

UČEBNÍ TEXTY VYSOKÝCH ŠKOL

Vysoké učení technické v Brně

Fakulta strojního inženýrství

Ing. Jiří Škorpík, Ph.D.

TEPELNÉ TURBÍNY A TURBOKOMPRESORY

VLASTNOSTI, NÁVRH, PROVOZ A VYBRANÉ STATĚ
Z PROUDĚNÍ PLYNŮ A PAR



AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM[®], s.r.o. Brno

Recenzent: Doc. Dr. Ing. Jan Fiedler

© Ing. Jiří Škorpík, Ph.D., 2020

ISBN 978-80-214-5847-5

Komentář recenzenta

Skripta „Tepelné turbíny a turbokompresory“ od pana Ing. Jiřího Škorpíka, Ph.D. jsou určena pro podporu výuky shodně nazvaného předmětu ve 2. ročníku nově akreditovaného magisterského programu v oboru Energetika. Navazují na již dříve vydaná skripta „Lopátkové stroje“ stejného autora, určená pro 1. ročník magisterského studia shodného oboru.

Obsahují 9 kapitol a na více jak 250 stránkách přinášejí komplexní pohled na parní a plynové turbíny a turbokompresory, jejich zapojení v technologii a základní konstrukční a materiálový popis nejdůležitějších částí těchto strojů. Skripta zahrnují poslední poznatky z vývoje těchto tepelných strojů a to jak v energetice, tak i v dopravě a průmyslu obecně a jsou doplněna řadou ilustračních obrázků a fotografií. To z nich dělá zajímavou publikaci nejen pro studenty. Za důležité považují z pedagogického hlediska poslední 4 kapitoly o obecném proudění plynů a par s názornými příklady.

Každá kapitola je doplněna přílohami s příklady. Tím vzniká z teoretické publikace i prakticky použitelná příručka nejen pro vysokoškolské studenty, ale i pro širší okruh techniků se zájmem o detailnější seznámení s turbínami a turbokompresory včetně návrhu jejich částí. Vydání takové publikace je účelné a bylo vyžadováno studenty.

Rozsah skript odpovídá předmětu Tepelné turbíny I, ale do budoucna je lze použít i jako podporu nově akreditovanému předmětu Tepelné turbíny a turbokompresory, který má předmět Tepelné turbíny I nahradit.

V Brně 9.3.2020

recenzi provedl

Doc. Dr. Ing. Jan Fiedler

Obsah

Skripta jsou vytvořena z devíti článků:

O skriptech

23. Tepelné turbíny a turbokompresory

- Úvod do parních turbín • Úvod do turbokompresorů • Úvod do dmychadel a turbodmychadel • Úvod do spalovacích turbín
- Kombinace spalovací a parní turbíny v paroplynovém oběhu • Přílohy*

24. Materiály a teorie strojních částí lopatkových strojů

- Materiály lopatkových strojů • Rotory • Ucpávky rotorů • Lopatky • Úvod do teorie tření • Obecné konstrukční požadavky na smyková vedení a kluzná ložiska • Kluzná ložiska • Valivá ložiska
- Mazací soustavy a olejové hospodářství
- Mazivo • Úvod do opotřebení a životnosti součástí • Přílohy*

25. Parní turbína v technologickém celku

- Zástavbová a provozní specifika parní turbíny
- Spotřební charakteristiky parních turbín
- Schémata zařízení s parními turbínami • Tepelná účinnost bloku s parní turbínou • Zvyšování účinnosti bloku a Carnotizace parního oběhu
- Alternativní pracovní látky v parních obězích • Přílohy*

26. Turbokompresor v technologickém celku

- Zástavbová a provozní specifika turbokompresoru • Snižování příkonu kompresoru chlazením • Turbodmychadla spalovacích motorů
- Vlastnosti komprimovaného vlhkého vzduchu
- Přílohy*

27. Plynová turbína v technologickém celku

- Spalovací turbína jako technologický celek
- Carnotizace Braytonova oběhu • Regulace a regulační a charakteristiky spalovacích turbín
- Přílohy*

