
INFORMACE K PŘEDMĚTU LOPATKOVÉ STROJE

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

Charakteristika předmětu	1.2
Výukové materiály	1.2
Pravidla pro získání zápočtu a hodnocení zkoušky	1.3
Osnova předmětu	1.4
Zadání zápočtových úloh	1.5
Otázky písemné části zkoušky	1.18
Odkazy	1.20
Přílohy (neveřejné)	1.21

Charakteristika předmětu

K čemu?

Předmět lopatkové stroje se zabývá základní naukou těchto strojů v celé šíři. Seznamuje studenty se základy konstrukce, návrhu i provozu. Přednášky obsahují dostatečné množství informací k základnímu návrhu lopatkového stroje nejen pro potřeby následného přesného výpočtu, ale i pro potřeby nabídky či posouzení vhodnosti lopatkového stroje pro danou aplikaci.

Na co navazuje

Na tento předmět obvykle navazuje, podle oboru studenta (Energetické inženýrství, Fluidní inženýrství, Technika prostředí), další předmět zaměřený na konkrétní typy lopatkových strojů (Tepelné turbíny a turbokompresory, Parní turbíny, Vodní turbíny I, II, Čerpadla I, II, Ventilátory).

Prerekvizity

Výklad tohoto předmětu předpokládá alespoň základní znalosti hydromechaniky, termomechaniky, energetických zdrojů a principy transformace energie.

Výukové materiály

On-line zdroje

Veškeré přednášky budou v průběhu semestru dostupné on-line na doméně turbomachinery.education, viz také níže odkaz u každé přednášky.

Skripta Teorie
lopatkových strojů

Materiály z výše uvedeného on-line zdroje byly vydány i jako skripta "Teorie lopatkových strojů". Tzn., že texty jsou totožné, s tím rozdílem, že skripta obsahují i řešení úloh, které budeme probírat na cvičení.

Skripta si lze půjčit ve fakultní knihovně, zakoupit ve fakultní skriptárně nebo objednat v e-shopu vydavatele zde: <https://www.cerm.cz/skorpik-jiri-teorie-lopatkovych-stroju>.

Další zdroje

Basic Concepts in
Turbomachinery

Odkazy na další literaturu, která by vám mohla pomoci při vašem studiu naleznete vždy na konci jednotlivých článků ve skriptech i on-line zdroji. Užitečným doplňkem při studiu může být pdf kniha [INGRAM, Grant, 2009, *Basic Concepts in Turbomachinery*, Grant Ingram & Ventus Publishing Aps, ISBN 978-87-7681-435-9] (volně ke stažení na <https://bookboon.com/en/key-concepts-in-turbo-machinery-ebook>), která je sice velmi stručná, ale obsahuje anglický slovník pojmů z oboru lopatkových strojů.

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. Přepočtení bodů na známku ukazuje Tabulka 1.

Tab. 1: Přepočtení bodů na známku

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

Zápočtová písemka

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), které budou k dispozici všem studentům (budou ležet na neobsazené lavici).

Připraveno je celkem 12 zadání, které jsou uvedeny v kapitole Zadání zápočtových úloh, s. 1.5.

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 vypsány 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.

Písemná část

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. 1.18.

Podmíněná ústní část

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 dvouhodinových přednášek a ze 13 dvouhodinových cvičení.

Přednášky

Samozřejmě na první přednášce začínáme zveřejněním podmínek pro získání zápočtu a zkoušky, viz kapitoly výše. Dále budeme postupovat podle témat, tak jak jsou řazena ve skriptech. Přibližný časových rozsah jednotlivých témat je uveden v pravém sloupci Tabulky 2.

