15 °C, čemuž odpovídá tlak za turbínou 0,002 MPa. Tento typ kondenzace se nazývá expanze do vakua (tlak je menší jak atmosférický). Pokud je požadováno, aby kondenzát byl využíván pro vytápění, bývá teplota kondenzace 80–90 °C, čemuž odpovídá tlak lehce vyšší než atmosférický, většinou 0,12 MPa a nazýváme takovou kondenzaci potlačenou kondenzaci.

Dle média chlazení můžeme rozeznávat následující kondenzátory:

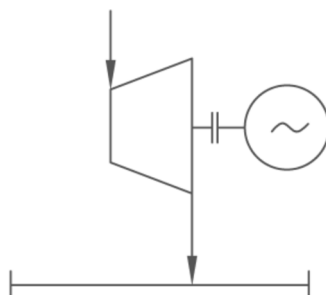
- povrchový-vodou chlazený – výstupní pára je chlazena vodou
- povrchový-vzduchem chlazený – výstupní pára je chlazena vzduchem
- směšovací – výstupní pára je chlazena jak vodou, tak i vzduchem



Obr. 10 Schématické zapojení kondenzační turbíny

### 2.8.6.2 Protitlakové parní turbíny

Protitlak (tlak páry na výstupu z turbíny) je větší jak atmosférický, a pára se využívá na další účely, kterými jsou například vytápění, kde tlak páry bývá 0,1–0,25 MPa a pro průmyslové potřeby, kde bývá tlak páry větší jak 0,1 MPa. Hlavním rozdílem protitlakových turbín (Obr. 11) oproti kondenzačním je, že na výstupu z kondenzační turbíny je kondenzátor páry, a na výstupu u protitlakové turbíny parovod se zapojeným spotřebičem.

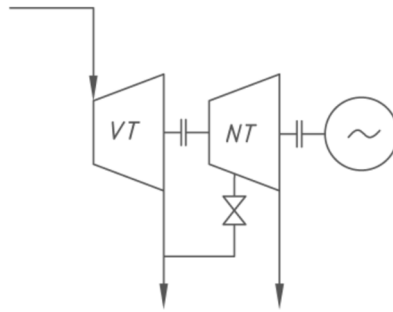


Obr. 11 Schématické zapojení protitlakové turbíny

### 2.8.6.3 Odběrové parní turbíny

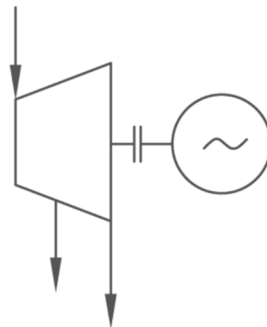
U tohoto typu turbíny je pára odebírána po částečné expanzi jinde než za posledním stupněm. Odběrů páry může být po celé délce turbíny realizováno několik, a u více tělesových turbín i mezi jednotlivými tělesy. Dle regulace odběru páry rozeznáváme neregulovaný odběr páry a regulovaný odběr páry.

Regulovaný odběr (Obr. 12) páry se využívá pro topné, či technologické účely a to tehdy, kdy je potřeba páry o tlaku vyšším, než je na výstupu z turbíny. Potřebné množství odebrané páry se reguluje regulačním ventilem. Výhodou regulovaného odběru oproti protitlaké turbíně je, že je možno provozovat odběrovou turbínu jako kondenzační (tehdy kdy není potřeba odběru páry) a také jako odběrovou (při potřebě odběru).



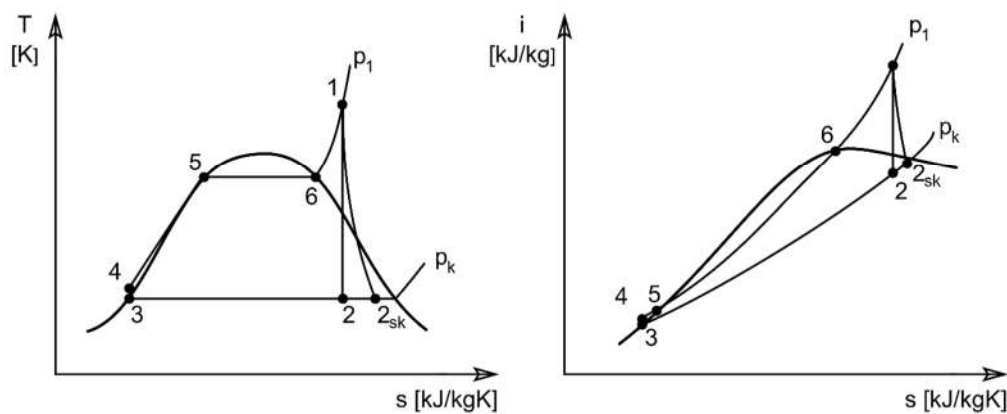
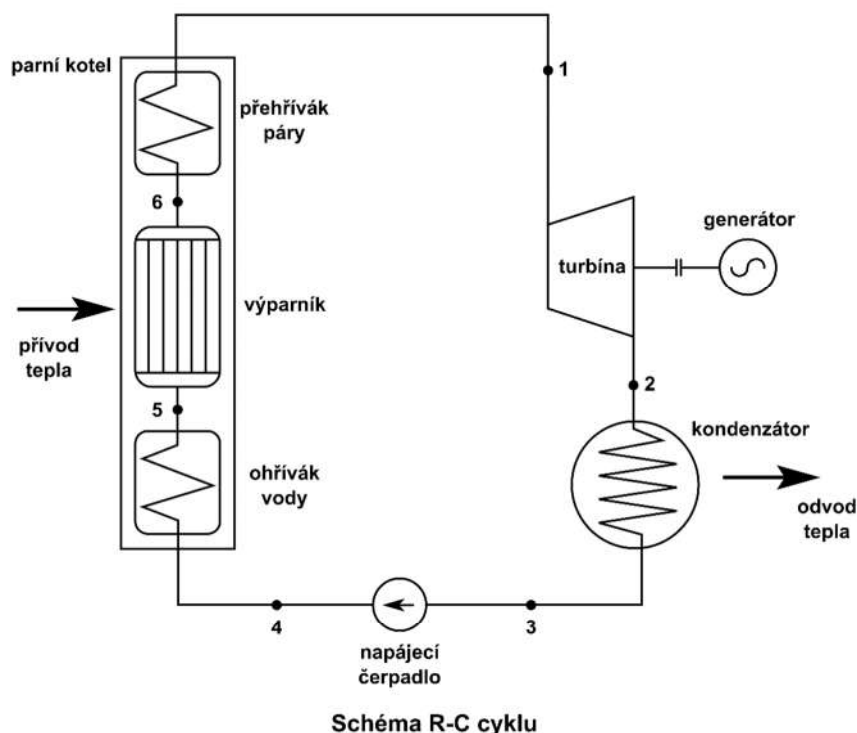
Obr. 12 Schématické zapojení odběrové turbíny s jedním regulovaným odběrem

Neregulovaný odběr (Obr. 13) páry se používá především za účelem regenerace páry.



Obr. 13 Schématické zapojení odběrové turbíny s jedním neregulovaným odběrem

Základním tepelným schématem používaný v tepelně energetických zařízeních je Rankine – Clausiův cyklus znázorněný na Obrázku Obr. 14.



**Znázornění R-C oběhu v T-s a i-s diagramu vody a vodní páry**

Obr. 14 Rankine - Clausiův cyklus

Tento ideální oběh je tvořen dvěma izoentropickými změnami (expansi v turbíně 1-2 a kompresí v napájecím čerpadle 3-4) a dvěma izobarickými změnami (ohřev v kotli 4-1 a kondenzací páry v kondenzátoru 2-3). V praxi je pracovní látkou voda, která v cyklu mění skupenství z plynného na kapalné a zpět.

Voda z kondenzátoru, kterou nazýváme *kondenzát*, je napájecím čerpadlem dopraven do napájecí nádrže a do kotle. V kotli se kondenzát ohřívá a mění se v přehřátou páru, kterou nazýváme admisní pára. Tato pára je přiváděna do turbíny, kde předává tepelnou energii rotoru parní turbíny, který pohání elektrický generátor. Po expanzi přichází pára do kondenzátoru, kde za stálého tlaku (podtlaku) předává

skupenské teplo chladící vodě a mění se v kondenzát. Celý pracovní proces je tak uzavřený a zanedbáme-li ztráty netěsnosti, pracuje oběh se stálým množstvím páry.

## 2.8.7 Základní stručný přehled parních kotlů používaných v energetice

### 2.8.7.1 Dělení kotlů podle pracovního média obecně, podrobněji kotle s přirozenou cirkulací, princip

Dělení kotlů dle pracovního média:

- Horkovodní
  - Skříňový
  - Plamencový
  - Bubnový
  - Průtočný (s nuceným oběhem)
- Parní
  - Velkoprostorový
    - Válcový
    - Plamencový
    - Žárotrubný
  - Vodotrubný
    - Podle konstrukce
      - Článekový
      - Strmotrubný
    - Podle průtoku ve výparníku
      - S oběhem ve výparníku
        - \* S přirozenou cirkulací
          - Jednobubnový
          - Dvoububnový
      - Průtočný
        - \* Pohyblivým koncem odpařování
        - \* S pevným koncem odpařování
        - \* Typ Ramzin
        - \* Se superponovanou cirkulací

#### Kotel s přirozenou cirkulací

*Jednobubnový kotel* - potřebný přítok vody je zajištěn rozdílnou hustotou vody a parovodní směsí v systému výparníku. Při jednom oběhu vody výparníkem se odpaří jen část vody, takže do várnice vstupuje mokrá pára. Oběh vody výparníkem je charakterizován oběhovým číslem „0“, který lze definovat jako převrácenou hodnotu suchosti nebo jako poměr hmotových toků vody vstupující do várnice a syté páry vyrobené výparníkem. Tyto kotle mají pevný konec vypařování (realizovaný bubnem) tzn. Kotel má konstantní velikost teplosměnné plochy. Ve vodní části bubnu dochází k zahušťování vody solemi a je nutné provádět odpouštění této zahuštěné vody (odluhu) a to těsně pod hladinou vody v bubnu. Kotel s přirozenou cirkulací dokáže udržet kvalitu páry i při zhoršené kvalitě napájecí vody. Typickým znakem je, že do várnice vstupuje voda z bubnu na bodě varu  $x=0$  a ohřívák vody je přímo napojen na buben kotle.

*Dvoububnový kotel* – má uspořádané dva bubny nad sebou – horní je parní buben a spodní je vodní menšího průměru. Výparník je tvořen obvodovými stěnami kotle a také mezistěnami. Hořáky jsou většinou umístěné na přední stěně. Tyto kotle jsou samonosné.

### 2.8.7.2 Dělení kotlů podle paliva obecně, kotle s cirkulující fluidní vrstvou

#### Dělení kotlů podle spalovaného paliva

- Tuhá paliva a odpady
  - Roštová ohniště
    - S přesuvným roštem
    - S pásovým roštem
  - Fluidní ohniště (atmosférické)
  - Práškové ohniště (ve vznosu)
- Kapalná
- Plynná paliva
- Kombinovaná
- Odpadní teplo
- Pro hnědá uhlí a odpady
- Pro černá uhlí
- Pro všechny typy tuhých paliv

#### Kotel s cirkulující fluidní vrstvou

Pro kotel s tímto ohništěm je charakteristické, že fluidní vrstva netvoří hladinu, ale zaplňuje ohniště po celé výšce. Horní hranici je odlučovací zařízení (např. cyklonový odlučovač) v němž jsou od sebe odloučeny spaliny a materiál fluidní vrstvy. Materiál fluidní vrstvy (nedohořená hořlavina, popel, aditivum při odsiřování) se vrací zpět do fluidní vrstvy nad dno ohniště. Odloučené spaliny pak dále pokračují přes teplosměnné plochy do odlučovače a dále do komína

### 2.8.8 Napájecí nádrž vč. odplynováků v základním stručném popisu

Požadavky na kvalitu napájecí vody parních kotlů specifikuje ČSN 07 7401 „Voda a pára pro tepelná energetická zařízení s pracovním tlakem páry do 8 MPa“. V této normě jsou uvedeny jednak ukazatele, které jsou závazné (tvrdost, obsah kyslíku, pH, obsah olejů, obsah SiO<sub>2</sub> a vodivost při 25 °C) a dále ukazatele doporučené (obsah CO<sub>2</sub>, obsah FE, obsah Cu, oxidovatelnost, obsah suspenzovaných látek). Z důvodu dodržení předepsaných limitů je nutné napájecí vodu před vstupem do parního kotle upravit. V současné době je v parních kotelnách většinou instalováno termické odplynění v napájecí nádrži s odplynovací nástavbou.

### 2.8.9 Proč odplynovat?

Voda při styku se vzduchem pohlcuje zejména kyslík, dusík, oxid uhličitý a další plynné složky z ovzduší. Z hlediska chemických režimů v tepelných okruzích jsou nejvýznamnější O<sub>2</sub> a CO<sub>2</sub>. Voda obsahující CO<sub>2</sub> reaguje kyselé a působí korozivně. Volný O<sub>2</sub> způsobuje důlkovou korozi, která prostupuje do hloubky stěn a je nebezpečnější než plošná koroze CO<sub>2</sub>. Hlavní princip odplynění je Henryho zákon – koncentrace rozpuštěného plynu ve vodě je přímo úměrná parciálnímu tlaku plynu nad její hladinou.

Výše uvedená problematika je ve skutečnosti daleko složitějším tématem, která se dotýká také vlastní chemické úpravy vody.

Základním kritériem pro tepelné oběhy je jejich účinnost. *Termická (tepelná) účinnost* je podíl získané (mechanické) práce a teplo přivedené do cyklu (jde o účinnost přeměny tepelné energie na mechanickou práci).

## 2.8.10 Historie

Historicky byl vývoj termodynamiky veden touhou zvýšit efektivitu prvních parních strojů, čímž se zabývala klíčová práce „Úvahy o hybné síle ohně“ francouzského fyzika *Sadiho Carnota* (r. 1824), často nazývaného otcem termodynamiky.

*Rudolf Clausius* upřesnil Carnotův výklad formulací prvního a druhého zákona termodynamiky (r. 1865).

Termodynamiku dále obohatili Kelvin, Rankine, Gibbs, Nernst a Planck.

*William Thomson* (známý jako lord Kelvin) zavedl pojem absolutní teploty a teplotní stupnici.

Američan *Gibbs* přišel na teorii *termodynamických potenciálů*, z čehož vzniklo pravidlo o koexistenci fází.

*Hermann Nernst* – třetí zákon termodynamiky (r. 1905) pojednávající o entropii látek v okolí *absolutní nuly*.

*Max Planck* zobecnil třetí zákon termodynamiky a zdůraznil význam pojmu entropie.

Termodynamická účinnost nebo termická účinnost nebo tepelná účinnost je bezrozměrné číslo, které vyjadřuje, jak efektivně teoretický tepelný stroj pracující s uzavřeným tepelným cyklem přeměňuje přivedenou tepelnou energii na práci.

$\eta_t$  – tepelná účinnost

$\eta$  – účinnost při termodynamických výpočtech

$(1 - \eta_t)$  – popisuje tepelné ztráty

Pro uzavřený cyklus platí rovnice:  $Q_p - Q_o - W_p + W_k = 0$

- $Q_p$  : teplo přivedené do cyklu
- $Q_o$  : teplo odvedené z cyklu
- $W_p$  : práce vykonaná cyklem
- $W_k$  : práce spotřebovaná cyklem

$$\eta = \frac{W_p - W_k}{Q_p} = \frac{Q_p - Q_o}{Q_p} = 1 - \frac{Q_o}{Q_p}$$

Termodynamická účinnost je vždy menší než 1.

### Termodynamické děje.

Základní termodynamické děje:

1. Izochorický děj – při stálém objemu ( $V = \text{konst.}$ )
2. Izobarický děj – při stálém tlaku ( $p = \text{konst.}$ )
3. Izotermický děj – při stálé teplotě ( $T = \text{konst.}$ )
4. Adiabatický děj – bez sdílení tepla s okolím
5. Polytropický děj – daný vztahem  $p \cdot v^n = \text{konst.}$

Při rozboru dějů je třeba se zaměřit na změny teploty, tlaku a objemu, protože tyto veličiny jsou rozhodující pro volbu materiálu, konstrukci a velikosti zařízení, ve kterém se děje konají.

**Parní turbíny** jsou tepelné motory, které přeměňují tepelnou energii vodní páry na mechanickou energii a ve spojení s generátorem na elektrickou energii. Parní turbína obsahuje dvě soustavy lopatek, z nichž jedna je spojena se skříní (státorem) a je nepohyblivá – rozváděcí a druhá je spojena s rotujícím hřídelem (rotorem) – oběžné (oběžná lopatková mříž). Do turbíny je přiváděna admisní (vstupní) pára o vysokých parametrech. V rozváděcích lopatkách pára expanduje a získává vysokou rychlost, kterou působí na oběžné lopatky, tyto mění směr proudění a reakce způsobuje vznik krouticího momentu a mechanické energie. Rozváděcí lopatky usměrňují tok páry na lopatky rotorů – brání vzniku *vířů*.

Pozn.: Vířivost jako veličinu nelze přímo měřit, spadá do oblasti dynamiky proudění.