37. Škrčení plynů a par

- Popis vzniku trvalé tlakové ztráty při škrčení
- Využití efektu škrčení v labyrintových ucpávkách
- Ventily • Škrčení v průřezových průtokoměrech
- Hydraulické vyvažování potrubí pomocí škrčení
- Vírové stroje • Přílohy*

39. Machovo číslo a efekty při proudění vysokými rychlostmi

- Dopady konečné velikosti rychlosti zvuku na kontinuitu proudu • Druhy rázových vln
- Expanzní vlny • Charakteristika obtékání tělesa vysokou rychlostí • Přílohy*

40. Proudění plynů a par tryskami

- Zuzující se tryska (konvergentní tryska, konfuzor)
- Lavalova tryska (konvergentně-divergentní tryska) • Proudění v šikmo seříznuté trysce
- Proudění tryskou se ztrátami • Některé aplikace teorie trysek • Přílohy*

41. Proudění plynů a par difuzory

- Energetická bilance difuzoru • Tvary difuzorů a s tvarem související ztráty • Nadzvukové difuzory
- Problémy difuzorů při nenávrhových stavech
- Některé aplikace teorie difuzorů • Přílohy*

*Přílohy obsahují řešení úloh a odvození důležitých vztahů.

O skriptech

Skripta jsou přímým pokračováním skript Teorie lopatkových strojů vydaných v roce 2019. Znamená to, že obsah skript vychází z článků vydaných v on-line zdroji Transformační technologie (www.transformacni-technologie.cz). Konkrétně se jedná o články č. 23 až 27, jejichž obsahem jsou vlastnosti, konstrukce a provoz tepelných turbín a turbokompresorů, a články č. 37, 39, 40, 41, jejichž obsahem je problematika z proudění plynů a par popisovaná v souvislosti s prouděním v tepelných turbínách a turbokompresorech. Skripta tedy tématicky pokrývají předmět Tepelné turbíny I nově akreditovaný předmět Tepelné turbíny a turbokompresory (vyučovaný od školního roku 2020/2021). Podrobněji viz Obsah těchto skript a obsah jednotlivých článků.

Podobně jako u skript Teorie lopatkových strojů lze obrázky a další číslované objekty vyhledat i v elektronické formě. Konkrétně na adrese <https://www.transformacni-technologie.cz/x.html#y>, kde za *x* dosadíte číslo článku a za *y* číslo objektu (například obrázek 96 Zapojení protitlakové turbíny v článku 23 můžete zhlédnout či stáhnout na adrese <https://www.transformacni-technologie.cz/23.html#96>.

V Brně, březen 2020

Ing. Jiří Škorpík, Ph.D.

23. TEPELNÉ TURBÍNY A TURBOKOMPRESORY

Jiří Škorpík, ORCID: 0000-0002-3034-1696, skorpik.jiri@email.cz

Úvod 1

Úvod do parních turbín 1

• Základní schéma kondenzační turbíny a turbíny s potlačenou kondenzací 2 • Základní schéma protitlakové turbíny 2 • výpočet možností parní turbíny v redukčně-chladicí stanici [Ú.653] 2 • Základní schémata turbín s odběrem páry 2 • Základní schémata vícetělesových turbín 4 • Základní schémata lodních parních turbín 6 • Způsoby regulace výkonu parních turbín 7 • Popis základního návrhu a konstrukce parních turbín 9 • návrh rozměrů jednostupňové parní turbíny [Ú.435] 9 • Další části parní turbíny a její vybavení 11 • Stavebnicová konstrukce a unifikace parních turbín 12 • Kompaktní provedení parních turbín na rámu 13

Úvod do turbokompresorů 14

• Turbokompresory s adiabatickou kompresí 14 • Turbokompresory s chlazenou kompresí 15 • Popis základního návrhu a konstrukce turbokompresoru 17 • návrh rozměrů a parametrů radiálního stupně kompresoru [Ú.726] 17 • Pohony turbokompresorů 18 • Regulace průtoku a kompresního poměru turbokompresoru 20