Tab. 2: Seznam témat přednášek a jejich přibližný časový rozpis

název	č. př.
1. Úvod do lopatkových strojů	Př. 1 až 3
2. Základní rovnice lopatkových strojů	Př. 3 až 4
3. Tvary lopatek a průtočných částí lopatkových strojů	Př. 5 až 6
4. Aerodynamika profilových mříží	Př. 6 až 7
5. Vnitřní ztráty lopatkových strojů a jejich vliv na návrh lopatkového stroje	Př. 8 až 9
6. Využití podobnosti lopatkových strojů při návrhu lopatkového stroje	Př. 10 až 11
7. Turbočerpadla	Př. 12
8. Ventilátory	Př. 13

Cvičení

Obsahem cvičení je řešení úloh z oblasti lopatkových strojů. Následuje seznam úloh a jejich krátký popis.

- Cv. 1:** Připomenutí některých pojmů z matematiky a jejich aplikace ve fyzice: Parciální derivace; Vektorový počet. Co je tenzor a Rotace vektoru, vírový a nevírový pohyb. [Škorpík, 2021]
- Cv. 2:** Úloha 1, s. 1.16; Úloha 2, s.1.17: úlohy na základní energetickou bilanci lopatkových strojů. Úloha 3, s. 1.19: úloha na základní energetickou bilanci turbosoustrojí.
- Cv. 3:** Úloha 4, s. 1.24: úloha na výpočet rychlostního trojúhelníku. Úloha 5, s. 1.25: úloha na výpočet rych. trojúhelníku s vlivem prostorového charakteru proudění.
- Cv. 4:** Úloha 2, s. 2.5; Úloha 3, s. 2.6: výpočet síly na lopatku.

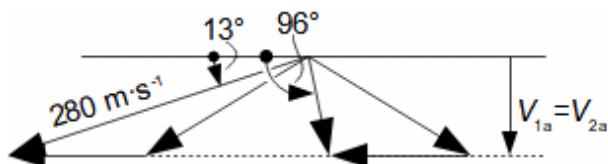
- Cv. 5: Úloha 4, s. 2.8: výpočet rozložení energie ve stupni lopatkového stroje. Úloha 5, s. 2.10; úloha 6, s. 2.10; úloha 7, s. 2.10: úlohy na výpočet rozložení energie ve stupni lopatkového stroje.
- Cv. 6: Úloha 8, s. 2.12: výpočet rozložení rychlostí a dalších vyšetřovaných veličin před a za rotorem.
- Cv. 7: Úloha 9, s. 2.13; Úloha 10, s. 2.13: návrh tvaru spirálního hrdla a rozbor spirální dráhy. Úloha 1, s. 3.4: optimální tvary lopatek.
- Cv. 8: Úloha 2, s. 3.6: optimální tvar lopatky. Úloha 3, s. 3.8: návrh lopatky radiálního ventilátoru. Úloha 4, s. 3.16: návrh spirálního hrdla ventilátoru.
- Cv. 9: Úloha 1, s. 4.7: odhad vlastností profilové mříže na základě tvaru profilů. Úloha 2, s. 4.8: výpočet ztrát profilové mříže. Úloha 3, s. 4.10: výpočet parametrů profilové mříže.
- Cv. 10: Úloha 4, s. 4.12: návrh lopatkové mříže axiálního ventilátoru. Úloha 1, s. 5.7: výpočet celkových ztrát stupně.
- Cv. 11: Úloha 1, s. 6.9: výběr vhodného lopatkového stroje podle očekávaných měrných otáček. Úloha 2, s. 6.12: návrh provozní charakteristiky ventilátoru.
- Cv. 12: Úloha 3, s. 6.12: návrh rozměrů rotoru radiálního ventilátoru. Úloha 1, s. 7.10: inženýr zachraňuje vánoce.
- Cv. 13: Zápočtové písemky.

Zadání zápočtových úloh

Následuje 12 zadání úloh ve znění v jakém budou na zápočtové písemce:

JMÉNO A PŘÍJMENÍ, DATUM:

- Úloha 1:** Vypočítejte absolutní, relativní a obvodové rychlosti rychlostního trojúhelníku, který je na obrázku, když víte, že Eulerova práce stupně na vyšetřovaném poloměru je $61,5 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$. [výsledek by měl být $W_2 \approx 235 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, obtížnost cca Př. 4]



Obrázek není v měřítku.

