

UČEBNÍ TEXTY VYSOKÝCH ŠKOL

---

Vysoké učení technické v Brně

Fakulta strojního inženýrství

Ing. Jiří Škorpík, Ph.D.

# TEORIE LOPATKOVÝCH STROJŮ



---

AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM<sup>®</sup>, s.r.o. Brno

Recenzent: Doc. Dr. Ing. Jan Fiedler

© Ing. Jiří Škorpík, Ph.D., 2019

ISBN 978-80-214-5783-6

# Komentář recenzenta

Vysokoškolská učebnice „Teorie lopatkových strojů“ vydávaná formou skript po jednotlivých přednáškách přináší na více než 300 stranách komplexní pohled na lopatkové stroje, které byly v posledních sto dvaceti letech nezpochybnitelným motorem vývoje industriální společnosti a to jak v energetice, tak i v dopravě a průmyslu obecně. V jednotlivých kapitolách skript je logicky uspořádáno shrnutí základních energetických bilancí platných obecně pro tepelné i hydraulické lopatkové stroje, základy výpočtů vnitřní aerodynamiky a geometrie lopatkových strojů včetně konstrukčního provedení všech základních typů takových strojů. Za důležitou považuji kapitolu o podobnosti lopatkových strojů, kde jsou zobecněny společné znaky celé skupiny a čtenář tak snadno pochopí příbuznost těchto energetických strojů.

Nejsou vynechány ani větrné turbíny, patřící v současnosti také k důležitým motorům pro obnovitelné energetické zdroje.

Každá kapitola je doplněna přílohami s příklady. To dělá z teoretické publikace i prakticky použitelnou příručku nejen pro vysokoškolské studenty, ale i pro širší okruh techniků se zájmem o detailnější seznámení s lopatovými stroji. Vydání takové publikace bylo odborníky z praxe dlouhodobě požadováno.

V Brně 16.9.2019

recenzi provedl

Doc. Dr. Ing. Jan Fiedler

# Teorie lopatkových strojů

Skripta jsou vytvořena z dvanácti článků číslovaných 11 až 22:

---

## Jak se skripty pracovat

*článek 11.*

### Lopatkový stroj

Základní rozdělení a princip činnosti • Společné konstrukční znaky lopatkových strojů • Vnitřní výkon/příkon lopatkového stroje • Stupeň lopatkového stroje • Rychlostní trojúhelník • Ztráty v lopatkových strojích • Přílohy\*

*článek 12.*

### Základní rovnice lopatkových strojů

Síla působící na lopatky od proudu tekutiny • Kroutící moment, výkon • Obvodová práce • Spirální kanály v lopatkových strojích • Rozložení tlaku a energie v lopatkovém stroji • Přílohy\*

*článek 13.*

### Energetické bilance lopatkových strojů

Energetická bilance vodní turbíny • Energetická bilance čerpadla • Energetická bilance tepelné turbíny • Energetická bilance turbokompresoru • Energetická bilance ventilátoru • Energetická bilance větrné turbíny • Vrtule • Přílohy\*

*článek 14.*

### Vztah mezi obvodovou a vnitřní prací stupně lopatkového stroje

Ventilační ztráta • Celková energetická bilance stupně • Účinnost skupiny stupňů • Přílohy\*

*článek 15.*

### Geometrie a materiály lopatkových strojů

Základní pojmy lopatkových mříží • Tvar profilu lopatky • Geometrické a aerodynamické veličiny lopatkových mříží • Tvary vstupních a výstupních hrdel lopatkových strojů • Tvary spirálních skříní • Materiály lopatkových strojů • Přílohy\*

*článek 16.*

### Základy aerodynamiky profilů lopatek a lopatkových mříží

Průběh tlaku a rychlosti podél profilu lopatky • Aerodynamika osamocenému profilu • Aerodynamika lopatkové mříže • Vliv rotace na aerodynamiku lopatkové mříže • Osamocení profilu ve stlačitelném prostředí • Aerodynamika lopatkových mříží ve stlačitelném prostředí • Shrnutí vlivu stlačitelnosti prostředí • Přílohy\*