Úvod do dmychadel a turbodmychadel 21

• Regulace turbodmychadla 21 • Popis základního návrhu a konstrukce turbodmychadel 22

Úvod do spalovacích turbín 24

• Spalovací komory 25 • Regulace spalovacích turbín 27 • Základní schémata zapojení spalovacích turbín 28 • Letecké aplikace spalovacích turbín a aeroderiváty 30

Kombinace spalovací a parní turbíny v paroplynovém oběhu 34

• Princip paroplynového oběhu a základní schéma zařízení pro jeho realizaci 34 • základní výpočet paroplynového oběhu [Ú.159] 35 • Dvoutlakový paroplynový oběh 35

Odkazy 36

Přílohy 39

• 159 Řešení úlohy 39 • 435 Řešení úlohy 40 • 653 Řešení úlohy 44 • 726 Řešení úlohy 45

Úvod

Princip tepelných turbín a turbokompresorů a základní konstrukční znaky jsou popsány v článku 11. Lopatkový stroj, přičemž klíčovými pojmy jsou jednostupňová parní turbína, vícestupňová parní turbína, vícetělesová parní turbína, vícestupňový turbokompresor, turbodmychadlo a spalovací turbína. Možnosti uplatnění těchto strojů jsou velmi široké, alespoň ty nejfrekventovanější jsou popsány v následujících kapitolách, včetně popisu jejich základních konstrukčních rysů.



Úvod do parních turbín

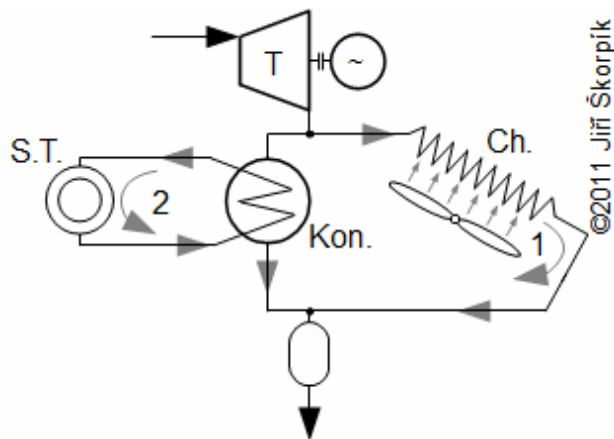
Parní turbíny netvoří samostatný funkční celek, potřebují širokou technologickou základnu se zdrojem páry s vnějším přestupem tepla – díky tomu může být použito v podstatě jakékoliv palivo, ale za cenu velkých investic i velkého zastavěného prostoru. Z těchto důvodů jsou parní turbíny využívány především tam, kde je potřeba větších výkonů (než je tomu například u spalovacích motorů) a to v tepelných elektrárnách, teplárnách, pro pohon lodí a pracovních strojů velkých příkonů.

Parní turbína je velmi rozšířený stroj vyráběný a provozovaný v rozmanitých výkonech. Parní turbíny nebo jejich části se vyrábí prakticky ve všech zemích s rozvinutým strojírenstvím. Nejvíce výrobců je v segmentu výkonů parních turbín do *100 MW*, přičemž parní turbínu s výkonem *1 000* a více megawat je schopno v současné době dodat jen asi 5 společností.

Nejčastěji je pracovní látkou vodní pára, ale může se jednat i o páry jiného složení, viz kapitola 25. Alternativní pracovní látky v parních obězích. Teplota vodní páry na vstupu do parní turbíny se obvykle pohybuje kolem $535\text{ }^{\circ}\text{C}$ (starší typy parních turbín, fosilní blok), $565\text{ }^{\circ}\text{C}$ (moderní fosilní blok) a u bloků se superkritickými parametry páry může dosahovat až $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ [7, s. 274] – teploty jsou dány použitým materiálem vstupních částí parních turbín a prvních stupňů lopatek. Pára pro parní turbínu se vyrábí například v parních kotlích (spalování fosilních paliv, biomasy, odpadů apod.), v parogenerátorech jaderných elektráren nebo v parogenerátoru solární elektrárny. V parních geotermálních elektrárnách může být zdrojem páry geotermální vrt.