Turbínou protéká určité množství páry, která postupně ztrácí svou tepelnou energii – klesá entalpie páry. Postupnou expanzí páry (klesá tlak i teplota páry) roste její měrný objem, a proto každý další stupeň musí mít větší průřez – delší lopatky. Nejdelší lopatky má tedy poslední stupeň turbíny. To působí problém konstruktérům pro vysoké odstředivé síly působící na dlouhé oběžné lopatky posledního stupně.

#### Poznámka:

Trvalým trendem v oblasti vývoje energetických strojů (např. parní turbíny) je zvyšování jejich účinnosti. U kondenzačních par. turbín je klíčovým faktorem, který významně ovlivňuje účinnost koncová lopatka nízkotlaké části turbíny. Snížením výstupních ztát koncové lopatky a tím zvýšení účinnosti je možné docílit větší výstupní průtočnou plochou turbíny, čehož lze dosáhnout právě použitím delší lopatky. To má mimo jiné i ekonomický přínos, neboť větší výstupní průtočná plocha turbíny v mnoha případech umožňuje snížit počet jejich nízkotlakých dílů, což má pozitivní vliv na cenu. Vývoj ultra dlouhých koncových lopatek vyžaduje aplikovat nejmodernější numerické simulační přístupy. Je nutné optimálně skloubit aerodynamický a mechanický návrh lopatky.

Z pohledu proudění páry se dosahují kolem koncových lopatek supersonické (nadzvukové) rychlosti, které vykazují hodnoty cca  $Ma\ 2$  ( $Ma\ 1$  = rychlost zvuku).

Z pohledu je kritickým konstrukčním uzlem zavěšení lopatky v rotoru. Např. závěs lopatky je při jmenovitých otáčkách turbíny 3000/min namáhán odstředivými silami, které jsou rovny ekvivalentní hmotnosti až 500 tun. Takto vysoké namáhání lopatky společně s korozním a erozním prostředím páry vytváří rovněž vysoké nároky na materiál lopatky.

Pro koncové lopatky se používají titanové slitiny (např. 6Ti4Al), původně vyvinuté pro letecký průmysl.

Hlavní výhodou titanových slitin je jejich příznivý poměr mezi měrnou hmotností a pevností, která dosahuje hodnot kolem 1000MPa. Na druhou stranu je nutné počítat s problematickou obrobiteľností a zhoršenou erozní odolností, tu lze zlepšit speciálními laserovými nástřiky povrchu lopatky.

Oběžná lopatka je tvořena aerodynamickým listem a tzv. stromečkovým závěsem, jímž se lopatka upevňuje v disku rotoru a přenáší veškeré odstředivé síly lopatky.

Další lopatky bývají osazeny dvěma integrovanými vazebními členy, a to na špičce listu a pak přibližně v polovině délky listu. Tyto vazební členy mají za úkol jednotlivé oběžné lopatky obvodově propojit a tím vyztužit celé kolo, což má pozitivní vliv na snížení nebezpečného kmitání lopatek.

Vazební člen na špičce listu plní funkci bandáže, která také slouží k zamezení nežádoucího proudění páry, a tím ke zvýšení účinnosti. Za klidu jsou mezi vazebními členy sousedních lopatek přesně definované vůle v řádu milimetrů. Při rozběhu turbíny dochází při určitých otáčkách k vymezení vůlí a následnému zamknutí vazebních členů. Při návrhu listu lopatky je kladen značný důraz na minimalizaci odstředivých sil, neboť ty mají přímý vliv na životnost závěsu lopatky.

Každá oběžná lopatka musí být frekvenčně naladěna tak, aby se její vlastní frekvence nevyskytovaly v blízkosti násobků frekvence otáčení, což je nutné kritérium pro eliminování rezonančního kmitání lopatky.

Zvláště důležité pro kmitání je doba, kdy turbosoustrojí mění svůj provozní stav – nájezd, doběh. V průběhu změn rychlosti otáčení se mění budící frekvence i odstředivá síla a tím tuhost lopatek. Konstrukční vlastnosti součásti turbíny a s nimi spojené rezonance jsou dalšími budícími prvky v systému s vlivem na celkové namáhání lopatek. V provozní fázi se začne uplatňovat aerodynamické buzení od proudící páry, rostou síly působící na lopatky a se zvyšováním rychlosti proudícího media se mění charakter úplavů za odtokovými hranami lopatkové mříže.

Rezonanční kmitání lopatek bývá často hlavní příčinou vzniku trhlin, které mohou následně zapříčinit vážnou havárii.

Je logické, že čím je lopatka delší, tím je její frekvenční naladění náročnější. V nízkotlakových dílech – zvláště na jejich konci – dosahuje proud pracovní páry supersonických rychlostí. Kondenzací páry zde vzniká vodní fáze ve formě vodních kapiček. V koncových stupních parních turbín dochází k podstatným změnám rychlostí proudu pracovního media, jejichž příčinou jsou změny výkonového zatížení, které je pak zvýrazněné např. u turbín s teplofikačním odběrem páry. Uvedené jevy jsou zdrojem budících sil, které dynamicky namáhají oběžné lopatky. Rovněž vedou ke zvýšení eroze nebo k nežádoucím deformacím nízkotlakových dílů, jež jsou způsobeny vlivem dilatací od nerovnoměrného ohřátí.

To vše má nepříznivý vliv nejen na účinnost, ale také na spolehlivost a životnost parních turbín. Touto problematikou se zabývají pracovníci DOOSAN ŠKODA POWER v Plzni.

### **2.8.11 Poslední novinka ve vývoji par. turbín**

Siemens představil v polovině r. 2016 parní turbínu s *levitujícím rotorem*. Tato technologie turbíny s levitujícím rotorem využívá magnetické pole, které se vytváří v elektromagnetických ložiscích, která nadnáší několik tun vážící rotor. Namísto potřeby stovek litrů oleje pro chlazení ložisek si nová *bezolejová turbína* vystačí s cca třemi litry oleje použitého v pohonu regulačních ventilů pro přísun páry do turbíny.

Dnešní parní turbíny používají pro mazání a chlazení ložisek rotoru olej, který musí být vzhledem k velmi vysokým teplotám kontinuálně proháněn skrze ložiska. Používaná olejová hospodářství zahrnují stovky litrů oleje v olejové nádrži, čerpadla, olejový chladič, filtry, rozvody, bezpečnostní systémy zabráňující vzniku požáru, ochrany s kabeláží aj.

Vývojáři Siemensu vyřešili i problém vysokých teplot páry vstupující do turbíny, a to speciálním systémem chlazení, který si nechali patentovat. Poloha rotoru je v aktivních elektromagnetických ložiscích sledována senzory a v případě potřeby je poloha upravena změnou intenzity magnetického pole.

Tato nová technologie je aplikovatelná na par. turbíny s rotorem vážícím až 10 tun, tedy o výkonu až 40MW.

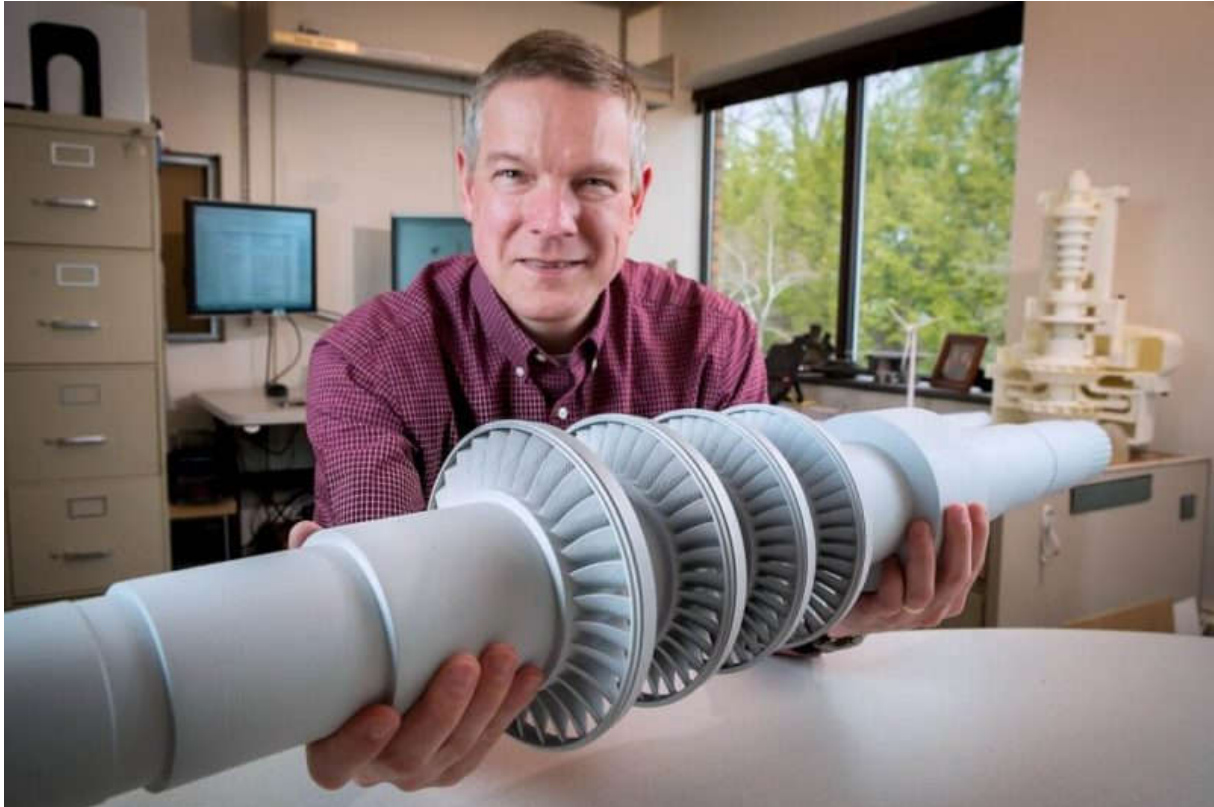
### **2.8.12 Další možnosti vývoje parních turbín**

Oddělení vývoje General Electric Global Research představilo koncept výroby energie prostřednictvím turbíny, která je poháněná CO<sub>2</sub> v superkritickém stavu. Díky vlastnostem tohoto media může dojít k zvýšení účinnosti výroby elektřiny a k významnému snížení hmotnosti i velikosti turbíny.

Hmotnost v současnosti používaných turbín se pohybuje v řádu tun, jenže během následujících pěti až deseti let už tomu tak být nemusí. Na obrázku Obr. 15 je zatím pouze plastový model turbíny s výkonem 10MW vytištěný na 3D tiskárně. Dle materiálů publikovaných GE má její skutečný funkční prototyp



z vysoko-pevnostních kovových slitin vážit pouhých 68 kg (150 liber), což je hmotnost, kterou sportovně založení lidé v posilovnách běžně zvedají na bench press lavicích.



Obr. 15 Model rotoru parní turbíny zhotovený na 3D tiskárně

“Toto kompaktní zařízení nám umožní dělat neuvěřitelné věci. Svět hledá ekologičtější a efektivnější způsoby výroby elektřiny. Koncept, který zkoumáme, umožní dosažení obou cílů zároveň,” řekl o výzkumu specialista vývoje parních turbín v GE Global Research Dough Hofer.

Médium, které pohání nově navrženou turbínu, není pára, ale oxid uhličitý v superkritickém stavu. Kritický bod oxidu uhličitého se nachází v mezích dosažitelných současnými technologiemi. Jeho kritická teplota je 304,25K (31,10°C) a kritický tlak 7,39MPa. Využití CO<sub>2</sub> pro účely generování elektřiny není novou myšlenkou. Studie MIT z roku 2004 uvádí, že použitím superkritického oxidu uhličitého o teplotě 550° může dosáhnout tepelné účinnosti 46 %.

Dle Hofera může využití vlastností superkritického CO<sub>2</sub> přispět ke zvýšení účinnosti velkých centrálních zdrojů energie, což jim umožní stát se více konkurenceschopnými v porovnání s obnovitelnými zdroji.

### 2.8.13 Vliv vlhkosti páry na lopatkování parní turbíny

Každá par. turbína obsahuje základní části, kterými jsou hřídel turbíny, oběžná kola, lopatky a dýzy. V dýze turbíny získává pára výtokovou rychlost a kinetickou energii. Dochází zde k expanzi. Průměr oběžných kol a velikost lopatek se liší podle hodnoty tlaku. Čím nižší je tlak páry tím větší musí být lopatky a průměr oběžného kola. Pro účinnost a životnost turbíny je významná *suchost páry*. Přítomnost vlhkosti v páře snižuje účinnost a způsobuje erozi lopatek.

Na eliminaci vlivu vlhkosti páry na lopatky turbíny se používají aktivní i pasivní metody snižování vlhkosti páry. Mezi aktivní metody odstraňování vlhkosti z páry je možno uvažovat primárně přehříváním páry nebo separací. Mezi pasivní metody potom ochranu náběžných hran oběžných lopatek například kalením nebo navařováním tvrdokovu.

### 2.8.14 Podle konstrukce rozlišujeme parní turbíny: rovnotlakové, přetlakové, protitlakové a kondenzační:

V rovnotlakových turbínách probíhá přeměna energie páry na energii kinetickou jen v dýze a pára prochází lopatkami za stálého tlaku.

V přetlakových turbínách pára expanduje jak v dýze, tak mezi lopatkami a tlak páry při prostupu turbínou není konstantní, ale klesá. Tlak, teplota a entalpie páry na vstupu do turbíny jsou tedy větší než na výstupu. Celkový tepelný spád turbíny se skládá ze spádu na lopatkách k celkovému spádu. Teplené spády se pohybují okolo 1200 – 1500kJ/kg.

Konstrukcí turbíny s větším počtem tlakových stupňů dojde ke snížení otáček turbíny a tím ke snížení sil namáhající části turbíny.

Kondenzátor je tepelný výměník pro chlazení a její přeměnu (kondenzaci) na kapalinu (kondenzát). Protože kondenzát z kondenzátoru vystupuje o teplotě cca 45 °C a odplynění se provádí při 105 °C je nutné kondenzát o tuto hodnotu ohřát a je možno je ohřát až v odplyněvací nebo vytvořit další odběr v turbíně a tím bude odběrová pára více expandovat v turbíně a tím zvýšíme výrobu elektrické energie. Ohřátí provádíme v povrchových ohřívacích většinou v trubkovém provedení, a protože většinou pracují při nízkých tlacích tak je nazýváme nízkotlakové regenerační ohříváky (NTO).

Obvyklými chladicími médii jsou voda nebo vzduch. V kondenzátoru dochází k předání kondenzačního tepla páry za konstantní teploty a tlaku. Kondenzátor v tepelných elektrárnách umožňuje prodloužit expanzi páry v turbíně až do relativně hlubokého *vakua*, což vede ke zvýšené tepelné účinnosti *parního cyklu*.

Nízké hodnoty tlaků v kondenzátoru zvyšují entalpický spád v turbíně a účinnost tepelného toku.

#### Snížení tlaku v kondenzátoru

Snížením tlaku v kondenzátoru zvyšujeme vyrobený elektrický nebo mechanický výkon.

Toto snížení tlaku je možno dosáhnout:

- Snížením vstupní teploty chladící vody.* Toto snížení je možno v praxi provést volbou chladícího okruhu. Kdy nejvyšší výkony lze dosáhnout použitím mokrých chladících věží, které pro danou teplotu okolí  $t_{ok}$  dosáhnou nejnižší teploty chladící vody  $t_{v1}$  na vstupu do kondenzátoru. Za předpokladu konstantního ohřátí  $\Delta t_v$  a konstantního koncového teplotního rozdílu  $\delta$  je pak teplota kondenzace  $t_k$  dána:

$$t_k = t_{v1} + \Delta t_v + \delta \quad (\text{Rovnice 5})$$

Z teploty kondenzace  $t_k$  je pak možno určit tlak za turbínou  $p_k$ . Z  $t_k = t_{v1} + \Delta t_v + \delta$

(Rovnice 5) pak plyne, že čím nižší je teplota chladící vody  $t_{v1}$  tím je nižší tlak  $p_k$ . Toto snížení tlaku má ale za následek velkou spotřebu doplňující vody do chladícího okruhu, které se přibližně rovná množství kondenzující páry a je většinou limitujícím parametrem.

- Zvětšením hmotnostního průtoku chladící vody.* V tomto případě se v  $t_k = t_{v1} + \Delta t_v + \delta$  (Rovnice 5) mění  $\Delta t_v$  a ostatní parametry jsou stejné. Toto snížení tlaku má negativní důsledek ve velkém zvětšení čerpací práce a používá se u elektráren stojícím na břehu moře nebo velkých řek.
- Zvětšením teplosměnné plochy kondenzátoru se dosáhne snížení koncového teplotního rozdílu  $\delta$ .* U tohoto způsobu snížení tlaku rostou investiční náklady na kondenzátor.

Snížení tlaku  $p_k$  má ale také negativní vliv v to, že roste měrný objem  $v_k$  a tím roste objemový průtok  $V_k$  posledním stupněm, a to pak vede ke snižování otáček a tím i ke snižování termodynamické účinnosti turbíny. Se snížením tlaku  $p_k$  také roste vlhkost za turbínou se všemi již uvedenými důsledky.