JMÉNO A PŘÍJMENÍ, DATUM:

- Úloha 2:** V bezlopatkovém mezikruhovém difuzoru radiálního kompresoru dochází ke zvýšení tlaku plynu. O jaký rozdíl se tlak zvýší, jestliže znáte výstupní rychlostní trojúhelník z oběžného kola a radiální složku výstupní rychlosti z difuzoru, která je $2,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$? Hustota pracovního plynu je $1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Předpokládejte proudění beze ztrát a vynechte vliv gravitačního zrychlení. [výsledek by měl být $\Delta p \approx 395 \text{ Pa}$, obtížnost cca Př. 4]



Obrázek není v měřítku.

JMÉNO A PŘÍJMENÍ, DATUM:

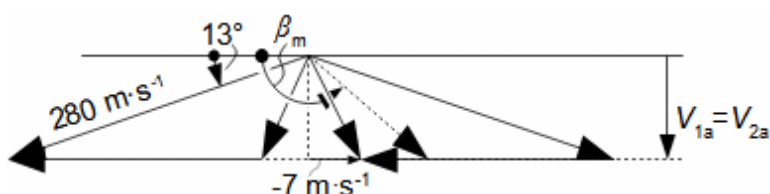
- Úloha 3:** Vypočítejte výstupní průtočnou plochu spirálního hrdla radiálního ventilátoru. Spirální hrdlo má tvar obdelníku o stejné šířce, jako je šířka oběžného kola, která je 70 mm. Vstupní průměr spirálního hrdla je 120 mm, vstupní rychlost do spirálního hrdla je $13 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a úhel, který svírá s obvodovým směrem je 26° . Objemový průtok ventilátorem je $150 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$. Současně spočítejte rozdíl tlaků mezi tlakem na obvodu oběžného kola a tlakem na výstupním vnějším poloměru spirálního hrdla při hustotě pracovního plynu $1,2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Předpokládejte potenciální proudění. [výsledek by měl být $A \approx 5617 \text{ mm}^2$, $\Delta p \approx 82,841 \text{ Pa}$, obtížnost cca Př. 4]

JMÉNO A PŘÍJMENÍ, DATUM:

- Úloha 4:** Jaký přetlak působí na oběžné kolo radiálního ventilátoru s dozadu zahnutými lopatkami? Otáčky kola jsou 1360 min^{-1} . Vnější průměr kola je 630 mm, a poměr vnitřního průměru kola ku vnějšímu průměru kola je 0,7. Relativní rychlost na vstupu do oběžného kola je $40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a na výstupu z kola $33 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Hustota pracovního plynu je $1,2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. [výsledek by měl být $\Delta p_R \approx 922 \text{ Pa}$, obtížnost cca Př. 4]

JMÉNO A PŘÍJMENÍ, DATUM:

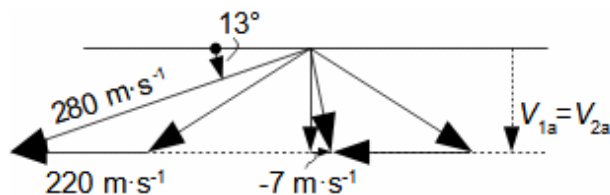
- Úloha 5:** Proveďte přibližný výpočet síly působící na lopatku rovinné lopatkové mříže jejíž rychlostní trojúhelník znáte, viz obrázek. Hmotnostní průtok mříží je $5 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ a úhel střední aerodynamické rychlosti $\beta_m = 107,76^\circ$. Náповěda: Využijte vztahu mezi střední aerodynamickou rychlostí a silou působící na lopatku a neuvažujte profilové ztráty. Vypočítejte také přetlak působící na lopatkovou mříž, jestliže rozteč lopatkové mříže je 40 mm a výška lopatek 60 mm. [výsledek by měl být $F \approx 1469 \text{ N}$, $\Delta p \approx 186 \text{ kPa}$, obtížnost cca Př. 4]



Obrázek není v měřítku.

