

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Učební text pro výuku odborného předmětu

Textbook for Technical Subject Teaching

## **STUDIJNÍ PROGRAM**

Specializace v pedagogice

## **STUDIJNÍ OBOR**

Učitelství odborných předmětů

## **VEDOUCÍ PRÁCE**

doc. Ing. David Vaněček, Ph.D.

SÉBASTIEN

LÁN

**2021**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Lán Jméno: Sébastien Osobní číslo: 409515  
Fakulta/ústav: Masarykův ústav vyšších studií (MÚVS)  
Zadávací katedra/ústav: Oddělení pedagogických a psychologických studií  
Studijní program: Specializace v pedagogice (B 7507)  
Studijní obor: Učitelství odborných předmětů (7504R100)

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Učební text pro výuku odborného předmětu

Název bakalářské práce anglicky:

Textbook for Technical Subject Teaching

Pokyny pro vypracování:

Cílem bakalářské práce je vytvořit učební text "letecká propedeutika". Text bude sloužit jako úvod do studia letecké dopravy a bude obsahovat základní informace z jednotlivých oblastí letectví, jako je atmosféra, aerostatika, aerodynamika, konstrukce letadel, pohonné jednotky, letiště. Teoretická část práce bude zaměřena na požadavky a východiska pro tvorbu učebního textu. Praktickou část bude tvořit vlastní učební text, který bude doplněn vzorovými početními příklady k dané problematice.

Seznam doporučené literatury:

- 1) LEPIL, Oldřich. Teorie a praxe tvorby výukových materiálů: zvyšování kvality vzdělávání učitelů přírodovědných předmětů. Olomouc, 2010. ISBN 978-80-244-2489-7.
- 2) VANĚČEK, David. Didaktika technických odborných předmětů. Praha, 2016. ISBN 978-80-01-05991-3.
- 3) SVOBODA, Emanuel. Přehled středoškolské fyziky. 4., upr. vyd. Praha, 2005. ISBN 978-80-7196-307-3.

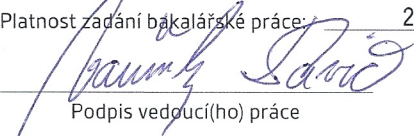
Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:


doc. Ing. David Vaněček, Ph.D.; České vysoké učení technické v Praze, Masarykův ústav vyšších studií

Jméno a pracoviště konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: 12. 12. 2019 Termín odevzdání bakalářské práce: 30. 4. 2020

Platnost zadání bakalářské práce: 23. 9. 2021

  
Podpis vedoucí(ho) práce

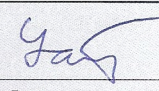
  
Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

  
Podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

31. 3. 2020

Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta(ky)

LÁN, Sébastien. *Učební text pro výuku odborného předmětu*. Praha: ČVUT 2021. Baka-  
lářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Masarykův ústav vyšších studií.



**MASARYKŮV ÚSTAV  
VYŠŠÍCH STUDIÍ  
ČVUT V PRAZE**

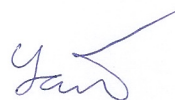
## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně. Dále prohlašuji, že jsem všechny použité zdroje správně a úplně citoval a uvádím je v příloženém seznamu použité literatury.

Nemám závažný důvod proti zpřístupňování této závěrečné práce v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) v platném znění.

V Praze dne: 1. 1. 2021

Podpis:



## **Poděkování**

Na tomto místě bych velmi rád poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Davidu Vaněčkovi, Ph.D. za jeho vedení při zpracování této práce a za jeho vstřícnost. Cením si též jeho osobního přístupu během celého studia.

# **Abstrakt**

Předmětem bakalářské práce je tvorba učebního textu pro odborný předmět. Teoretická část práce je zaměřena na obecné požadavky a východiska tvorby učebního textu. V rámci praktické části práce byl v souladu s teoretickými poznatky vytvořen vlastní učební text s názvem „Letecká propedeutika“. Vytvořený učební text slouží jako úvod do studia letecké dopravy a obsahuje témata atmosféra, aerodynamika, konstrukce letadel, pohonné jednotky a letiště.

## **Klíčová slova**

učební text, odborný předmět, letecká doprava, atmosféra, aerodynamika, konstrukce letadel, pohonné jednotky, letiště

# **Abstract**

The subject of the bachelor thesis is creation of technical subject textbook. The theoretical part of the theses is focused on general requirements and starting points for textbook creation. In the practical part of the thesis a textbook called "Aviation Propaedeutics" was created in accordance with the theory. The created textbook serves as an introduction to the air transport study and contains topics atmosphere, aerodynamics, aircraft construction, power units and aerodromes.

## **Key words**

textbook, technical subject, air transport, atmosphere, aerodynamics, aircraft construction, power units, aerodromes

# Obsah

<b>Úvod</b> .....	<b>7</b>
<b>1 UČEBNÍ TEXT A VÝCHODISKA JEHO TVORBY</b> .....	<b>9</b>
1.1 Obsah učiva.....	9
1.1.1 Složky učiva.....	10
1.1.2 Struktura učiva.....	10
1.1.3 Rámcový vzdělávací program.....	11
1.1.4 Školní vzdělávací program.....	12
1.1.5 Ostatní pedagogické dokumenty.....	12
1.2 Metody a organizační formy výuky.....	13
1.2.1 Metody výuky a jejich kategorizace.....	13
1.2.2 Organizační formy výuky.....	15
1.3 Materiální didaktické prostředky.....	16
<b>2 POŽADAVKY NA UČEBNÍ TEXT</b> .....	<b>18</b>
2.1 Funkce učebního textu.....	18
2.2 Strukturní prvky učebního textu.....	18
2.3 Charakteristiky učebního textu.....	19
2.4 Didaktické zásady.....	21
<b>3 VYTVOŘENÝ UČEBNÍ TEXT</b> .....	<b>24</b>
3.1 Účel vytvořeného učebního textu.....	24
3.2 Východiska tvorby vlastního učebního textu.....	24
3.3 Struktura a charakteristiky vlastního učebního textu.....	26
<b>4 TVORBA UČEBNÍHO TEXTU</b> .....	<b>29</b>
4.1 Nástroje použité při tvorbě učebního textu.....	29
4.2 Grafická úprava vytvořeného učebního textu.....	29
4.3 Ukázky vytvořeného učebního textu.....	31
<b>Závěr</b> .....	<b>36</b>
<b>Seznam použité literatury</b> .....	<b>37</b>
<b>Seznam obrázků</b> .....	<b>39</b>
<b>Seznam tabulek</b> .....	<b>40</b>
<b>Příloha</b> .....	<b>41</b>

# Úvod

Učebnice a další typy učebních textů patří mezi hojně používané učební pomůcky, které jsou určeny jak pro potřeby žáků a studentů, tak i pro pedagogickou činnost učitelů. Představují velmi důležitý prvek ve výchovně-vzdělávacím procesu a v mnoha ohledech jsou nezastupitelné. Vzhledem k tomu, jak důležitou roli učební texty mají, jsou také předmětem zkoumání pedagogických věd.

Aby učební texty plnily svou didaktickou funkci, musí splňovat řadu kritérií, která jsou obsažena v teoretických poznátcích tvorby učebních textů. Tato kritéria se týkají obsahu učiva, struktury a členění textu, využití obrazového materiálu, typografického zpracování textu apod.

Učebnic existuje nepřeborné množství a v mnoha předmětech má učitel či student možnost výběru z celé řady publikací. Pro některé odborné předměty vyučované na středních odborných školách, ale i pro předměty na vysokých školách žádné učební texty k dispozici nejsou. Žáci a studenti jsou pak odkázáni na jiné materiály, které nejsou zaměřené na konkrétní předmět nebo se primárně netýkají jen dané oblasti, příp. na učební materiály vytvořené samotným učitelem, v případě že takové materiály učitel napsal.

V současné době nejsou k dispozici v podstatě žádné publikace, ať už pro střední odborné školy či vysoké školy, které by se týkaly letecké dopravy a které by žáky uvedly do problematiky základních oblastí letectví a opíraly se pouze o učivo z obsahu všeobecně-vzdělávacích předmětů – matematiky a fyziky.

Cílem této práce je tedy vytvořit učební text „Letecká propedeutika“, který by čtenářům poskytl vhled do letecké dopravy, objasnil základní principy a zákonitosti, poskytl základní odbornou terminologii a vysvětlil výpočty veličin vztahujících se k daným tématům. Potřeba mít k dispozici takový text byla identifikována během výuky předmětu Základy letecké dopravy na Fakultě dopravní ČVUT v Praze, jehož cílem je začínající studenty seznámit se základními informacemi a fakty civilního dopravního letectví. Učivo, které je náplní tohoto předmětu, je v závislosti na tom, zda student přichází z gymnázia či střední odborné školy, buď zcela novým učivem nebo učivem, které je zopakováno a prohloubeno. Pro tento předmět však neexistuje žádný učební text, stejně tak není k dispozici žádná učebnice určená pro střední odborné školy, která by se týkala daných témat.

Teoretická část práce je zaměřena na teoretické požadavky a východiska pro tvorbu učebních textů. Praktickou část představuje vlastní učební text vytvořený v souladu s teoretickými poznatky.



# **TEORETICKÁ ČÁST**

# 1 UČEBNÍ TEXT A VÝCHODISKA JEHO TVORBY

Dle Výkladového slovníku z pedagogiky je učební text: „Označení pro texty, se kterými se pracuje buď ve vyučování, nebo souvisí s vyučováním, s učením. Patří mezi ně učebnice, učitelem připravené texty, návody pro určité operace, výňatky z odborných studií, soubory citací, cvičebnice, pracovní sešity, slovníky, encyklopedie, čítanky aj. Na vysokých školách např. skripta. Text, který představuje informace, které je třeba zvládnout, naučit se je.“ [1]

Učební text je jeden z mnoha výukových materiálů, které se používají ve výuce. Mezi výukové materiály lze zařadit jakákoli sdělení informací studentům v podobě verbální, grafické, obrazové, audiovizuální, ale také informační zdroje dostupné na internetu a učební pomůcky. Výukové materiály zahrnují vše od tištěných materiálů, jako jsou učebnice a další literatura; přes učební pomůcky, kterými jsou přístroje, modely, soupravy atd.; až po moderní materiály využívající informační a komunikační technologie, např. elektronické prezentace, internetové informační zdroje, e-learning [1, 2].

Úkolem učebního textu je poskytnout studentům co nejužitečnější text. Cílem není předložit maximum informací, ale vystihnout podstatu problému a jeho zákonitosti. Text nemá přinášet nové vědecké poznatky, ale shromáždit a zobecnit již známé. Učební text doplňují i další materiály v závislosti na konkrétní situaci ve smyslu školy, předmětu, tématu, formy a metody výuky atd. [2, 3]

Při tvorbě učebního textu či jiného výukového materiálu pro dané téma a předmět je třeba vymezit několik základních východisek. Mezi ně lze zařadit obsah učiva, metody a organizační formy výuky a materiální didaktické prostředky. Tato východiska představují první krok při tvorbě učebního textu [2].

## 1.1 Obsah učiva

Učební látka či učivo představuje soubor poznatků, pracovních postupů, metod a způsobů řešení daných vzdělávacími programy v rámci konkrétního předmětu, ale i v kontextu s ostatními předměty, které předává učitel žákům a které by měli žáci zvládnout. Učivo je předmětem vyučovací činnosti učitele a učební činnosti žáků. Má vliv na naplňování výukových cílů [1, 4].

Vzhledem k existenci velkého množství poznatků ze všech možných oblastí činnosti člověka je třeba tyto poznatky podrobit didaktické transformaci, aby se staly obsahem učiva. Didaktická transformace představuje převedení učiva do podoby, jenž je přizpůsobena věkovým a individuálním zvláštnostem žáků. Pro výchovně-vzdělávací proces vybírá z nepřeberného množství společenského vědění a kultury to nejpodstatnější a nejvýznamnější. Didaktická transformace se týká poznávacích, dovednostních

i hodnotových aspektů. Didaktickou transformací vzniká didaktická soustava učiva, což je soustava poznatků a činností, jež si má žák v průběhu školní výuky osvojit [1, 4].

### **1.1.1 Složky učiva**

Učivo obsahuje čtyři vzájemně propojené složky, kterými jsou vědomosti, dovednosti, vlastnosti člověka a hodnotové orientace.

Vědomosti nebo též znalosti jsou poznatky, které si žák osvojuje z různých oborů. Mezi tyto poznatky lze zařadit vzájemně související fakta, soustavy pojmů, definic, zákonů, principů, teorií a pravidel. Protože jsou procesy vnímání, paměti a myšlení základem vědomostí, dělí se vědomosti na představy, fakta, pojmy, vztahy a složité vědomostní struktury. Vědomosti jsou podstatnou částí učiva většiny předmětů [4].

Dovednosti jsou dispozice ke správnému, přesnému, rychlému a úspornému vykonávání určitých činností získané učením nebo výcvikem. Pokud se jedná o dovednosti v oblasti smyslové a pohybové činnosti, jde o dovednosti senzomotorické. Dovednosti mající povahu vnitřních myšlenkových operací jsou dovednosti intelektové. V sociálním kontaktu s ostatními lidmi vznikají dovednosti na úrovni sociální komunikace a jednání. Pokud jsou dovednosti automatizované, označují se jako návyky [1, 4].

Vlastnosti člověka zahrnují mj. rozsah jeho paměti, úroveň jeho myšlení, vůli, pílí, emoce, zkušenosti, obratnost a vytrvalost [4].

Mezi hodnotové orientace patří zájmy, postoje a přesvědčení o tom, co je důležité, hodnotné a potřebné [1, 4].

### **1.1.2 Struktura učiva**

Jednotlivé složky učiva, viz výše, jsou vzájemně propojeny a vytváří složitou strukturu. V kontextu s rámcovými vzdělávacími programy se užívá termínů cílové zaměření vzdělávání a cílové kompetence žáka. V rámcových vzdělávacích programech je uveden výčet klíčových a příp. též odborných kompetencí žáka v souladu s cíli daného vzdělávání a v návaznosti na předchozí vzdělávání. Kompetencemi žáka jsou míněny schopnosti, znalosti, dovednosti, postoje a hodnotové orientace, které jsou předpokladem k určitému výkonu [4].

S ohledem na rozdílnost dovedností a schopností žáků je vhodné rozdělit učivo na základní a rozšiřující. Základní učivo nebo také kmenové učivo tvoří jádro obsahu vzdělávání v podobě souboru poznatků, dovedností, pracovních postupů a činností, které by měly zvládnout všichni žáci. Jedná se o jasně vymezené prvky učiva, bez kterých není možné osvojení učiva dalšího. Je třeba, aby základní učivo žák přijal jako učivo důležité pro jeho další život, a to ve smyslu jak praxe, tak i rozvoje osobnosti a postojů. Základní učivo lze označit jako standardy vzdělávání, které se staly východiskem pro tvorbu vzdělávacích programů [1, 4].

Rozšiřující učivo určuje maximální hranice učiva s ohledem na jeho obsah a strukturu. Slouží k rozšíření a prohloubení základního učiva o další prvky, které slouží k pochopení

vztahů, k praktickému uplatnění a zobecnění poznatků. Kromě základního a rozšiřujícího učiva může být do učiva zahrnuto i učivo doplňující, které představuje např. zajímavosti k danému tématu či bližší specifikace objektu. Úkolem doplňujícího učiva je motivovat žáky, oživit výuku, podtrhnout mezipředmětové vztahy [4].

