

---

# INFORMACE K PŘEDMĚTU TEPELNÉ TURBÍNY A TURBOKOMPRESORY (LT1)

---

*Autor: Jiří Škorpík, skorpik@fme.vutbr.cz*

Charakteristika předmětu	2.3
Výukové materiály	2.3
Pravidla pro získání zápočtu a hodnocení zkoušky	2.4
Osnova předmětu	2.5
Zadání zápočtových úloh	2.7
Otázky písemné části zkoušky	2.16
Přílohy (neveřejné)	2.21

---

**Author:** Jiří, Škorpík (first name, surname)

**Issue date:** March, 2023

**Title:** Informace k předmětu tepelné turbíny a turbokompresory (LT1)

Copyright©Jiří Škorpík, 2023

All rights reserved.

---

### Charakteristika předmětu

Tepelné turbíny I (LT1)	Předmět Tepelné turbíny a turbokompresory vznikl z předmětu Tepelné turbíny I. Jak už název napovídá, dříve existoval na Energetickém ústavu i předmět Tepelné turbíny II. Oba předměty byly z 80 % zaměřeny na parní turbíny, a to zejména z toho důvodu, že absolventi těchto předmětů se z velké části stávali zaměstnanci První Brněnské strojírny v její divizi parních turbín. V 90. letech minulého století se situace na trhu práce začala měnit a proto se změnila i osnova. Nově předmět obsahoval kapitoly o turbokompresorech a spalovacích turbínách na úkor detailů z parních turbín. V novém tisíciletí se spektrum zaměření našich absolventů natolik změnilo, že bylo rozhodnuto o změně názvu předmětu Tepelné turbíny I na Tepelné turbíny a turbokompresory a předmětu Tepelné turbíny II na Parní turbíny.
Tepelné turbíny II (LPA)	
Parní turbíny (LPA)	
Tepelné turbíny a turbokompresory (LT1)	Předmět tepelné turbíny a turbokompresory byl rozdělen tématicky na dynamiku tekutin a vnitřní termodynamiku tepelných turbín a turbokompresorů, přičemž dynamika tekutin se zabývala chováním stlačitelného proudění a rozvody tekutin.
Turbíny a turbokompresory (LT1)	Další změny v osnově předmětu Tepelné turbíny a turbokompresory byly provedeny na počátku 20. let, zejména po vypuknutí energetické krize kvůli válce na Ukrajině. V této době byly jednoznačně vytvořeny podmínky pro důvodné rozšíření osnovy o teorii a užití větrných turbín na úkor turbín parních, které mají navíc vlastní předmět. Proto se tento předmět od školního roku 2023/24 bude jmenovat Turbíny a turbokompresory.  V současné době je předmět Tepelné turbíny a turbokompresory přímým pokračováním předmětu Lopatkové stroje (LLS). Úvodní část předmětu je věnována dynamice tekutin, která doplňuje teorie lopatkových strojů tak, aby bylo možno komplexně a v kontextu vysvětlit návrh a provoz větrných i tepelných turbín a turbokompresorů.

### Výukové materiály

Výukové materiály jsou dostupné on-line a v tištěné podobě jako skripta.

Veškeré přednášky budou v průběhu semestru dostupné on-line, viz níže odkaz u každé přednášky.

Teplé turbíny a turbokompresory (skripta)

Většina přednášek je uvedena i v tištěných skriptech "Tepelné turbíny a turbokompresory; Vlastnosti, návrh, provoz a vybrané statě z proudění plynů a par – ISBN 978-80-214-5847-5". Chybí v nich nově přidané přednášky o větrných turbínách (ty jsou nově vyučovány od školního roku 2022/2023), naopak skripta obsahují přednášky o parních turbínách. Skripta si lze půjčit ve fakulní knihovně, zakoupit ve fakulní skriptárně nebo objednat v e-shopu vydavatele zde: <https://www.cerm.cz/skorpik-jiri-tepelne-turbiny-a-turbokompresory-vlastnosti-navrh-provoz-a-vybrane-state-z-proudeni-plynu-a-par>.