JMÉNO A PŘÍJMENÍ, DATUM:

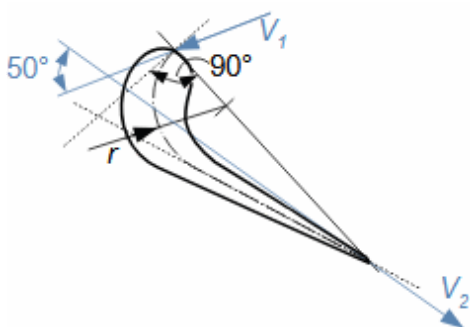
- Úloha 6:** Proved'te výpočet stupně reakce axiálního stupně, jehož rychlostní trojúhelník znáte. [výsledek by měl být $R \approx 0,4$, obtížnost cca Př. 4]



Obrázek není v měřítku.

JMÉNO A PŘÍJMENÍ, DATUM:

- Úloha 7:** Na obrázku je profil lopatky pro konfuzorovou profilovou mříž; jeho střední čára profilu je tvořena kruhovým obloukem a přímkou. Navrhněte maximální prohnutí střední čáry profilu, když víte, že úhel zakřivení proudu je 130° , délka tětivy střední čáry profilu je 48 mm. Další parametry jsou patrné z obrázku. [výsledek by měl být $y_c \approx 18,8$ mm pro $i = \delta = 0^\circ$, obtížnost cca Př. 6]



Obrázek není v měřítku.

JMÉNO A PŘÍJMENÍ, DATUM:

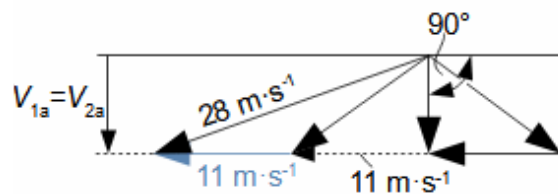
- Úloha 8:** Vypočítejte stupeň reakce stupně radiálního ventilátoru. Zvýšení tlaku v oběžném kole je 922,5 Pa. Relativní rychlost na vstupu do oběžného kola je $40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Absolutní rychlost na výstupu z oběžného kola je $29,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, která se ve statorové části stupně sníží na polovinu s měrnou ztrátou $42 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$. Obvodová rychlost na vnitřní poloměru kola je $31,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Tlak na vstupu do kola je 100 kPa. Hustota pracovního plynu je $1,2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. [výsledek by měl být $R\approx 0,9$, obtížnost cca Př. 6]

JMÉNO A PŘÍJMENÍ, DATUM:

- Úloha 9:** Vypočítejte odpor konfuzorové lopatkové mříže. Víte, že axiální síla působící na mříž je 569,15 N, obvodová síla působící na mříž je 1399,12 N. Úhel střední aerodynamické rychlosti v mříži je $107,76^\circ$. [výsledek by měl být $D \approx 115$ N, obtížnost cca Př. 7]
-

JMÉNO A PŘÍJMENÍ, DATUM:

- Úloha 10:** Jaká je přibližná profilová ztráta rotoru axiálního stupně hydraulického stroje jehož rychlostní trojúhelník znáte? Tlakový součinitel stupně je 5, hustota pracovní tekutiny je $1,2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Neuvažujte vliv ventilační ztráty a změny potenciální energie. [výsledek by měl být $L_h \approx 60,5 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$, obtížnost cca Př. 11]



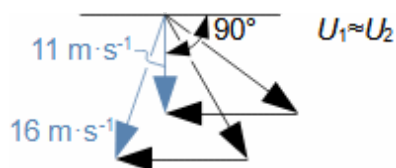
Obrázek není v měřítku.