Mezi jednotlivými prvky učiva existují určité vztahy, které je spojují v celek v podobě struktury učiva. Strukturace učiva, tedy transformace učiva do struktury, je důležitá při tvorbě učebnic a práci učitele. Aby prvky učiva žák nepřijímal izolovaně, mělo by být postupováno tak, aby si žák zařazoval nové poznatky do struktury již osvojených poznatků [4].

### **1.1.3 Rámcový vzdělávací program**

Obsah učiva vychází primárně z daného typu školy a jejího zaměření. Celkovou koncepci vzdělávacího programu určuje rámcový vzdělávací program (RVP). Rámcový vzdělávací program je vydáván Ministerstvem školství pro každý obor vzdělání v předškolním, základním, základním uměleckém, jazykovém a středním vzdělávání. Je ukotven ve školském zákonu [2, 5].

Účelem rámcových vzdělávacích programů je stanovení konkrétních cílů, forem, délky a povinného obsahu všeobecného a odborného vzdělání v závislosti na zaměření příslušného oboru vzdělání. RVP dále určuje organizační uspořádání, profesní profil, podmínky průběhu a ukončování vzdělávání a zásady pro tvorbu školních vzdělávacích programů. RVP také stanovuje podmínky pro vzdělávání žáků se speciálními vzdělávacími potřebami a nezbytné materiální, personální a organizační podmínky a podmínky bezpečnosti a ochrany zdraví [5].

Dle školského zákona musí být rámcové vzdělávací programy v souladu s nejnovějšími poznatky vědních disciplín, jejichž základy a praktické využití má vzdělávání zprostředkovat; a také poznatky pedagogiky a psychologie, které se týkají metod a organizačního uspořádání vzdělávání, a to s ohledem na věk a rozvoj žáků [5].

Rámcové vzdělávací programy určené pro střední odborné vzdělávání jsou členěny do 12 kapitol, které zahrnují obecnou charakteristiku RVP, cíle středního odborného vzdělávání, klíčové a odborné kompetence absolventa, uplatnění absolventa, organizaci vzdělávání, kurikulární rámce pro jednotlivé oblasti vzdělávání, rámcové rozvržení obsahu vzdělávání, průřezová témata, zásady tvorby školního vzdělávacího programu, podmínky pro uskutečňování vzdělávacího programu, vzdělávání žáků se speciálními vzdělávacími potřebami a žáků mimořádně nadaných a využití RVP ve vzdělávání dospělých [6].

Obsahu učiva se nejvíce týká kapitola „Kurikulární rámce pro jednotlivé oblasti vzdělávání“, která udává závazný obsah všeobecného a odborného vzdělávání, a také požadované výsledky vzdělávání. Obsah vzdělávání se dělí na vzdělávací oblasti a obsahové okruhy. Mezi vzdělávací oblasti středního odborného vzdělávání patří:

- jazykové vzdělávání a komunikace,

- společenskovední vzdělávání,
- přírodovědné vzdělávání,
- matematické vzdělávání,
- estetické vzdělávání,
- vzdělávání pro zdraví,
- vzdělávání v informačních a komunikačních technologiích a
- odborné vzdělávání [6].

RVP pro střední odborné vzdělávání definují pouze požadované výsledky vzdělávání a nutné prostředky pro jejich dosažení, ale způsob realizace vytyčených požadavků nechávají na jednotlivých školách. Na základě rámcových vzdělávacích programů si jednotlivé školy vytvářejí své realizační programové dokumenty, jimiž jsou školní vzdělávací programy [4, 6].

### **1.1.4 Školní vzdělávací program**

Školní vzdělávací program (ŠVP) vychází z rámcového vzdělávacího programu a musí být v souladu s příslušným RVP. Školní vzdělávací program si zpracovává škola sama a je plně v kompetenci ředitele školy. Obsah vzdělávání může být ve školním vzdělávacím programu uspořádán do předmětů nebo modulů. Podle ŠVP se uskutečňuje vzdělávání v konkrétní škole [5].

Školní vzdělávací program musí být zpracován komplexně, tzn. pro všechny ročníky. Obsahuje požadované kompetence absolventa, výsledky a obsah vzdělávání, didaktické postupy, personální, materiální a organizační podmínky pro daný vzdělávací program [4].

Rámcový vzdělávací program jasně vymezuje strukturu ŠVP a popisuje, co má být uvedeno v jednotlivých částech, kterými jsou úvodní identifikační údaje, profil absolventa, charakteristika vzdělávacího programu, učební plán, přehled rozpracování obsahu vzdělávání v RVP do ŠVP, učební osnovy pro všechny předměty uvedené v učebním plánu nebo vzdělávací moduly, popis materiálního a personálního zajištění výuky v daném ŠVP a oboru vzdělání, charakteristika spolupráce se sociálními partnery při realizaci daného ŠVP [6].

### **1.1.5 Ostatní pedagogické dokumenty**

V souladu s pravidly uvedenými v RVP a školou zpracovaným ŠVP jsou vytvořeny další pedagogické dokumenty, které konkretizují vzdělávací programy a kterými jsou učební plány, učební osnovy či vzdělávací moduly, časově-tematické plány.

Učební plán formou tabulky zobrazuje seznam vyučovacích předmětů, příp. modulů, jejich časovou dotaci, rozvržení do jednotlivých ročníků a počty vyučovacích hodin. Součástí učebního plánu je i rozvržení týdnů ve školním roce, rozdělení předmětů na povinné, volitelné a nepovinné, a forma a podíl praktického vyučování [4].

Učební osnovy či vzdělávací moduly popisují výsledky a obsah vzdělávání jednotlivých předmětů v souladu s RVP, profilem absolventa dle ŠVP, hodinovou dotací, vzdělávacími potřebami a možnostmi žáků. Jejich součástí je název předmětu, počet výukových hodin, koncepce předmětu, předpokládané výsledky, rozvržení učiva do jednotlivých ročníků [4].

V souladu s ŠVP, učebním plánem a učebními osnovami sestavuje učitel pro jednotlivé předměty časově-tematický plán, který předkládá řediteli školy ke schválení. V tomto plánu je učivo rozděleno tak, aby byl během školního roku zajištěn nejen výklad tohoto učiva, ale také procvičování, opakování, shrnutí a prověření [4].

## **1.2 Metody a organizační formy výuky**

Na obsahovou stránku učiva navazují metody a organizační formy výuky. Výukový materiál závisí na specifických požadavcích výuky. Jinou podobu bude mít výukový materiál v případě frontální výuky, jinou v případě převládajících žákovských činností nebo v případě projektové výuky. Pro různé metody výuky se volí různé výukové materiály. Roli hrají i individuální studijní předpoklady žáka a celé třídy. To vše se odráží např. na přiměřenosti a rozsahu grafického ztvárnění, použití obrazového materiálu a množství textových informací [2].

### **1.2.1 Metody výuky a jejich kategorizace**

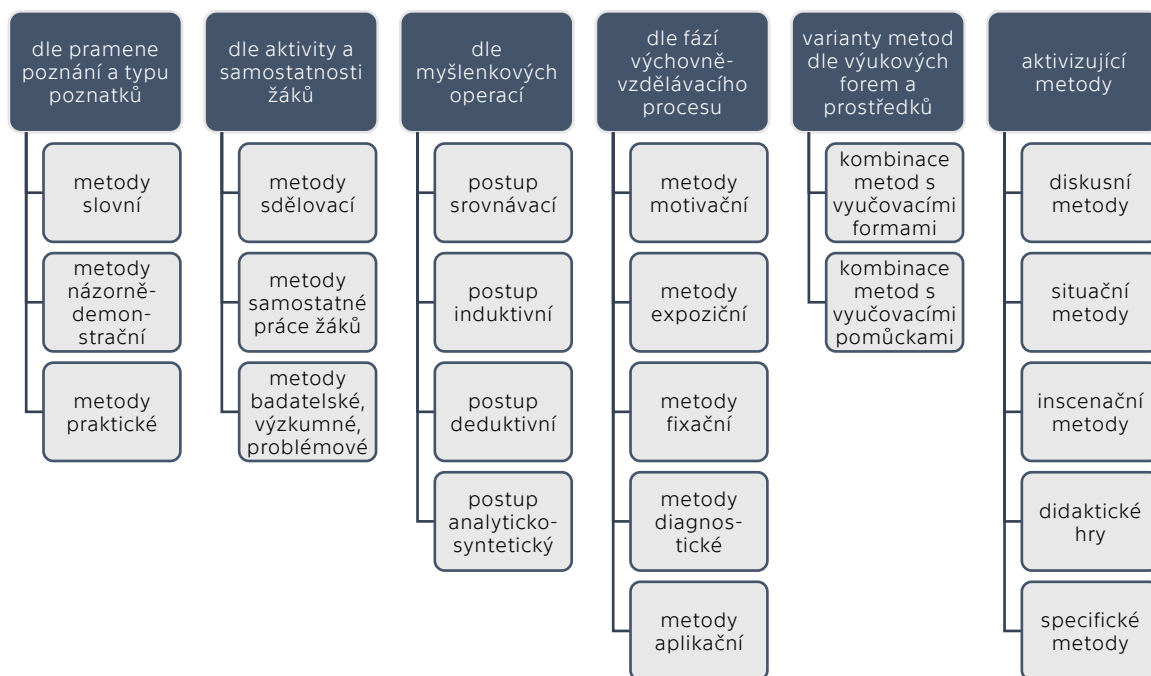
Výukové metody představují didaktické prostředky, pomocí kterých lze dosáhnout výchovně-vzdělávacího cíle. Výukové metody souvisí jak s činností žáka, tak i činností učitele. Obě tyto činnosti se vzájemně doplňují. Výukovou metodu lze popsat jako soustavu vyučovacích činností učitele a učebních činností žáka směřující k dosažení výchovně-vzdělávacích cílů [7].

Výběr výukové metody závisí na rozhodnutí učitele a je ovlivněn výchovně-vzdělávacím cílem, obsahem vzdělání, věkem a úrovní žáků, vybavením školy, kvalitou vztahu učitele a žáků, zkušenostmi a kapacitou učitele [1].

Na metody výuky lze nahlížet z různých úhlů pohledu a dle toho je kategorizovat. Mezi nejčastěji používané dělení patří klasifikace dle Maňáka, viz obr. 1. Tato klasifikace využívá k dělení metod výuky několik kritérií.

Dělení dle pramene poznání a typu poznatků zohledňuje aspekt didaktický. Dle něj se metody dělí na slovní, názorně-demonstrační a praktické. Mezi slovní metody patří monologické metody (např. vysvětlování, výklad, přednáška), dialogické metody (např. rozhovor, dialog, diskuse, beseda), metody písemných prací (např. písemná cvičení, kompozice) a metody práce s učebnicí, knihou, textovým materiálem. Mezi názorně-demonstrační metody se řadí pozorování předmětů a jevů, předvádění (např. pokusů, modelů), demonstrace statických obrazů, projekce statická a dynamická. Praktické metody zahrnují nácvik pohybových a pracovních dovedností, laboratorní činnost žáků, pracovní činnost, grafické a výtvarné činnosti [7].

Dělení podle aktivity a samostatnosti žáků zohledňuje aspekt psychologický, dělení podle myšlenkových operací aspekt logický, dělení podle fází výchovně-vzdělávacího procesu aspekt procesuální, dělení podle výukových forem a prostředků aspekt organizační. Aspekt interaktivní je zohledněn v aktivizujících metodách [7].



Obrázek 1 Kategorizace výukových metod [8]

Mezi novější a též rozšířenou klasifikaci výukových metod patří rozdělení metod dle Maňáka a Švece. Tato klasifikace zohledňuje stupeň složitosti edukačních vazeb mezi učitelem a žáky. Je charakteristická splynutím pojmů výuková metoda a organizační forma. Představuje kombinovaný pohled na výukové metody a dělí je na:

- klasické výukové metody,
- aktivizující výukové metody a
- komplexní výukové metody.

Klasické výukové metody jsou stále hojně využívané, lze je označit jako tradiční metody. Je pro ně charakteristická frontální výuka, při níž má dominantní roli učitel předávající informace žákům. Klasické výukové metody lze dále dělit na metody slovní, názorně-demonstrační a praktické, viz výše [7, 9].

Aktivizující metody slouží k podpoře tvůrčího myšlení žáků, působí na ně stimulačně a vedou k jejich aktivizaci. Tyto metody jsou založeny na řešení problémových situací a úloh. Mezi aktivizující metody patří diskusní metody, metody heuristické, metody situační, metody inscenační, didaktické hry [7].

Komplexní metody definuje J. Maňák a V. Švec jako „složitě metodické útvary, které předpokládají různou, ale vždy ucelenou kombinaci a propojení několika základních prvků didaktického systému, jako jsou metody, organizační formy výuky, didaktické prostředky nebo životní situace, jejich sjednocujícím prvkem je však vždy výuková

*metoda*". Do skupiny komplexních metod se řadí frontální výuka; skupinová a kooperativní výuka; partnerská výuka; individuální a individualizovaná výuka, samostatná práce žáků; kritické myšlení; brainstorming; projektová výuka; výuka dramatem; otevřené učení; učení v životních situacích; televizní výuka; výuka podporovaná počítačem; sugestopedie a superlearning; hypnopedie [7, 9].

Volba konkrétní výukové metody závisí na mnoha faktorech. Nelze používat jednu výukovou metodu pro všechny situace. V reálné výuce se využívají různé metody, a to souběžně a ve vzájemném propojení. Při výběru výukové metody je důležité zohlednit především typ školy, zákonitosti výchovně-vzdělávacího procesu a z nich vyplývající vyučovací zásady, charakter vyučovaného předmětu, organizační formy, učební možnosti žáků a jejich osobnostní předpoklady, časové a prostorové podmínky vyučování, osobnost učitele [7, 10].

### **1.2.2 Organizační formy výuky**

Organizační forma výuky je způsob uspořádání celého vyučovacího procesu. Spolu s vyučovacími metodami jsou organizační formy výuky nejdůležitějším prostředkem realizace cílů a učiva ve výuce. Jednotlivé formy výuky jsou určeny souhrnem faktorů, kterými jsou místo vyučování, délka vyučování, počet žáků, způsob řízení učební práce žáků [1, 11].

Organizační formy výuky lze dělit podle vztahu k osobnosti žáka či studenta, podle charakteru výukového prostředí a podle délky trvání, viz obr. 2. Podle vztahu k osobnosti žáka se rozlišuje forma individuální, skupinová, hromadná a individualizovaná [12].