Vodou chlazené kondenzátory energetických bloků jsou trubkové konstrukce, tvořené svazkem přímých teplosměnných trubek upevněných na obou koncích do trubkových stěn (tzv. trubkovic). Proti vibracím a nadměrnému průhybu jsou trubky podepřeny několika podpěrnými stěnami. Rozvod chladicí vody do jednotlivých trubek zajišťují vodní komory. Nekondenzovatelné plyny z parní části kondenzátoru jsou za provozu trvale odsávány vývěvou (parní ejektor), která se podílí na tvorbě vakua v kondenzátoru. Materiálem trubek bývá – hliníková mosaz, nerezová ocel, slitina mědi a niklu (kupronikl), titan.

Vzduchem chlazené kondenzátory odvádí teplo přímo do okolního vzduchu, chladicí okruh tedy nepotřebuje zdroj vody. Teplosměnné trubky jsou na vnějším povrchu žebrované a uspořádané do deskových sekcí, uložené šikmo ve tvaru písmene A. Ze spodní strany je vháněn chladicí vzduch prostřednictvím ventilátoru. Rozvod páry do trubek je zajištěn kolektorem na horní straně, odvod kondenzátu je ze spodního kolektoru. *Nevýhodou* oproti vodou chlazeným kondenzátorům je vyšší pořizovací cena, vyšší spotřeba energie pro ventilátory a horší dosažitelné vakuum.

V kondenzátorech se udržuje vysoké vakuum (6kPa tzn. 94% vakuum). Hodnota vakua má značný vliv na snížení měrné spotřeby páry, zvýšení vakua o 1 % znamená snížení spotřeby páry cca o 2 %.

Hodnoty vakua závisí na chladícím povrchu kondenzátoru, na množství chladicí vody vztažené na 1kg páry a na vstupní teplotě chladicí vody. Zvýšením těchto parametrů dojde ke zvýšení vakua.

#### Trubky v kondenzátoru:

$\varphi$  – součinitel prostupu tepla

$\varphi = 0,85$  (pro trubky mosazné a slitin mědi a niklu)

$\varphi = 0,9$  (nerezová ocel – také se čistí pro vznik bodové koroze)

Rychlost chladicí vody v trubkách kondenzátoru  $W$  ovlivňuje do značné míry součinitel prostupu tepla – čím je  $W$  větší, tím menší vyjde chladicí plocha a vnější kondenzátor

$$W = 1,5 \div 2,4 \text{ m/s}$$

Menší rychlosti dávají kromě snížení přestupu tepla také nerovnoměrné rozdělení vody do svazků trubek a způsobují snadnější usazování kalů v trubkách. U vysokých rychlostí může vzniknout na vstupu do trubek eroze, zejména obsahuje-li voda hodně kyslíku.

Plyny, které při teplotách v kondenzátoru nekondenzují, často nazývané inertní plyny (převážně je to vzduch), ovlivňují hodnotu přístupného součinitele tepla velmi intenzivně. Pára ze směsi v blízkosti trubky zkondenzuje a zbylá vrstva vzduchu ulpí na trubce a tím brání přístupu páry – dochází ke zhoršení funkce kondenzátoru.

Vstupní teplota vody nelze ovlivnit, je přibližně rovna okolní venkovní teplotě.

Zvětšení chladicí plochy – větší rozměry kondenzátoru – prodražení kondenzátoru.

Zvýšení průtoku chladicí vody – vyšší výkon čerpadel – zvýšení vlastní spotřeby elektřiny.

V důsledku poklesu konečného tlaku (růstu hodnoty vakua) dochází k růstu měrného objemu páry a tím je potřeba zvětšit rozměry koncového dílu turbíny – cenový nárůst turbíny.

Teplota kondenzátu z kondenzátoru se pohybuje v rozmezí okolo 30°C.

Množství chladicí vody bývá 50–60násobek množství páry vstupující do kondenzátoru.

### Hlavní příčiny špatného (neekonomického) provozu kondenzace:

- Netěsnost podtlakové části oběhu (NT díly turbíny, kondenzátor)
- Špatná činnost čerpadel chladicího okruhu
- Nedostatečná činnost vývěv – správné nastavení tlaku pro zahlcení par. ucpávek
- Znečištění vnitřního povrchu trubek kondenzátoru
- Snížení účinnosti chladících věží při oběhovém chlazení (možnost použití ventilátoru)

### Generátor (alternátor)

Elektrická energie z turboalternátoru je převáděna do transformátoru, který zvýší napětíovou hladinu z VN na VVN (obvykle 400kV nebo 110kV) a sníží proudy z desítek kiloampér na stovky ampér. Takovéto napětí a proudy jsou vhodné k přenosu.

*Rotor* alternátoru určuje frekvenci v síti – u nás je tato frekvence 50 Hz, proto musí rotor vykonat 50ot/sec, což je 3000ot/min.

*Stator* se skládá ze tří cívek, posunutých o 120°, ve kterých pohyb zmagnetizovaného rotoru indukují elektrický proud. Každá cívka představuje 1 fázi – proto máme 3fázovou soustavu.

### Přenos energie platí:

- Aby byly ztráty co nejmenší, používáme pro přenos vysoké napětí (vysoké napětí → nízký proud, ztrátové Joulovo teplo  $P=R \cdot I^2$  → 2x menší proud = 4x nižší ztráty).

### Synchronní alternátor

- Na štítu je činný a zdánlivý výkon
- Činný výkon reaguje na změnu výkonu turbíny a výkon turbíny reaguje na množství páry.

Pozn.: Nejvyšší možné přenosové napětí, při němž by bylo možno venkovní vedení provozovat, je omezené tzv. *elektrickou pevností vzduchu* a činí asi 2400kV.

### Alternátor

- Je točivý elektrický stroj, ve kterém se přeměňuje kinetická energie (pohybová energie) rotačního pohybu na energii elektrickou ve formě střídavého proudu (*synchronní alternátor*).
- Alternátor pracuje na principu elektromagnetické indukce, kde *rotor* jako otočný magnet se otáčí uvnitř pevně umístěných cívek na železných jádrech, které tvoří *stator*.
- Pohybem rotoru je generován elektrický proud. Rotující magnetické pole indukují ve vinutí cívkou střídavý elektrický proud.
- Alternátory pracují v běžném provozu synchronně s frekvencí příslušné elektrorozvodné sítě.
- Všechny alternátory musí být do sítě *přifázovány* při shodě (nulová hodnota) fázového posunu a frekvence (na straně alternátoru je vždy dán otáčkami hnacího stroje).
- Alternátory pracují při jmenovitých otáčkách 3000ot/min, která vyplývá ze synchronního provozu stroje při jmenovité frekvenci elektrorozvodné sítě 50 Hz platných pro celou Evropu.
- Alternátor bývá doplněn *budičem* (přes pevnou spojku bývá spojen s rotorem alternátoru), který *stejným proudem* nabudí rotor, tzn., že se z rotoru stává *elektromagnet*. Buzením se před i po přifázování turbogenerátoru mění velikost napětí na alternátoru.

Pozn.: Asynchronní alternátor se používá pouze výjimečně v malých vodních elektrárnách. Výhodou je jednoduchá konstrukce, spolehlivost při provozu a stálé otáčky – turbína nepotřebuje regulátor otáček.

### 3 UVÁDĚNÍ NOVÉ TURBÍNY DO PROVOZU

#### 1) Program individuálních zkoušek turbosoustrojí

##### a) Individuální zkoušky potrubí

- i) *Kontrola kvality a úplnosti montáže dle průvodní technické dokumentace*
- ii) *Kontrola rozmístění a nastavení závěsů*
- iii) *Kontrola rozmístění a přístupnosti armatur*
- iv) *Kontrola funkčnosti armatur a regulačních obvodů*
- v) *Kontrola izolace potrubních tras*
- vi) *Kontrola označení potrubních tras*
- vii) *Kontrola stavu baterek (DC) pro nouzové olejové čerpadlo*

##### b) Individuální zkoušky olejového systému

- i) *Kontrola kvality a úplnosti montáže dle průvodní technické dokumentace*
  - ii) *Kontrola elektromotorů (směr točení)*
  - iii) *Kontrola chodu a funkce čerpadel, odzkoušení nouzového čerpadla*
  - při poklesu tlaku mazacího oleje pod 1 bar musí začít dodávat nouzové čerpadlo příslušný tlak mazacího oleje – použití pouze pro doběh turbíny po výpadku el. energie na protáčecí otáčky (časová závislost na kapacitě akumulátorové stanice sloužící jako dodávka SS proudu pro nouzové čerpadlo)
  - iv) *Kontrola těsnosti olejového systému*
  - v) *Kontrola funkce ventilátoru pro odsávání olejových par z olejové nádrže*
  - vi) *Odlučovač olejové mlhy*
  - Vytváří mírný podtlak v olejovém systému, takže olejová mlha neuniká do okolí. Odsávaný vzduch s olejovou mlhou prochází filtračními elementy z mikrovláken, koalescenčním\* efektem se odloučí 99,9 % olejových částic. Takto pročištěný vzduch splňuje zákonné limity a je vypuštěn do stroje. Odloučený olej se vrací zpět do olejové nádrže, jeho vlastnosti zůstávají nezměněné.
  - \*Pozn.: koalescence je shlukování a odlučování jemně rozptýlených částic kapalin.
  - vii) *Seřízení tlaku mazacího oleje regulátorem na 3 bar (seřizuje se při teplotě min 30 °C)*
  - viii) *Provedení proplachu celého olejového systému, dle stavu a vyčištění sít umístěných v olejové nádrži se může proplach opakovat*
  - pro proplach olejového systému musí být dostatečný průtok oleje (rychlost proudění), proto se demontují síta z olejových filtrů, otevrou se škrtkové clony na vstupu do ložisek, olej by měl mít teplotu 40°C, provede se by-pass mazacího oleje generátoru a převodovky, demontují se horní poloviny radiálních ložisek
  - Otevření ventilů chladicí vody do olejového chladiče při teplotě oleje cca 40°C
- ##### c) Individuální zkoušky vysokotlakého regulačního oleje
- i) *Odzkoušení funkce obou čerpadel (jedno je pracovní a druhé je 100% záloha)*
  - ii) *Kontrola těsnosti olejového systému*
  - iii) *Seřízení vodního chladiče oleje*
  - iv) *Odzkoušení pohybu rychlozávěrného ventilu (otevřeno – zavřeno)*
  - v) *Odzkoušení jednotlivých regulačních ventilů (otevřeno – zavřeno)*
  - vi) *Odzkoušení regulační clony regulovaného odběru (je-li zabudována)*

**d) Evakuační stanice (vodokružná vývěva, parní vývěva)**

- i) Slouží k vytvoření vakua na výstupu z turbíny
- ii) Spouštění stanice, nastavení odsávání nekondenzovatelných par z kondenzátoru, u vodokružné vývěvy nastavení zahlcení čerpadla vodou

**e) Individuální zkoušky generátoru**

- i) Individuální zkoušky generátoru podle požadavků výrobce provádí zkušební technik dodavatele generátoru
- ii) Zkušební technik generátoru ve spolupráci se zkušebním technikem turbíny provedou důležitou zkoušku, a to při prvním najíždění turbíny tzv. „zpětná wattová“ (ochrana statoru generátoru)

**f) Pomontážní čistící operace**

- i) Profuk vstupního par. potrubí se provádí po dokončení montáže a tím pročištění od zbytků materiálu, které zůstaly uvnitř parovodu po svařování během montáže
- Profuk parního potrubí je součástí dodávky kotle, a proto profuk zajišťuje dodavatel kotle
- Celý proces profukování tvoří 3 fáze:
  - o Nahřívání potrubí
  - o Vlastní profukování
  - o Snižování výkonu kotle a chlazení potrubí
- Nahřívání potrubí lze považovat za ukončení, jestliže na výstupu z kotle se dosáhlo pracovní teploty páry a teplota potrubí na konci profukované trasy se již nemění
- Parní výkon kotle se v tomto období kontroluje dle údajů průtokoměru napájecí vody do kotle
- Profukuje se po dobu min. 30 minut a v pravidelných intervalech jsou zapisovány parametry profuku (tlak, teplota, průtok páry)
- Nahřívání potrubí je možno považovat za ukončené, jestliže teplota na začátku profukovaného potrubí dosáhla provozní teploty a teplota na konci profuk. potrubí se nemění.
- Množství a parametry profukovací páry se předem stanoví výpočtem  
Dynamický tlak páry se stanoví ze vztahu:

$$P_d = (m/f)^2 \times v/2 \text{ g [kp.m}^{-2}\text{]}$$

m – množství páry [kg.s<sup>-1</sup>]

f – průtočný průřez profuk. části [m<sup>2</sup>]

v – měrný objem páry [m<sup>3</sup>.kg<sup>-1</sup>]

g – zemské zrychlení..... 9,8 [m.s<sup>-2</sup>]

- U potrubí, kde nebylo provedeno před montáží moření, se profuk provádí min. 5x
- Měření se provádí a zapisuje v intervalech 2÷5 min
- Měřené hodnoty slouží jako podklad pro kontrolní výpočet dynamických tlaků
- Rozměry destiček se volí jednotně – 25x50x8 mm
- Každá destička má mít vražené číslo pořadové číslo profuku
- Celkem se provádí profuk min. 3x
  - vždy se vyhodnocuje stav destičky, která je zabudována na výstupním provizorním potrubí před turbínou
  - destička má lakovaný povrch a vyhodnocuje se počet vrypů od uvolněných mechanických nečistot
  - před každým profukem se do potrubí vkládá nová destička
- Jsou-li v potrubním systému zabudovány kompenzátory, nutno zjistit u výrobce kompenzátorů, zda je povoleno provést profuk potrubí na plánovaných parametrech
- Minimální počet profuků je 3x

- i) Nutno demontovat v přívod. potrubí páry měřící clonu množství

## 2) Program předkomplexních zkoušek turbosoustrojí

- a) Zkouška všech ochran a signalizací
- b) Kontrola funkce monitorovacího, zabezpečovacího a řídicího systému turbosoustrojí
- c) Zkouška záskoků čerpadel regulačního a mazacího oleje

## 3) První najetí turbíny

- a) **Kontrola parametrů vstupní páry**
  - Parametry musí být mírně nad min. parametry zadané do řídicího systému (teplota, tlak)
- b) **Po odzkoušení ochran na stojícím generátoru se můžou zahájit teplé zkoušky**
- c) **Pro spuštění turbíny musí být splněny následující podmínky**
  - i) *Zapnutí čerpadlo (najižděcí) mazacího oleje (taktéž značené jako POČ – pomocné olejové čerpadlo)*
  - ii) *Musí být spuštěno protáčekací zařízení*
    - Pro rozběh protáčekacího zařízení se používá softstartér (frekvenční měnič), který zabezpečuje pozvolný rozběh motoru PZ, šetří mechanické části PZ a nezatěžuje nadměrně elektrickou síť
  - i) *Musí být tlak (podtlak) v kondenzátoru ucpávkové páry (KUP) cca 0,9- 0,95 bar*
  - Parovzdušná směs je odsávána z prostoru parních ucpávek, zde kondenzuje, kondenzát je odveden přes odvaděč kondenzátoru do hlavního kondenzátoru a studený vzduch z parovzdušné směsi je odveden na výstup ventilátoru do prostoru strojovny. Chladivem pro KUP je hlavní kondenzát
  - ii) *Musí být spuštěna evakuační stanice (vývěva), KUP (kondenzátor ucpávkových par), zahlcení par. ucpávek PLS a ZLS, chladicí voda, chladič vzduchu generátoru, regulační vysokotlaký systém – odzkoušení těsnosti RZV a RV*
  - iii) *Provést odvzdušnění vodních komor olejového chladiče a chladiče vzduchu generátoru*
- d) **Provede se prohřev vstupního potrubí**
  - viz Závěr – prohřev
- e) **Zkontrolovat otevření všech odvodnění na turbíně a příslušném potrubí.**
  - Po prohřátí jednotlivých částí parovodu příslušné přímé odvodnění zavřeme
  - Armatury na větvích s odvaděči kondenzátu jsou vždy otevřené, avšak při prvním uvádění turbosoustrojí do provozu jsou armatury před jednotlivými odvaděči uzavřeny a armatury v obtoku odvaděčů jsou otevřeny (možnost zanesení sít v odvaděčích z nečistot a tím i k poškození dosedacích ploch kuželek)
- f) **Zkontrolovat uzavření armatury regulovaného a neregulovaného odběru a armatur na zahlcení ucpávek**
- g) **Spustit systém chladicí vody zapnutím hlavního čerpadla chladicí vody pro kondenzátor a spustíme podávací čerpadlo pro chladič oleje a generátoru**
- h) **Zkontrolovat otevření armatur na vstupu a výstupu chladicí vody z kondenzátoru, chladiče oleje a chladiče vzduchu generátoru. Zkontrolovat otevření armatur chladícího kondenzátu na vstupu a výstupu do PV, KUP a NTO. Obtoky jsou uzavřeny. Taktéž zkontrolovat otevření případně zabudovaných deskových chladičů kondenzátu do NTO v recirkulačním kondenzátním potrubí**
- i) **Provést odvzdušnění vodních komor chladiče oleje a chladiče vzduchu G**
- j) **Na ovládacím monitoru na velině přepneme všechny monitorované provozní prvky do automatického režimu.**