*článek 17.*

### Ztráty v lopatkových strojích

Profilové ztráty • Ostatní ztráty vznikající ve stupni lopatkového stroje • Celkové ztráty stupně mříží • Ventilační ztráta rotoru • Ztráty vznikající mimo lopatkovou část stroje • Výkon/příkon turbosoustrojí • Přílohy\*

*článek 18.*

### Podobnosti lopatkových strojů

Teorie podobnosti, teorie modelů • Geometrická podobnost stupňů lopatkových strojů • Kinematická podobnost stupňů lopatkových strojů • Specifické (měrné) otáčky • Odhad účinnosti z podobnostních součinitelů • Podobnosti lopatkových strojů • Přílohy\*

*článek 19.*

### Návrh axiálních stupňů lopatkových strojů

Cíle a zjednodušující předpoklady návrhu • Optimální rychlostní trojúhelníky axiálních stupňů • Stupně s přímými lopatkami • Kuželové stupně s přímými lopatkami • Stupně se zkroucenými lopatkami • Tabulky a nomogramy • Přílohy\*

*článek 20.*

### Návrh radiálních a diagonálních stupňů lopatkových strojů

Radiální stupně • Diagonální stupně • Přílohy\*

*článek 21.*

### Vodní turbíny a hydrodynamická čerpadla

Peltonova turbína • Francisova turbína • Kaplanova turbína • Radiální čerpadla • Axiální čerpadla • Charakteristiky hydrodynamických čerpadel • Regulace hydrodynamických čerpadel • Výběr vhodného čerpadla • Kavitace • Tabulky a nomogramy • Přílohy\*

*článek 22.*

### Větrné turbíny a ventilátory

Aerodynamický návrh větrné turbíny • Lopatky větrných turbín • Turbíny pro přílivové elektrárny • Axiální ventilátory • Radiální ventilátory • Charakteristiky ventilátorů • Regulace ventilátorů • Výběr vhodného ventilátoru • Přílohy\*

\*Přílohy obsahují řešení úloh a odvození důležitých vztahů.

# Jak se skripty pracovat

Teorii lopatkových strojů jsem psal pro potřeby pochopení principu a základního návrhu lopatkových strojů, proto tato skripta obsahuje i řešené úlohy.

Skripta *Teorie lopatkových strojů* je sice vytvořeno z 12 článků zveřejněných na webu Transformační technologie, přesto se nejedná o pouhý sborník článků, protože jednotlivé články na sebe navazují jako kapitoly v knize. Navíc tato publikace, na rozdíl od webové verze, obsahuje i přílohy včetně řešení úloh. Princip číslování článků je stejný jako na webu, proto je první článek skript označen číslem 11 a poslední číslem 22.

Kromě číslování článků je převzato i další značení. U některých objektů (obrázek, rovnice, tabulka atd.) je za číslem označujícím polohu objektu v rámci článku uvedeno identifikační číslo (číslo za tečkou), které slouží k identifikaci objektu v rámci celého webu. Je-li například pod obrázkem číslo 2.271, znamená to, že ve složce <http://www.transformacni-technologie.cz/objekty> bude tento obrázek pod označením 271.gif. Identifikační číslo využívám i jako kotvu na stránce. Pokud chcete odkazovat na nějaké místo v Transformačních technologiích, například právě na *Obrázek 2* v článku 11. Lopatkový stroj, který má identifikační číslo 271, stačí napsat adresu skládající se z adresy článku a kotvy #271 tedy: <http://www.transformacni-technologie.cz/11.html#271>. Píšu o tom proto, aby tento způsob odkazu na konkrétní místo na stránkách mohl využít kdokoliv. Podle identifikačního čísla lze nalézt i řešení úlohy v přílohách.

Pokud odkazuji na jiný článek nebo kapitolu v jiném článku, tak tento odkaz začíná číslem článku s tečkou. Například: ...jak je popsáno v kapitole 14. Ventilační ztráta... Tento odkaz směřuje na kapitolu s názvem „Ventilační ztráta“ v článku 14. Vztah mezi obvodovou a vnitřní prací stupně lopatkového stroje. Na celý článek odkazuji i zkráceně, především v Rejstříku, ve formátu 14. nebo [14.], což je odkaz opět na článek 14. Vztah mezi obvodovou a vnitřní prací stupně lopatkového stroje. Oproti formátu odkazů na články jiných autorů v seznamu odkazů (literatury) se odlišuje zmíněný formát tečkou za číslem. Například v přílohách standardně používám odkaz na objekt v Transformačních technologiích formátem [12.], [12.284] apod., a na odkazy jiných autorů nebo díla uvedená v seznamu odkazů na konci přílohy [3], [3, s. 143] (tj. čísla bez tečky) apod.