• Základní schéma kondenzační turbíny a turbíny s potlačenou kondenzací

Podle zapojení parní turbíny v technologickém celku se hovoří nejfrekventovaněji o kondenzační turbíně, protitlakové, turbíně s odběrem páry apod.



454 Zapojení kondenzační turbíny

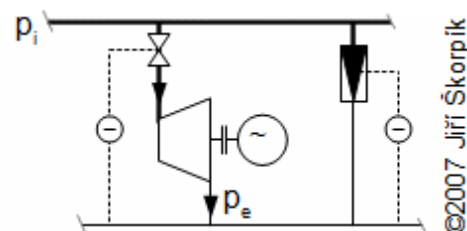
1 chladicí smyčka kondenzátoru pro případ udržování co nejnižšího tlaku kondenzace; **2** chladicí smyčka kondenzátoru pro případ využití kondenzačního tepla (potlačená kondenzace). **T** parní turbína; **Kon.** kondenzátor; **Ch.** chladicí zařízení – používá se suchá kondenzace (jako v tomto případě kondenzátor chlazený vzduchem) nebo mokrá kondenzace, respektive chlazení odparem, jehož princip je popsán v subkapitole [43. Vlhký vzduch a relativní vlhkost vzduchu](#); **S.T.** spotřebič tepla (sítě CZT – centrální zásobování teplem). Tento způsob zapojení je běžný u turbín v teplárnách. Smyčka číslo **2** se zapíná podle požadavku spotřebiče tepla (v případě vytápění je to v zimním období). Během letního provozu, kdy není nutné ohřívat vodu na požadovanou teplotu, se kondenzační teplo maří v chladiči – je zapojena smyčka **1** s cílem udržovat nejnižší možnou teplotu kondenzace pro dosažení co nejvyšší tepelné účinnosti parního oběhu.

Za kondenzační turbínu je považována turbína, za kterou následuje kondenzátor, *Obrázek 454*. Teploty kondenzace (v případě vody) se pohybují již od $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (podle teploty okolí), tomu odpovídá tlak za turbínou přibližně $0,002\text{ MPa}$, proto se někdy říká, že pára expanduje do vakuu. V případě, že se teplota kondenzace významně zvýší, např. z důvodů využití kondenzačního tepla pro vytápění (zvýšení teploty kondenzace na 80 až $90\text{ }^{\circ}\text{C}$) nebo

jiné účely, říkáme, že turbína pracuje v režimu s potlačenou kondenzací – někdy se používá výraz s potlačeným vakuem. Kondenzátor se nachází obvykle co nejbližší turbíny kvůli hroziící vysoké tlakové ztrátě – může se ale nacházet i na vzdálenějším místě od turbíny, např. vzduchové kondenzátory, které jsou často umístovány až na střechu strojovny.

• Základní schéma protitlakové turbíny

V případě protitlakových turbín není na výstupu kondenzátor, ale parovod, případně kondenzátor s tlakem kondenzace obvykle vyšším než $0,1\text{ MPa}$, viz *Obrázek 96*.



96 Zapojení protitlakové turbíny

p_i [Pa] vstupní tlak; p_e [Pa] výstupní tlak. Tlak páry ve výstupním parovodu závisí na dalším využití páry, a může být i vyšší jak 1 MPa . Tato pára se využívá například pro technologické účely nebo vytápění. Parní turbína je zálohována redukční stanicí (může být doplněna chlazením páry) pro případy zvýšení odběru páry nad limity turbíny nebo pro případy poruchy turbíny. Řez protitlakovou parní turbínou je uveden v kapitole [11. Základní typy a aplikace lopatkových strojů](#). Více o zapojení v [53].