- k) Po najetí kotle na vhodné parametry vstupní páry je možné uvést turbínu do provozu dle předem stanoveného najížděcího diagramu (tento bude případně upraven najížděcím technikem dle potřebné skutečnosti a dán programátorovi pro jeho zabudování do SW)
- l) Prohřejeme trasu potrubí od HUA po RZV pozvolným otevíráním obtoku HUA (hlavní uzavírací armatura). Dbáme na to, aby rychlost prohřevu nepřekračovala 6°C/min.
- m) Po otevření obtoku pozvolna otevíráme HUA a obtok zavřít. Pro zvýšení proudění páry a urychlení prohřevu lehce pootevříme ruční armaturu na přímém odvodnění před RZV do jímky. Po startu turbíny tuto armaturu zavřeme. Potrubí je nahřáté, pokud je teplota před RZV cca 300°
- n) Spustíme najížděcí ejektor postupným otevíráním ventilu na vstupu pracovní páry. Až je tento ventil naplno otevřen, otevíráme ventil v odsávacím potrubí kondenzátoru. Postup při odstavení ejektoru je opačný.
- Podtlak v kondenzátoru větším než – 50kPa nám vytvoří parní najížděcí ejektor
  - Lepší řešení jsou vodokružné vývěvy pro rychlé docílení vakua (cca min. -80kPa)
    - i) Zahltíme ucpávky parou, kontrolujeme tlak v přetlakové větvi ucpávek, který by měl být 35kPa
    - ii) Po prohřátí potrubí vstupní páry a při vakuu větším než – 80kPa je možné přistoupit k vlastnímu startu TG
- o) Provedeme kvitaci ochran turbosoustrojí, poté můžeme aktivovat sekvenci „PŘÍPRAVA TURBÍNY“
- V této sekvenci je provedena kontrola ovládní všech systémů turbíny
  - Pokud jsme opomněli některou sekvenci dát do automatického režimu, nyní to ŘS (řídící stanice) provede
  - Pokud je vše v pořádku, aktivujeme „START TURBÍNY“
  - Turbosoustrojí automaticky najede na jmenovité otáčky po naprogramovaném najížděcím diagramu
  - Podle momentální teploty skříně si ŘS vybere křivku pro studený (skříně má méně než 80°C), teplý nebo horký start
  - Provede se odzkoušení vypínacích otáček nastavených o 10% vyšší než jmenovitých
- p) Po opětovném najetí na jmenovité otáčky se provede z ovládacího monitoru aktivace synchronizace – přifázování generátoru k síti a zatížení na min. 500KW
- Rychlost zatěžování je lepší volit 250KW/min
  - Při výkonu 500KW končí expanze v mokré páře, proto se výstupní hrdlo chladí, ale poslední řada rotorových lopatek silně ventiluje
  - Ventilace se s výkonem a tlakem za turbínou snižuje
  - Př.: při tlaku za turbínou – 88kPa (tj. 12kPa) poslední lopatka ventiluje ještě při výkonu 1850kW (vlhkost 94 %) – jedná se již o velmi malou ventilaci, která není nebezpečná
  - Proto studený start stanoví jako bezpečnou hranici pro přifázování 2MW
    - i) Během startu kontrolujeme všechny měřené parametry, kde pozornost věnujeme relativnímu posuvu a axiálnímu posuvu, a to z důvodu rychlejšího prohřátí horní satorové skříně, kdy rozdíl teplot spodní a horní skříně je 40° - 50°C (může být i více)
    - ii) Po ukončení prodlev lze turbínu zatížit v režimu regulace výkonu změnou žádané hodnoty nebo turbínu provozovat v režimu regulace tlaku a zatěžování se děje automaticky v závislosti na tlaku páry před turbínou.
  - Za provozu je možné přepínat regulaci tlaku a výkonu
    - iii) Po zatížení na 2MW je možno otevřít uzavírací armaturu v neregulovaném odběru (NO) páry do NTO (nizkotlaký ohřívák)
    - iv) Po zatížení na 3MW je možno zařadit RO páry



**q) Během provozu sledovat všechny parametry, chod všech čerpadel, sledovat funkci regulaci hladiny v kondenzátoru a regulace teploty v chladičích**

- Žádaná hodnota teploty mazacího oleje je nastavena na 42°
- V zimním období se reguluje teplota mazacího oleje výstupním ventilem na vodní straně olejového chladiče
- V letním období obvykle vznikají problémy s chlazením oleje, neboť chladicí voda má teplotu okolí a když nastanou tropická vedra tak vznikají velké problémy s chlazením mazacího oleje (olej na vstupu do ložisek je až 48°, klesne tlak, viskozita, stoupne teplota ložisek a mírně se zvýší chvění)

**r) Další pokračování prohřevu až na jmenovité otáčky tzv. volnoběh**

- Na jmenovitých otáčkách nelze dlouho setrávat z důvodu ohřívání výstupního hrdla
- První teplá zkouška se ukončí postupným snižováním výkonu až do zapůsobení tzv. „zpětná wattová ochrana“
- Zpětná wattová ochrana má dvojí funkci:
  - Zamezuje zpětnému toku energie do turbíny
  - Blokuje vypínač generátoru při odstraňování – zajišťuje vypnutí v okamžiku, kdy turbína již odebírá výkon ze sítě pro krytí ztrát
- Dojde k uzavření přívodu páry do turbíny, které provede RZV (rychlzávěrný ventil, konstruovaný se zvláštním ohledem na provozní bezpečnost, rychlost a těsnost)
- Doplnující uzavírací prvek tvoří RV (regulační ventily), které sice nemají jako svoje primární funkce, ale taktéž se podílí na bezpečnostní funkci, kterou významným podílem zvyšují bezpečnost turbíny
- Dalším bezpečnostním orgánem jsou zpětné klapky na odběrech páry z turbíny

- Jejich uzavírací funkce je podpořena hydraulickým dotlačovacím válcem

**s) Během prohřevu turbíny dochází také k sušení alternátoru**

- Na volnoběhu se provedou potřebné zkoušky alternátoru a poté se na monitoru spustí tlačítko fázování a asynchronní generátor je tím připojen do sítě
- Soustrojí je zatěžována automaticky cca 250kW za minutu až do 500kW a poté se provádí automaticky postupné zatěžování až do 2MW při rychlosti zatěžování 250kW/min, kdy dochází k prvnímu prohřevu turbíny

**t) Práce po odstavení turbíny na více dní je opačný postup jako při najíždění ze studeného stavu.**

**4) Rizikové momenty při najíždění turbosoustrojí ze studeného stavu**

**a) Před spuštěním turbíny je zapotřebí věnovat max. pozornost tvorbě vakua v kondenzátoru**

- Během delšího provozování turbosoustrojí na volnoběhu může docházet k postupnému snížení hodnoty vakua v kondenzátoru (výstupu z turbíny), což má za následek ohřívání výstupního hrdla turbíny (pára vstupuje do kondenzátoru s větší teplotou)
- Je zapotřebí si uvědomit, že v kondenzátoru (výměníku) neprobíhá kondenzace jen čisté páry, ale také páry s obsahem nečistot, různých příměsí, případně paroplynových směsí

### Obecně platí

- Snížením tlaku v kondenzátoru zvyšujeme vyrobený elektrický výkon nebo mechanický výkon

### Toto snížení tlaku je možno dosáhnout

#### a) Snížením vstupu teploty chladicí vody

- Toto snížení je možno v praxi provést volbou chladicího okruhu
- Nejvyšší výkony lze dosáhnout použitím mokrých chladících věží, která pro danou teplotu okolí lze dosáhnout nejnižší teplotu chladicí vody  $t_{v1}$  na vstupu do kondenzátoru
- Čím nižší je teplota chladicí vody tím nižší je tlak v kondenzátoru
- Platí:  $\Delta t_v = t_{v2} - t_{v1}$  (vyhovující je 5–10°)  
 $t_{v2}$  = teplota chladicí vody ve výstupu z kondenzátoru  
 $t_{v1}$  = teplota chladicí vody na vstupu do kondenzátoru
- Problémy vznikají v letním období, kdy okolní teplota je podstatně vyšší (25° - 30°C), tudíž tlak v kondenzátoru má nižší hodnotu a s tím související vyšší teplota na výstupu z turbíny do kondenzátoru
- Snížení tlaku v kondenzátoru má negativní vliv na to, že roste měrný objem a tím objemový průtok posledním stupněm což vede ke snižování termodynamické účinnosti turbíny
- Se snížením tlaku v kondenzátoru také roste vlhkost za turbínou

#### b) Zvětšením hmotnostního průtoku chladicí vody

- Takovéto snížení tlaku má negativní důsledek na velkém zvětšení čerpací práce (energetická náročnost)

#### c) Zvětšením teplosměnné plochy kondenzátoru

- Důsledkem čehož jsou značně zvýšené investiční náklady na kondenzátor

#### d) Nedostatečné (zhoršené) vakuum bývá příčinou

- Nedostatečné zahlcení zadní ucpávky, takže dochází k úniku vzduchu do kondenzátoru
- Zanešení vnitřních stěn trubkovnic pro chladicí vodu v kondenzátoru
- Nasávání vzduchu do kondenzátoru způsobené porušením těsnosti přírub v dělicí rovině, přírub armatur, pojišťovací membrány kondenzátoru

### Příčiny špatné funkce parní vývěvy

- Ucpání dýzy
- Nesprávná poloha dýzy vůči difuzoru
- Nedostatečné podchlazení odsávané směsi z kondenzátoru čímž dochází k tomu, že vývěva místo malého množství parovzdušné směsi odsává velké množství parovzdušné směsi a tím je narušena správná funkce vývěvy
- Nedostatečný tlak pracovního média (páry)
- Prasklé trubky v KUP
- Zanesené trubky v KUP
- Malý průtok chladicího kondenzátu v KUP
- Závada odvodu kondenzátu z KUP (sifon – profouknutí)
- Netěsná přepážka mezi I. a II. stupněm
- Množství plynů, které pára přináší sebou do kondenzátoru

U vodokružné vývěvy musí být správně seřízeno množství chladicí vody pro potřebné vytvoření vakua. Velká výhoda těchto vývěv je rychlost dosažení vakua a její bezproblémový chod.

Pozn.: Věnovat pozornost správné funkci KUP. Při jeho špatné funkci může mimo jiné dojít ke zkorodování kartáčů pro svod statické elektřiny. Tato pak může narušit kompozici spodních kamenů radiálního ložiska.

## 4 ZASOLOVÁNÍ TURBÍN

Napájecí voda přiváděná do kotle se doplňuje tzv. demineralizovanou vodou z vodního zdroje, která pokrývá ztráty páry v oběhu (netěsnosti potrubí, využití páry pro vytápění, odluhování kotlů).

### 4.1 Napájecí voda

Je základní voda pro výrobu páry, která však obsahuje různé rozpuštěné soli a minerály.

Vylučování jednotlivých solí je v závislosti na teplotě:

- Křemičité soli nerozpustné (40 ° - 260 °C)
- Sodné soli rozpustné (260 ° - 480 °C)

Zvláštní pozornost je třeba věnovat problematice zasolování, kdy v různých oblastech průtočných částí turbíny dochází k vylučování solí obsažených v páře a jejich usazování.

Předepsaná kvalita vstupní páry pro parní turbíny je závislá na vstupních parametrech páry, pro ilustraci je uvedena v Tab. 2.

#### 4.1.1 Čistota vstupní páry

*Předepsaná kvalita vstupní páry pro turbíny s tlakem vstupní páry nižším než 6,5 MPa*

Tab. 2 Čistota vstupní páry

Složení (nejvýše)	Označení (měrná jednotka)	Kotle s přehřívákem páry	
		Pára k pohonu protitlakových turbín	Pára k pohonu kondenzačních turbín
<b>Hodnoty závazné</b>			
Měrná elektrická vodivost při 25 °C	$\mu\text{S} [\text{cm}^{-1}]$	1	0,3
Obsah $\text{SiO}_2$	$\mu\text{g} [\text{l}^{-1}]$	40	20
<b>Hodnoty doporučené</b>			
Obsah Na	$\mu\text{g} [\text{l}^{-1}]$	35	10
Obsah $\text{NH}_3$	$\text{mg} [\text{l}^{-1}]$	2	1

Nánosy solí způsobují zejména zhoršení pohyblivosti regulačních a rychlozávěrných ventilů, změnu geometrie lopatkových kanálů a snížení životnosti použitých materiálů.

Vlivem nánosů je:

- Zařízení je provozováno při nižším výkonu, než je jmenovitý
- Nižší účinnost zařízení
- Zvýšení měrných nákladů na výrobu elektrické energie

### 4.2 Zasolování

1. K zasolování dochází i při dlouhodobém provozování turbíny bez odstávky a změny parametrů i tehdy, má-li admisní pára obsah solí přípustný dle příslušných norem.
2. Nesprávné dimenzování chemické úpravy kondenzátu u tepláren, kde kondenzát tvoří z velké části značně znečištěné vratné kondenzáty z technologie nebo topných sítí je příčinou zasolování turbín.
3. Dalším velkým problémem je špatná funkce kontinuálního odluhu bubnu kotle, kde koncentrace solí v kotelní vodě je velká, dochází k vyššímu pění a zvýšenému únosu solí párou vlivem přestřiku.

4. Základním vnitřním zdrojem solí v napájecí vodě jsou produkty koroze všech konstrukčních materiálů, jejichž koncentrace je přímo úměrná množství kyslíku rozpuštěného ve vodě – *špatná funkce odplynění*.

S expanzí páry v par. turbíně klesá teplota a tlak páry a klesá také rozpustnost solí v páře.

Při změně (poklesu) výkonu turbíny dochází ke změnám teplotních a tlakových poměrů a tím oblast vylučování solí se posune směrem k výstupu páry z turbíny, což má za následek *zvyšování teploty páry na výstupu*.

Nánosy solí zmenšují průtočné průřezy lopatkových kanálů v průtočné části turbíny.

Má-li protékat stejné množství páry při zasoleném lopatkování jako při nezasoleném, musí pára protékat vyšší rychlostí, k čemuž je třeba většího adiabatického spádu na průtočné části a vyššího tlaku před průtočnou částí neboli vyšší tlak za regulačním stupněm při konstantním tlaku na výstupu z turbíny.

Zvýšení tlaku za regulačním stupněm má za následek zvýšení axiální síly od protékající páry na rotor, která je zachycována v axiálním ložisku turbíny.

Z max. přípustného namáhání axiálního ložiska je výrobcem turbíny stanovena max. přípustný tlak za regulačního stupněm při zasoleném lopatkování.

Při zasolené průtočné části se zvětšují tlakové spády na jednotlivé řady, zvyšují se rychlosti páry v lopatkovitých kanálech a tím dochází ke zvýšení *ohybového namáhání* lopatek.

Obecně lze říci, že zasolení lopatkování snižuje účinnost turbíny a zvyšuje *statické* a *dynamické* namáhání lopatek.

Je potřeba si uvědomit, že často spouštěné turbíny z poloteplého nebo studeného stavu dochází k *samovolnému vymývání solí*, tzv. samočisticí efekt.

Vlivem povrchové koroze od solí také klesá *mez únavy materiálu* lopatek. Nánosy soli mohou být příčinou nevyváženosti a tím zvýšeného chvění obzvláště u rychloběžných turbín, což jsou v dnešní době všechny turbíny o výkonu 4 – 20MW.

Z výše uvedených důvodů je zákazníkům doporučeno provádět mnohem častěji zkoušku jedné z nejdůležitější konstrukční části turbíny, tj. pohyblivost *rychlzávěrného ventilu*.

### 4.3 Způsoby odstraňování solí

Pro odstranění problémů se zasolováním turbíny je vyřešení příčiny vysokého obsahu soli v páře (viz popis výše), což jsou investičně náročné zásahy do stávající technologie.

Má-li se volit způsob odstranění nánosů, pak rozhodující, zdali soli, tvořící nánosy jsou ve vodě *rozpustné* či *nerozpustné*.

Při revizi turbíny spojené s otevřením skříně je zapotřebí odebrat z průtočného kanálu vzorky po celé délce výskytu nánosů.

Chemický rozbor vzorků prokáže složení nánosů, a to zejména jaká je část vodou rozpustných křemičitanů a zdali případné dávkování NaOH tyto přemění na rozpustné.

V případě, že procento vodou nerozpustných solí je velké, odstranění nánosů se provádí mechanicky, a to seškrabováním a smytím horkou vodou.

Pro čištění rotorů vyjmutých ze skříně, se často používá *otryskávání jemným popílkem*, který nezpůsobuje poškození povrchu lopatek.

U kondenzačních turbín se provádí odstranění nánosů při zcela smontovaném stroji a to tak, aby turbína po úplném vychlazení byla skříň turbíny včetně kondenzátoru zaplněna vodou po úroveň spodku parních ucpávek a rotor turbíny byl protáčen pomocí protáčecího zařízení 4–6 hodin (toto provedení bylo u starších typů turbín s otáčkami 3000ot/min).

#### **4.3.1 Promývání turbíny při provozních otáčkách a sníženém zatížení postupně ochlazovanou parou.**

Nejprve se doporučuje provést promytí *mokrou parou*. Po takto provedeném promytí zůstává na oběžných lopatkách nánosy nerozpustných solí, které se mohou postupně *odplavit vlhkou parou* z turbíny.