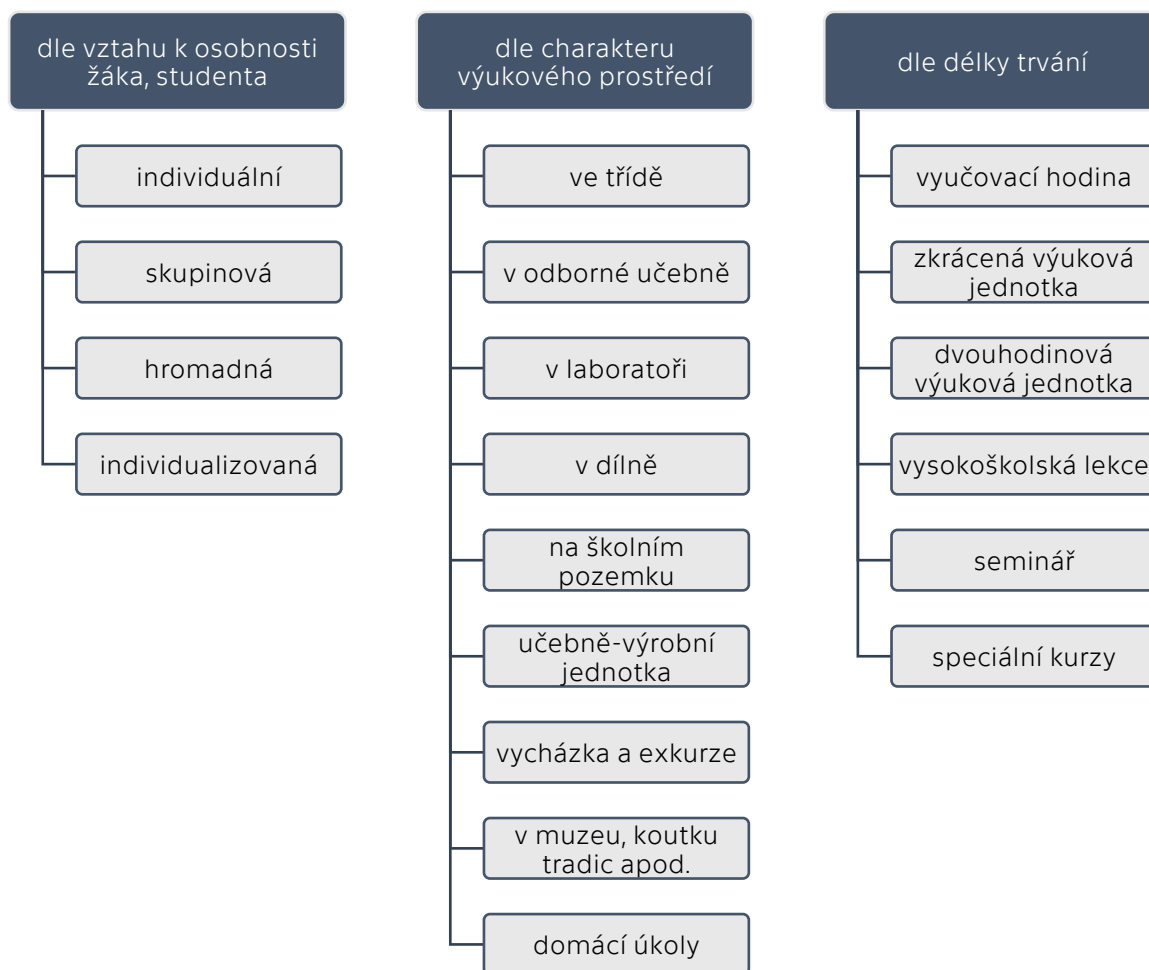
Individuální forma výuky se vyznačuje tím, že se učitel věnuje pouze jednomu žákovi. Tato forma se uplatňuje např. při výuce jazyků, doučování, při písemném nebo ústním zjišťování znalostí, na praktických cvičeních, při procvičování učiva, při zadání samostatné práce [4, 11].

Skupinová forma výuky spočívá v práci žáků v menších skupinách. Žáci v těchto skupinách většinou pracují na náročnějším (problémovém) úkolu. Úkolem učitele je řídit, radit, pomáhat, v případě problémů organizovat činnost žáků ve skupinách. Ideální počet žáků ve skupině se různí, pohybuje se okolo tří až sedmi. Přínosem práce ve skupině je rozvoj vzájemné komunikace, argumentace, spolupráce mezi žáky a učení se organizovat si svou i skupinovou práci [4, 11].

Hromadná forma výuky nazývaná též jako frontální je velmi často využívanou formou výuky. Učitel při ní pracuje s vymezenou skupinou – třídou žáků a působí na všechny žáky současně. Je důležité, aby učitel udržoval kontakt se všemi žáky ve třídě. Nevýhodou této formy výuky je malá aktivita žáků, ztráta soustředěnosti žáků, orientace na průměrného žáka [10, 13].



Individualizovaná forma výuky spočívá v práci učitele s jedním žákem, avšak v prostředí hromadného vyučování. Při zachování frontální výuky je zdůrazněn individuální přístup k žákům spočívající v diferenciaci cílů a metod výuky [1, 11].



Obrázek 2 Klasifikace organizačních forem výuky [12]

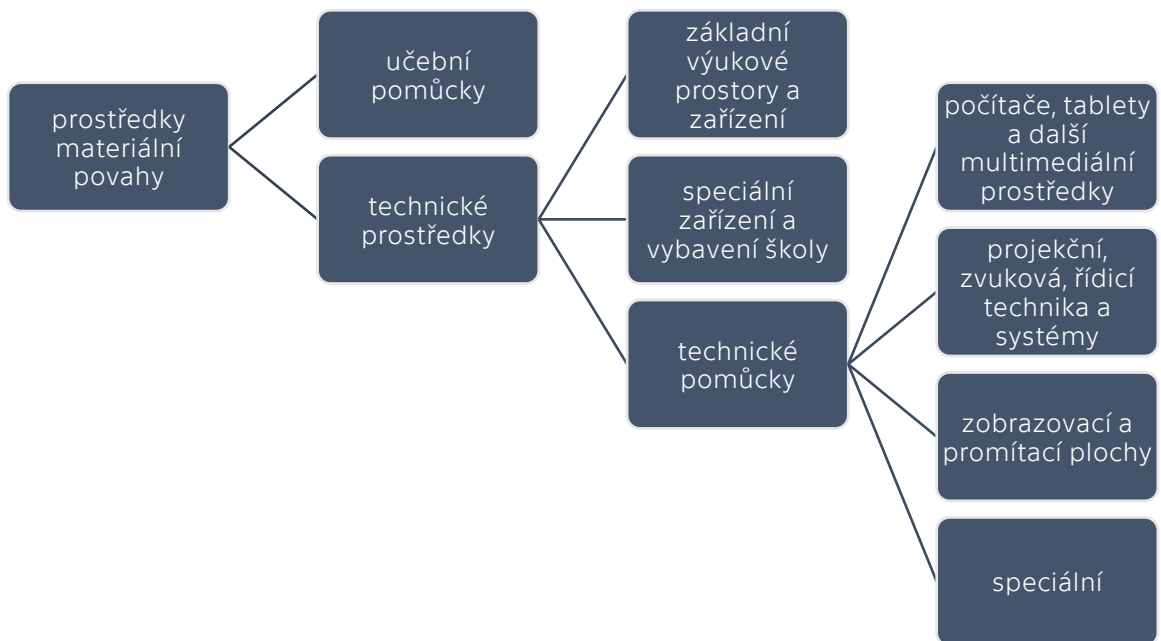
### 1.3 Materiální didaktické prostředky

Didaktické prostředky jsou všechny předměty a jevy, které jsou používány k dosažení výchovně-vzdělávacích cílů. Vedle nemateriálních didaktických prostředků zahrnujících vyučovací metody, organizační formy a vyučovací zásady, jsou materiální didaktické prostředky, mezi které patří učební pomůcky a technické prostředky, viz obr. 3 [4, 11].

Technické prostředky zprostředkovávají přenos učiva žákům a plní tak sekundární funkci ve vztahu k obsahu vzdělávání. Mezi technické prostředky se řadí základní výukové prostory a zařízení, speciální zařízení a vybavení školy, a technické pomůcky. Jedná se tedy o veškeré technické prostředky od učeben, laboratoří, školní knihovny, přes školní dílny a stroje, až po počítače, tablety, projekční a zvukovou techniku [4].

Druhou skupinou materiálních didaktických prostředků jsou učební pomůcky, které jsou přímým nositelem didaktické informace o předmětech a jevech tvořících obsah

výuky. Učební pomůcky mohou podávat obsah přímo nebo pomocí technických prostředků. Úkolem učebních pomůcek je podpořit, doplnit a zefektivnit práci učitele a usnadnit pochopení učiva žáky [4].



Obrázek 3 Rozdělení materiálních didaktických prostředků [4]

Do učebních pomůcek patří originální předměty a reálné skutečnosti (např. minerály, rostliny, preparáty, vzorky, přístroje, fyzikální, chemické a biologické jevy), zobrazení a znázornění předmětů a skutečností (např. obrazy, fotografie, mapy, modely, audiovizuální záznamy), textové pomůcky (např. učebnice, atlasy, příručky, pracovní sešity, encyklopedie, sbírky úloh, tabulky), pořady a programy prezentované didaktickou technikou (výukové pořady a programy) a speciální pomůcky (např. žákovské experimentální soustavy, pomůcky pro tělesnou výchovu, hudební nástroje) [11].

## 2 POŽADAVKY NA UČEBNÍ TEXT

Učebnice (učební text) je jednou z didaktických pomůcek a má své nezastupitelné místo v edukačním procesu. Musí splňovat určitá kritéria týkající se obsahové stránky, celkové struktury, členění textu, využití obrazového materiálu, typografického zpracování textu apod. Tato kritéria vyplývají z funkce učebnice.

### 2.1 Funkce učebního textu

Z funkčního hlediska se dle J. Průchy rozlišují tři základní pojetí učebnice – učebnice jako kurikulární projekt, jako zdroj obsahu vzdělávání pro žáky a jako didaktický prostředek pro učitele. Kurikulárním projektem je učebnice z toho důvodu, že představuje uskutečnění určitého didaktického systému vymezeného jen obecně. Učebnice podává výklad jednotlivých poznatků v určité posloupnosti a rozsahu, metodické postupy, požadavky na žáka atd. Učebnice jako zdroj obsahu vzdělání pro žáky přetváří vědecké poznatky do podoby pochopitelné pro žáky. Po stránce kvalitativní i kvantitativní je třeba vědecké poznatky zpracovat tak, aby byly přizpůsobeny intelektu i věku žáků, a to s ohledem na požadované cílové kompetence. Učebnice má ve vztahu k učiteli funkci informačního zdroje. Učitel může z učebnice vycházet při prezentaci učiva, řízení vyučování, řízení učení žáka a organizaci práce s učebnicí [2, 14].

Učebnice plní funkci prezentace učiva, to znamená způsob podání informací žákům a učitelům, dále plní funkci řízení učení a vyučování na straně žáka i učitele, a funkci organizační, tedy orientování čtenáře v učebnici při práci s ní [11].

Existují i jiná a podrobnější vymezení hlavních funkcí učebního textu. Jedním z uváděných vymezení je dělení dle D. D. Zujeva, který definuje následující funkce: informační funkce vymezující obsah vzdělávání; transformační funkce poskytující didakticky transformované informace žákům; systematizační funkce rozčleňující učivo a vymezující jeho posloupnost; zpevňovací a kontrolní funkce zajišťující osvojování, fixování a procvičování poznatků; integrační funkce umožňující porozumění a propojení s jinými osvojenými poznatky; koordinační funkce zajišťující koordinaci s využíváním dalších didaktických prostředků; rozvojově-výchovná funkce přispívající k vytvoření harmonické osobnosti žáka [11].

### 2.2 Strukturní prvky učebního textu

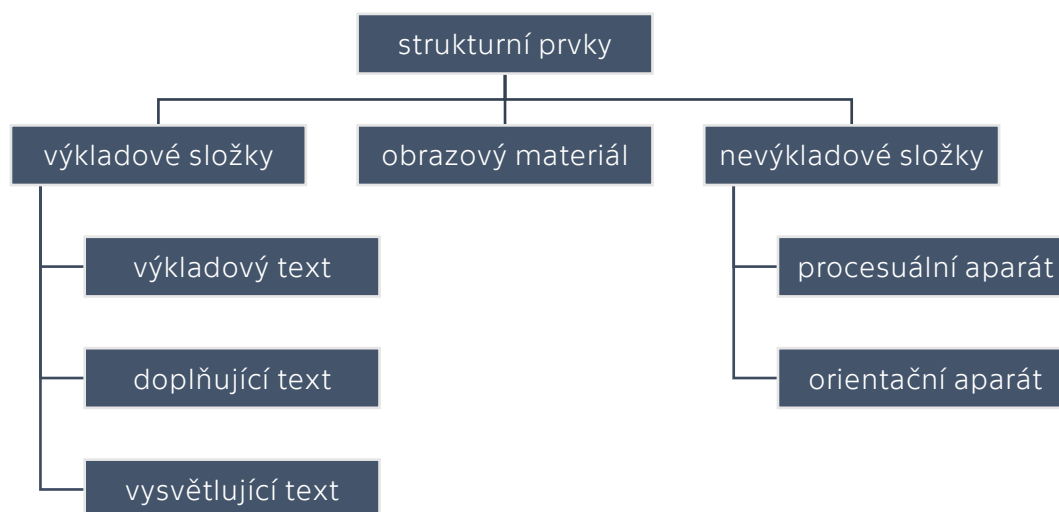
Obsahy jednotlivých učebnic lze rozdělit do charakteristických složek, kterými jsou výkladové složky, obrazový materiál a nevýkladové složky, viz obr. 4. Vymezené složky korespondují s výše uvedenými funkcemi učebnicových textů [2].

Výkladové složky mají za úkol prezentaci učiva. Řadí se mezi ně výkladový text, doplňující text a vysvětlující text. Výkladový text je stěžejní částí učebního textu a zahrnuje např. základní a objasňující text, vzorové úlohy, přehledy poznatků, shrnutí učiva. Doplnující text vhodným způsobem doplňuje výkladový text. Jedná se o motivační text,

rozšiřující poznatky, poznámky, ilustrační příklady, přílohy atd. Vysvětlující text slouží k popisu obrázků a tabulek, výkladu cizích slov a jako vysvětlivky [2, 11].

Výkladové složky doplňuje obrazový materiál, který navazuje na věcný obsah. Obrazový materiál tvoří např. schémata, náčrtky, grafické modely, grafy funkčních závislostí a doplňující ilustrace, jako jsou fotografie a kresby. Mezi obrazový materiál se řadí i grafické symboly, které slouží k lepší orientaci v učebním textu [2].

Úlohou nevýkladových složek je řízení vyučování a učení prostřednictvím procesuálního a orientačního aparátu. Procesuální aparát zahrnuje mj. otázky a odpovědi, úlohy a jejich řešení. Mezi orientační aparát patří nadpisy, odkazy na text, obrázky, tabulky či literaturu, hesla na okraji textu, rejstřík, obsah [2].



Obrázek 4 Strukturní prvky učebnic [2]

Ačkoli je možné jednotlivé prvky v učebních textech kategorizovat a pohlížet na ně odděleně, ve skutečnosti jsou vzájemně propojené a tvoří jeden celek. Různé části textu jsou většinou odlišeny velikostí písma a grafickou úpravou. Poznámky a vysvětlivky bývají psány menší velikostí písma, nadpisy naopak větší velikostí anebo tučným písmem, nejdůležitější informace jsou zdůrazněny např. v podobě rámečku či podbarvení, pro odlišení výkladových složek se používají barevné čáry podél textu a grafické symboly. Obrazový materiál má též sdělovací funkci, doplňuje psaný text a usnadňuje jeho pochopení. V některých případech je obrazový materiál stěžejní informací, od které se odvíjí textová část. Obrazový materiál žákům ztraktivňuje učební text a plní tak motivační funkci [2].