Od počátku psání jsem se snažil neduplikovat informace, proto jsou jednotlivé články mezi sebou propojeny odkazy, což jsou buď tučná nebo podtržená slova v textu. Těmito způsoby jsou označeny důležité pojmy, které jsou uvedeny v Rejstříku (jedná se o rejstřík celého webu, který naleznete na adrese <http://www.transformacni-technologie.cz/rejstrik.html>). Pokud je slovo zvýrazněno tučně, znamená to, že okolní text obsahuje důležité informace k tomuto heslu. Právě na toto místo směřují odkazy s tímto heslem. Pokud je slovo podtržené, znamená to, že někde v jiném článku jsou důležité informace k tomuto heslu, číslo článku naleznete v rejstříku.

Rejstřík často neobsahuje doslovně celý tučný nebo podtržený výraz jako v textech, ale pouze podstatná a přídavná jména. Například heslo „žárotrubný kotel“

je v rejstříku pod heslem • kotel, ale pojem „parní turbína“ je v rejstříku pod heslem • parní turbína, protože se jedná o frekventovaný výraz. Při hledání v rejstříku je tedy nutné vyzkoušet několik kombinací.

Na tomto místě bych rád upozornil na popis symbolů a zkratek, ten totiž uvádím vždy jen při jejich prvním výskytu v textu v rámci článku, dále už předpokládám, že je čtenář zná nebo si je snadno dohledá listováním zpět.

Mým cílem bylo vytvořit publikaci přehlednou a srozumitelnou, což obnášelo zařadit odvozování vzorců do příloh, aby nenarušovaly plynulost textu a klást větší důraz na souvislosti.

Ing. Jiří Škorpík, Ph.D.



# 11. LOPATKOVÝ STROJ

Jiří Škorpík, skorpik.jiri@email.cz

<i>strana 1</i>	<i>strana 14</i>
<b>Úvod</b>	<b>Stupeň lopatkového stroje</b>
<i>strana 1</i>	<i>strana 15</i>
<b>Základní rozdělení a princip činnosti</b> Základní typy a aplikace lopatkových strojů • Rozdíl mezi objemovým a lopatkovým strojem • Rozdělení lopatkových strojů podle směru proudění	<b>Rychlostní trojúhelník</b>
<i>strana 11</i>	<i>strana 17</i>
<b>Společné konstrukční znaky lopatkových strojů</b> Lopatka, lopatkový kanál a profilová mříž	<b>Ztráty v lopatkových strojích</b>
<i>strana 12</i>	<i>strana 18</i>
<b>Vnitřní výkon/příkon lopatkového stroje</b>	<b>Odkazy</b>
	<i>strana 20</i>
	<b>Přílohy</b>