Promývání turbíny se provádí mokrou parou pomocí promývací větve par. potrubí, které tvoří obtok hlavní uzavírací armatury na parovodu. Její součástí je směšovací kus, který slouží k přípravě mokré páry podle předem daných parametrů, které jsou:

- a) Odlehčení soustrojí na cca 1200kW
- b) Snížování teploty páry na vstupu do turbíny rychlostí 1°C/min
- c) Teplota promývací páry se sníží na hodnotu, která leží cca 5°C nad mezí sytosti (což odpovídá tlaku páry v prostoru ventilové komory)
- d) Sledovat hodnoty tlaku a teploty dle I-S diagramu (toto je zakomponováno v SW jako programu pro promývání)
- e) Dávat pozor při případných změnách parametrů páry a následné změny výkonu – může dojít k zásahu zpětné wattové ochrany generátoru

Není-li nainstalován takovýto program v SW, je nutno měřit hodnoty (teplota, tlak) přímo u turbíny, a to také z důvodu, že škrcením páry v dlouhých úsecích potrubí se může pára znovu přehřát.

Z kondenzátu (odvaděč kondenzátu na výstupu páry z turbíny) jsou odebírány vzorky (každých 10 minut) pro sledování vodivosti kondenzátu.

V počáteční fázi promývání vodivost prudce vzrůstá (vlhkou parou se začínají odplavovat usazené soli na lopatkách) kdy hodnota vodivosti může stoupnout až na několik set  $\mu\text{S}$ .

Po určité době tato hodnota klesá a na konci promývání má být hodnota cca 15–20  $\mu\text{S}$  (pro protitlakovou turbínu).

Při takovém způsobu promývání je nutné *sledovat*:

- a) Relativní posuv
- b) Chvění turbíny (při zvýšeném chvění nutno vyčkat s další změnou teploty páry až do doby, než se chvění ustálí na jmenovité hodnoty, která byla před zahájením promývání). Pro promytí by měla být turbína odstavena, vysušena a v co nejkratší době znovu uvedena do provozu.
- c) Při vniknutí vody do turbíny – *vodní ráz* – okamžité odstavení turbíny
- d) Změna teploty páry o více než 20°C a není-li možno změnu teploty zastavit – okamžité odstavení turbíny

## 5 CHVĚNÍ TURBÍN (VIBRACE)

Jednou z důležitých veličin, které charakterizují chod soustrojí, je mechanické kmitání části turbíny.

V současné době se turbíny vybavují přístroji, které trvale měří chvění soustrojí a při vzrůstu chvění nad přípustnou hodnotu dávají varovný signál, popř. odstavují turbínu.

Vibrace nám signalizují, že ve stroji dochází k nějaké závadě.

Rozeznáváme základní vibrace měřené ručním přístrojem:

- a) *Relativní chvění*
  - Kmitání ložiska vůči rámu
  - Kmitání rámu vůči základu
- b) *Absolutní chvění*
  - Měří vzhled k vlastní setrvačné (seismické) hmotě

Veličiny charakterizující chvění jsou:

- a) Dráha **s** (měřena obvykle v mikrometrech)
- b) Rychlost **v** (měřena obvykle v  $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ )
- c) Zrychlení **a** (měřena obvykle v  $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$  nebo  $\text{mm}\cdot\text{s}^{-2}$ )
- d) Frekvence chvění **f** (měřena v Hz)

Přednostně uplatňovaným kritériem chvění ložiskového stojanu turbíny je rychlost chvění. Tato je při synchronním chvění vztažena na dvojitou amplitudu a je vyjádřena vzorcem:

$$2A = 450 V / f$$

2 A – dvojitá amplituda vyjádřena v  $[\mu\text{m}]$

V – střední hodnota rychlosti chvění v  $[\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}]$

F – frekvence otáček v [Hz]

Přednostně uplatňovaným kritériem popisu chvění hřídele je dvojitá amplituda dle Tab. 3.

Tab. 3 Kritérium popisu chvění hřídele – dvojitá amplituda

Jmenovité otáčky [Hz]	Dvojitá amplituda měřená na ložiskovém stojanu $[\mu\text{m}]$
16,67	75
25	50
30	42
50	25
60	21
100	12
200	6

Chvění se kontroluje přes stabilně zabudovanými snímači magneticky uchycené ve směru radiálním, na čistých obrobených plochách ložiskových stojanů.

Destabilita rotoru je velmi nebezpečný jev, který může nastat v rámci určitých otáček, případně provozních podmínek. Proto další provoz rotoru v oblasti destability je nepřipustný a může být příčinou velkých ekonomických ztrát.

Destabilitu rotoru v kluzných ložiskách nelze ve většině případů odhalit měřením absolutních vibrací na ložiskových stojanech nebo na skříni stroje.

Dnes jsou turbíny (jak výše uvedeno) vybaveny diagnostickým systémem s relativními snímači chvění rotoru.

Je známo, že tato výše uvedená nestabilita nepředstavuje problém u turbín, které mají skutečné kritiky nad provozními otáčkami (jedná se o tzv. „tuhý hřídel“).

Obecně pohyb lze v mechanice popsat dráhou (výchylkou), rychlostí nebo zrychlením, přičemž tyto veličiny jsou navzájem vázány matematickými vztahy a jsou tedy vzájemně přepočítatelné.

**Výchylka** (displacement) se udává obvykle v mikrometrech [ $\mu\text{m}$ ]

**Rychlost** (velocity) je první derivací výchylky podle času (rychlost změny výchylky) a udává se obvykle v [ $\text{mm/s}$ ]

**Rychlost vibrací** je nejvýhodnějším parametrem chvění pro diagnostické účely opotřebením pravidelně rotujících částí. Při měření rychlosti vibrací se nemusíme starat o frekvenci (otáčky), na jaké jsme danou hodnotu rychlosti naměřili, zatímco u ostatních dvou veličin je zapotřebí uvést, při jaké frekvenci otáčení byla hodnota naměřena, jinak není možné stav stroje ohodnotit.

Není zde účelem popisovat vyhodnocování vibrační diagnostiky, neboť toto provádějí specialisté s patřičným finančně náročným technickým vybavením.

Frekvence chvění (stručný popis) ukazuje možný původ kmitání:

Podle výše frekvence kmitání a frekvence otáčkové se rozeznává kmitání:

- a) O frekvenci odpovídající otáčkám
- b) O frekvenci nižší, než odpovídá otáčkám
- c) O frekvenci vyšší, než odpovídá otáčkám

*A. Příčina chvění spočívá v rotující soustavě hmot, což může být způsobeno:*

- Nevyváženost rotoru (amplituda vzrůstá přibližně se čtvercem otáček)
- Nedostatečné vystředění spojky (chvění vzrůstá se zatížením)
- Uvolnění ložiskových pánví (kamenů)
- Špatné uložení (naklápění) ložiskových stojanů
- Špatná dilatace (drhnutí) ložiskových stojanů na základové desce

*B. Jedná se o samobuzené kmitání olejového filmu (oil whip)*

- Samobuzené kmitání vzniká (vybudí se) přibližně při otáčkách soustrojí, které jsou dvojnásobkem kritických otáček, tzn. že samobuzené kmitání olejového filmu může vznikat pouze u těch elastických rotorových soustav, kdy kritické otáčky jsou poloviční nebo nižší proti otáčkám provozním.

Další možné příčiny:

- Vliv vnitřního tlumení (např. uvolňování nasazených částí na hřídel)
- Působení ohybové složky od točivého momentu, přenášeného hřídelem
- Buzení od aerodynamických sil od proudění páry v ucpávkách a v lopátkování
- Většinou se jedná o chvění způsobené ozubenými převody (zvláště u starších typů turbín se šnekovým náhonem olejového čerpadla a rychlostního regulátoru)

### Odstranění příčin vibrací:

- Znovu vyvážení rotoru a vyrovnání spojky v axiálním i radiálním směru (max. odchylka – 0,02mm)
- Po dlouhodobém provozu je nutno zkontrolovat uložení ložiskových stojanů v axiálním směru

## **6 VYVAŽOVÁNÍ ROTORŮ**

- a) Statické vyvažování
  - se provádělo u částí nasazovaných na hřídel u výrobce – dnes se již nepoužívá
- b) Dynamické vyvažování
  - se provádí na vyvažovacích strojích za snížených otáček, nebo ve vyvažovacích vakuových tunelech i za jmenovitých otáček rotoru

Důležitým elementem ovlivňujícím klidný chod jsou ložiska.

### Tepelné deformace

- V tělesech parních turbín proudí pára, jejíž teplota dosahuje hodnot od 20°C (při spouštění turbíny ze studeného stavu) do cca 560°C (provoz parní turbíny se zatížením), tím dochází u částí turbín k teplotním rozdílům, které vedou k tepelným deformacím i tepelných napětí, která mohou ohrozit bezpečný provoz turbíny

### Rozeznáváme tepelné deformace:

- a) Kdy dochází k nebezpečí dotyku rotujících a statorových částí
- b) Růst napětí nad přípustnou mez

Průhyby skříně a rotoru

Při spouštění turbíny ze studeného stavu dochází ke zvýšenému chvění a tím možnost nebezpečí dotyku statorových a rotorových částí.

Důležitou součástí každého stroje je výpočet relativních posuvů turbíny (axiální posuv rotorové části mínus axiální posuv statorové části) při najetí ze studeného stavu.

Cílem výpočtu je určení krajních hodnot (max. a min.) relativních posuvů turbíny při najetí ze studeného stavu a následně určení relativních posuvů v ustáleném stavu při plném výkonu (jde o správné použití velikosti ucpávkových kroužků, aby nedošlo k dotyku mezi rotorovou a statorovou částí v axiálním směru).

Při provozování turbíny může docházet k postupnému *snižování tlaku (vakua) v kondenzátoru*.

## **7 ZKOUŠKA VAKUA A SYSTÉMU UCPÁVKOVÉ PÁRY (turbína odstavena)**

1. Spustí se POČ a protáčecí zařízení
2. Spustí se hlavní chladicí čerpadla
3. Spustí se kondenzátní čerpadlo s recirkulací do kondenzátoru
4. Spustí se vývěva (vodoproudá nebo paroproudá) a u paroproudé vývěvy se spustí najížděcí ejektor pro rychlejší dosažení vakua
5. Při podtlaku v kondenzátoru cca 0,5 bar se otevře pára na ucpávky. Ucpávky stroje jsou labyrintové.



6. Ucpávková pára má dvě větve:
  - a) Přetlaková větev
  - b) Podtlaková větev (zamezení přísávání vzduchu do vakuového systému)
- Ucpávková pára zahlučuje (odsává) ucpávku a tím zatěsňuje prostor mezi rotorem a statorem.
7. V přetlakové větvi má být 0,5 bar a v podtlakové větvi má být 0,05 bar
8. Při vakuu, odpovídajícímu tlaku 0,9 bar se u parní vývěvy uzavírá najížděcí ejektor, který již neodsává vzduch z kondenzátoru, ale naopak do kondenzátoru je přísávána pára.
  - U protitlakových turbín je u starších turbín pára z ucpávek odváděna výfukem do strojovny (u menších protitlaků) nebo je pára z ucpávek odsávána přes pomocný kondenzátor menší vývěvou (u větších protitlaků)
9. Při měření množství přísávaného vzduchu se postupuje následovně:
  - a) Uzavře se odsávání vzduchu z kondenzátoru (vývěva zůstává v provozu)
  - b) Měří se vzrůst tlaku v kondenzátoru v závislosti na čase
- Zhoršení vakua nesmí přesahovat: (dle normy ČSN 080030 čl. 26)
  - U turbín se jmenovitým výkonem do 25MW → 4 mm Hg/min
  - U turbín se jmenovitým výkonem nad 25MW → 3 mm Hg/min
  - Pro převod platí: 1 mm Hg = 1,33 mbar
10. Pro zjišťování míst netěsnosti se používají indikační přístroje
  - Princip zjišťování netěsnosti spočívá v tom, že vakuový systém (vše co souvisí s vakuem) se zevně ofoukává vhodným plynem (např. některým druhem freonu) a zvláštní sonda v odsávacím potrubí k vývěvě pak indikuje přítomnost tohoto plynu, vznikajícího netěsnostmi do vakuového systému

#### **A. Zvýšení tlaku páry před turbínou**

- a) Zvýší se vlhkost páry před posledními stupni, sníží se termodynamická účinnost expanze, vznik eroze posledních stupňů
- b) Klesá měrný objem (objemový průtok do turbíny), klesá i termodynamická účinnost
- c) Vzrůstá příkon napájecích čerpadel a tím i klesá čistý výkon elektrárny (tento vliv je zvlášť velký u nižších výkonů bloků kde se zvyšujícím se tlakem rychle klesá termodynamická účinnost napájecího čerpadla a o to rychleji roste jeho příkon)
- d) Konstrukční materiálové problémy u parních kotlů

#### **B. Zvýšení teploty páry před turbínou**

- a) Zvětší se mechanická práce turbíny
- b) Zvětší se objemový průtok do turbíny
- c) Vylepší se termodynamická účinnost
- d) Snižuje se vlhkost páry posledních stupňů a tím se zvedne termodynamická účinnost i životnost posledních stupňů
- e) Zvyšování teploty je omezeno použitými materiály kotle, potrubí i parní turbíny

Z výše uvedených důvodů týkající se zvýšení tlaku je nejlépe tento parametr kombinovat se zvyšováním teploty páry na vstupu do turbíny.

Z výše uvedeného plyne, že pro určitý výkon je optimální určitá kombinace tlaků a teplot. Tato kombinace se určuje z hlediska použitého paliva i daného provozování, tj. turbína pro špičkový nebo základní zatížení.

Informativní kombinace tlaků a teplot je zobrazena v Tab. 4.

Tab. 4 Informativní kombinace tlaků a teplot

Rozsah výkonů [MW]	2–5	5–12	12–25	25–40	40–70
Vstupní tlak [bar]	35	68	90	110	130
Vstupní teplota [°C]	435	480	535	535	535

## 8 PŘIHRÍVÁNÍ PÁRY

U turbín velkých výkonů při max. teplotě na vstupu se poslední stupně dostávají do velmi vlhké páry. Možným řešením je přerušit expanzi a páru znovu ohřát na vstupní teplotu. Je však zapotřebí správně zvolit tlak, na kterém se bude pára přihrívát, čímž dojde ke zvýšení výkonu a tím růst termické účinnosti cyklu a zároveň dochází k poklesu měrné spotřeby tepla.

## 9 REGENERACE TEPLA

Smyslem regenerace tepla je minimalizovat přívod tepla do cyklu tím, že napájecí voda do kotle se bude ohřívat parou z odběru turbíny (NTO – nízkotlaký ohřívák kondenzátu) a ne teplem z paliva. Tím snížíme měrnou spotřebu paliva, která je jedna ze základních nákladových položek energetických centrál.

V oběhu parních elektráren je nutno dbát, aby v napájecí vodě byl minimalizován obsah kyslíku. Kyslík v systémech energetických zařízení způsobuje korozi a tím snižuje jejich životnost.

Kyslík se do vody dostává hlavně v oblasti kondenzátoru, kde je tlak podstatně nižší než atmosférický, a proto se netěsností přisává vzduch do podtlakového systému.

Kyslík a ostatní plyny se z kondenzátu dostávají, pomocí termické úpravy vody tzn. že před varem vody v napájecí nádrži se z vody jako první začnou vylučovat plyny v ní obsažené. Toto zařízení se nazývá *odplyňovák*, který je dodávkou kotelního zařízení.

Protože kondenzát z kondenzátoru vystupuje o teplotě 45°C a odplynění se provádí při 105°C je nutné kondenzát ohřát v ohřívácích, které se nazývají nízkotlaké regulační ohříváky (NTO).

Regenerace má také vliv na účinnost turbíny. Protože jeden z parametrů ovlivňujících termodynamickou účinnost turbíny jsou *otáčky*, kdy čím vyšší otáčky tím vyšší je termodynamická účinnost.

**Regenerace má také vliv na účinnost turbíny.** Protože jeden z parametrů ovlivňující termodynamickou účinnost turbíny jsou otáčky, kdy čím vyšší jsou otáčky tím vyšší je termodynamická účinnost. Proto se je snažíme maximalizovat. Maximální otáčky jsou ale omezeny z konstrukčního hlediska hlavně délkou poslední lopatky. Délka poslední lopatky je dána objemovým průtokem poslední stupněm, který roste s klesajícím tlakem a se zvětšujícím se hmotnostním průtokem. Snížení hmotnostního průtoku posledními stupni kondenzačních parních turbín napomáhá právě rozvinutá regenerace tepla, kdy posledními stupni proudí cca 70% vstupního hmotnostního průtoku páry.

## 10 NAVRHOVÁNÍ CYKLU

Jak vyplývá z předchozích kapitol, je měrná spotřeba tepla dána různými parametry, které ještě působí proti sobě. Volba těchto parametrů pak navždy určí spotřebu daného energetického zařízení a tím i návratnost a ekonomiku provozu. Proto je zapotřebí vstupní parametry cyklu parní turbíny zvolit co nejlépe. Je proto nutné, aby návrháři cyklu dostali správná zadání.

Obecně lze rozdělit zadání energetického zařízení do dvou základních typů:

- a) Je k dispozici určité množství daného paliva a určíme elektrický výkon
- b) Chceme určitý elektrický výkon při daném palivu a určíme množství paliva

Pro obě zadání je pak také nutno znát kde bude energetické zařízení nainstalováno a pak je možno podle lokality zvolit typ chlazení. To bude například v suchém vnitrozemí suchý chladicí okruh, který má prakticky nulovou spotřebu doplňující vody, ale relativně velkou měrnou spotřebu tepla.