Úloha 653

Závod na výrobu bioethanolu spotřebovává sytou páru o tlaku $1,1\text{ MPa}$ v množství $75\text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$. Tato pára je dodávána přes redukčně-chladicí stanici z teplárny. Pára na vstupu do redukčně-chladicí stanice má tlak $1,6\text{ MPa}$ a teplotu $295\text{ }^{\circ}\text{C}$. (a) Vypočítejte množství chladicí vody pro redukčně-chladicí stanici, pokud je teplota chladicí vody $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ a tlak $2,8\text{ MPa}$. (b) Stanovte vnitřní průměr parovodu za redukčně-chladicí stanici, jestliže rychlost páry v potrubí je $30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. (c) Z i-s diagramu vyhodnoťte jakým způsobem by tato redukčně-chladicí stanice mohla být nahrazena parní turbínou. Jaký teoreticky možný výkon by měla taková turbína? Řešení úlohy je uvedeno v *Příloze 653*, s. 44.

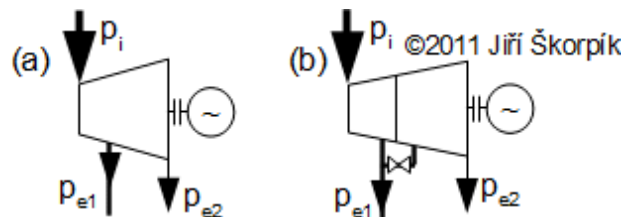
• Základní schémata turbín s odběrem páry

Turbína s odběrem páry je turbína, ze které je část páry odebírána za jiným než posledním stupněm turbíny. Po délce turbíny může být takových odběrů několik. Pára z odběru může být odebírána, buď neregulovaně, nebo regulovaně.

V případě neregulovaného odběru je tlak páry v odběru dán tlakem ve spotřebiči páry na konci odběru (Obrázek 167a). V případě regulovaného odběru je v turbíně vytvořena přepážka, tak aby veškerá pára proudila do odběru, za přepážku proudí část páry z odběru přes regulační ventil, kterým se reguluje množství páry pokračující v expanzi (podle požadavku na tlak páry od spotřebiče) v turbíně za přepážkou (Obrázek 167b).

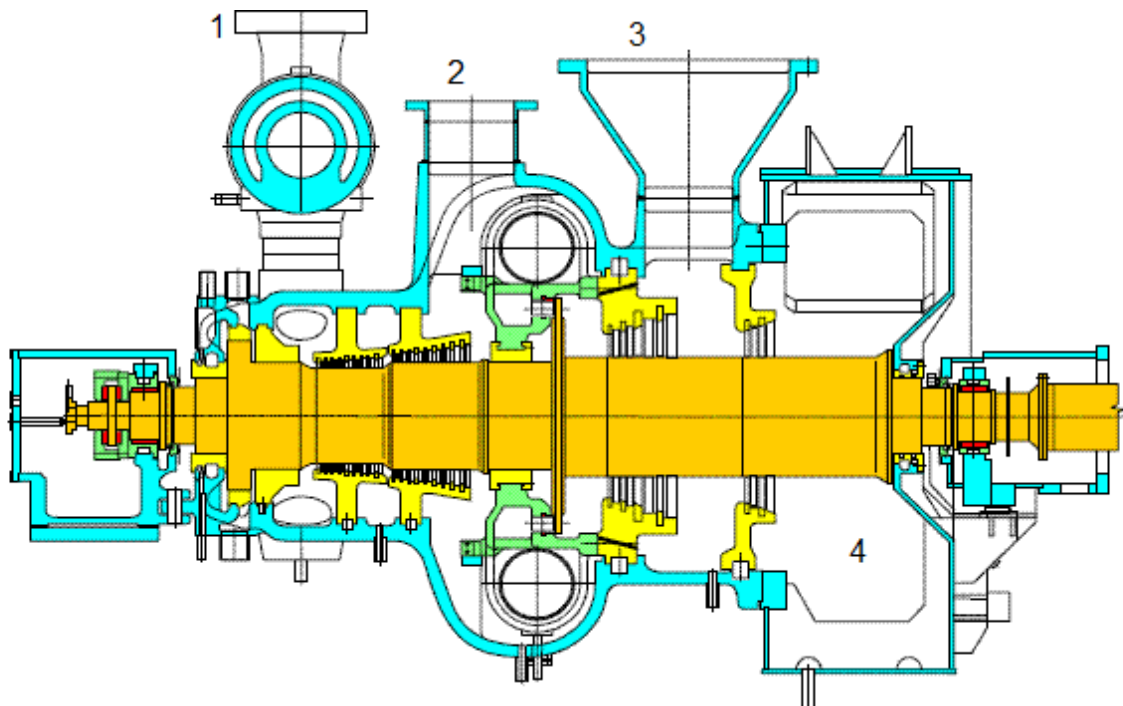
Turbíny s regulovaným odběrem se dimenzují na maximální odběr páry. To znamená, že část turbíny za odběrem je konstruována na průtok nižší než část