Teorie lopatkových strojů (skripta)

V tomto předmětu budou detailněji probrány i některé statě ze skript k předmětu Lopatkové stroje – Teorie lopatkových strojů (ISBN 978-80-214-6102-4).

### Pravidla pro získání zápočtu a hodnocení zkoušky

Hodnocení zkoušky

Při hodnocení studenta vycházím z toho, kolik získal celkem bodů ze zápočtové písemky, písemné a ústní části zkoušky. Přičemž maximální počet bodů je 10. Přepočet bodů na známku je podle Tabulky 1.

**Tabulka 1:** Přepočet bodů na známku

bodů	známka	bodů	známka
9-10	A	6-6,5	D
8-8,5	B	5-5,5	E
7-7,5	C	<5	F

Zápočet

Zápočtová písemka je hodnocena maximálně 3 body. Přičemž k získání zápočtu stačí 1 bod.

Zápočtová písemka se skládá z řešení slovní úlohy. K jejímu vyřešení bude moci student použít kalkulačku – za kalkulačku nepovažují přístroje s možností vzdálené komunikace (mobil, tablet apod.). Během řešení zápočtové úlohy lze nahlížet do skript Teorie lopatkových strojů (2. vydání, 2022) a skript Teorie lopatkových strojů (2023) a další podkladů, které budou k dispozici v učebně. Každá úloha má jiné povolené podklady, které jsou vypsány u zadání úlohy.

Připraveno je celkem 8 zadání, které jsou uvedeny v kapitole Zadání zápočtových úloh, s. 2.7.

Průběh zápočtové písemky je následující: Každý student si vylosuje zadání úlohy na listě formátu A4. Řešení bude psát přímo na list se zadáním úlohy, na který napíše i své jméno.

Zápočtová písemka i s losováním trvá 2x50 min. V případě neuspokojivého hodnocení či nemoci může student absolvovat opravnou zápočtovou písemku.

Termíny zápočtové písemky budou včas vypsaný a obvykle korespondují s termíny zkoušek, přičemž prvním možným termínem je poslední (13) cvičení.

Zkouška

Zkouška se skládá z písemné a podmíněné ústní části hodnocených 5, respektive 2 body.

V písemné části zkoušky student dostane 5 otázek, přičemž za každou správnou odpověď na otázku může získat 1 bod. Doba na písemnou odpověď na zadané otázky je 50 minut. Uvedených 5 otázek je náhodným výběrem z otázek, které jsou zveřejněny v kapitole Otázky písemné části zkoušky, s. 2.16.

Po dokončení písemné části zkoušky mohou studenti, kteří v celkovém součtu za písemnou část a zápočtové písemky získali alespoň 7 bodů, absolvovat i nepovinnou ústní část zkoušky. V ústní části zkoušky budou klást doplňující otázky a zkoušet porozumění tématu. V ústní části zkoušky může student získat další 2 body.

### Osnova předmětu

Předmět Lopatkové stroje je složen ze 13 tříhodinových přednášek a ze 13 dvouhodinových cvičení.

Přednášky

Samozřejmě na první přednášce začínáme zveřejněním podmínek pro získání zápočtu a zkoušky, viz kapitoly výše. Postupovat budeme podle témat uvedených v Tabulce 2.

Tabulka 2:

př.	název	web
<b>Dynamika tekutin</b>		
1.	Termodynamické údaje látek	-
1-2.	Machovo číslo a efekty při proudění vysokými rychlostmi	fluid-dynamics
2-3.	Proudění plynů a par tryskami	fluid-dynamics
3-4.	Proudění plynů a par difuzory	fluid-dynamics
4.	Škrcení plynů a par	fluid-dynamics

př.	název	web
<b>Turbíny a turbokompresory</b>		
5.	Aerodynamika větrných turbín	turbomachinery
5-6.	Větrné elektrárny	turbomachinery
7.	Termodynamika turbokompresorů	turbomachinery
8.	Provedení turbokompresorů	turbomachinery
9., 11.	Termodynamika turbín; Ztráty změnou meridánové rychlosti – teorie kuželového stupně	turbomachinery
10.	svátek	-
12.	Provedení plynových turbín a turbodmychadel	turbomachinery
13.	svátek	-

## Cvičení

Obsahem cvičení je řešení úloh spojené s naukou probíranou na přednáškách a fyzikální a matematický aparát potřebný k jejich řešení. Seznam úloh a jejich krátký popis je uveden v Tabulce 3.