Pokud máme takovéto zadání, může návrhář navrhnout optimální parní cyklu, tak aby ziskovost celého projektu byla co nejlepší. To je takový cyklus, kdy je správná kombinace investičních nákladů a měrné spotřeby tepla.

Základním předpokladem ale je, aby daný návrhář měl správné poznatky o chování jednotlivých částech cyklu. To znamená, aby měl co přesnější charakteristiky jednotlivých zařízení. Jedná se především o turbínu, kotel a chladicí okruh.

Jak vyplývá z předcházejících kapitol, podstatný vliv na měrnou spotřebu má návrh cyklu charakteristiky turbíny. Kdy hlavně u menších výkonů může být podstatný rozdíl. Tento rozdíl je dán hlavně tím, zda se jedná o jednostupňovou (dvoustupňovou), které používají vysoko zatížené stupně nebo vícestupňové, které používají optimálně zatížené stupně. Jednostupňové mají nižší investiční náklady ale podstatně horší termodynamickou účinnost, až o desítky procent. To se pak promítne do větší měrné spotřeby tepla.

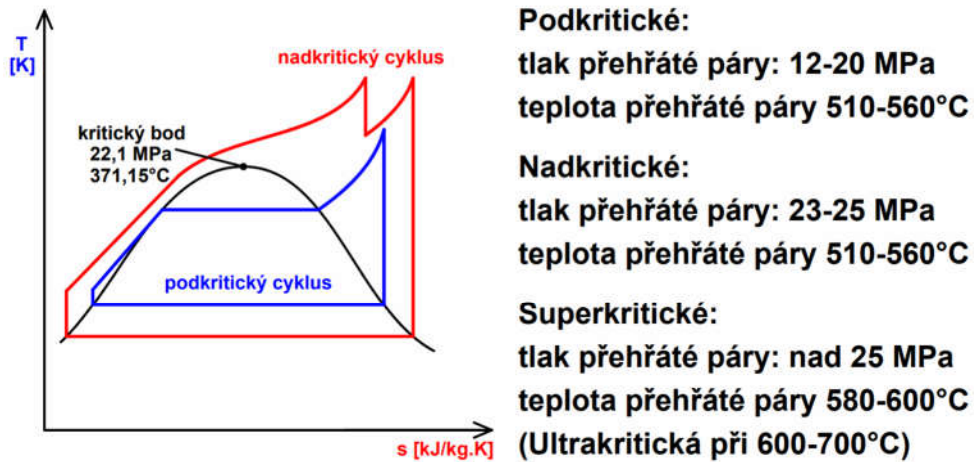
Kotel jako zařízení přeměňující chemickou energii paliva na tepelnou energii páry má samozřejmě velký vliv na měrnou spotřebu paliva. Na konstrukci kotle má samozřejmě největší vliv palivo pak ale také teplota napájecí vody. Z praxe vím, že v současné době je velice rozšířený způsob, že kotel a turbína se objednávají samostatně. To vede k tomu, že zákazník dostane kotel s vysokou účinností, relativně levný, ale s nízkou teplotou napájecí vody. To jak jsme viděli, v předcházející kapitole, vede k velké měrné spotřebě tepla, takže výsledkem je nižší efektivita výsledné elektrárny.

Chladicí okruh slouží k odvodu tepla do atmosféry a tím vytváří tlak za turbínou. Dosažení co nejnižšího tlaku má ale za následek zvyšování příkonu chladicího okruhu. To je zvyšování příkonu chladicích čerpadel při chlazení vodou nebo zvyšování příkonu ventilátorů při použití vzduchového kondenzátoru. Takže čistá výroba elektrické energie může být ve výsledku nižší.

Z technologií na tuhá paliva se v EU nejvíce rozvíjí technologie APC (pokročilé práškové spalování).

Jedná se prakticky o nadkritické a ultrakritické bloky:

- Vysoké parametry páry (teplota a tlak)
- Nízký tlak v kondenzátoru
- Dvojí přehřívání páry
- Vysoký stupeň regenerace – 8-10 ohříváků napájecí vody
- Černouhelné kotle s tepelnou účinností až 94 %
- Pohon napájecího čerpadla parní turbínou
- Účinnost výroby elektrické energie až 51 %



Pro teploty páry do 560°C se používají klasické feritické oceli, pro teploty nad 560°C je zapotřebí použít austenitické oceli nebo superslitiny – obrovsky narůstá cena.

Obr. 16 Nadkritické bloky tepelných elektráren



Obr. 17 Superkritická elektrárna Lippendorf – Německo

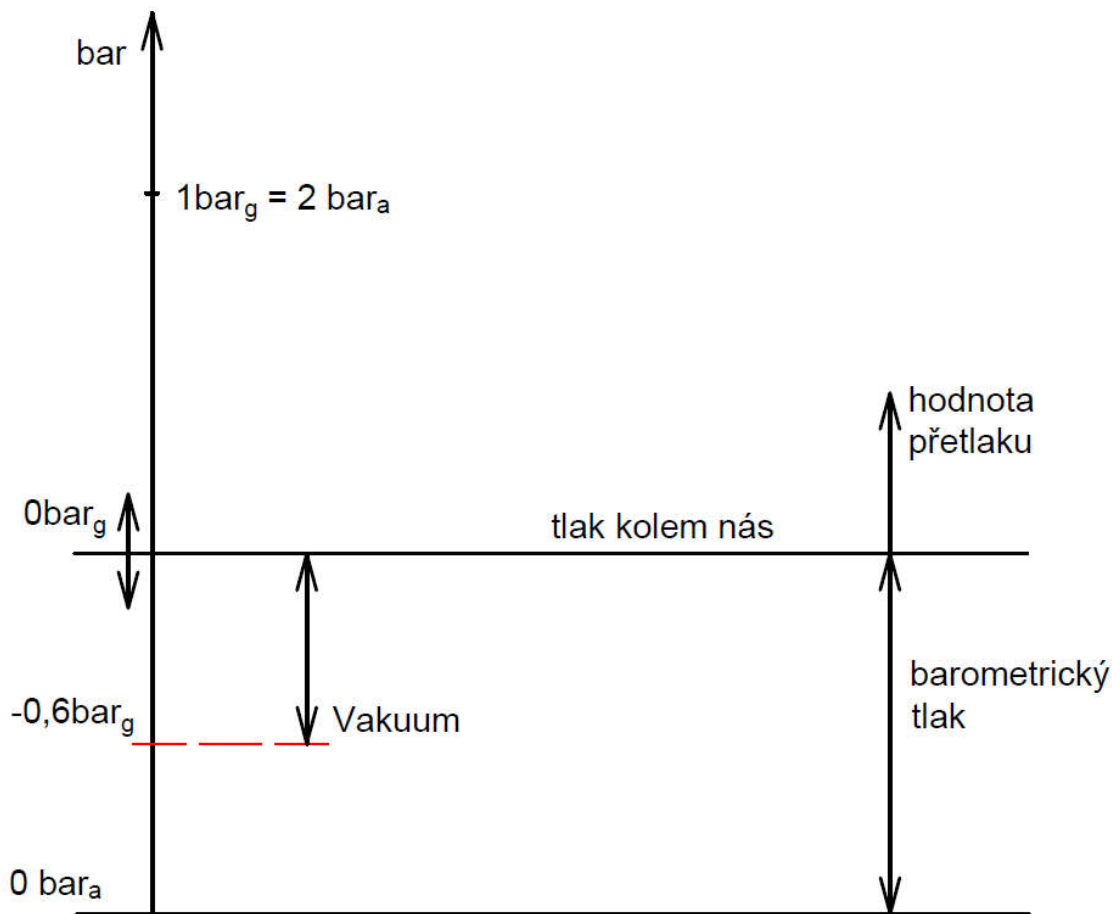
# 11 ZÁVĚR

## 11.1 Praktické poznámky a zkušenosti z provozu parních turbín

1. Manometry je vždy měřen přetlak  $p_a$  vůči barometrickému tlaku  $p_{bar}$ .  
Vztahy v jednotkách SI jsou uváděny jako absolutní tlak

$$P_{abs} = p_a + p_{bar}$$

Znázornění rozdílu  $bar_g$  a  $bar_a$



$$1bar = 0,1 MPa = 100 KPa = 10^5 Pa$$

2. Kritické otáčky mají být dosti vzdáleny od provozních.

Platí:

- Pokud jsou provozní otáčky nižší než kritické, mluvíme o *tuhém hřídeli*
- Jsou-li provozní otáčky vyšší než kritické, jedná se o *pružný hřídel*

Nutno dbát při najíždění turbíny – projet kritické otáčky rychleji, aby nedošlo k vibracím stroje.

Nejčastější poruchou bývá deformace (prohnutí) hřídele, jehož příčina může být nestejněmorné ochlazování hřídele po odstavení turbíny, jelikož spodní část hřídele se ochlazuje rychleji než

horní a hřídel se prohýbá nahoru. Tyto deformace jsou přechodné a po několika hodinách na protáčením zařízení vymizí.

Nesmí se zahlcovat ucpávky stojícího rotoru!

3. Prudký pokles teploty vstupní páry – vznik tzv. vodní ráz (tlaková vlna způsobená prudkou změnou rychlosti toku v potrubí). Vodní ráz může ohrozit první i poslední stupně turbíny.
4. Při výpadku chladícího čerpadla se zhorší vakuum a dojde ke zvýšení teploty páry na výstupu z turbíny do kondenzátoru (tato teplota stoupá poměrně rychle 80-100 °C), nemělo by se čerpadlo spustit dříve, než teplota výstupního hrdla nevychladne. Náhlé ochlazení ohřátých ploch by způsobilo tepelné pnutí ve skříni, což může vést ke vzniku trhlin. Kromě toho vzniká nebezpečí uvolnění trubek v trubkovnici kondenzátoru.
5. Již v IBZKG byly vyráběny olejové chladiče tak, že tlak oleje v chladiči se udržuje vyšší než tlak chladící vody. Praskne-li trubka, nevniká voda do oleje ale opačně – aby nedošlo ke znehodnocení olejové náplně.

Jedna z nejdůležitějších parametrů je viskozita.

Viskozita [cSt] při 50 °C..... 20 ÷ 25

Viskozita [°E] při 50 °C..... 2,9 – 3,5

Viskozita oleje nesmí být vyšší o 25 % viskozity oleje původního.

Viskozita °E (Englera) =  $\frac{\text{doba výtoku oleje } ^\circ\text{C}}{\text{Doba výtoku vody } 20 ^\circ\text{C}}$

»je to poměr, kolikrát pomaleji vyteče olej než voda 20 °C teplá.

Pozn.:

- Potrubí pro zpětné vedení oleje se musí určit a uspořádat tak, aby se dosáhlo plynulého odtoku (s ohledem na možnost vytváření pěny)
- Horizontálně uložené olejové potrubí mají mít stálý spád min. 10 mm/m směrem k olejové nádrži.
- Olejová potrubí z uhlíkové oceli se musí mořit, lépe je vyrábět tato potrubí z nerezové oceli

Výrobce Značka	Kinematická viskozita při 40 °C [mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	Bod vzplanutí [°C]	Bod tuhnutí [°C]	Odlučitelnost vzduchu při 50 °C [min]
<b>BENZINA</b> TB - 46	41,4 ÷ 50,6	185	- 6	6
<b>MOBIL</b> T. oilmedium	46	320	- 12	3
<b>MOBIL</b> DTE AW 46	42,8	214		2 ÷ 3
<b>SHELL</b> TURBO T 46	49	207	- 6	3
<b>OMV</b> HTU 46	46	216	- 15	
<b>TOTAL</b> PRESLIA 46	46	230	- 9	4,5
<b>BP</b> TURBINOL 46	46	230	- 12	3
<b>BP</b> ENERGOL THB 46	46	216	- 9	
<b>ESSO</b> TERESSO 46	43	225	- 15	4

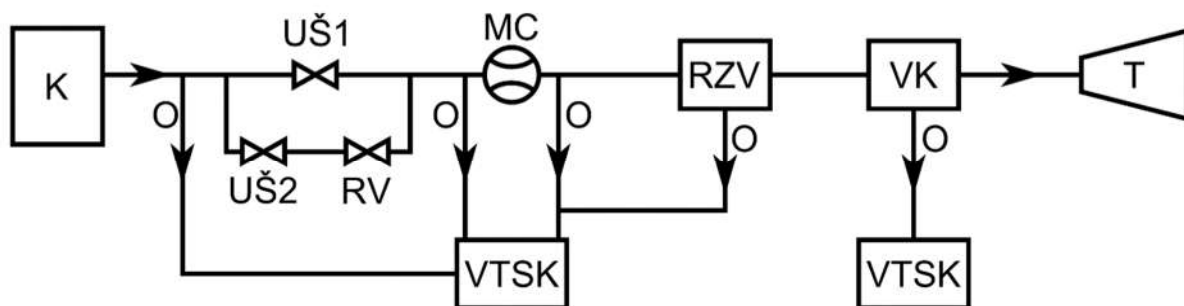
Tab. 5 Turbínové oleje

6. Pro projíždění kritických otáček je zvlášť důležité zajistit, aby teplota oleje vstupujícího do ložisek byla vyšší než 35 °C. Při nižších teplotách je již olej tak hustý, že při vyšších kluzných rychlostech a zvýšených vibrací rotoru by se v kritickém pásmu otáček mohl protrhnout olejový film, a tak poškodit ložisko.
7. Vliv změny vakua
  - s vyšším vakuem stoupá účinnost, přitom je nutno dbát, aby nebyl podchlazován kondenzát, to znamená, aby teplota kondenzátu neklesla pod teplotu nasycené páry o více než 1-3 °C
8. Vždy se doporučuje, aby obsluha na velínu si vedla knihu se záznamy
  - a) Počet studených startů
  - b) Počet teplých startů
  - c) Dobu provozu turbíny – se rozumí počet hodin chodu turbíny na jmenovitých otáčkách od momentu prvního spuštění turbíny nezávisle na zatížení a počtu spuštění

U velkého množství provozovaných turbín není měření moto hodin, od kterých se odvíjí servisní činnost na každém stroji.

## 11.2 Správný prohřev je základem pro další provozování turbíny.

### 11.2.1 Jednoduché schéma s popisem prohřevu parního potrubí K-T:



Legenda:

K – kotel

T – turbína

uš1 – uzavírací šoupátko s elektro pohonem

uš2 – uzavírací šoupátko s elektro pohonem

RV – regulační ventil s elektro pohonem

MC – měřící clona (množství páry)

RZV – rychlouzávěrný ventil

VK – ventilová komora

VTSK – vysokotlaký sběrač kondenzátu

NTSK – nízkotlaký sběrač kondenzátu

O – odvodnění

Úvodem nutno dodat, že potrubí od K po RZV je většinou v dodávce kotle – záleží na domluvě výrobce K a výrobce T.

V době, kdy existovala IBZKG, která vyráběla jak kotel, tak turbínu jako komplexní zařízení, výše uvedený problém neexistoval.

Pokud je potrubí včetně příslušenství dodávkou kotle (jak výše uvedeno), pak ovládání uš1, uš2 a RV je vyvedeno na monitor pro turbínu (velín), aby zkušební technik turbíny si sám nastavoval vhodné parametry pro ohřev. Samozřejmostí je, že zkušební technik pro kotel (za účasti zkušební technika pro turbínu) před prohřevem provedl *profuk* potrubí, při demontované měřící cloně (M).

*Vlastní prohřev potrubí při dosažených parametrech páry K (T, p, m):*

1. uš1 – zavřeno
2. uš2 – otevřen na cca 50 %
3. RV – pootevřen na 3 % a sleduje se rychlost teploty ohřevem potrubí EV3 – RZV

Přípustná rychlost ohřevu: 6-10 °C/min.



Aby bylo možno otevřít přehradní šoupátko (uš1) je potřeba dodržet minimální rozdíl tlaků před a za uš1.

### 11.2.2 Přívodní parovod horký a ventilová komora studená:

Při tomto stavu je nutné, aby před otevřením RZV nebyl parovod natlakovaný.

Pokud by tomu tak bylo, mohlo by dojít k překročení max. povolené rychlosti stoupaní teploty pro komoru RV.