turbíny před odběrem. V případě, že spotřebič páry připojený na odběru bude odstaven (sezónní provoz, servisní odstávka), klesne výkon turbíny (přibližně o 50 % až 60 % jmenovitého výkonu turbosoustrojí). Existují turbíny, které jsou konstruovány na stejný maximální průtok před i za odběrem, takové turbíny jsou dražší, a pokud nedochází k výpadku odběrové páry příliš často, je to i zbytečné.



167 Způsoby odběrů páry z parní turbíny (a) turbína s neregulovaným odběrem; (b) turbína s regulovaným odběrem.

Oba uvedené typy odběrů páry se mohou na jedné turbíně kombinovat, Obrázek 670, protože každý typ odběru je vhodný pro jiné využití. Neregulované odběry se používají především za účelem



670 Parní turbína s regulovaným a neregulovaným odběrem páry, typ G40

1 vstupní ventilová komora (vstup páry do turbíny); 2 regulovaný odběr (ventil není zobrazen); 3 neregulovaný odběr; 4 boční hrdlo ke kondenzátoru. V tomto případě regulovaný odběr může sloužit i jako druhý vstup páry do turbíny – proto označení dvoutlaková parní turbíny, bližší popis naleznete v kapitole *Kombinace spalovací a parní turbíny v paroplynovém oběhu*, s. 34). Výkon 24 MW, otáčky turbíny $6\,000\text{ min}^{-1}$. Turbína nemá na vstupu regulaci množství páry – regulace výkonu je prováděna regulací tlaku páry v kotli, viz níže podkapitola *Způsoby regulace výkonu parních turbín*, s. 7. Výrobce PBS (CZ).

regenerace tepla, což je proces zvyšující tepelnou účinnost oběhu, který spočívá v odebrání části páry z turbíny, která pak při kondenzaci ve výměníku přehřívá napájecí vodu zdroje páry.

U vícetělesových turbín může být odběr realizován i mezi tělesy. Regulované odběry se používají, například k zásobování parovodu párou o tlaku vyšším, než je na konci turbíny. Kombinací neregulovaného a regulovaného odběru získáme tedy turbínu schopnou zásobovat regenerační výměníky i spotřebiče páry (neregulovaný odběr může pokrývat základní celoroční odběr páry – takže není nutný regulovaný odběr).

Při regulovaném odběru je vyvedení veškeré páry z turbíny a pak přivedení části této páry přes regulační ventil zpět do turbíny doprovázeno výraznou tlakovou ztrátou a tedy i snížením vnitřní účinnosti turbíny. Pro zlepšení účinnosti byla vyvinuta regulační mezistěna (Obrázek 1048), která nahrazuje v prvním stupni za odběrem statorovou řadu lopatek.