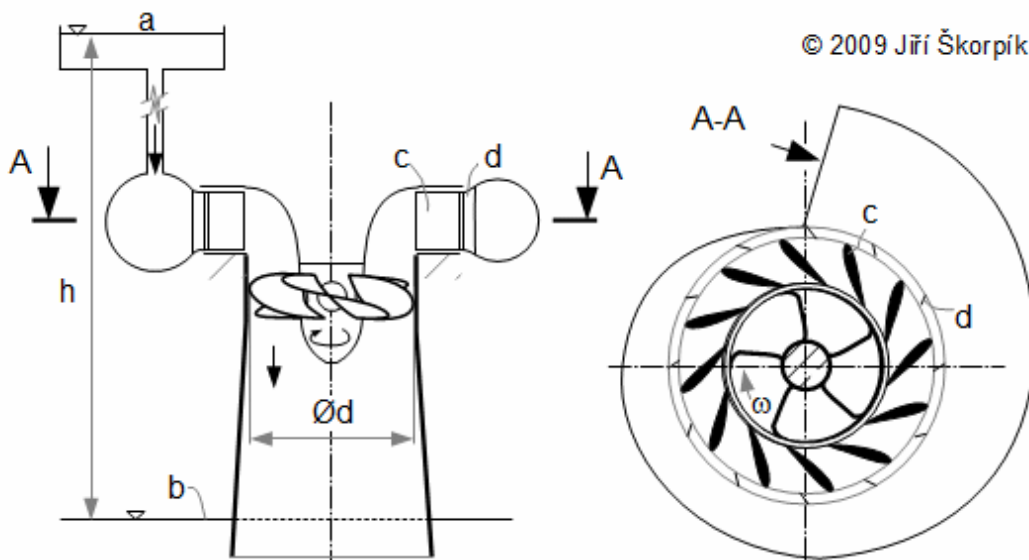
## Úvod

Lopátkové stroje rovněž **turbostroje** jsou širokou skupinou strojů (například parní turbíny, plynové/spalovací turbíny, turbokompresory, odstředivá/radiální čerpadla, vodní turbíny a mnoho dalších strojů). Jejich charakteristickým rysem je **rotor** po obvodu opatřený lopatkami někdy nazýván oběžným kolem. Lopatky vytváří kanály tzv. **lopatkový kanál**, ve kterých proudí pracovní tekutina. K transformaci energie dochází vlivem vzájemného silového působení mezi pracovní tekutinou a lopatkami.

### Základní rozdělení a princip činnosti

Otáčení rotoru lopátkového stroje je způsobeno silou působící na lopatky. Jestliže pracovní tekutina energii předává rotoru, potom se stroj nazývá turbínou (akční síla je od proudu pracovní tekutiny reakční od lopatek). U hydrodynamických čerpadel, turbokompresorů, ventilátorů – zkráceně **pracovní stroje** – probíhá opačný proces a pracovní tekutina energii získává (akční síla je od lopatek reakční od proudu tekutiny).

Pro lopátkové stroje je typický rozdíl tlaku před a za strojem (tlakový spád) nebo rozdíl rychlosti pracovní tekutiny popřípadě kombinace obou jak je typické například pro vodní Kaplanovu turbínu. Tato vodní turbína není tvořena pouze rotorem, ale ještě před ním jsou tzv. rozvaděcí řady lopatek seřazeny po obvodu oběžného kola, takové řadě lopatek říkáme lpatkový **stator**<sup>(1)</sup>. Ve statorové řadě lopatek se transformuje část tlakové energie vody vodního sloupce nad turbínou na kinetickou energii. Tento proud vody o vysoké rychlosti je usměrňován směrem k oběžnému kolu a vstupuje do rotujících lpatkových kanálů.