## 2.3 Charakteristiky učebního textu

Každý učební text by měl splňovat několik základních vlastností. Učivo by mělo být vhodně zpracováno, a to s ohledem na účel učebního textu a cílovou skupinu, pro kterou je text určen. Text by se měl vyznačovat vysokou srozumitelností a měl by být graficky upraven tak, aby bylo učivo v něm obsažené přehledné a v textu se dalo dobře

orientovat. Důležité je, aby byl text rozčleněn na jednotlivé části z hlediska jejich funkce, ve smyslu výkladu, opakování, příkladů apod. [15]

Na učební text je kladena řada požadavků, jež musí být splněny, aby text splňoval svou didaktickou funkci. Nejdůležitější požadavky jsou zobrazeny na obr. 5.

odborné	<ul style="list-style-type: none"><li>•souhlas učiva s poznatky dané vědní disciplíny</li></ul>
didaktické	<ul style="list-style-type: none"><li>•soulad s kurikulem</li><li>•správný výběr poznatků</li></ul>
metodické	<ul style="list-style-type: none"><li>•volba adekvátních prostředků výkladu učiva</li></ul>
logické	<ul style="list-style-type: none"><li>•ucelená struktura poznatků</li><li>•rozčlenění učiva</li></ul>
psychologické	<ul style="list-style-type: none"><li>•přiměřenost učiva věkovému stupni žáků</li></ul>
lingvistické	<ul style="list-style-type: none"><li>•jazyková správnost</li><li>•stylistická úroveň</li></ul>
estetické	<ul style="list-style-type: none"><li>•vhodné výtvarné a typografické ztvárnění učebnice</li></ul>
hygienické	<ul style="list-style-type: none"><li>•přiměřený objem a hmotnost učebnice</li><li>•kvalita papíru</li></ul>

Obrázek 5 Požadavky na učební texty [2]

Aby byly naplněny odborné požadavky, musí být učební text v souladu s poznatky dané vědní disciplíny. Text by měl obsahovat relevantní informace, zobecnovat informace již známé a odrážet nejnovější vědecké informace [2].

Didaktické požadavky souvisí se správným výběrem poznatků a souladem s kurikulem. Prezentované informace musí být přiměřené po stránce kvantitativní tak, aby příliš nezabíhaly do detailů. Na závěr každé kapitoly, resp. tématu by mělo být shrnutí daného učiva, úlohy a kontrolní otázky pro poskytnutí zpětné vazby o získaných vědomostech [2, 3, 11].

Metodické požadavky spočívají ve správné volbě adekvátních prostředků výkladu učiva. Ideální je, pokud je text doplněn ilustračním materiálem, tedy obrázky, grafy, schémata a diagramy sloužícími k ilustraci učiva a lepšímu zapamatování. Vhodné je i zařazení příkladů doplňujících probírané učivo [2, 11].

Logické požadavky se týkají struktury poznatků a členění učiva. Text by měl být koncipován tak, aby na sebe jednotlivé kapitoly tematicky navazovaly a aby měly poznatky jasnou a ucelenou strukturu. Učební text by měl být logicky rozčleněn na jednotlivé

kapitoly a ty na další části. Ani jednotlivé odstavce by neměly představovat samostatné oddíly bez další návaznosti [2, 3].

Psychologické požadavky berou v úvahu přiměřenost učiva věkovému stupni žáků. Učební text by měl být přizpůsoben úrovni dosavadního vzdělání cílové skupiny, být přiměřený její slovní zásobě a jazykovým zkušenostem [2, 11].

Lingvistické požadavky se zaměřují na dodržení jazykové správnosti a stylistické úrovně. Text by měl být formulován srozumitelně a jasně, aby bylo zcela jednoznačně pochopeno prezentované učivo. V textu by měla být dodržena spisovná jazyková norma, stylistická, syntaktická a gramatická správnost. V celé práci by měla být použita jednotná terminologie, s vysvětlením termínu při jeho prvním uvedení. Cizojazyčné výrazy by měly být přeloženy, s výjimkou domestikovaných cizojazyčných výrazů [2, 3, 11].

Estetické požadavky představují vhodné výtvarné a typografické ztvárnění učebnice. V textu by měly být použity různé druhy písma, měla by být zajištěna dobrá čitelnost textu a kvalitní ilustrace. Pro zdůraznění důležitých informací je vhodné použít tučné písmo, rámečky, barevné podbarvení. Jednotlivé stránky i celé kapitoly by měly být vhodně graficky uspořádány [2, 11].

Hygienické požadavky se týkají vlastního fyzického provedení. Mělo by být pamatováno na přiměřený objem a hmotnost knihy, dostatečnou kvalitu papíru a celkové zpracování [2].

## **2.4 Didaktické zásady**

K obecným požadavkům kladeným na tvorbu učebních textů lze rovněž zařadit obecné didaktické zásady. Didaktické zásady jsou jakýmsi normami v procesu výuky, které vedou k optimálnímu dosažení stanovených výchovně-vzdělávacích cílů. Dále uvedené zásady jsou ty, které lze z pohledu tvorby učebního textu nejvíce zohlednit [4].

Podle zásady spojení teorie s praxí je důležité, aby teorie a praxe nebyly odděleny, ale byly vzájemně provázány. Teoretické poznatky by měly být aplikovány na konkrétní jevy a měl by být uváděn dostatek příkladů z praxe. Procvičování látky by se mělo dotýkat současných jevů a příkladů [3, 11].

Při dodržování zásady názornosti dochází k propojování abstraktních pojmů s konkrétními nebo konkretizovanými pojmy. Poznatky, které se má žák naučit, si lépe pamatuje, pokud si tyto poznatky osvojuje i pomocí obrazových informací a zapojuje co nejvíce smyslů. Také uvádění konkrétních příkladů přispívá k lepší názornosti [3, 4].

Zásada přiměřenosti spočívá v tom, aby byl obsah učebního textu adekvátní věku žáků, jejich jazykovým schopnostem a vědomostem. Je důležité, aby obsah a rozsah učiva, jeho obtížnost a způsob podání byly přizpůsobeny cílové skupině žáků [4, 11].

V souladu se zásadou vědeckosti by poznatky obsažené v učebním textu měly být pravdivé, vědecky ověřené, věcně správné. Obsah učiva by měl být v souladu s dosaženými poznatky technické i pedagogické vědy [4, 11].

Cílem zásady trvalosti je trvalé osvojení učiva, aby si žáci nabyté vědomosti zapamatovali a mohli si je v paměti vybavit a prakticky využít. Učební text by měl být systematický, protože systematicčnost usnadňuje zapamatování učiva. Nové poznatky by měly logicky navazovat na předchozí poznatky, měly by být opakovány a procvičovány. K tomu v učebním textu slouží shrnutí, příklady, otázky a úkoly [4, 11].

Zásada soustavnosti klade důraz na systematicčnost a pevné logické uspořádání učiva. Jednotlivé celky by na sebe měly logicky navazovat. Učivo obsažené v učebním textu by mělo vést od jednoduššího ke složitějšímu, od známého k neznámému, od obecného ke zvláštnímu [4, 11].

V souladu se zásadou srozumitelnosti se požaduje, aby předkládané učivo bylo pro žáky srozumitelné. Poznatky jsou pro žáky srozumitelné tehdy, když si žáci dokážou tyto poznatky zařadit do struktury již osvojených poznatků a používat je v praxi [4].

# **PRAKTICKÁ ČÁST**



## 3 VYTVOŘENÝ UČEBNÍ TEXT

Vytvořený učební text nese název „Letecká propedeutika – úvod do studia letecké dopravy“ a obsahuje poznatky z vybraných základních témat týkajících se oboru letecká doprava. Celý učební text je obsažen v příloze na konci práce.

### 3.1 Účel vytvořeného učebního textu

Vytvořený učební text je určen jak žákům středních odborných škol, tak začínajícím studentům vysokých škol. Text vychází z potřeb mít k dispozici vhodný materiál pokrývající vybrané oblasti letectví, který je sice odborný, ale zároveň uchopitelný pro žáky, resp. studenty, opírající se o poznatky středoškolské fyziky a obsahující také příklady aplikované na danou problematiku. V současné době se totiž na knižním trhu na toto téma nachází převážně literatura populárně-naučná, nebo na druhou stranu literatura vysoce odborná a zabíhající do velkých detailů.

Z pohledu středních odborných škol přicházejí v úvahu školy s oborem vzdělávání 37-41-M/01 Provoz a ekonomika dopravy. Součástí příslušného rámcového vzdělávacího programu je obsahový okruh doprava a přeprava, který umožňuje žákům komplexně se seznámit s dopravními a přepravními technologiemi, podstatou a využíváním dopravních prostředků a manipulační techniky a se základy konstrukce a používání dopravní infrastruktury. Výsledky vzdělávání uvedené v rámcovém vzdělávacím programu mají obecný charakter s tím, že mají být orientovány na dílčí druh dopravy v závislosti na zaměření oboru vzdělání. Největší uplatnění vytvořeného učebního textu tedy bude v rámci oboru zaměřeného na leteckou dopravu [16].

Co se vysokých škol týká, vytvořený učební text je možné využít jako úvodní materiál např. v rámci studijních programů Technika a technologie v dopravě a spojích, Technologie a management v dopravě, Technika, technologie a řízení letecké dopravy. Učební text je mj. vhodný pro studenty předmětu Základy letecké dopravy vyučovaného na Fakultě dopravní ČVUT v Praze v rámci společné části studia několika studijních oborů [17].

### 3.2 Východiska tvorby vlastního učebního textu

Při tvorbě vlastního učebního textu byla brána v úvahu základní východiska tvorby výukových materiálů popsaných v kapitole 1. Těmito východisky jsou obsah učiva, metody a organizační formy výuky a materiální didaktické prostředky.

Obsah vytvořeného učebního textu je přizpůsoben cílové skupině, kterou tvoří žáci středních odborných škol a začínající studenti vysokých škol. Pro vytvoření učebního textu bylo čerpáno z odborné literatury, předpisů a zákonů. Text byl podroben didaktické transformaci tak, aby zahrnoval podstatné a významné informace a byl pro žáky srozumitelný a pochopitelný.

S ohledem na účel vytvořeného učebního textu jsou obsahem textu základní poznatky z vybraných oblastí letecké dopravy navazující na učivo středoškolské fyziky. Do učebního textu byla zařazena témata atmosféra, aerodynamika, konstrukce letadel, pohonné jednotky a letiště. Předpokladem jsou již osvojené poznatky z učiva fyziky, zejména z částí dynamika hmotného bodu, mechanická práce a mechanická energie, gravitační pole, mechanika tekutin, termodynamika a tepelné stroje. Učivo obsažené ve vytvořeném učebním textu navazuje na poznatky z fyziky, prohlubuje je a aplikuje na problematiku letectví.

Téma „atmosféra“ zahrnuje popis atmosféry Země, její složení a členění; v letectví používaný model atmosféry nazývaný mezinárodní standardní atmosféra; výpočet základních meteorologických prvků, jako je teplota vzduchu, tlak vzduchu, hustota vzduchu; vysvětlení tlakové výšky, její indikace pomocí barometrického výškoměru a využití pro létání v letových hladinách; objasnění principu letu letadel lehčích než vzduch, tj. balónů a vzducholodí, souvislosti s Archimedovým zákonem a výpočet nadlehčující aerostatické vztlakové síly.

Následuje téma „aerodynamika“, které obsahuje učivo o proudění vzduchu, rovnici kontinuity a Bernoulliho rovnici, s tím souvisejícím statickým a dynamickým tlakem vzduchu, jejich měření na letadlech pomocí sond a využití pro měření rychlosti letu; výpočet Machova čísla; informace o základních silách působících na letící letadlo; vysvětlení obtékání vzduchu kolem křídla, tlakového rozložení nad a pod profilem křídla a vzniku výsledné aerodynamické síly; výpočet aerodynamické vztlakové a odporové síly; vysvětlení součinitele vztlaku a odporu.

Další téma je „konstrukce letadel“, ve kterém je popsáno dělení letadel, hlavní konstrukční části letounů, otáčení kolem všech os, princip řízení letadel pomocí kormidel a dalších řídicích ploch, mechanizace křídla a základní letadlové systémy (podvozek, palivový systém, pneumatický systém, klimatizace a přetlakování, systém ochrany proti námraze, hydraulický systém, elektrický systém, pomocná energetická jednotka) včetně jejich funkce, charakteristik a konstrukčních částí.

Učební text pokračuje tématem „pohonné jednotky“, kde je vysvětlen účel pohonné jednotky s odkazem na Newtonovy pohybové zákony a princip vzniku tahu; definována veličina hmotnostní tok; vysvětlen účel propulsního systému a motoru; popsán vrtulový pohon, motory s přerušovaným pracovním cyklem se zaměřením na pístový spalovací motor a motory s kontinuálním pracovním cyklem zahrnující jednoproudové, dvouproudové, hřídelové a náporové motory; uvedeny výpočty tahu, výkonu, účinnosti.

Posledním tématem obsaženým v učebním textu jsou „letiště“ zahrnující dělení a označování letišť; definice hlavních částí letiště; logiku označování drah; popis ploch vymezených kolem drah, značení používaného na dráze; definice a výpočty vyhlášených délek; informace o pojezdovém systému a typech pojezdových drah; informace o odbavovacích plochách a typech stání letadel.

Vytvořený učební text sleduje procesuální aspekt výukových metod. Procesuální aspekt zohledňuje třídění metod podle fází výchovně-vzdělávacího procesu.

Dle tohoto kritéria se rozlišují metody motivační, expoziční, fixační, diagnostické a aplikační. To se odráží v učebním textu, který je koncipován tak, aby nejprve poskytl motivaci žákům, dále výklad učiva a řešené příklady, a nakonec shrnutí a otázky k procvičení.

Text může posloužit jako podklad pro výklad učitele, může být použit pro řešení uvedených příkladů aplikovaných na danou problematiku ve výuce a také pro kontrolu porozumění učivu žáky.

Z pohledu organizačních forem výuky může být text podkladem pro frontální výuku ve škole, ale též je možné ho využít při samostudiu a jako vhodný studijní materiál pro začínající studenty vysoké školy, kterým poskytuje nezbytný vhled do vybraných oblastí letecké dopravy a návod na výpočty důležitých veličin.

Samotný učební text je možné při výuce vhodně doplnit a kombinovat s dalšími materiálními didaktickými prostředky. Nabízí se využití prezentací obsahujících mj. fotografie, videa, animace k jednotlivým tématům, které by napomohly lepšímu pochopení učiva a které s ohledem na svou povahu a rozsah nemohly být zařazeny do učebního textu. Dále je možné využít modely nebo reálné předměty (např. aerometrické přístroje, tepelné motory a jejich části).

### **3.3 Struktura a charakteristiky vlastního učebního textu**

Vytvořený učební text obsahuje všechny základní strukturní prvky, kterými jsou výkladové složky, obrazový materiál a nevýkladové složky. Všechny složky jsou v učebním textu vzájemně provázány tak, že tvoří jeden ucelený učební materiál.

Na začátku vytvořeného učebního textu je uvedena předmluva, což bývá zvykem u všech učebnic i jiných učebních materiálů. Účelem předmluvy je informovat čtenáře o obsahu dané publikace, důvodu jejího vzniku a o tom, komu je publikace určena. Do vytvořeného učebního textu byla sepsána předmluva v následujícím znění, která uvádí, jaká témata jsou v učebním textu obsažena, jaký je účel textu, komu je text určen a jaká je jeho struktura.