JMÉNO A PŘÍJMENÍ, DATUM:

- Úloha 11:** Vypočítejte vnitřní práci a hydraulickou účinnost napájecího čerpadla a systémovou účinnost soustavy, ve které čerpadlo pracuje. Požadovaný tlak v kotli je 6 MPa, tlak v napájecí nádrži 300 kPa, tlakové ztráty potrubního systému na sání jsou 60 kPa na výtlaku jsou 360 kPa. Ztráty v čerpadle jsou $700 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$. Za hustotu dosazujte $1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^3$. Změnu potenciální energie neuvažujte. [výsledky by měly být $\eta_i \approx 0,9$; $\eta_s \approx 0,85$, obtížnost cca Př. 12]

JMÉNO A PŘÍJMENÍ, DATUM:

- Úloha 12:** Vypočítejte vnitřní ztráty oběžného kola rovnotlakového axiálního ventilátoru, když znáte jeho rychlostní trojúhelník (viz obrázek) a příkon, který je 60 W. Průtok ventilátorem je $1500 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Hustota pracovního plynu je $1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Jaké je zvýšení celkového tlaku? Neuvažujte ztráty v mechanismech stroje. [výsledek by měl být $L_w \approx 52,5 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\Delta p_s \approx 81 \text{ Pa}$, obtížnost cca Př. 13]



Obrázek není v měřítku.

Otázky písemné části zkoušky

- Ot. 1: Definujte celkovou energii kapaliny.
- Ot. 2: Definujte účinnost turbín.
- Ot. 3: Definujte účinnost pracovních strojů.
- Ot. 4: Definujte střední poloměr lopatek a kvadratický poloměr lopatek.
- Ot. 5: Rovnice pro výpočet síly působící na lopatky od proudu tekutiny.
- Ot. 6: Jaký směr má výslednice vnějších tlakových sil působící na kontrolní objem lopatek čistě axiálního stupně přetlakové turbíny (např. Kaplanovy)? Tuto výslednici zakreslete do obrázku profilové mříže.
- Ot. 7: Definujte střední aerodynamickou rychlost v lopatkovém mříži.
- Ot. 8: Jaký úhel svírá síla působící na lopatku od proudu tekutiny v lopatkové mříži se střední aerodynamickou rychlostí při proudění beze ztrát?
- Ot. 9: Jaký je rozdíl mezi Eulerovou a vnitřní prací stupně?
- Ot. 10: Napište rovnici pro Eulerovu práci tekutiny ve stupni lopatkového stroje.
- Ot. 11: Jak se od sebe liší stupeň přetlakový (reakční) a stupeň rovnotlakový (akční)?
- Ot. 12: Jakou hlavní výhodu byste shledali u přetlakového axiálního stupně turbíny oproti stupni rovnotlakovému?
- Ot. 13: Zakreslete v $h-s$ diagramu vnitřní práci a ztráty tepelné turbíny, znáte-li vstupní a výstupní parametry plynu (entalpie, tlak, rychlost).
- Ot. 14: Zakreslete v $h-s$ diagramu vnitřní práci a ztráty turbokompresoru, znáte-li vstupní a výstupní parametry plynu (entalpie, tlak, rychlost).
- Ot. 15: Popište základní podmínky osově symetrického potenciálního proudění (slovně nebo rovnicemi).
- Ot. 16: Co je to gradient tlaku? Zakreslete gradient tlaku na nějakém příkladu.
- Ot. 17: Popište hlavní kótované úhly a rozměry profilu lopatky (střední čára profilu, prohnutí..).
-