Tabulka 3:

cv.	úloha	web	popis
1.	Ú. 704 Ú.10, s. 2.13	- turbomachinery	aplikace konstrukce $h$ - $s$ diagramu pomocí teorie porovnávací izobary při termodynamických výpočtech lopatkových strojů
2.	Ú.2, s. 5.19	turbomachinery	výpočet axiálního stupně se zkroucenými lopatkami při stlačitelném proudění a uvažování ztrát
3.	Ú.896 Ú.1007	fluid-dynamics	úlohy na parametry rázových vln
4.	Ú.109	fluid-dynamics	výpočet reálné expanze páry v Lavalově trysce a návrh jejího tvaru
4.	Úloha 441	fluid-dynamics	výpočet tvaru difuzoru s konstantním gradientem tlaku
5.	Úloha 92	fluid-dynamics	úloha na škrčení vodní páry
6.	Úloha 650	fluid-dynamics	výpočet ztráty přes labyrintovou ucpávku
6-7.	Ú. 1, s. 10.8 Ú. 2, s. 10.8 Ú. 3, s. 10.10	turbomachinery	úlohy na výpočet tvaru lopatky větrné turbíny
7.	Úloha 592	turbomachinery	úloha na výpočet optimálního výkonu větrné turbíny

cv. úloha	web	popis
8.	Úloha 122 turbomachinery	výpočet přídatných ztrát vícestupňové komprese
8.	Úloha 849 turbomachinery	výpočet vnitřní účinnosti povrchově chlazeného turbokompresoru
9.	Úloha 612 turbomachinery	výpočet vnitřní účinnosti kompresoru s mezichlazením
9.	Úloha 726 turbomachinery	základní termodynamický návrh stupně turbokompresoru
10.	-	svátek
11.	Úloha 188 turbomachinery	základní výpočet přetlakového stupně parní turbíny
12.	-	zápočtové písemky
13.	-	svátek

### Zadání zápočtových úloh

Následuje 8 stran, na kterých jsou uvedena zadání ve formátu v jakém budou na zápočtové písemce.

K vyřešení některých zápočtových úloh jsou potřeba podklady jako termodynamické tabulky apod. Tyto podklady budou k dispozici studentům v učebně včetně textů přednášek.

JMÉNO A PŘÍJMENÍ, DATUM:
--------------------------

- Úloha 1:** V turbíně expanduje směs plynů  $N_2$  a  $CO_2$ . Hmotnostní podíl  $N_2$  ve směsi je 0,21. Rychlost na vstupu a výstupu turbíny je  $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Měrná individuální plynová konstanta  $N_2$  je  $296,8 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ,  $CO_2$  je  $188,92 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Teplota plynu na vstupu je  $530 \text{ }^\circ\text{C}$ , na výstupu  $290 \text{ }^\circ\text{C}$ . Tlak na vstupu je  $0,9 \text{ MPa}$ , tlak na výstupu  $0,1 \text{ MPa}$ . Spočítejte vnitřní účinnost turbíny. [ $\eta_i \approx 0,8757$ ; povolené podklady: přednášky, Data pro konstrukci porovnávací izobary různých plynů].



JMÉNO A PŘÍJMENÍ, DATUM:
--------------------------

- Úloha 2:** V turboexpandéru expanduje plyn z teploty 650 °C a tlaku 0,4 MPa, do tlaku 0,1 MPa. Teplota na konci expanze je 399,56 °C. Rychlost plynu na vstupu a výstupu turbíny je 50 m·s<sup>-1</sup>. Vnitřní práce turboexpandéru je 197 kJ·kg<sup>-1</sup>. Stanovte ventilační ztrátu, když víte, že do hmoty turbíny odchází polovina tepla z ventilačních ztrát (jiné sdílené teplo je nevýznamné) a také stanovte vnitřní účinnost, jestliže jedinou ztrátou je pouze ventilační ztráta. Uvažujte, že pracovním plynem je ideální plyn, jehož měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku je 1 kJ·kg<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>. [ $w_r \approx 106,88$  kJ·kg<sup>-1</sup>;  $\eta_{\text{pol}} \approx 0,7398$ ; povolené podklady: přednášky]