*„Letectví je velmi širokým oborem, a proto nelze v rámci této publikace obsáhnout veškeré jeho oblasti. Učební text Letecká propedeutika pokrývá vybraná témata týkající se letecké dopravy. Jednotlivé kapitoly se zaměřují na zemskou atmosféru, její složení, základní meteorologické prvky a jejich výpočet, princip letu prostředků lehčích i těžších než vzduch, výpočet aerostatické a aerodynamické vztlakové síly, dělení letadel, hlavní části letadel, řízení letadel, letadlové systémy, pohonné jednotky používané v letectví a s tím související nejdůležitější veličiny, letiště a jejich základní části a charakteristiky.*

*Účelem tohoto textu je seznámit čtenáře s vybranými oblastmi letecké dopravy, vysvětlit základní principy létání s využitím poznatků z učiva středoškolské fyziky a na příkladech ukázat postupy řešení a výpočty základních veličin týkajících se vysvětlované problematiky. Text je určen pro studenty středních odborných škol zaměřených*

na leteckou dopravu a také pro studenty vysokých škol, kteří se studiem letecké dopravy teprve začínají a kterým má text posloužit jako úvod do jejich studia.

Učební text je rozdělen do několika základních kapitol, které jsou dále členěny na menší logické celky. Na začátku každé kapitoly je krátký motivační text, který čtenáře uvede do problematiky dané kapitoly. Stěžejní částí kapitol je studijní text, který obsahuje výklad, definice a vzorce pro výpočet veličin. Následují vzorové příklady k dané problematice, jejichž součástí je i postup řešení a správný výsledek. V závěru každé kapitoly je její krátké shrnutí, kontrolní otázky, na které by student měl být schopen po prostudování textu odpovědět, a seznam doporučené literatury pro získání hlubších znalostí."

Za předmluvou je uveden obsah celého dokumentu. Učební text je rozdělen do několika základních kapitol představujících logicky na sebe navazující celky a podkapitol s cílem uspořádat učivo přehledným způsobem. Kapitoly a podkapitoly jsou průběžně číslovány, což umožňuje lepší orientaci v textu a odkazování se na jiná místa v textu.

Jednotlivé kapitoly vytvořeného učebního textu jsou rozděleny do několika částí dle jejich funkce, viz obr. 6. Na začátku každé kapitoly je uvedena motivace. Jejím úkolem je uvést čtenáře do problematiky obsažené v dané kapitole a nastínit obsah učební látky.



Obrázek 6 Struktura kapitol vytvořeného učebního textu

Po motivaci následuje stěžejní výkladová část. Text je strukturován tak, aby byla zachována posloupnost podávaných informací. Text je doplněn obrázky a tabulkami, které ilustrují učivo pro jeho lepší názornost a zapamatování.

Na výklad navazují řešené příklady, které mají ukázat aplikování teoretických znalostí a uvedených matematických vztahů do praktického použití. Zadání příkladů je popsáno slovně, případně doplněno schematickým obrázkem. Každý příklad obsahuje kompletní řešení včetně postupu. Jednotlivé kroky jsou slovně popsány s odkazem na použité vztahy uvedené ve výkladové části učebního textu. Řešení úlohy je vždy provedeno nejprve obecně pomocí jednotných označení veličin. Následně jsou dosazeny numerické hodnoty převedené na základní jednotky. Nakonec je uveden správný výsledek včetně jednotek. V učebním textu je dodržena správná úprava zápisu matematických výrazů, tedy všechny veličiny jsou psány kurzívou, jednotky veličin jsou psány stojatě a v kroku, kdy jsou do vzorce dosazeny numerické hodnoty, je veličina zapsána ve složené závorce.

Závěr každé kapitoly tvoří shrnutí, kontrolní otázky a doporučená literatura. Shrnutí představuje krátký výstižný text, který sumarizuje nejdůležitější poznatky z učiva obsaženého v příslušné kapitole. K ověření znalostí slouží kontrolní otázky. Otázky se vztahují vždy k dané kapitole, po jejímž nastudování by měl být žák schopen tyto

otázky zodpovědět a tím si ověřit své znalosti. Seznam doporučené literatury na konci každé kapitoly obsahuje několik publikací, ze kterých vychází učební text a které mohou posloužit k rozšíření znalostí k dané problematice. Výčet doporučené literatury je uveden v souladu s citační normou ČSN ISO 690.

Aby učební text mohl plnit svou didaktickou funkci, je nutné splnit určité požadavky a zásady. Vytvořený učební text je napsaný v souladu s vědeckými poznatky a opírá se o relevantní zdroje, jako jsou odborné knihy, učebnice, skripta, zákony, předpisy. Zobecňuje již známé informace. V souladu s obecnými požadavky kladenými na učební texty jsou předkládané informace doplněny ilustračním materiálem pro lepší pochopení a zapamatování. Jelikož má být učební text přizpůsoben úrovni dosaženého vzdělání cílové skupiny, je učební text vytvořený tak, aby jej pochopili žáci středních škol a začínající studenti vysokých škol, u kterých se předpokládají určité znalosti z matematiky a fyziky.

V textu je dbáno na dodržení jazykové správnosti a stylistické úrovně, je používána spisovná čeština a jednotná terminologie. Anglické termíny používané v letectví jsou doplněny o jejich české ekvivalenty a vysvětleny. Z grafického hlediska je text přizpůsoben estetickým požadavkům, a to použitím nástroje zajišťujícího vysokou typografickou kvalitu textu a matematických rovnic a obrázky vytvořeny v softwaru poskytujícím kvalitní výstupy. Při tvorbě učebního textu bylo pamatováno na jednotný grafický vzhled celého materiálu, mj. použitím jednotného formátování pro jednotlivé části, jednotného vzhledu použitých obrázků, jednotného barevného motivu.

Snahou bylo koncipovat celý učební text tak, aby byly dodrženy též obecné didaktické zásady, především zásada spojení teorie s praxí, zásada názornosti, zásada přiměřenosti, zásada vědeckosti, zásada trvalosti, zásada soustavnosti, zásada srozumitelnosti. Způsob, jakým je text strukturován a napsán, jaká je jeho obsahová stránka, jaké je členění textu, využití obrazového materiálu a typografické zpracování textu, jak je uvedeno výše, koresponduje i s požadavky plynoucími z didaktických zásad.

# 4 TVORBA UČEBNÍHO TEXTU

## 4.1 Nástroje použité při tvorbě učebního textu

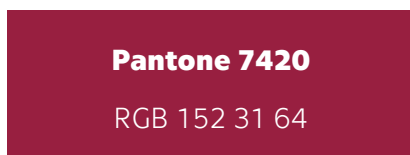
Učební text byl vytvořen pomocí nástroje LaTeX, který je určen k sazbě vědeckých a matematických dokumentů a který se vyznačuje vysokou typografickou kvalitou výsledných dokumentů. Velkou předností tohoto nástroje je také sazba matematických rovnic. LaTeX dokáže snadno měnit vlastnosti a rozložení textu, automaticky vytvářet obsah, různé seznamy, interaktivní odkazy mezi obsahem a kapitolami, křížové odkazy na části dokumentu, obrázky, tabulky apod., dokáže generovat seznam použité literatury. V závislosti na druhu (třídě) dokumentu je text automaticky formátován.

Obrázky a schémata vložená do učebního textu byla vytvořena v softwaru AutoCAD, což je jeden z dostupných CAD systémů pro počítačem podporované projektování a konstruování. Pro znázornění letadel, která jsou součástí některých obrázků, byl použit software AviPLAN a jeho knihovna poskytující mj. pohledy na různé typy letadel.

## 4.2 Grafická úprava vytvořeného učebního textu

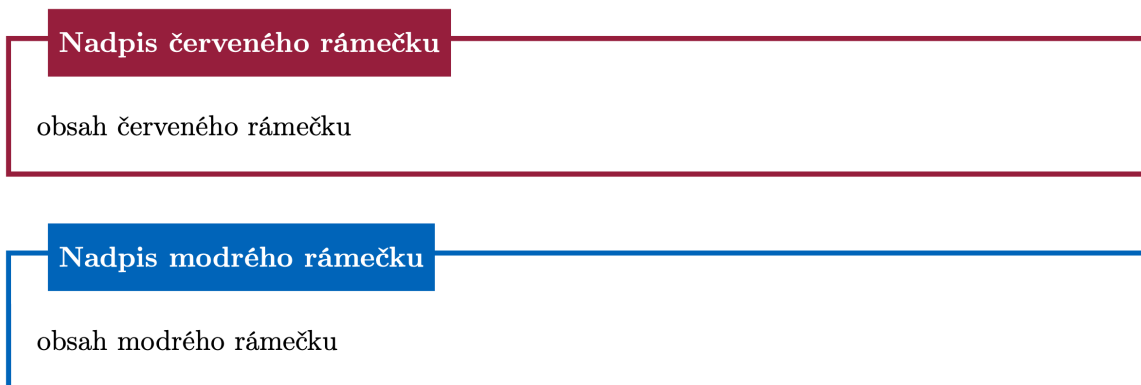
Pro vytvořený učební text byla v nástroji LaTeX zvolena třída dokumentu *book*, která pracuje s kapitolami začínajícími na nových stránkách podobně jako v knihách. Pro lepší přehlednost a orientaci v textu jsou kapitoly rozděleny na podkapitoly v podobě *section*. V záhlaví každé strany je pro přehlednost uvedena aktuální kapitola a její název. Prostý text je napsaný patkovým písmem o velikosti 11 bodů. Nadpisy kapitol a podkapitol jsou napsány větším a tučným písmem.

Základní barvou používanou pro text jednotlivých odstavců, nadpisy, popisy obrázků a tabulek, záhlaví a zápatí je černá barva. Pro zvýraznění důležitých částí a vytvořené obrázky byly zvoleny dvě barvy, a to základní barva jednotného vizuálního stylu ČVUT v Praze modrá *Pantone 300* a tmavě červená doplňková barva *Pantone 7420*, viz obr. 7.



Obrázek 7 Barvy použité ve vytvořeném učebním textu [18]

Pro zdůraznění nejdůležitějších vztahů a zákonů byly použity barevné rámečky – v uvedeném modrém a červeném odstínu (viz obr. 8). Každý rámeček má stejnou barvou podbarvené záhlaví, ve kterém je uveden název. Barevné rámečky byly vytvořeny pomocí knihovny *TikZ*.





Obrázek 8 Barevné rámečky použité ve vytvořeném učebním textu

Ve vytvořeném učebním textu je množství rovnic, resp. vztahů pro výpočet různých veličin. Důležité matematické vztahy jsou spolu s jejich popisem vloženy do zmíněných barevných rámečků, méně důležité jsou uvedeny na samostatných řádcích bez dalšího zvýraznění. Veškeré vztahy jsou číslovány ve tvaru  $x.y$ , kde  $x$  je číslo kapitoly a  $y$  číslo vztahu v dané kapitole. Tento systém usnadňuje orientaci v textu a umožňuje snadné odkazování na vztahy z jiných míst v textu. Stejná logika číslování, tedy číslování ve tvaru  $x.y$ , bylo použito i pro obrázky a tabulky.

Zadání početních příkladů bylo vloženo do světle šedých boxů, které zlepšují orientaci v příkladech a vizuálně oddělují zadání a řešení příkladů. Jednotlivé příklady jsou číslovány ve tvaru  $x.y$ , kde  $x$  je číslo kapitoly a  $y$  pořadové číslo příkladu v kapitole.

Ke snadnější orientaci v textu slouží i použité symboly, viz tab. 1. Všechny symboly byly vybrány z knihovny *fontawesome* a mají jednotný vzhled, tj. kulatý tvar, velikost a barvu. Jako barva symbolů byla zvolena modrá *Pantone 300*. Pro motivaci byl zvolen symbol terče (*bullseye*), pro shrnutí symbol vykřičníku (*exclamation-circle*), pro kontrolní otázky symbol otazníku (*question-circle*) a pro doporučenou literaturu symbol plus (*plus-circle*).

Tabulka 1 Symboly použité ve vytvořeném učebním textu

Symbol	Název	Význam
	motivace	uvedení do problematiky, nastínění obsahu kapitoly
	shrnutí	stručný přehled učiva kapitoly
	kontrolní otázky	otázky k ověření učiva dané kapitoly
	doporučená literatura	přehled zdrojů k učivu kapitoly a jeho rozšíření

## 4.3 Ukázky vytvořeného učebního textu

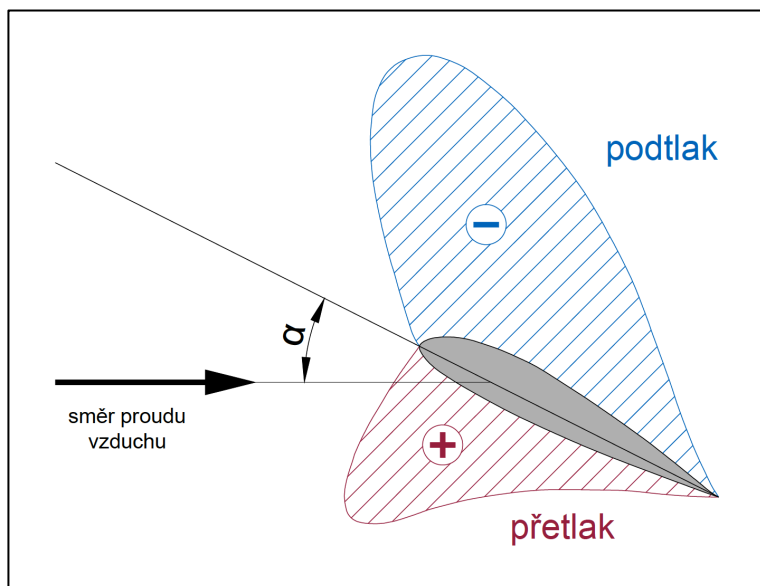
Na začátku každé kapitoly je uvedena krátká motivace. Jedná se pouze o jeden odstavec textu s tučně zvýrazněným nadpisem doplněným o symbol terče. Ukázka motivace k jedné z kapitol vytvořeného učebního textu je vidět na obr. 9.

### 🎯 Motivace

Prostředím, ve kterém se pohybuje letadlo, je zemská atmosféra. Aby bylo možné pochopit principy létání, je nutné se nejprve seznámit s vlastnostmi atmosféry a vzduchu v ní obsaženém. Atmosféra Země se z hlediska vertikálního členění dělí na jednotlivé vrstvy, které se odlišují svými vlastnostmi. Pro potřeby letectví se používá model atmosféry, který vystihuje převládající poměry v atmosféře a podle kterého je možné počítat různé fyzikální veličiny týkající se vzduchu v atmosféře. Toho se využívá např. pro určování výšky letadla v závislosti na tlaku vzduchu. Hustota vzduchu ovlivňuje vztlakovou sílu nadlehčující balóny a vzducholodě v atmosféře, což lze vysvětlit pomocí Archimedova zákona.

Obrázek 9 Ukázka motivace

Hlavní část jednotlivých kapitol tvoří výklad učiva rozdělený do podkapitol a dále členěný na odstavce. Mezi souvislé textové části jsou zařazeny tabulky a obrázky znázorňující různá schémata k dané problematice. Všechny vytvořené obrázky jsou provedeny v jednotných barvách uvedených výše. Příklad jednoho z nakreslených schémat je vidět na obr. 10.