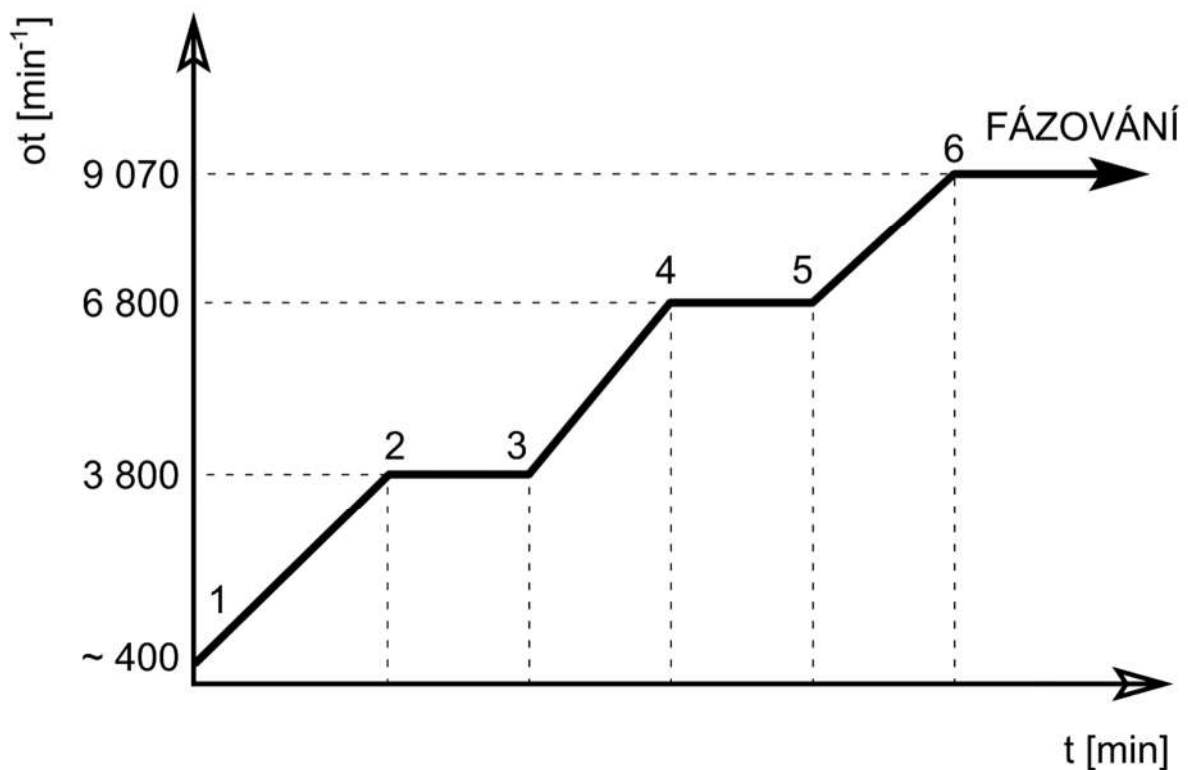
Postupně otevřeme uš2 na 100 % a neustále otevíráme ventil RV na 100 % a otevřeme uš1.

Otevře se RZV při sledování teploty a tlaku a provádí se prohřev VK.

Sledovat, jestli se případně nezvýší otáčky PZ (protáčecího zařízení). V případě zvýšení otáček se jedná o netěsnost RZV a RV (regulační ventil).

Další postup najíždění turbíny se provádí dle najížděcího diagramu, který si vyhodnotí teplotu skříně, která by měla být větší než 100 °C.

### 11.2.3 Popis jednotlivých najíždění dle najížděcího diagramu:



Obr. 18 Najížděcí diagram parní turbíny

#### Bod 1:

- 400 ot/min – jsou otáčky „Protáčecího zařízení (PZ)“ jako jedna z podmínek pro spuštění turbíny v automatickém režimu.
- Před spuštěním PZ musí být spuštěn mazací olejový systém – POČ.
- Další podmínky jsou min. tlak a teplota páry před turbínou.

Bod 2:

- Postupné zvyšování otáček (dané v SW) na cca 1500 ÷ 3000 ot/min.
- V této fázi je nutné sledovat rozdíl teplot horní a spodní turbínové skříně, popřípadě upravit najížděcí diagram a tento předat technikovi pro úpravu SW.

Bod 2-3:

- První prohřev.
- Jeli rozdíl teplot horní a spodní skříně statoru v mezích, poté asi po 15-20 minutách nastává další prohřev. Nutno také sledovat axiální a relativní posuv.

Bod 3-4:

- Dochází k dalšímu zvýšení otáček (na Obr. 18)
- 6000 – musí být vždy nad nebo pod kritickými otáčkami
- Pokud se nenacházejí v tomto pásmu prohřevu – sledovat teploty skříně vršek a spodek

Bod 4-5:

- Další prohřev turbíny.

Bod 5-6:

- Zvyšování otáček až na jmenovité otáčky tzv. volnoběh. Na těchto otáčkách nemůžeme dlouho provozovat turbínu, neboť dochází k poměrně rychlému nárůstu teploty výstupního hrdla, což je způsobeno minimálním množstvím páry jdoucí do kondenzátoru.

Bod 6:

- Nastává fázování a generátor od tohoto momentu najíždí po své najížděcí křivce až na 1MW. Zkontrolují se všechny důležité parametry turbíny.

Závěrem nutno podotknout, že veškeré parametry uvedené v těchto skriptech jsou jen ilustrační pro lepší pochopení všech možných následných dějů.

Výpočtář turbíny určí dle konstrukce turbíny všechny potřebné parametry:

- Výkon generátoru
- Teplota vstupní páry
- Tlak vstupní páry
- Množství vstupní páry
- Otáčky turbíny

Dodá také pro zkušebního technika příslušné diagramy. Najížděcí diagram může zkušební technik zadat pracovníku provádějící SW k jeho úpravě. Poté možno provést automatický start turbíny.

# 12 PŘÍLOHY

## Příloha 1

### Předpis pro volbu oleje

#### Používání olejů pro tepelné turbíny

Olej použitý po mazací, případně i regulační systém musí být výrobcem výslovně specifikován jako olej s antioxidačními a antikorozivními přísadami, určený pro tepelné turbíny a mimo to musí splňovat tyto technické požadavky (podle ČSN 656620).

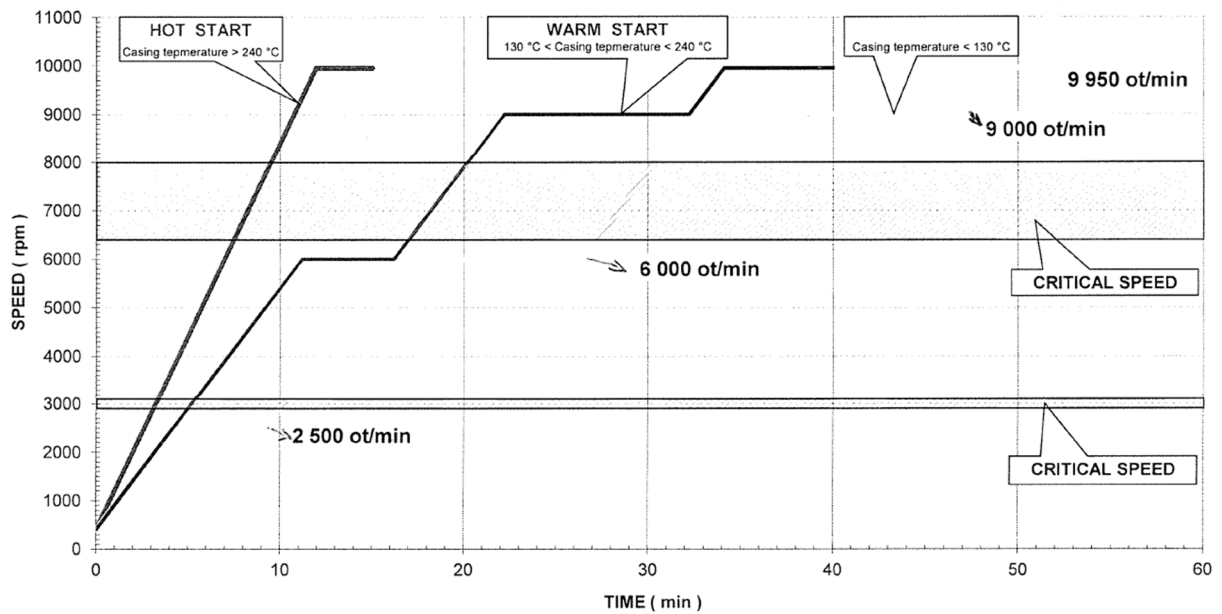
Název zkoušky oleje	Zkušební metody	Jednotky	Hodnoty použitého
Hustota při 15 °C	ČSN 656216, ISO 3675 ASTM D 1298	kg/m <sup>3</sup>	877
Bod vzplanutí (o. k.)	ČSN 656212, ISO 2592 ASTM D 92	°C	185
Kinematická viskozita při 40 °C	ČSN 656216, ISO 3104 ASTM D 445	mm <sup>2</sup> /s	41,4 ÷ 50,6
Kinematická viskozita při 100 °C	ČSN 656216, ISO 3104 ASTM D 445	mm <sup>2</sup> /s	6,8
Viskozitní index min.	ISO 2009, ASTM D 2270	-	90
Bod tuhnutí	ČSN 656078, ISO 3016 ASTM D 97	°C	-6
Neutralizační číslo max (číslo kyselosti)	ČSN 656070 ASTM D 664	mg KOH/g	0,05
Obsah popela max.	ČSN 656063	% hmotnosti	0,008
Obsah vody max.	ČSN 656062	% hmotnosti	0,03
Obsah mechanických nečistot	ČSN 656000	% hmotnosti	0
Doba deemulgace max.	ČSN 656230, IP 19	sec.	300
Koroze na ocelových tyčinkách	ČSN 656249, ISO 7210 ASTM	-	nepřítomna
Odolnost proti stárnutí (do kyselosti 2 mg <sub>KOH</sub> /g)	ASTM D 943		
Odlučitelnost vzduchu při 40 °C max.	DIN 51381	min.	6

Uvedeným podmínkám vyhovují turbínové oleje TB – 46 a jejich ekvivalenty podle jednotlivých výrobců. Hodnota čísla kyselosti a obsahu popela může být upravena po konzultaci s dodavatelem oleje.

Turbínové oleje s přísadami mohou způsobit podráždění pokožky a sliznic. Při práci s nimi je proto nutné dodržovat bezpečnostní předpisy podle ČSN 656020 a předpisy pro používání podle údajů dodavatele.

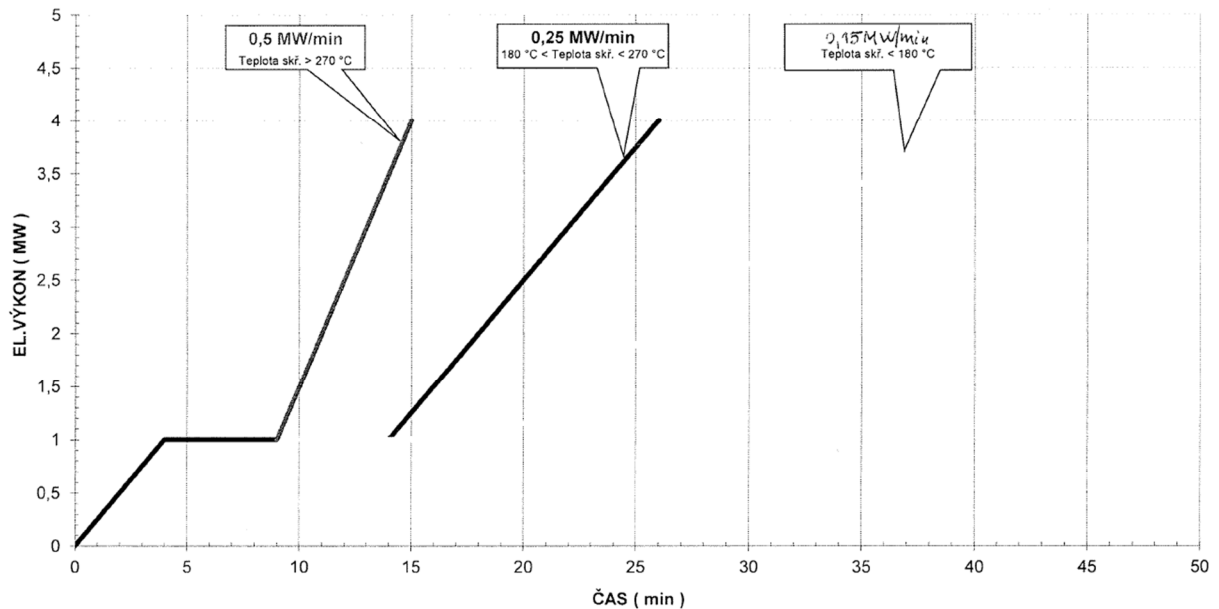
## Příloha 2

### STARTING DIAGRAM TG, R 3,5-5/(0,06-0,24)



Graf 1 Najížděcí diagram pro skutečnou parní turbínu

### ZATĚŽOVACÍ DIAGRAM TG R 3,5-5/(0,06-0,24)



Graf 2 Zatěžovací diagram pro skutečnou parní turbínu

## **Příloha 3**

### **Profuk potrubí**

#### **1) Technický popis**

- a) Účelem profukování vnitřku parního potrubí je odstranění všech cizích předmětů, okují a uvolněných nečistot po chemickém čištění. Trasy, které musí být profukovány jsou stanoveny projektem.
- b) Před zahájením profukování musí být ukončena řádná příprava, která sestává zejména z:
  - montáže provizorního profukovacího potrubí
  - montáže kontrolních destiček nebo sít (popř. jiných vhodných zařízení)
  - montáže kontrolních měřících přístrojů pro sledování parametrů během profukování
  - ochrana, případně vyjmutí měřících a regulačních přístrojů, které by mohly být při profukování poškozeny
  - úklidu veškerých dřevěných lešení, odpadů a hořlavín z okolí profukovaného potrubí a výfuků
  - zabezpečení prostoru výfuku profukovacího potrubí před vstupem nepovolaných osob
- c) Parametry páry pro profukování musí být předem stanoveny výpočtem s podmínkou dosažení vyšších dynamických účinků páry, než jaké jsou za normálního provozu. Teplota páry má být co nejbližší provozní teplotě. Uvedených podmínek bývá dosaženo zpravidla při:
  - 50 % provozního tlaku páry
  - 70 % provozního množství páry
  - teplotě snížené z bezpečnostních důvodů o 20 - 25 °C proti provozní teplotě
  - profukování je řízeno škrcením páry armaturou na parním rozdělovači
- d) K vlastnímu profukování se přikročí po dohodě s provozovatelem a při úzké spolupráci s obsluhou zdroje páry a vědomím bezpečnostního technika

#### **2) Provizorní úprava zařízení pro profukování**

- a) Provizorní výfukové potrubí se napojí na příruby obou větví vstupního parovodu před RZ ventily.
- b) Na začátku provizorního potrubí pro profuk se umístí držák kontrolních destiček
- c) Parní síto před spouštěcím ventilem bude demontováno
- d) Pro kontrolu nahřívání potrubí je nutno zajistit měření teploty na začátku a na konci potrubí
- e) Před vlastním profukováním musí být dokončeny izolace profukovaného parovodu
- f) Z profukovaného potrubí je třeba demontovat všechna zařízení, která by mohla být profukem poškozena (např. měřící přístroje)

#### **3) Postup profukování**

##### **a) Nahřívání potrubí**

Provádí se pozvolným otevíráním uzavírací armatury na začátku profukované trasy. Ostatní armatury v profukovaném potrubí musí být zcela otevřeny. Rychlost prohřevu potrubí je 50-60 °C/h. Parovod se považuje za nahřátý, pokud teplota na konci potrubí nebude při zvyšování průtoku páry do parního potrubí dále stoupat.

Nahřívání při opakovaných profucích bude prováděno stejným způsobem jako první pouze rychlost prohřevu může být 4°/min. Rozdíl teploty páry a povrchu potrubí nesmí být větší než 100 °C na začátku nahřívání a 40-60 °C na konci nahřívání potrubí.

b) *Vlastní profuk*

Po nahřátí parovodu se otevřením přívodního šoupátka zvýší výkon při profukování na stanovenou hodnotu.

Při uvedeném výkonu se profukuje po dobu 30 minut a v 5 minutových intervalech se zaznamenávají parametry páry měřené provozními nebo provizorními měřicími přístroji.

c) *Chladnutí potrubí*

Po 30 minutách profukování se uzavře přívodní šoupátko a potrubí se nechá chladnout. Po ochlazení na 150 °C je možno začít s novým nahříváním potrubí. Vzhledem k tomu, že potrubí bude chemicky čištěno, je nutno profukovat minimálně 3x podle počtu a velikosti úhozů na kontrolní destičce.

4) Vyhodnocování profuku

Kontrola kvality profukování se provede jednak srovnáním parametrů výpočtovými hodnotami a vizuální kontrolou velikosti a počtu úhozů na kontrolních destičkách vkládaných před každým profukem do výfukového potrubí.

Profukování je možno považovat za ukončené, jestliže byl:

- dosažen nutný počet profuků dle stavu kontrolních destiček
- dosaženo vypočtených hodnot dynamického tlaku při všech profucích
- dodržen technologický postup
- hodnota absolutní velikosti úletů nečistot při posledním profukování je nižší než 25 % její maximální hodnoty
- hodnota relativního stupně úletů nečistot poklesla na své minimum

5) Výpočet parametru profukování

Dobrá výsledek profukování je zajištěn jen tehdy, dosáhnou-li dynamické tlaky páry při profuku minimálně provozních hodnot.

Vzhledem k nepřesnostem při měření se doporučuje provádět profukování s 1,2 násobkem provozního dynamického tlaku.