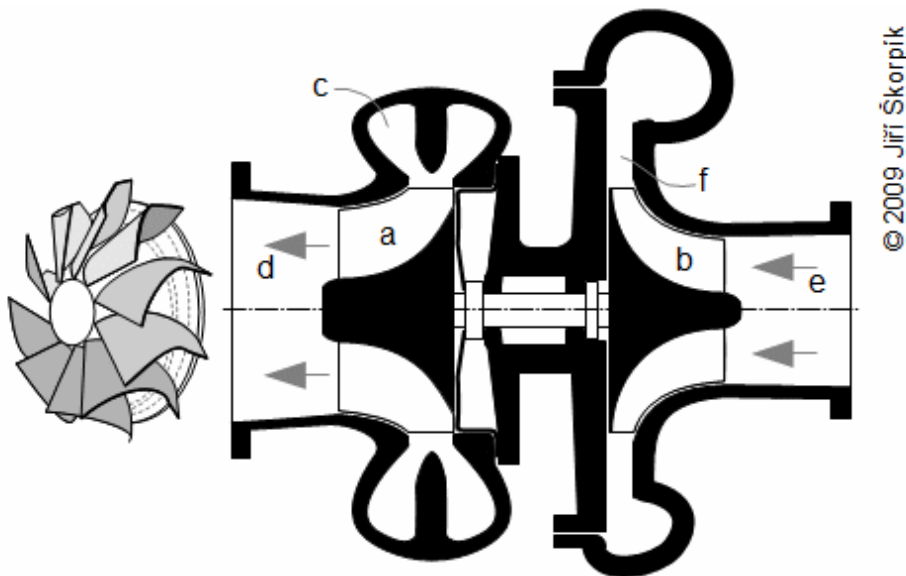


1.270 Kaplanova turbína jako příklad přeměny potenciální energie vody na práci.  
**a** hladina vstupní nádrže; **b** hladina výstupní nádrže; **c** lopatky rozvaděcího kola (stator); **d** výztužná mříž spirální skříně. **h** [m] výškový rozdíl mezi hladinou vstupní a výstupní nádrže; **Ød** [m] průměr oběžného kola turbíny (vnější průměr rotoru); **ω** [rad·s<sup>-1</sup>] úhlová rychlost otáčení kola turbíny.

<sup>(1)</sup>*Statorová řada lopatek či rozvaděcí řada lopatek*

Obsahuje ji většina typů lopatkových strojů. Jejím úkolem je usměrňovat proud pracovní tekutiny pod požadovaným úhlem a rychlostí směrem na oběžné kolo.

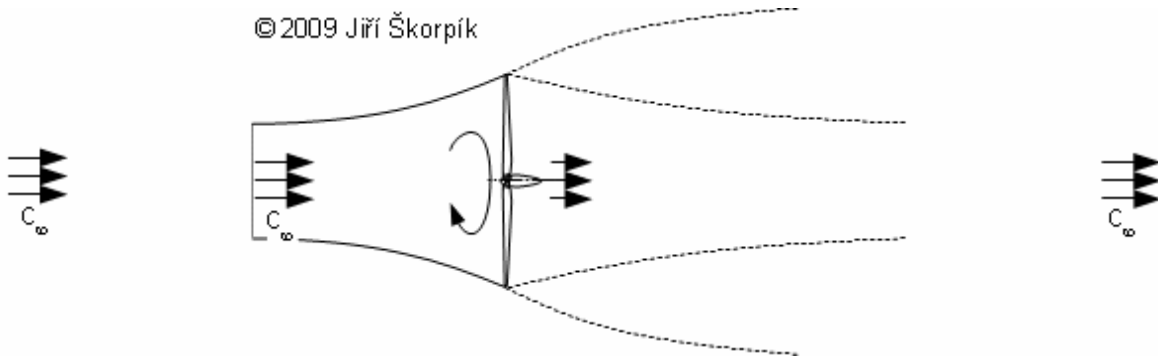
Dalším příkladem je mnohem menší a jednodušší zařízení, turbodmychadlo spalovacího motoru osobního automobilu. To je tvořeno hned dvěma oběžnými koly na společné hřídeli. Jedno je turbínové a pohání oběžné kolo kompresorové. Účelem **turbodmychadla** je zvýšit tlak nasávaného vzduchu do motoru pomocí proudu výfukových spalin.



2.271 Průřez turbodmychadlem jako příklad transformace tepelné energie na práci.

**a** oběžné kolo turbíny; **b** oběžné kolo kompresoru; **c** zdvojená spirální skříň turbíny; **d** bezlopatkový rozvaděč; **e** výstup spalin; **f** vstup vzduchu; **g** bezlopatkový difuzor; **h** spirální skříň dmýchadla. Bezlopatkový rozvaděč je spirální kanál, který plní stejnou funkci jako lopatkový stator u Kaplanovy turbíny (proud spalin je k oběžnému kolu turbíny usměrňován po spirální dráze). V kompresorovém oběžném kole je nasávaný vzduch komprimován a současně i urychlován (zvýšuje se jeho tlaková i kinetická energie). Na výstupu z kompresorového kola je spirální kanál g, jehož úkolem je tentokrát vzduch rovnoměrně od kola odvést a zpomalit před vstupem do spirální skříně, což je transformace energie kinetické na tlakovou.

Stroje s největším průměrem rotoru jsou větrné turbíny. V tomto případě se transformuje kinetické energie větru na práci. Větrné turbíny obvykle nemají skříň, proto je proudění za turbínou ovlivňováno okolním proudem o kinetické energii.