Obrázek 10 Ukázka schematického obrázku



Vzhledem k obsahu vytvořeného učebního textu bylo nutné do textu zařadit řadu matematických vztahů a fyzikálních zákonů. Důležité fyzikální zákony a rovnice převzaté z učiva středoškolské fyziky jsou vloženy do červených rámečků s podbarveným nadpisem, viz obr. 11. Důležité matematické vztahy týkající se oboru letectví jsou vloženy do modrých rámečků se stejně podbarveným nadpisem, viz obr. 12.

### Druhý Newtonův zákon (zákon síly)

Časová změna hybnosti tělesa je rovna síle, která na těleso působí.

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{d(m\vec{v})}{dt} \quad (4.3)$$

Obrázek 11 Ukázka červeného rámečku pro fyzikální zákony a rovnice

### Tah dvouproudového motoru

Tah dvouproudového motoru je dán jako:

$$F_T = \dot{m}_{ob} \cdot w_{ob} + (\dot{m}_g + \dot{m}_p) w_{tr} - \dot{m}_v \cdot w_L, \quad (4.15)$$

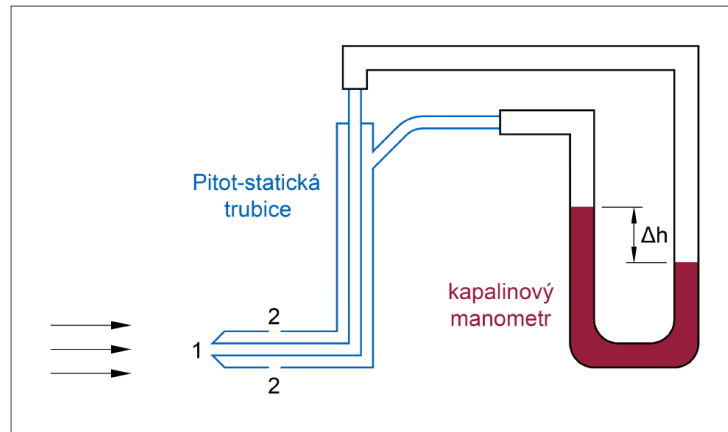
kde  $\dot{m}_{ob}$  je hmotnostní tok vzduchu protékajícího obtokovým kanálem,  $w_{ob}$  je výstupní rychlost obtokového vzduchu,  $\dot{m}_g$  je hmotnostní tok vzduchu protékajícího generátorem,  $\dot{m}_p$  je hmotnostní tok paliva,  $w_{tr}$  je výstupní rychlost spalin,  $\dot{m}_v$  je hmotnostní tok vzduchu vstupujícího do motoru ( $\dot{m}_v = \dot{m}_{ob} + \dot{m}_g$ ) a  $w_L$  je rychlost letu.

Obrázek 12 Ukázka modrého rámečku pro matematické vztahy z oboru letectví

Teoretické poznatky jsou doplněny o řešené příklady. Zadání příkladu tvoří text ve světle šedém boxu, příp. ještě doplněný o schematický obrázek. Následuje postup řešení a výpočet příkladu, viz obr. 13.

### Příklad 2.2

Určete rychlost proudění vzduchu v okolí Pitot-statické trubice, pokud je rozdíl výšek hladin v manometrické trubici tvaru U roven 1,5 cm. Uvažujte hustotu vzduchu  $1,225 \text{ kg m}^{-3}$  a manometr naplněný rtutí o hustotě  $13,534 \text{ g cm}^{-3}$ .



### Řešení

Rovnoběžně s nabíhajícím proudem vzduchu ① se měří celkový tlak vzduchu  $p_c$ , který je součtem statického a dynamického tlaku, a kolmo k proudu vzduchu ② se měří statický (atmosférický) tlak vzduchu  $p_s$ .

$$\left. \begin{array}{l} \textcircled{1} \quad p_1 = p_c = p_s + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \\ \textcircled{2} \quad p_2 = p_s \end{array} \right\} p_1 - p_2 = p_c - p_s$$

Rozdíl tlaků  $p_1$  a  $p_2$  je dán rozdílem výšek hladin rtuti v ramenech manometrické trubice.

$$p_1 - p_2 = \Delta h (\rho_{Hg} - \rho) g$$

Rychlost proudění vzduchu se získá z rovnice pro celkový tlak vzduchu.

$$v = \sqrt{\frac{2(p_c - p_s)}{\rho}}$$

Rozdíl celkového a statického tlaku je dán jako rozdíl tlaků  $p_1$  a  $p_2$ .

$$v = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}$$

Diference tlaků se vyjádří pomocí rozdílu tlaků z manometrické trubice.

$$v = \sqrt{\frac{2\Delta h (\rho_{Hg} - \rho) g}{\rho}}$$

$$\{v\} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,015 \cdot (13534 - 1,225) \cdot 9,80665}{1,225}}$$

$$\underline{\underline{v \doteq 57 \text{ m s}^{-1}}}$$

Obrázek 13 Ukázka řešeného příkladu

V závěru kapitol je krátké shrnutí učiva tvořené jedním odstavcem textu s tučně zvýrazněným nadpisem doplněným o symbol vykřičníku. Ukázka shrnutí učiva jedné kapitoly vytvořeného učebního textu je vidět na obr. 14.

### **!** Shrnutí

Atmosféra je plynný obal Země sahající od zemského povrchu do výšky několika desítek tisíc kilometrů, přičemž z pohledu letectví je nejdůležitější troposféra a spodní část stratosféry. Pro potřeby jednotných výpočtů byl mezinárodně přijat model atmosféry zvaný mezinárodní standardní atmosféra, který vystihuje převládající poměry v atmosféře. Dle tohoto modelu je nulová výška na úrovni průměrné výšky hladiny moře, kde jsou definovány konstantní hodnoty základních meteorologických prvků, mj. teploty, tlaku a hustoty vzduchu. Pro jednotlivé veličiny jsou stanoveny jejich průběhy v závislosti na výšce. Změny tlaku vzduchu s rostoucí výškou se využívají pro indikaci výšky barometrickým výškoměrem, přičemž závisí na nastaveném referenčním tlaku (QNH, QFE, QNE). Prostředky lehčí než vzduch, mezi které patří balóny a vzducholodě, jsou schopny letu díky aerostatické vztlakové síle, kterou je možné matematicky vyjádřit aplikací Archimedova zákona.

Obrázek 14 Ukázka shrnutí

Po shrnutí následují kontrolní otázky. Jedná se o několik očíslovaných otázek k ověření znalostí učiva dané kapitoly s tučně zvýrazněným nadpisem doplněným o symbol otazníku, viz obr. 15.

### **?** Kontrolní otázky

1. Jaký je účel pohonné jednotky?
2. Jaké fyzikální zákony souvisí s tahovou silou pohonné jednotky?
3. Co je to hmotnostní tok a v jakých jednotkách se udává?
4. Co je to tah pohonné jednotky?
5. Jak vzniká tah u vrtulového pohonu?
6. Jak vzniká tah u proudového pohonu?
7. Jaké doby pracovního cyklu má čtyřdobý zážehový motor?
8. Co jsou to motory s kontinuálním pracovním cyklem?
9. Jaké jsou základní části jednoproudového motoru a jak tento motor funguje?
10. Jaké jsou základní části dvouproudového motoru a jak tento motor funguje?
11. Co udává obtokový poměr?
12. Co jsou to turbínové motory hřídelové a k čemu se využívají?
13. Jak funguje náporový motor?
14. Co je to propulsní účinnost a tepelná účinnost pohonné jednotky?

Obrázek 15 Ukázka kontrolních otázek

Na úplném konci kapitol je seznam doporučené literatury, který tvoří několik publikací k dané problematice s tučně zvýrazněným nadpisem doplněným o symbol plus, viz obr. 16.

**+ Doporučená literatura**

BROŽ, Václav. *Aerodynamika nízkých rychlostí*. Vyd. 5. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-010-2347-8.

DRAXLER, Karel. *Přístrojové systémy letadel II*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-010-2484-9.

HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika*. 2. přepracované vydání. Brno: VUTIUM, 2019. ISBN 978-80-214-4123-1.

SVOBODA, Emanuel. *Přehled středoškolské fyziky*. 4., upr. vyd. Praha: Prometheus, 2005. ISBN 978-80-7196-307-3.

VĚK, Vratislav a Jana CELERINOVÁ. *Letadlové systémy*. Vyd. 2. přeprac. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-010-2501-2.

Obrázek 16 Ukázka doporučené literatury

# Závěr

Tvorba učebních textů je poměrně náročný proces, neboť při psaní takového textu nejde o pouhý záznam určitých poznatků konkrétního oboru, ale kromě toho je nutné zohlednit celou řadu aspektů. V první řadě je nutné se zaměřit na to, co má být obsahem učebního textu a komu má být tento text určen.

Aby bylo možné naplnit cíl práce, to jest vytvořit učební text orientovaný na vybraná témata z oboru letecká doprava, bylo třeba se vedle odborné technické roviny zaměřit i na rovinu pedagogickou. Z toho důvodu je první část práce ryze teoretická a obsahuje poznatky týkající se tvorby učebních textů, které vznikly jakožto výsledek provedené rešerše odborné literatury zaměřené na pedagogiku a didaktiku.

V rámci teoretické části práce byla identifikována a objasněna hlavní východiska tvorby učebních textů. Dále byly popsány vlastnosti a požadavky na tvorbu učebních textů, které je třeba zohlednit, aby byla naplněna didaktická funkce učebních textů. Jednotlivé požadavky byly specifikovány a konkretizovány a byly podkladem pro praktickou část práce.

Tvorba vlastního učebního textu, tedy praktická část práce, vycházela z teoretických zásad. Text byl napsán tak, aby byla mj. zachována logická návaznost jednotlivých poznatků, dodržena správná struktura, obsah byl správný po odborné stránce, byla použita náležitá terminologie, byl vhodně využit obrazový materiál a text byl kvalitně graficky zpracován.

Vytvořený učební text „Letecká propedeutika“ s podnázvem „Úvod do studia letecké dopravy“ pokrývá vybraná témata letecké dopravy a zahrnuje poznatky z oblastí atmosféra, aerodynamika, konstrukce letadel, pohonné jednotky a letiště.

Učební text je možné využít jak žáky středních odborných škol s patřičným zaměřením, tak i začínajícími studenty vysokých škol. Text poskytuje přehledně zpracované základní poznatky z vybraných témat doplněné o řešené příklady aplikované na danou problematiku.

Předpokladem je skutečné využití vytvořeného učebního textu, minimálně pro studenty prvního ročníku Fakulty dopravní ČVUT v Praze. Záměrem je text postupně rozšířit o další témata, která s ohledem na rozsah práce zatím nebyla zpracována a která jsou součástí sylabu předmětu.

# Seznam použité literatury

- [1] KOLÁŘ, Zdeněk. *Výkladový slovník z pedagogiky: 583 vybraných hesel*. Praha: Grada, 2012. ISBN 978-80-247-3710-2.
- [2] LEPIL, Oldřich. *Teorie a praxe tvorby výukových materiálů: zvyšování kvality vzdělávání učitelů přírodovědných předmětů*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2010. ISBN 978-80-244-2489-7.
- [3] PODLAHOVÁ, Libuše. *Didaktika pro vysokoškolské učitele*. Praha: Grada, 2012. Pedagogika (Grada). ISBN 978-80-247-4217-5.
- [4] VANĚČEK, David. *Didaktika technických odborných předmětů*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2016. ISBN 978-80-01-05991-3.
- [5] Zákon č. 561/2004 Sb., o předškolním, základním, středním, vyšším odborném a jiném vzdělávání (školský zákon). In: *Sbírka zákonů*. ISSN 1211-1244.
- [6] *Národní ústav pro vzdělávání* [online]. Praha: Národní ústav pro vzdělávání, školské poradenské zařízení a zařízení pro další vzdělávání pedagogických pracovníků, c2011–2020 [cit. 2020-09-25]. Dostupné z: <http://www.nuv.cz>
- [7] ZORMANOVÁ, Lucie. *Výukové metody v pedagogice*. Praha: Grada, 2012. Pedagogika (Grada). ISBN 978-80-247-4100-0.
- [8] MAŇÁK, Josef. *Stručný nástin metodiky tvořivé práce ve škole*. Brno: Paido, 2001. ISBN 80-731-5002-6.
- [9] MAŇÁK, Josef a Vlastimil ŠVEC. *Výukové metody*. Brno: Paido, 2003. ISBN 80-731-5039-5.
- [10] VALIŠOVÁ, Alena, Hana KASÍKOVÁ a Miroslav BUREŠ. *Pedagogika pro učitele. 2., rozšířené a aktualizované vyd.* Praha: Grada, 2011. Pedagogika (Grada). ISBN 978-80-247-3357-9.
- [11] ZORMANOVÁ, Lucie. *Obecná didaktika: pro studium a praxi*. Praha: Grada, 2014. Pedagogika (Grada). ISBN 978-80-247-4590-9.
- [12] MAŇÁK, Josef. *Nárys didaktiky*. Brno: Masarykova univerzita, 1990. ISBN 80-210-0210-7.
- [13] SKALKOVÁ, Jarmila. *Obecná didaktika*. Praha: Grada, 2007. Pedagogika (Grada). ISBN 978-80-247-1821-7.
- [14] PRŮCHA, Jan. *Moderní pedagogika. 5., aktualiz. a dopl. vyd.* Praha: Portál, 2013. ISBN 978-80-262-0456-5.
- [15] HUSA, Jiří. *Oborová didaktika 3* [online]. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2018 [cit. 2020-09-25]. ISBN 978-80-213-2860-0. Dostupné z: <https://www.ivp.czu.cz/dl/65282?lang=cs>

- [16] *Rámcový vzdělávací program 37-41-M/01 Provoz a ekonomika dopravy* [online]. Praha: Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy, 2008 [cit. 2020-09-25]. Dostupné z: <http://zpd.nuov.cz/RVP/ML/RVP%203741M01%20Provoz%20a%20ekonomika%20dopravy.pdf>
- [17] Fakulta dopravní [online]. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta dopravní, 2020 [cit. 2020-09-25]. Dostupné z: <https://www.fd.cvut.cz>
- [18] *Grafický manuál identity ČVUT* [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze [cit. 2020-09-25]. Dostupné z: <https://www.cvut.cz/sites/default/files/content/e254fb38-e72d-463b-8c9f-cb0435416f29/cs/20201112-graficky-manual-identity-cvut-v-praze.pdf>

## Seznam obrázků

Obrázek 1 Kategorizace výukových metod [8] .....	14
Obrázek 2 Klasifikace organizačních forem výuky [12] .....	16
Obrázek 3 Rozdělení materiálních didaktických prostředků [4].....	17
Obrázek 4 Strukturní prvky učebnic [2].....	19
Obrázek 5 Požadavky na učební texty [2].....	20
Obrázek 6 Struktura kapitol vytvořeného učebního textu.....	27
Obrázek 7 Barvy použité ve vytvořeném učebním textu [18] .....	29
Obrázek 8 Barevné rámečky použité ve vytvořeném učebním textu .....	30
Obrázek 9 Ukázka motivace .....	31
Obrázek 10 Ukázka schematického obrázku .....	31
Obrázek 11 Ukázka červeného rámečku pro fyzikální zákony a rovnice.....	32
Obrázek 12 Ukázka modrého rámečku pro matematické vztahy z oboru letectví.....	32
Obrázek 13 Ukázka řešeného příkladu .....	33
Obrázek 14 Ukázka shrnutí.....	34
Obrázek 15 Ukázka kontrolních otázek .....	34
Obrázek 16 Ukázka doporučené literatury.....	35



# Seznam tabulek

Tabulka 1 Symboly použité ve vytvořeném učebním textu.....	30
--	----

# **Příloha**

Následující příloha obsahuje vytvořený učební text s názvem „Letecká propedeutika – úvod do studia letecké dopravy“.