JMÉNO A PŘÍJMENÍ, DATUM:
--------------------------

- Úloha 3:** Navrhněte délku lopatek, otáčky a obvodovou práci na kvadratickém poloměru lopatek stupně axiálního turbokompresoru pro případ proudění beze ztrát. Návrh proved'te s ohledem na prostorový charakter proudění. Patní poloměr stupně je 90 mm, průtok stupněm musí být  $3 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ . Ve stupni požadujeme zvýšení tlaku z 0,1 na 0,12 MPa. Na vstupu je teplota pracovního plynu  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  při rychlosti  $40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a měrném objemu  $0,84427 \text{ m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$ . Stupeň reakce na kvadratickém poloměru lopatky navrhněte na hodnotu 0,65. Uvažujte, že pracovním plynem je ideální plyn, jehož měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku je  $1 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  a jeho Poissonova konstanta má hodnotu 1,4. Stupeň navrhněte pro konstantní obvodovou práci po výšce lopatky a konstantní měrný průtok. [ $l \approx 78,1 \text{ mm}$ ;  $N \approx 10\,418 \text{ min}^{-1}$ ;  $V_2 \approx 112 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $w_E \approx -15\,492 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; povolené podklady: skripta Teorie lopatkových strojů]

JMÉNO A PŘÍJMENÍ, DATUM:
--------------------------

- Úloha 4:** Na poloměru  $r=8$  m větrné turbíny působí na lopatku síla  $150 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$  v obvodovém a  $200 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$  v axiálním směru při rychlosti větru  $8,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a obvodové rychlosti na vyšetřovaném poloměru  $51 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Vypočítejte hodnoty axiálního a obvodového součinitele větrné turbíny na tomto poloměru. Prandtlův součinitel  $C_F$  na tomto poloměru je roven  $0,6366$ . Turbína má dvě lopatky a na vyšetřovaném poloměru je navržena tak, aby hodnota axiálního součinitele nepřekročila hodnotu  $1/3$ . [ $a=72,515\cdot 10^{-3}$ ;  $a'=9,3843\cdot 10^{-3}$ ; povolené podklady: přednášky]

JMÉNO A PŘÍJMENÍ, DATUM:
--------------------------

- Úloha 5:** V difuzoru kruhového průřezu probíhá stlačení suchého vzduchu s konstantním gradientem tlaku v osovém směru. Jaký je poloměr difuzoru na 80 % jeho délky? Parametry na vstupu do difuzoru:  $70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 126 kPa, 20 °C. Účinnost difuzoru je 88 %. Tlak v ústí difuzoru je 128 kPa. Požadovaný průtok difuzorem je  $0,0788 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ . [ $r_{x=80\%} = 27,792 \text{ mm}$ ; povolené podklady: přednášky; data pro konstrukci porovnávací izobary suchého vzduchu]

JMÉNO A PŘÍJMENÍ, DATUM:
--------------------------

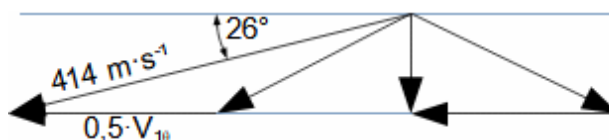
- Úloha 6:** O kolik procent klesl výkon parního kotle, jestliže došlo k zasunutí vřetena regulačního ventilu parní turbíny o 15 %. Parní kotel je nastaven na udržení konstantního tlaku a teploty. Tlak páry před ventilem 1,6 MPa při teplotě páry 295 °C. Jmenovitý průtok kotlem je 70,265 t·h<sup>-1</sup>. Neuvažujte ztráty v kotli ani v potrubí. Ventil má lineární regulační charakteristiku s počátkem v nule (tj. při uzavření dokonale těsní).  $K_{v100}$  regulačního ventilu je 800 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>. A aktuální naměřená tlaková ztráta ventilu je 150 kPa. [ $\Delta P_K \approx 10$  %; povolené podklady: přednáška Proudění plynů a par tryskou, Rovnice regulačních ventilů, podklad pro vyřešení zap. Úloh 6. a 7, Termodynamická data H<sub>2</sub>O – výběr pro vyřešení zápočtových úloh č. 6 a 7]