3.193 Axiální větrná turbína.

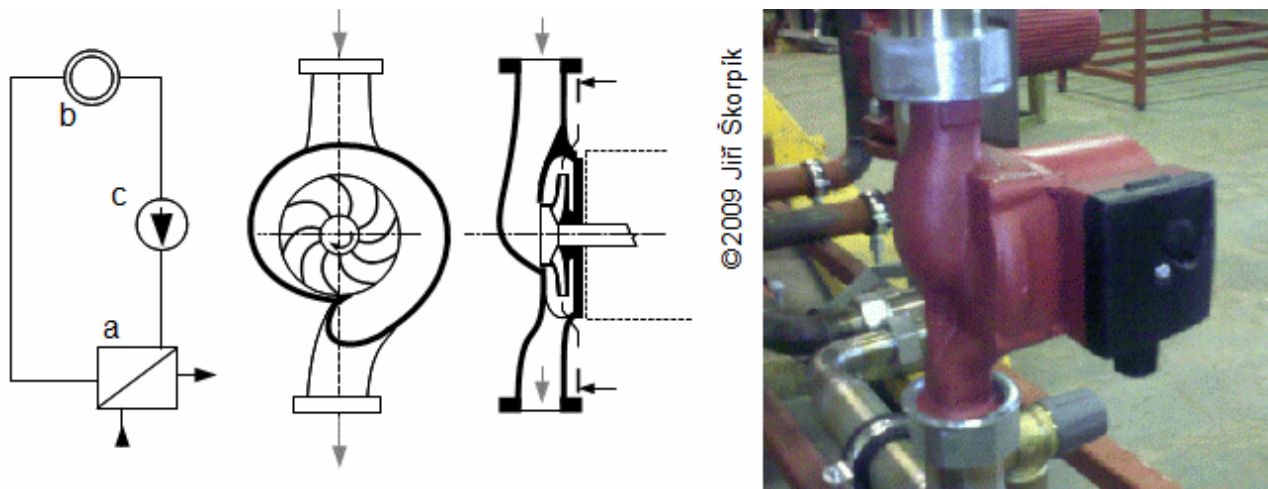
$c_{\infty}$  [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ] rychlost větru před ovlivněnou oblastí turbíny.

Vyběr způsobu návrhu lopatkové stroje nejvíce ovlivňují vlastnosti pracovní tekutiny přesněji její stlačitelnost. Z tohoto hlediska je výhodné rozlišovat hydraulické a tepelné stroje. U **hydraulických strojů** je zanedbatelná změna hustoty pracovní tekutiny. U **tepelných strojů** se hustota pracovní tekutiny mění. To znamená, že například vodní a větrné turbíny jsou považovány za hydraulické stroje a turbodmychadla za tepelné stroje.

## Základní typy a aplikace lopatkových strojů

Typů a způsob využití lopatkových strojů je velké množství. Sestavy strojů s lopatkovými stroji se nazývají **turbosoustrojí**. Základní aplikace lopatkových strojů jsou následující:

**Hydrodynamická čerpadla** jsou stroje sloužící k dopravě a zvyšování tlaku kapaliny. Z pohledu pracovních podmínek lze rozdělit hydrodynamická čerpadla na cirkulační (oběhová), kondenzátní a napájecí. **Cirkulační čerpadla** se používají především k zajištění cirkulace (oběhu) kapaliny v okruhu, překonává tlakové ztráty v okruhu. Energie předaná kapalině v cirkulačním čerpadle je přibližně  $100 J \cdot kg^{-1}$ . Výkony mohou být až v jednotkách *MW* (hlavní cirkulační čerpadlo jaderné elektrárny). Na *Obrázku 4* je příklad malého cirkulačního čerpadla s odstředivým oběžným kolem v monoblokovém provedení. Kapalina v oběžném kole, působením odstředivých sil, proudí od středu kola k jeho obvodu. Z oběžného kola vystupuje kapalina do spirální skříně odkud je odvedena na výtlačný konec čerpadla.



4.292 Cirkulační čerpadlo a příklad jeho použití.  
a tepelný výměník; b spotřebič tepla; c cirkulační čerpadlo.

**Kondenzátní čerpadla** jsou určena k čerpání kapaliny blízko mezi sytosti (např. kondenzátu). Energie předaná kapalině v kondenzátním čerpadle je vyšší než u oběhových čerpadel, protože kondenzát je čerpán do vyšších tlaků ( $500 J \cdot kg^{-1}$  v případě vody).