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE



# LETECKÁ PROPEDEUTIKA

Úvod do studia letecké dopravy

Ing. Sébastien Lán

# Předmluva

Letectví je velmi širokým oborem, a proto nelze v rámci této publikace obsáhnout veškeré jeho oblasti. Učební text „Letecká propedeutika“ pokrývá vybraná témata týkající se letecké dopravy. Jednotlivé kapitoly se zaměřují na zemskou atmosféru, její složení, základní meteorologické prvky a jejich výpočet, princip letu prostředků lehčích i těžších než vzduch, výpočet aerostatické a aerodynamické vztlakové síly, dělení letadel, hlavní části letadel, řízení letadel, letadlové systémy, pohonné jednotky používané v letectví a s tím související nejdůležitější veličiny, letiště a jejich základní části a charakteristiky.

Účelem tohoto textu je seznámit čtenáře s vybranými oblastmi letecké dopravy, vysvětlit základní principy létání s využitím poznatků z učiva středoškolské fyziky a na příkladech ukázat postupy řešení a výpočty základních veličin týkajících se vysvětlované problematiky. Text je určen pro studenty středních odborných škol zaměřených na leteckou dopravu a také pro studenty vysokých škol, kteří se studiem letecké dopravy teprve začínají a kterým má text posloužit jako úvod do jejich studia.

Učební text je rozdělen do několika základních kapitol, které jsou dále členěny na menší logické celky. Na začátku každé kapitoly je krátký motivační text, který čtenáře uvede do problematiky dané kapitoly. Stěžejní částí kapitol je studijní text, který obsahuje výklad, definice a vzorce pro výpočet veličin. Následují vzorové příklady k dané problematice, jejichž součástí je i postup řešení a správný výsledek. V závěru každé kapitoly je její krátké shrnutí, kontrolní otázky, na které by student měl být schopen po prostudování textu odpovědět, a seznam doporučené literatury pro získání hlubších znalostí.

*Sébastien Lán*  
autor učebního textu

# Obsah

<b>1</b>	<b>Atmosféra</b>	<b>4</b>
1.1	Atmosféra Země a její složení . . . . .	4
1.2	Mezinárodní standardní atmosféra . . . . .	6
1.3	Tlaková výška . . . . .	9
1.4	Aerostaty . . . . .	10
1.5	Řešené příklady . . . . .	11
1.6	Závěr . . . . .	17
<b>2</b>	<b>Aerodynamika</b>	<b>19</b>
2.1	Proudění . . . . .	19
2.2	Síly působící na letadlo . . . . .	22
2.3	Řešené příklady . . . . .	26
2.4	Závěr . . . . .	29
<b>3</b>	<b>Konstrukce letadel</b>	<b>31</b>
3.1	Dělení letadel . . . . .	31
3.2	Hlavní části letounů . . . . .	32
3.3	Řízení letadel a mechanizace křídla . . . . .	34
3.4	Letadlové systémy . . . . .	36
3.5	Závěr . . . . .	38

<b>4 Pohonné jednotky</b>	<b>41</b>
4.1 Účel pohonné jednotky . . . . .	41
4.2 Vrtulový pohon . . . . .	43
4.3 Motory s přerušovaným pracovním cyklem . . . . .	44
4.4 Motory s kontinuálním pracovním cyklem . . . . .	46
4.5 Řešené příklady . . . . .	52
4.6 Závěr . . . . .	55
<b>5 Letiště</b>	<b>57</b>
5.1 Dělení a označování letišť . . . . .	57
5.2 Dráha . . . . .	58
5.3 Pojezdové dráhy a odbavovací plocha . . . . .	61
5.4 Řešené příklady . . . . .	62
5.5 Závěr . . . . .	65
<b>Literatura</b>	<b>67</b>

# Kapitola 1

## Atmosféra

### 🎯 Motivace

Prostředím, ve kterém se pohybují letadla, je zemská atmosféra. Aby bylo možné pochopit principy létání, je nutné se nejprve seznámit s vlastnostmi atmosféry a vzduchu v ní obsaženém. Atmosféra Země se z hlediska vertikálního členění dělí na jednotlivé vrstvy, které se odlišují svými vlastnostmi. Pro potřeby letectví se používá model atmosféry, který vystihuje převládající poměry v atmosféře a podle kterého je možné počítat různé fyzikální veličiny týkající se vzduchu v atmosféře. Toho se využívá např. pro určování výšky letadla v závislosti na tlaku vzduchu. Hustota vzduchu ovlivňuje vztlakovou sílu nadlehčující balóny a vzducholodě v atmosféře, což lze vysvětlit pomocí Archimedova zákona.

### 1.1 Atmosféra Země a její složení

Atmosféra Země je plynný obal planety Země, se kterou je svázána gravitační silou. Atmosféra Země sahá od zemského povrchu po horní hranici ve výšce několika desítek tisíc kilometrů. Atmosféru tvoří především směs plynů označovaná jako vzduch, který kromě plynů suché a čisté atmosféry obsahuje i vodní páru a případně další znečišťující plynné příměsi. V atmosféře se také nachází tzv. atmosférický aerosol, který tvoří pevné a kapalné částice vody a dalších látek. Zastoupení jednotlivých plynů suché a čisté atmosféry je vidět v tabulce 1.1.

Z hlediska vertikálního členění se atmosféra dělí na různé vrstvy dle určitého kritéria. Jedním z používaných kritérií je průběh teploty vzduchu s výškou. Podle tohoto kritéria se atmosféra dělí na troposféru, stratosféru, mezosféru, termosféru a exosféru.

Troposféra je spodní vrstvou atmosféry a ve středních zeměpisných šířkách sahá průměrně do výšky 11 km (nad rovníkem do výšky 16 až 18 km, nad póly do výšky 7 až 9 km). Vyznačuje se klesající teplotou vzduchu s rostoucí výškou. Teplota v troposféře klesá v průměru

Tabulka 1.1: Složení atmosféry

Plyn (chemický vzorec)	Objemová procenta
dusík (N <sub>2</sub> )	78,084
kyslík (O <sub>2</sub> )	20,946
argon (Ar)	0,944
oxid uhličitý (CO <sub>2</sub> )	0,040 55
neon (Ne)	0,001 818
helium (He)	0,000 524
metan (CH <sub>4</sub> )	0,000 186
krypton (Kr)	0,000 114
vodík (H <sub>2</sub> )	0,000 05
oxid dusný (N <sub>2</sub> O)	0,000 033

o 0,65 °C na 100 m výšky. Troposféra obsahuje téměř veškerou vodní páru, a proto v ní dochází ke vzniku mlh, oblaků, bouřkové činnosti, vzniku a vypadávání srážek. Dochází v ní k neustálému vertikálnímu promíchávání vzduchu. Přibližně 3/4 hmotnosti atmosféry Země jsou soustředěny právě v troposféře. Nad troposférou je přechodová vrstva označovaná jako tropopauza, která odděluje troposféru od stratosféry.

Stratosféra leží v průměrné výšce 10 až 50 km. Do výšky 20 až 25 km se teplota vzduchu s rostoucí výškou nepatrně zvyšuje a odtud dále roste, přičemž maximum se pohybuje okolo 0 °C. Je to způsobeno přítomností ozonu, který pohlcuje sluneční ultrafialové záření a zahřívá se. Horní hranicí stratosféry je stratopauza, která ji odděluje od mezoféry.

Mezoféra sahá zhruba od výšky 50 km do výšky 80 km. Teplota vzduchu v mezoféře s rostoucí výškou klesá. V blízkosti horní hranice ve vysokých zeměpisných šířkách dosahuje v létě hodnot −80 až −90 °C a v zimě hodnot −40 až −50 °C. Níže položenou mezoféru od výše položené termosféry odděluje mezopauza.

Termosféra leží zhruba mezi 80 až 90 km a 200 km nad zemským povrchem, avšak její vertikální členění se v literatuře různí. Teplota se do výšky 200 až 300 km zvyšuje, a to v rozmezí od 200 K až do 1 000 K. Termosféru a exosféru odděluje termopauza.

Exosféra tvoří vnější část atmosféry, sahá do výšek kolem 20 000 až 35 000 km a přechází v meziplanetární prostor. V exosféře se nachází převážně volné atomy vodíku a helia.

Dalším používaným kritériem pro vertikální členění atmosféry je její chemické složení. Podle chemického složení se vymezují dvě vrstvy atmosféry, a to homosféra a heterosféra. Homosféra sahá od zemského povrchu do výšky přibližně 90 km. Relativní zastoupení plynů vzduchu se v homosféře podstatně nemění, a to díky turbulentnímu promíchávání vzduchu. Existují však



látky, jejichž množství je i v místech homosféry proměnné. Mezi tyto výjimky patří např. ozon a oxid uhličitý, jejichž koncentrace se mění v čase i prostoru, či vodní pára, která je soustředěna převážně ve spodních 10 km atmosféry. Nad homosférou se nachází heterosféra, která je charakteristická tím, že se v ní uplatňuje difúzní rovnováha. Koncentrace plynů se tedy v heterosféře různí, u těžších plynů ubývá s výškou rychleji než u plynů lehčích. Z toho důvodu se ve vysokých výškách atmosféry vyskytuje převážně atomární vodík.

Podle koncentrace atmosférických iontů a volných elektronů se atmosféra dělí na neutrosféru a ionosféru. Neutrosféra se rozkládá mezi zemským povrchem a výškou 60 až 70 km. V této části atmosféry je koncentrace iontů natolik malá, že nepůsobuje odraz krátkých rádiových vln. Nad neutrosférou se nachází ionosféra, která sahá do výšky přibližně 1 000 km. Jedná se o ionizovanou část atmosféry, ve které je většina částic ionizována (nachází se v plazmatickém stavu). Vzhledem k vysoké koncentraci iontů a volných elektronů dochází k odrazu některých frekvencí elektromagnetického vlnění zpět k zemskému povrchu. Těto skutečnosti je využíváno při rádiovém spojení.

## 1.2 Mezinárodní standardní atmosféra

Za účelem jednotné kalibrace tlakových výškoměrů, výpočtů a porovnání letových charakteristik letadel, projektování letadel a raket a sestavování balistických křivek byl mezinárodně přijat model atmosféry označovaný jako mezinárodní standardní atmosféra. Mezinárodní standardní atmosféra vystihuje převládající poměry v atmosféře reprezentativní během celého roku ve všech zeměpisných šířkách. Byla přijata Mezinárodní organizací pro civilní letectví (ICAO) v roce 1952.

Model mezinárodní standardní atmosféry vychází z několika základních předpokladů. Nulová výška je dle mezinárodní standardní atmosféry na úrovni průměrné výšky hladiny moře. V této nulové výšce jsou definovány konstantní hodnoty základních meteorologických prvků, jako je teplota vzduchu, tlak vzduchu, hustota vzduchu a tíhové zrychlení, viz tabulku 1.2. Jedním z dalších předpokladů mezinárodní standardní atmosféry je platnost stavové rovnice.

Tabulka 1.2: Hodnoty meteorologických prvků v nulové výšce dle MSA

Meteorologický prvek	Hodnota v nulové výšce
teplota vzduchu	$T_0 = 288,15 \text{ K}; t_0 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$
tlak vzduchu	$p_0 = 101\,325 \text{ Pa}$
hustota vzduchu	$\rho_0 = 1,225 \text{ kg m}^{-3}$
tíhové zrychlení	$g_0 = 9,806\,65 \text{ m s}^{-2}$

Průběh teploty vzduchu v závislosti na výšce je definován pomocí konstantních teplotních gradientů pro jednotlivé vrstvy atmosféry. Od hladiny moře, kde je teplota vzduchu 288,15 K, do výšky 11 km klesá teplota vzduchu o 0,65 °C na 100 m výšky. Tato závislost je matematicky vyjádřena rovnicí 1.1. Ve výškách 11 až 20 km je nulový teplotní gradient. V rozmezí těchto výšek je tedy konstantní teplota vzduchu o hodnotě 216,65 K.

### Teplota vzduchu

Teplota vzduchu ve výškách od hladiny moře do 11 km dle mezinárodní standardní atmosféry je dána jako:

$$T_h = T_0 + \beta \cdot h, \quad (1.1)$$

kde  $T_0$  je teplota vzduchu v nulové výšce,  $\beta$  je teplotní gradient  $-0,0065 \text{ K m}^{-1}$  a  $h$  je výška.

Tlak vzduchu nebo též atmosférický tlak lze definovat jako sílu působící v daném místě atmosféry kolmo na jednotkovou plochu a vyvolanou tíhou vzduchového sloupce, který sahá od dané výšky po horní hranici atmosféry. Čím je výška pomyslného sloupce větší, tím je i atmosférický tlak větší. Proto tlak vzduchu dosahuje nejvyšší hodnoty na hladině moře a s rostoucí výškou klesá. Díky stlačitelnosti vzduchu není průběh závislosti tlaku vzduchu na výšce lineární, ale mocninný. Dle mezinárodní standardní atmosféry je hodnota tlaku vzduchu v nulové výšce 1013,25 hPa. Matematicky je závislost tlaku vzduchu na výšce vyjádřena následujícími rovnicemi.

### Tlak vzduchu

Tlak vzduchu dle mezinárodní standardní atmosféry je ve výškách od hladiny moře do 11 km dán jako:

$$p_h = p_0 \left[ 1 + \frac{\beta \cdot h}{T_0} \right]^{-\frac{g_0}{\beta \cdot R}} \quad (1.2)$$

a ve výškách nad 11 km do 20 km jako:

$$p_h = p_{11} \exp \left[ -\frac{g_0}{R \cdot T_h} (h - 11\,000) \right], \quad (1.3)$$

kde  $p_0$  je tlak vzduchu v nulové výšce,  $\beta$  je teplotní gradient  $-0,0065 \text{ K m}^{-1}$ ,  $h$  je výška,  $T_0$  je teplota vzduchu v nulové výšce,  $g_0$  je tíhové zrychlení v nulové výšce,  $R$  je měrná plynová konstanta ( $287,05287 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ),  $p_{11}$  je tlak vzduchu ve výšce 11 km vypočítaný dle rovnice 1.2 a  $T_h$  je teplota vzduchu ve výšce  $h$ . Teplota  $T_h$  v rovnici 1.3 je konstanta o hodnotě 216,65 K, neboť v dané vrstvě atmosféry je nulový teplotní gradient.

Hustota vzduchu, podobně jako tlak vzduchu, klesá s rostoucí výškou, přičemž průběh této závislosti je mocninný. Na hladině moře je dle mezinárodní standardní atmosféry hustota vzduchu  $1,225 \text{ kg m}^{-3}$ . S rostoucí výškou hustota vzduchu klesá a lze ji vypočítat s využitím stavové rovnice ideálního plynu, viz níže.

### Hustota vzduchu

Hustota vzduchu ve výšce  $h$  dle mezinárodní standardní atmosféry je:

$$\rho_h = \frac{p_h}{R \cdot T_h}, \quad (1.4)$$

kde  $p_h$  je tlak vzduchu ve výšce  $h$ ,  $R$  je měrná plynová konstanta ( $287,052 \text{ 87 J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) a  $T_h$  je teplota vzduchu ve výšce  $h$ .