JMÉNO A PŘÍJMENÍ, DATUM:
--------------------------

- Úloha 7:** O kolik procent klesne vnitřní výkon jednostupňové parní turbíny, jestliže se jeho regulační ventil přivře tak, že tlaková ztráta ve ventilu vzroste na 150 kPa a průtokový součinitel armatury poklesne na  $680 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  (odečet z charakteristiky ventilu)? Průtok páry při plně otevřeném ventilu je  $70,265 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$ . Tlak páry před ventilem je 1,6 MPa při teplotě  $295 \text{ }^\circ\text{C}$  (tyto parametry jsou ve všech režimech konstantní). Tlak za turbínou je konstantní 1,1 MPa. Postačí výpočet poklesu vnitřního izoentropického výkonu turbíny. Tlakovou ztrátu ventilu při jeho plném otevření neuvažujte. [ $\Delta P_f \approx 33 \%$ ; povolené podklady: přednáška Proudění plynů a par tryskou, Rovnice regulačních ventilů, podklad pro vyřešení zap. Úloh 6. a 7., Termodynamická data  $\text{H}_2\text{O}$  – výběr pro vyřešení zápočtových úloh č. 6 a 7]

JMÉNO A PŘÍJMENÍ, DATUM:
--------------------------

- Úloha 8:** Na obrázku je navržený rychlostní trojúhelník rovnotlakového stupně jednostupňové turbíny. Vypočítejte rychlostní poměr (vztažený k disponibilnímu entalpickému spádu) a stupeň reakce takto navrženého stupně. Které ze zobrazených a vámi vypočítaných parametrů se odlišují od běžně doporučených hodnot pro tento typ stupně? Zdůvodněte navrhované změny. Disponibilní entalpický spád stupně je  $90,22 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ , ventilační ztráta disku  $2,3 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ , polovina tepla produkovaného při ventilační ztrátě je odvedena do hmoty turbíny. [tři parametry jsou zcela nevhodně navrženy; povolené podklady: skripta Teorie lopatkových strojů, přednáška Termodynamika turbín]



Obrázek není v měřítku.

---

**Otázky písemné části zkoušky**

---

- Ot. 1:** Jaký zjednodušující předpoklad zavádíme při konstrukci porovnávací izobary v  $T$ - $s$  diagramu reálného plynu (ve vztahu k tepelné kapacitě plynu)?
- Ot. 2:** Popište postup konstrukce izobar v  $T$ - $s$  nebo  $h$ - $s$  diagramu reálného plynu, jestliže znáte tvar porovnávací izobary.
- Ot. 3:** Jak se bude měnit rychlost nadzvukové proudění: (a) ve zužující se trubici; (b) v rozšiřující se trubici?
- Ot. 4:** Jaké jsou vlastnosti proudění při průchodu přímou rázovou vlnou (tlaky, rychlosti, entropie)?
- Ot. 5:** Zakreslete v  $h$ - $s$  diagramu ztrátu vzniklou při průchodu proudění rázovou vlnou.
- Ot. 6:** Definujte normálové složky rychlosti plynu při průchodu šikmou rázovou vlnou. Jaké jsou jejich vlastnosti?
- Ot. 7:** Nakreslete schéma průchodu proudění skrz expanzní vlny (děj popište).
- Ot. 8:** Nakreslete a popište  $\lambda$ -rázovou vlnu. Kde lze očekávat vznik této vlny?
- Ot. 9:** Jaký vliv má rostoucí Machovo číslo před profilem na aerodynamické parametry profilu? (Glauert-Prandtlovo pravidlo)
- Ot. 10:** Zakreslete a popište průběh hmotnostního toku plynu zužující se tryskou na tlakovém poměru v diagramu  $m$ - $\varepsilon_s$  ( $m$  je hmotnostní tok plynu tryskou,  $\varepsilon_s$  je tlakový poměr mezi vstupem a výstupem z trysky).
- Ot. 11:** Bendemanova elipsa – co to je a k čemu ji používáme?
- Ot. 12:** Jaké stavy proudění Lavalovou tryskou mohou nastat při nenávrhových stavech? Co je to podexpandovaná a přeexpandovaná tryska?
- Ot. 13:** Popište expanzi v kanále ve tvaru Lavalovy trysky v  $h$ - $s$  diagramu (proudění se ztrátami). Definujte účinnost trysky.
- Ot. 14:** Za jakých předpokladů lze odvodit rovnice pro průtok skupinou stupňů turbín, které vychází z podobnosti proudění tryskami?
- Ot. 15:** Popište vliv nadzvukovém proudění na výstupní úhel rychlosti z lopatkové mříže. (úhel zakreslete)
- Ot. 16:** Proudění difuzorem se ztrátami v  $h$ - $s$  diagramu. Vyznačte ztráty a definujte účinnost difuzoru.
-