- Ot. 18: Popište (zakreslete) základní aerodynamické charakteristiky profilové mříže (nátokový úhel, úhel deviační, zakřivení proudu).
- Ot. 19: Definujte hustotu profilové mříže.
- Ot. 20: Jaké jsou obecné zásady při návrhu rychlostních trojúhelníků axiálních stupňů? Uveďte zvlášť pro stupně turbín a pro stupně pracovních strojů.
- Ot. 21: K čemu slouží vstupní a výstupní hrdla lopatkových strojů, respektive jaké požadujeme jejich vlastnosti?
- Ot. 22: Jaké typy profilových ztrát znáte?
- Ot. 23: Citlivější na odtržení mezní vrstvy při obtékání lopatek je proudění turbulentní, nebo laminární?
- Ot. 24: Profilová ztráta v konfuzorové a difuzorové mříži. Zakreslete v h - s diagramu proudění uvedenými mřížemi.
- Ot. 25: Jak se změní síla působící na prizmatické lopatky v lopatkové mříži pro případ proudění se ztrátami oproti izoentropickému proudění (nakreslit pro případ turbínové nebo difuzorové mříže).
- Ot. 26: Definujte poměrnou ztrátu.
- Ot. 27: Jaká opatření se používají ke snížení ztrát sekundárním prouděním ve stupni?
- Ot. 28: Jaká opatření se používají ke snížení okrajové ztráty stupně?
- Ot. 29: Jakými opatřeními se lze vyhnout nebo zcela vyloučit ztrátu nesprávným nátokovým úhlem?
- Ot. 30: Jaká opatření se používají ke snížení vnitřní netěsnosti stupně?
- Ot. 31: Jakým způsobem se projevuje ztráta nerovnoměrností rychlostního pole před mříží?
- Ot. 32: Kdy mohou nastat podmínky pro vznik ztráty zpětným prouděním a jaká existují opatření k jejímu snížení?
- Ot. 33: Protiběžný vír v lopatkovém kanále stupně radiálního pracovního stroje - co způsobuje? Definujte součinitel skluzu.
- Ot. 34: Protiběžný vír v lopatkovém kanále stupně radiální turbíny - co způsobuje? Definujte součinitel skluzu.
- Ot. 35: K čemu slouží podobnostní součinitelé stupňů lopatkových strojů? Uveďte význam (definici) alespoň jednoho.
-

- Ot. 36: Podle jakého podobnostního součinitele byste stanovili nejvhodnější typ lop. stroje (například vodní turbíny, čerpadla, ventilátoru, turbokompresoru), jestliže byste znali pracovní parametry dané požadavkem zadání (průtok, otáčky a spády...)?
- Ot. 37: Nakreslete bezrozměrovou ideální charakteristiku ψ - ϕ turbíny, nebo pracovního stroje (pro N =konst.).
- Ot. 38: Uveďte příklad skutečné bezrozměrové charakteristiky ψ - ϕ turbíny nebo pracovního stroje (pro N =konst., zakreslete ztráty).
- Ot. 39: Co je to systémová účinnost?
- Ot. 40: Definujte hydraulickou účinnost čerpadla.
- Ot. 41: Zakreslete pracovní bod hydrodynamického pracovního stroje, znáte-li charakteristiku potrubního systému, ve kterém pracuje.
- Ot. 42: Jaký vliv má změna viskozity pracovní tekutiny na skutečnou charakteristiku pracovního stroje a proč?
- Ot. 43: Jaký typ hydrodynamického čerpadla se spouští s uzavřeným výtlačkem?
- Ot. 44: Jak sestrojíte charakteristiku dvou stejných čerpadel pracujících paralelně?
- Ot. 45: Co označuje veličina NPSH u čerpadel?
- Ot. 46: Obvyklé měrné otáčky radiálních ventilátorů jsou nižší, nebo vyšší než axiálních ventilátorů?
- Ot. 47: Uveďte rovnice pro vnitřní práci ventilátoru a jeho vnitřní účinnost.
- Ot. 48: Jaký vliv má změna hustoty pracovní tekutiny na charakteristiku ventilátoru?
- Ot. 49: Ax. ventilátor bez předřazených lopatek – přetlakové lopatkování: nakreslete rychlostní trojúhelník pro případ jmenovitých parametrů průtoku a pro snížený průtok. Jaký vliv má snížení průtoku na nátokový úhel?
- Ot. 50: Jaké jsou způsoby regulace průtoku ventilátorem?

Odkazy

ŠKORPÍK, Jiří, 2021, Technická matematika, *Transformační technologie, Transformační technologie*, Brno, [online], ISSN 1804-8293. Dostupné z <https://www.transformacni-technologie.cz/42.html>.