Výroba, návrh a optimalizace parametrů turbíny (optimalizace lopatkových částí za odběrem pro široký rozsah průtoků a tlaků) s regulovanými

odběry je velmi náročná a nákladná, z těchto důvodů se nevyskytují parní turbíny s více jak dvěma regulovanými odběry a v nabídce je má velmi málo firem [18, s. 33].



©2019 Jiří Škorpík

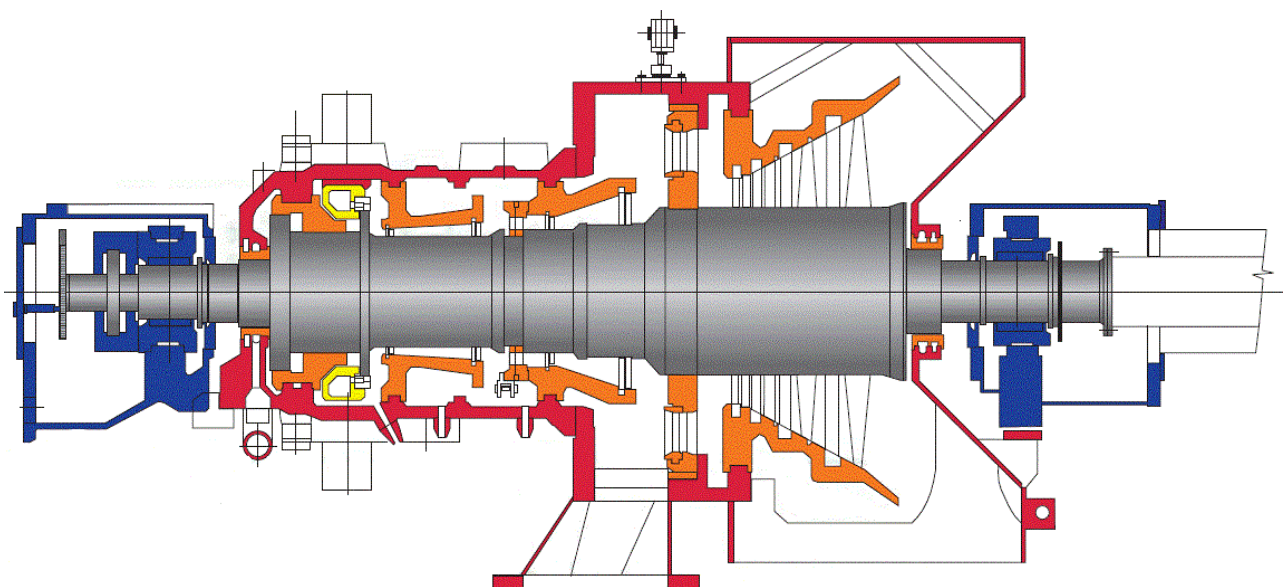
1048 Princip regulační mezistěny

Posouvání přední části mezistěny dochází k změně průtočného průřezu mezistěny. Příklad provedení viz Obrázek 462.

• Základní schémata vícetělesových turbín

Především u větších výkonů se používají vícetělesové parní turbíny. Uspořádání a propojení jednotlivých těles parních turbín záleží na způsobu zapojení parní turbíny v technologickém celku tj. na typu zdroje páry a účelu bloku (Obrázek 283 a Obrázek 802).

Při expanzi páry v turbíně dochází k nárůstu jeho objemu a tedy i zvyšování průtočného průřezu turbíny. Při velkých průtocích může vycházet průtočný průřez příliš velký (velký průměr turbíny), než aby protékal jen jedním tělesem, potom se



462 Parní turbína se dvěma regulovanými odběry pomocí mezistěny

Jmenovitý výkon turbíny je 25 MW, jmenovitý stupní tlak a teplota jsou 9,4 MPa a 550 °C, tlak na výstupu do kondenzátoru 9 kPa, tlak v prvním odběru je 1,4 MPa, ve druhém 0,15 MPa. Výrobce Siemens Industrial Turbines, Brno [18, s. 79], [34, s. 221].