- Ot. 17: Jaká znáte opatření ke snížení citlivosti na odtržení mezní vrstvy v difuzorech?
- Ot. 18: Co jsou to ejektory a injektory? Jak fungují? Nakreslete jejich obecné schéma.
- Ot. 19: Popište princip labyrintové ucpávky.
- Ot. 20: Popište funkci jednodsedlového ventilu, výhody/nevýhody.
- Ot. 21: Popište funkci jednodsedlového ventilu s difuzorem, výhody/nevýhody.
- Ot. 22: Popište funkci dvousedlového ventilu, výhody/nevýhody.
- Ot. 23: Popište princip využití průtokového součinitele armatury k určení průtoku ventilem.
- Ot. 24: Popište možnosti zapojení redukčního ventilu z pohledu regulované větve.
- Ot. 25: Popište princip redukčně–chladicí stanice.
- Ot. 26: Definujte axiální a obvodový součinitel větrné turbíny.
- Ot. 27: Definujte výkonový a náporový součinitel větrné turbíny
- Ot. 28: Jaké jsou hodnoty základních součinitelů ideálního rotoru větrné turbíny?
- Ot. 29: Popište princip aerodynamického návrhu lopatky větrné turbíny metodou BEM.
- Ot. 30: Nakreslete a popište bezrozměrovou charakteristiku větrné turbíny.
- Ot. 31: Popište ztráty větrné turbíny při transformaci kinetické energie větru na práci.
- Ot. 32: Nakreslete a popište výkonovou charakteristiku větrné elektrárny.
- Ot. 33: Popište aerodynamickou regulaci větrné turbíny.
- Ot. 34: Popište regulaci větrné turbíny natáčením lopatek.
- Ot. 35: Popište regulaci větrné turbíny změnou otáček.
- Ot. 36: Popište regulaci větrné turbíny bočením.
- Ot. 37: Popište základní části konstrukce lopatky větrné turbíny.
- Ot. 38: Na čem závisí výkon větrné elektrárny v dané lokalitě?
-