*Provozní parametry:*

Maximální provozní hmotnostní průtok  $M = 16,1 t \cdot h^{-1} = 4,47 kg \cdot s^{-1}$

Provozní tlak páry  $p = 3,1 MPa$

Provozní teplota páry  $t = 448 °C$

Měrný objem páry  $v = 0,103 969 m^3 \cdot kg^{-1}$

Rozměr potrubí parovodu **TR 168, 3 × 6, 3**

Průtočný řez potrubí  $f = 0,01904 m^2$

a) dynamický tlak za provozu  $p_d$

$$p_d = \left(\frac{M}{f}\right)^2 \cdot \frac{v}{2} \cdot 10^{-6} = \left(\frac{4,47}{0,019\ 04}\right)^2 \cdot \frac{0,103\ 69}{2} \cdot 10^{-6}$$

$$p_d = 0,002\ 865\ 198\ MPa$$

b) dynamický tlak při profukování  $p_{dprof}$

$$p_{dprof} \geq 1,2 \cdot p_d = 1,2 \cdot 0,002\ 865\ 198$$

$$p_{dprof} = 0,003\ 438\ 238\ MPa$$

c) hmotnostní průtok při profukování  $M_{prof}$

předpokládané parametry při profuku:

- $p_{prof} = 1,55\ MPa$
- $t_{prof} = 420\ ^\circ C$
- $v_{prof} = 0,216868\ m^3 \cdot kg^{-1}$

$$M_{prof} = 1,095 \cdot M \cdot \sqrt{\frac{v}{v_{prof}}} = 1,095 \cdot 4,47 \cdot \sqrt{\frac{0,103\ 969}{0,216\ 868}}$$

$$M_{prof} = 3,39\ kg \cdot s^{-1} = 12,2\ t \cdot h^{-1}$$

d) porovnání dynamických účinků  $m$

$$m = \frac{p_{prof}}{p} = \left(\frac{M_{prof}}{M}\right)^2 \cdot \frac{v_{prof}}{v} \geq 1,2$$

$$m = \left(\frac{12,2}{16,1}\right)^2 \cdot \frac{0,216\ 868}{0,103\ 969} = 1,2$$

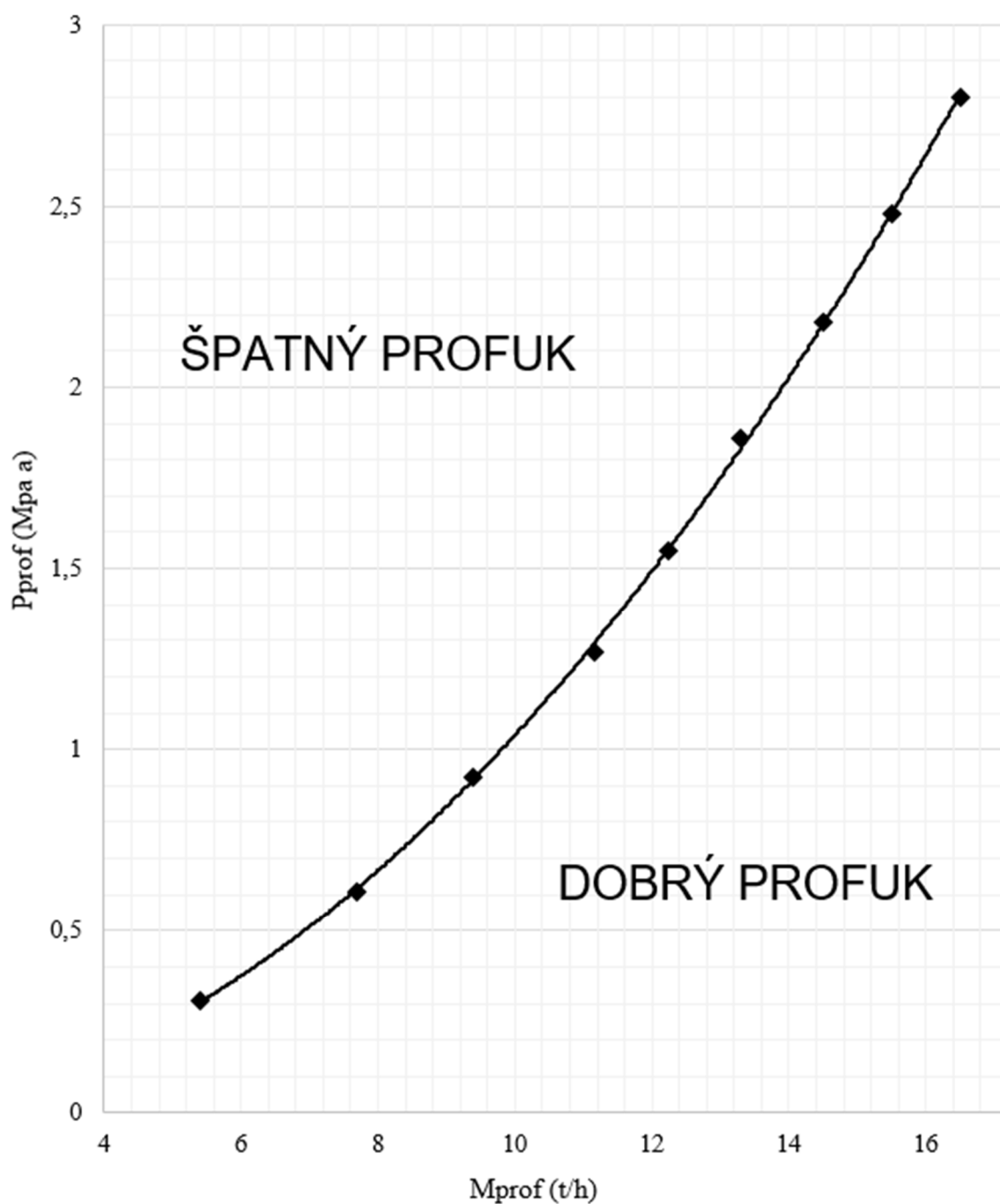
**Parametry páry pro profuk:**

$$M_{prof} = 12,2\ t \cdot h^{-1}$$

$$p_{prof} = 1,55\ MPa$$

$$t_{prof} = 420\ ^\circ C$$

Pro snadnější orientaci v parametrech při profukování je vypracován diagram průběhu dynamického tlaku pro profukování vstupního parovodu k turbíně.



Graf 3 Diagram průběhu dynamických tlaků



## Příloha 4

### Slovníček pojmů

- Akumulátor** Zařízení k akumulaci určitého média. V teplárenství např. k akumulaci tepelné, mechanické nebo elektrické energie.
- Alternátor** Točivý elektrický stroj, který transformuje mechanickou energii na elektrickou energii. V teplárenství se obvykle používají synchronní alternátory, které jsou zdrojem střídavého napětí o frekvenci 50 Hz.
- Armatura** Součást strojů zajišťující činnost, obsluhu, kontrolu. Např. klapky, ventily, šoupátka, pojišťovací ventily, zpětné klapky apod.
- Cirkulační čerpadlo** Zařízení, které obstarává cirkulaci určitého média v uzavřené soustavě. V teplárenství např. v horkovodní soustavě, kde zajišťují distribuci tepla zákazníkům, udržují potřebný tlak a průtok.
- Čerpadlo** Stroj sloužící pro dopravu média v tekutém stavu. Čerpadla se dělí na hydrodynamická (např. odstředivá), hydrostatická (např. zubová) a speciální (např. proudová).
- Činný výkon** Je jednou ze složek zdánlivého výkonu. Činný výkon se nevratně přemění na jinou formu energie, např. mechanickou v elektrickém stroji.
- Dálkové zásobování teplem** Systém dodávky tepelné energie. Tepelná energie se vyrábí centrálně a následně je distribuována pomocí soustavy zásobování tepelnou energií.
- DEMI voda** Voda, která je zbavena všech minerálů. Používá se pro plnění vysokotlakových parních kotlů, za provozu se společně s kondenzátem doplňuje do napájecích energií.
- Dmychadlo** Stroj určený pro stlačování plynu do tlaku 0,3 MPa
- Dřevní štěpka** Strojně nadrcená dřevní hmota určená především pro energetické účely.
- Ekonomizér** Tepelný výměník, který slouží pro předehřívání napájecí vody do kotle. Ekonomizér využívá tepla spalin, ze spalovaného paliva. Bývá umístěn v zadních tazích kotle, před spalinovodem.
- Elektrárna** Komplex zařízení sloužící k výrobě elektrické energie. V elektrárnách probíhá transformace tepelné, jaderné, vodní nebo větrné energie na energii elektrickou.
- Elektrizační soustava** Rozsáhlý systém, který zahrnuje silnoproudá zařízení sloužící k výrobě elektrické energie (generátory), transformaci (transformátory), přenosu (venkovní vedení, kabely), rozvodu (kabely) a spotřeby (el. spotřebiče).
- Entropie** Veličina vyjadřující míru degradace tepla v pracovní látce. Ideální tepelný stroj pracuje izoentropicky.
- Frekvence sítě** Frekvence (jednotka Hz) spolu s napětím (jednotka Volt) patří k základním kvalitativním charakteristikám elektrické sítě.
- Horkovod** Obvykle ocelové potrubí sloužící k distribuci horké vody z místa výroby k zákazníkovi.
- Horkovodní kotel** Složitě zařízení k výrobě horké vody.
- Hořák** Slouží k mísení a distribuci směsi paliva a oksličovadla ve vhodném poměru do kotle. Hořáky se dělí dle paliva na plynové, kapalinové a uhelné.
- Kogenerace** kombinovaný a vysoce účinný proces společné výroby elektrické energie a tepla.

<b>Kompresor</b>	Stroj určený pro stlačování plynů. Poměr výstupního a vstupního tlaku je u kompresoru větší než 3.
<b>Kondenzátor</b>	Tepelný výměník, do něhož se přivádí pára vystupující z posledního stupně parní kondenzační turbíny.
<b>Kotel</b>	Složitě zařízení sloužící pro přeměnu chemické energie vázané v palivu na tepelnou energii. Kotle se dělí podle paliva na plynové, uhelné, biomasové apod.
<b>Kotelní voda</b>	Voda, kterou je naplněn tlakový systém kotle za provozu.
<b>Měrná tepelná kapacita</b>	Množství tepla potřebné k ohřátí 1 kg látky o 1°C.
<b>Motor</b>	Stroj, který přeměňuje elektrickou, tepelnou nebo hydraulickou energii na mechanickou práci.
<b>Napájecí čerpadlo</b>	Čerpadlo, které dopravuje napájecí vodu do kotle.
<b>Odluh</b>	Trvalé nebo krátkodobé odvádění zahuštěné kotelní vody. Ztráta tepla odluhem je jednou ze ztrát kotle.
<b>Odplynění</b>	Jde o úpravu napájecí vody do kotle – vytěsnění kyslíku. Odplynění eliminuje korozi uvnitř trubek tlakového celku kotle. Nejčastěji se používá termické nebo chemické odplynění.
<b>Parní turbína</b>	Tepelný lopatkový rotační stroj, v němž se mechanická energie získává expanzí vodní páry v soustavě rozváděcích a oběžných lopatek.
<b>Paroplynový cyklus</b>	Jde o spojení parního oběhu (Rankin Clausiova) a plynového oběhu (Joule Bratonova). Klasické schéma se sestává ze spalovací turbíny, spalínového kotle, parní turbíny a kondenzátoru (v případě paroplynové elektrárny). Typický paroplynový cyklus je na provozu Červený mlýn, společnosti Teplárny Brno.
<b>Parovod</b>	Potrubí určené pro dopravu páry od místa výroby do místa spotřeby.
<b>Přehřátá pára</b>	Jde o sytou páru, jenž byla dodatečně přehřátá (v přehříváku kotle). V praxi se často používá označení „ostrá pára“.
<b>Přehřívák</b>	Tepelný výměník, který využívá nejvyšší teplotu spalin k přehřátí syté páry.
<b>Příkon</b>	Příkon je přiváděný výkon. Poměr výkonu k příkonu je účinnost. Účinnost je vždy menší než 1.
<b>Rosný bod</b>	Teplota, při které ochlazením par přehřátých vznikají páry nasycené, což se projevuje tvořením kapek kapaliny.
<b>Rotor</b>	Točivá část stroje, např. parní turbíny, asynchronního motoru, spalovací turbíny, kompresoru apod.
<b>Řídicí systém</b>	Komplex zařízení umožňující ovládání, řízení, monitorování, archivaci technologických procesů.
<b>Soustava zásobování tepelnou energií</b>	Soustava tvořená hlavními a lokálními zdroji tepla a rozvodnými sítěmi, jimiž je tepelná energie dodávána do vytápěných objektů (tzn. Do odběrných míst). Zkráceně je soustava označována jako SZTE, setkat se můžete také s pojmem Soustava centrálního zásobování teplem (SCZT).
<b>Spalovací turbína</b>	Tepelný lopatkový rotační stroj, který je tvořen kompresorem, spalovací komorou a plynovou turbínou, jednu ze spalovacích turbín s prstencovou spalovací komorou lze nalézt na provozu Červený mlýn společnosti Teplárny Brno a.s.

<b>Spalování</b>	Proces, při kterém se uvolňuje teplo, světlo, voda. Rozeznáváme dokonalé a nedokonalé spalování.
<b>Stator</b>	Netočivá část stroje, např. parní turbíny, asynchronního motoru, spalovací turbíny, kompresoru apod.
<b>Sytá pára</b>	Pára, která je v prostoru nad kapalinou, ze které se vypařila, ale je s ní stále ve styku. Má stejnou teplotu, jako kapalina při rovnovážném stavu.
<b>Šoupě</b>	Uzavírací armatura, kde je médium uzavíráno pomocí klínu (srdce).
<b>Tepelné čerpadlo</b>	Zařízení, které odnímá nízkopotenciální teplo a předává ho pro potřeby vytápění nebo pro ohřev teplé užitkové vody.
<b>Teplárna</b>	Komplex zařízení sloužící k výrobě tepla a elektrické energie. Elektrická energie a teplo jsou vyráběny s vysokou účinností. Jedna z nejstarších tepláren ve střední Evropě je na provoz Špitálka společnosti Teplárny Brno, a.s.
<b>Teplo</b>	Představuje vnitřní energii látky. Jde o formu energie danou neuspořádaným pohybem atomů a molekul. Jednotkou tepla je Joule (J).
<b>Teplota</b>	Fyzikální veličina, která charakterizuje tepelný stav určité hmoty.
<b>Tlak</b>	Jde o sílu působící na jednotku plochy. Základní jednotkou je Pascal (Pa).
<b>Transformátor</b>	Elektrický stroj určený převážně ke zvyšování nebo snižování napěťové úrovně.
<b>Trigenerace</b>	Kombinovaný proces výroby elektřiny, tepla a chladu.
<b>Účinnost</b>	Míra využití vložené energie. Účinnost je vždy menší než 1.
<b>ÚT</b>	Zkratka pro ústřední topení. K ohřevu topného média (vody) dochází na místě zvaném kotelna nebo výměňková stanice.
<b>Velín</b>	Neboli blokova dozorna, slouží pro dálkový monitoring a řízení objektu, např. teplárny, elektrárny, výtopny, čerpací stanice apod.
<b>Vodoznak</b>	Jde o zákonnou armaturu parního kotle, přístroj je spojen s parním a vodním prostorem bubnu parního kotle, v jehož průřezu lze přímo pozorovat výšku hladiny v kotli.
<b>Vratná voda</b>	Voda, která se vrací od zákazníků. Ti z vody odebrali teplo např. přípravou TUV (teplé užitkové vody) nebo ohřev ÚT (ústřední topení).
<b>Výhřevnost</b>	Množství tepla, které se uvolní dokonalým spálením jednoho kilogramu paliva, přičemž teplota odcházejících spalin má teplotu okolí.
<b>Výkon</b>	Z fyzikálního pohledu je výkon podíl práce vykonané v určitém časovém úseku. Jednotkou výkonu je Watt (W).
<b>Výměník tepla</b>	Zařízení pro výměnu tepla mezi médii, např. výměník spaliny vs. horká voda, pára vs. horká voda apod.
<b>Výměňková stanice</b>	Soubor zařízení (tepelný výměník, armatury, čerpadla) sloužící k předávání tepelní energie mezi oddělenými okruhy.
<b>Výtopna</b>	Komplex zařízení sloužící k výrobě tepla.
<b>Zemní plyn</b>	Fosilní palivo, jehož základní složkou je metan (CH <sub>4</sub> ). Zemní plyn má vysokou výhřevnost a jeho spalováním vzniká jen minimum emisí. Teplárny Brno patří k největším odběratelům zemního plynu v ČR.

## 13 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

ŠČEGLJAJEV, A. V. Parní turbíny. Teorie tepelného děje a konstrukce turbín. 1. svazek, 1. vyd. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1983, 367 s

BEČVÁŘ, J. Tepelné turbíny. 1 vyd., Praha: Nakladatelství technické literatury, n.p., Spálená 51, Praha, 1968. 548 s. ISBN 04-213-68

AMBROŽ, J. Parní turbíny a kondenzace. Praha: České vysoké učení technické, 1980. Učební texty vysokých škol.

KALČÍK, J. Technická termodynamika. 1. vyd. Praha: ČSAV, 1960. 514, [1] s. Práce ČSAV. Sekce techn.

MAŠTOVSKÝ, O. Hydromechanika. 2. Praha: Statní nakladatelství technické literatury, 1964.

KRAJÍČ, L. Parní turbíny a příslušenství. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2017, 280 s. ISBN 978-80-261-0731-6.

ZEMAN, V.; HLAVÁČ, Z. "Kmitání mechanických soustav," Západočeská univerzita v Plzni, ISBN 80-7043-337-X.

SLAVÍK, Jaromír, Vladimír STEJSKAL a Vladimír ZEMAN. Základy dynamiky strojů. Praha: České vysoké učení technické, 1997. ISBN 80-01-01622-6.

ENENKL, V. Termomechanika. Vysoké učení technické v Brně, učební texty vysokých škol, 1976