- Ot. 39: Nakreslete množství vyrobené elektřiny a výkon větrné elektrárny jako závislost na rychlosti větru. Vyznačte nejvýhodnější umístění optimálního výkonu větrné elektrárny.
- Ot. 40: Co je to roční využití instalovaného výkonu větrné elektrárny?
- Ot. 41: Jaké jsou výhody multirotorové větrné elektrárny?
- Ot. 42: Popište co lze dělat s větrnou elektrárnou na konci její projektované životnosti?
- Ot. 43: Popište polytropickou kompresi v  $h-s$  diagramu a  $T-s$  diagramu.
- Ot. 44: Popište v  $h-s$  diagramu celkovou energetickou bilanci stupně kompresoru (bilance musí obsahovat profilové ztráty, ventilační ztrátu, ostatní ztráty a vnitřní práci).
- Ot. 45: Popište  $h-s$  diagram vícestupňové komprese. Definujte součinitel přídavných ztrát.
- Ot. 46: Popište princip povrchového chlazení turbokompresoru (tzv. vnitřní).
- Ot. 47: Popište princip mezichlazení turbokompresoru (tzv. vnější). Zakreslete odvedené teplo v  $T-s$  diagramu.
- Ot. 48: Popište princip chlazení komprese vstříkovaním kapaliny.
- Ot. 49: Na čem, z termodynamického hlediska, závisí hranice efektivnosti chlazení komprese?
- Ot. 50: Nakreslete očekávaný průběh Eulerovy práce po výšce lopatek axiálního stupně kompresoru.
- Ot. 51: Popište kompresi vlhkého vzduchu. Co se děje s komprimovaným vlhkým vzduchem, když chladne – čemu to může vadit?
- Ot. 52: Popište princip suchoběžné plynové ucpávky.
- Ot. 53: Zakreslete schéma hlavních napojení turbokompresoru.
- Ot. 54: Popište absolutní charakteristiku turbokompresoru. Jaké jsou její nedostatky?
- Ot. 55: Popište univerzální charakteristiku turbokompresoru. Jaké jsou její výhody/nevýhody?
- Ot. 56: Popište charakteristiku turbokompresoru s redukovanými parametry. Proč ji používáme?
- Ot. 57: Způsoby pohonu turbokompresorů – výhody/nevýhody.
-

- Ot. 58: Způsoby regulace turbokompresorů. Výhody/nevýhody jednotlivých způsobů.
- Ot. 59: Jaké jsou nejčastější poruchy dmychadel? Co je způsobuje?
- Ot. 60: Popište polytropickou expanzi v  $h-s$  diagramu a  $T-s$  diagramu.
- Ot. 61: Popište v  $h-s$  diagramu celkovou energetickou bilanci stupně turbíny (bilance musí obsahovat profilové ztráty, ventilační ztrátu, ostatní ztráty a vnitřní práci).
- Ot. 62: Popište  $h-s$  diagram vícestupňové expanze. Definujte součinitel zpětného využití ztrát.
- Ot. 63: Popište princip (nakreslit) a základní vlastnosti Curtisova stupně.
- Ot. 64: Který ze stupňů (rovnotlakový, Curtisův dvouvěncový, přetlakový) dosahuje vyšší optimální hodnoty tepelného spádu na stupeň (předpokládejte stejnou obvodovou rychlost pro všechny stupně)? Seřadte je od nejvyššího zpracovaného spádu k nejmenšímu. Uveďte výhody/nevýhody jednotlivých typů stupňů.
- Ot. 65: Popište základní princip návrhu kuželového stupně.
- Ot. 66: Jaké znáte způsoby ochrany lopatek před vysokými teplotami?
- Ot. 67: Nakreslete schéma zapojení turbodmychadla v součinnosti se spalovacím motorem.
- Ot. 68: Co je to aeroderivát? Nakreslete základní schéma.
- Ot. 69: Obecné schéma bloku se spalovací turbínou a jeho účinnost, včetně popisu funkce jednotlivých částí.
- Ot. 70: Definujte střední teplotu přívodu tepla a odvodu tepla z Braytonova oběhu. Zakreslete je v  $T-s$  diagramu.
- Ot. 71: Pomocí  $T-s$  diagramu popište vliv tlaku za kompresorem na tepelnou účinnost spalovací turbíny. Výhody/nevýhody tohoto řešení.
- Ot. 72: Pomocí  $T-s$  diagramu popište vliv komprese s mezichlazením na tepelnou účinnost spalovací turbíny. Schéma zapojení kompresorové části. Výhody/nevýhody tohoto řešení.
- Ot. 73: Pomocí  $T-s$  diagramu popište vliv teploty před turbínou na tepelnou účinnost spalovací turbíny. Výhody/nevýhody tohoto řešení.
- Ot. 74: Popište princip regenerace tepla u spalovací turbíny. Definujte stupeň regenerace. (nakreslete schéma zařízení)
-

**Ot. 75:** Popište způsoby regulace spalovacích turbín a jak ovlivňují charakteristiky spalovacích turbín. Jakou charakteristiku má spalovací turbína s konstantními otáčkami? Proveďte porovnání momentové charakteristiky jednohřídelové a dvouhřídelové spalovací turbíny.

---