Ve výše uvedených rovnicích pro výpočet základních meteorologických prvků dle mezinárodní standardní atmosféry by správně měla být za výšku dosazována geopotenciální výška. Nicméně pro uvažované vrstvy atmosféry – troposféru a spodní stratosféru není rozdíl mezi geopotenciální a geometrickou výškou významný, a proto lze ve výpočtech uvažovat i geometrickou výšku. Ve výšce 11 km je rozdíl mezi geopotenciální a geometrickou výškou 19 m, ve výšce 20 km se jedná o rozdíl 63 m.

Rychlost zvuku v atmosféře je rychlost, jakou se šíří zvukové vlny v tomto prostředí, tedy ve vzduchu. Lze ji vypočítat pomocí rovnice 1.5. Jak je vidět, rychlost šíření zvuku závisí na teplotě vzduchu. Z toho důvodu je průběh závislosti rychlosti zvuku na výšce nad mořem stejný jako průběh závislosti teploty vzduchu na výšce. V troposféře, kde teplota vzduchu lineárně klesá od hladiny moře do výšky 11 km, s rostoucí výškou rychlost zvuku klesá. Ve spodní stratosféře (ve výškách 11 až 20 km) je nulový teplotní gradient, a proto i rychlost zvuku je konstantní.

### Rychlost zvuku

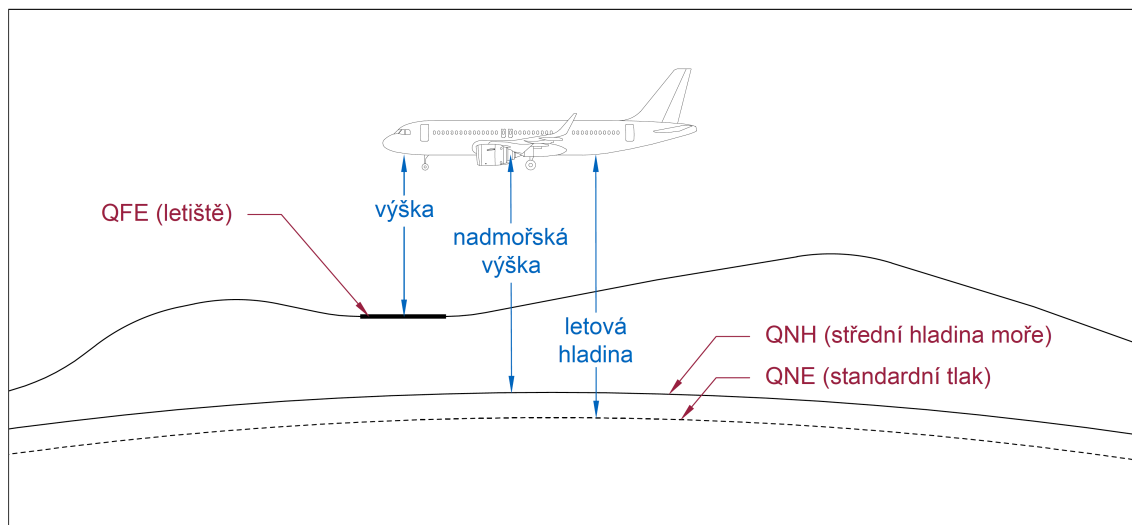
Rychlost zvuku je dána jako:

$$a = \sqrt{\kappa \cdot R \cdot T} \approx 20\sqrt{T}, \quad (1.5)$$

kde  $\kappa$  je adiabatický exponent (1,4),  $R$  je měrná plynová konstanta ( $287,052 \text{ 87 J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) a  $T$  je teplota.

### 1.3 Tlaková výška

Úbytek tlaku vzduchu s rostoucí výškou se v letectví využívá pro určení výšky letadla. K indikaci výšky se používá barometrický výškoměr, který je jedním ze základních palubních přístrojů. Jedná se o aerometrický přístroj, který indikuje výšku letadla na základě měření velikosti atmosférického tlaku a nastaveném referenčním tlaku. Výškoměr je kalibrován podle mezinárodní standardní atmosféry a v závislosti na nastaveném referenčním tlaku může ukazovat nadmořskou výšku, výšku nad referenčním bodem nebo může být použit pro indikaci letových hladin, viz obr. 1.1. Nastavovaný referenční tlak, kterým může být tlak QNH, QFE či QNE, se vztahuje k nulové výšce. Ve chvíli, kdy je atmosférický tlak stejný jako referenční tlak, výškoměr ukazuje nulovou výšku.



Obrázek 1.1: Výšky zobrazované barometrickým výškoměrem

Tlak QNH je atmosférický tlak redukováný na střední hladinu moře podle podmínek mezinárodní standardní atmosféry, používaný pro nastavení tlakové stupnice výškoměru k zobrazení nadmořské výšky. Jinými slovy, tlak QNH je aktuální tlak v dané oblasti přepočtený na hladinu moře. Je-li na výškoměru nastavený tlak QNH, výškoměr ukazuje skutečnou nadmořskou výšku v daném místě.

Tlak QFE je atmosférický tlak vztážený k výšce letiště nad mořem. Pokud je na výškoměru nastavený referenční tlak QFE, zobrazovaná výška odpovídá výšce letadla nad referenčním bodem – letišťem. Po přistání na letišti výškoměr indikuje nulovou výšku.

Tlak QNE je standardní tlak o hodnotě 1013,25 hPa a využívá se pro let v letové hladině. Při nastavení výškoměru na standardní referenční tlak je indikována tlaková výška, která odpovídá určité letové hladině. Letová hladina je hladina konstantního atmosférického tlaku, vztážená ke stanovenému základnímu údaji tlaku a oddělená od ostatních takových hladin stanovenými tlakovými intervaly.

Letová hladina vyjadřuje výšku letadla při standardním tlaku vyjádřenou ve stovkách stop. Označuje se jako „FL xxx“, kde FL je zkratka pro letovou hladinu z angl. flight level a xxx je dvou nebo třímístné číslo vyjadřující výšku ve stovkách stop. Letové hladiny se počítají po 500 stopách, proto označení každé letové hladiny končí číslicí 0 nebo 5. Např. letová hladina FL 320 odpovídá výšce  $320 \cdot 10^2$  ft. Jedna stopa (angl. feet) je rovna 0,3048 m.

## 1.4 Aerostaty

Letadlo lehčí než vzduch neboli aerostat je jakékoli letadlo nesené v atmosféře především aerostatickými silami. Existují dva základní typy aerostatů, a to balón a vzducholod'. Balón je bezmotorové letadlo lehčí než vzduch, vzducholod' je letadlo s pohonem lehčí než vzduch.

Balón je nejstarším vzduchoplavebným prostředkem. První let člověka byl proveden 15. 10. 1783 horkovzdušným balónem. Letu balónu s lidskou posádkou předcházela ještě let, při kterém byla na palubě pouze zvířata. Konstrukteři balónu byli bratři Joseph-Michel Montgolfier a Jacques Étienne Montgolfier. Téhož roku byl proveden i první let s posádkou balónem naplněným vodíkem, jehož vynálezce byl Jacques Charles. Postupem času vznikly i další typy balónů. Někdy se jednotlivé typy balónů nazývají podle jejich vynázečů. Horkovzdušný balón se tak označuje jako montgolfiéra, balón naplněný vodíkem jako charliéra, balón s oddělenými komorami pro vodík a teplý vzduch jako roziéra (de Rozier), balón naplněný svítiplynem jako greeniéra (Green).

O století později se odehrál první let vzducholodě. Konstruktorem první fungující vzducholodě byl Henri Giffard. Vzducholod' byla 44 m dlouhá a o její pohon se staral lehký parní stroj. První vzlet se uskutečnil v roce 1852 ve Francii. Vzducholodě byly postupně zdokonalovány, místo parního stroje se využíval elektromotor a později spalovací motor, který měl zcela zásadní význam pro rozvoj vzducholodí. Větší a výkonnější vzducholodě se využívaly v dopravním letectví. Konstruktorem nejvýznamnějších vzducholodí před první světovou válkou byl Ferdinand von Zeppelin. Jednotlivé typy vzducholodí byly označovány písmeny LZ (Luftschiff Zeppelin) a pořadovým číslem. První z nich, vzducholod' LZ 1, vzlétla v roce 1900 nad Bodamským jezerem. Asi nejznámější se stala vzducholod' LZ 129 Hindenburg, která byla 245 m dlouhá a pojala až 72 cestujících. Její provoz skončil katastrofou během přistávacího manévru. Celá vzducholod' nakonec shořela, protože nosným plynem nebylo bezpečné helium, ale hořlavý vodík.

Let prostředků lehčích než vzduch lze vysvětlit díky Archimedovu zákonu. Jedná se o zákon popisující vztlakovou sílu působící na těleso ponořené do tekutiny. Platí tedy nejen pro kapaliny, ale též pro plyny. V případě balónů a vzducholodí je plynem, v němž jsou tyto prostředky ponořeny, vzduch.

### Archimedův zákon

Těleso ponořené do tekutiny, která je v klidu, je nadlehčováno silou rovnající se tíze tekutiny stejného objemu, jako je ponořená část tělesa.

Velikost aerostatické vztlakové síly působící na aerostaty v atmosféře lze vypočítat dle následující rovnice, která je matematickým vyjádřením Archimedova zákona. Objem části ponořeného tělesa představuje objem aerostatu, který je celý ponořen v okolní tekutině – vzduchu. Hustota figurující v této rovnici je hustota vzduchu v daném místě atmosféry. Velikost vztlakové síly tedy bude záviset na výšce nad mořem, neboť s rostoucí výškou klesá hustota vzduchu.

### Aerostatická vztlaková síla

Vztlaková síla působící na aerostat je:

$$F_{vz} = V \cdot \rho_v \cdot g, \quad (1.6)$$

kde  $V$  je objem aerostatu,  $\rho_v$  je hustota vzduchu a  $g$  je tíhové zrychlení.

## 1.5 Řešené příklady

### Příklad 1.1

Vypočítejte teplotu a hustotu vzduchu dle mezinárodní standardní atmosféry ve výšce 9 200 m.

### Řešení

Teplota vzduchu  $T_h$  ve výšce 9 200 m se vypočítá dle rovnice 1.1.

$$T_h = T_0 + \beta \cdot h$$

$$\{T_h\} = 288,15 - 0,0065 \cdot 9200$$

$$\underline{\underline{T_h = 228,35 \text{ K}}}$$

Hustota vzduchu  $\rho_h$  ve výšce 9 200 m se vypočítá dle rovnice 1.4, do které je třeba dosadit teplotu  $T_h$  vypočítanou v předchozím kroku a tlak vzduchu  $p_h$  vyjádřit pomocí vztahu 1.2.

$$\rho_h = \frac{p_h}{R \cdot T_h}$$

$$\rho_h = \frac{p_0 \left[ 1 + \frac{\beta \cdot h}{T_0} \right]^{-\frac{g_0}{\beta \cdot R}}}{R \cdot T_h}$$

$$\{\rho_h\} = \frac{101325 \left[ 1 - \frac{0,0065 \cdot 9200}{288,15} \right] \frac{9,80665}{0,0065 \cdot 287,05287}}{287,05287 \cdot 228,35}$$

$$\underline{\underline{\rho_h \doteq 0,455 \text{ kg m}^{-3}}}$$

**Příklad 1.2**

Vypočítejte tlak vzduchu ve výšce, ve které je teplota vzduchu 232,25 K. Uvažujte podmínky mezinárodní standardní atmosféry.

**Řešení**

Z rovnice pro výpočet teploty 1.1 je nutné vyjádřit výšku  $h$ . Vzhledem k tomu, že zadaná teplota 232,25 K je větší než mezní teplota 216,65 K, jedná se o výšku  $h$  ležící ve spodních 11 km atmosféry.

$$T_h = T_0 + \beta \cdot h \quad \Rightarrow \quad h = -\frac{T_0 - T_h}{\beta}$$

Tlak vzduchu  $p_h$  ve výšce  $h$  se vypočítá dle rovnice 1.2, přičemž za výšku  $h$  je třeba dosadit výšku vyjádřenou v předchozím kroku.

$$p_h = p_0 \left[ 1 + \frac{\beta \cdot h}{T_0} \right]^{-\frac{g_0}{\beta \cdot R}}$$

$$p_h = p_0 \left[ 1 - \frac{\beta \cdot \frac{T_0 - T_h}{\beta}}{T_0} \right]^{-\frac{g_0}{\beta \cdot R}}$$

$$p_h = p_0 \left[ 1 - \frac{T_0 - T_h}{T_0} \right]^{-\frac{g_0}{\beta \cdot R}}$$

$$\{p_h\} = 101325 \left[ 1 - \frac{288,15 - 232,25}{288,15} \right] \frac{9,80665}{0,0065 \cdot 287,05287}$$

$$\underline{\underline{p_h \doteq 32\,616 \text{ Pa}}}$$

**Příklad 1.3**

Jakou rychlostí se bude šířit zvuk v atmosféře ve výšce 5 km nad mořem? Uvažujte podmínky mezinárodní standardní atmosféry.

**Řešení**

Rychlost zvuku v atmosféře lze vypočítat pomocí rovnice 1.5, do které je nutné dosadit teplotu vzduchu.

$$a = \sqrt{\kappa \cdot R \cdot T}$$

Teplota vzduchu se určí dle rovnice 1.1 pro výšku 5 km nad mořem dle mezinárodní standardní atmosféry.

$$a = \sqrt{\kappa \cdot R \cdot (T_0 + \beta \cdot h)}$$

$$\{a\} = \sqrt{1,4 \cdot 287,05287 \cdot (288,15 - 0,0065 \cdot 5000)}$$

$$\underline{\underline{a \doteq 320,5 \text{ m s}^{-1}}}$$

**Příklad 1.4**

Jaké letové hladině odpovídá výška 11 000 m?

**Řešení**

Zadanou výšku 11 000 m je nejprve nutné převést na stopy.

$$11\,000 \text{ m} = \frac{11\,000}{0,3048} \text{ ft} \doteq 36\,089 \text{ ft}$$

Letové hladiny se počítají po 500 ft, proto je třeba výšku patřičně zaokrouhlit. Následně je možné výšku vyjádřit ve stovkách stop, tedy ve tvaru FL xxx.

$$36\,089 \text{ ft} \doteq 360 \cdot 10^2 \text{ ft} \Rightarrow \underline{\underline{\text{FL } 360}}$$



**Příklad 1.5**

Balón naplněný vodíkem o hustotě  $89,9 \cdot 10^{-6} \text{ g cm}^{-3}$  má tvar koule o poloměru 2 m. Hmotnost konstrukce balónu (bez nosného plynu) je 1,5 kg. Vypočítejte vztlakovou sílu působící na vypuštěný balón nad hladinou moře. Dále určete maximální hmotnost nákladu, který je balón schopný nést ve výšce 4 km nad mořem. Uvažujte podmínky mezinárodní standardní atmosféry.

**Řešení**

Vztlaková síla působící na balón nad hladinou moře se vypočítá dle rovnice 1.6. Za hustotu vzduchu  $\rho_h$  se dosadí hustota vzduchu v nulové výšce  $1,225 \text{ kg m}^{-3}$ .

$$F_{vz} = V \cdot \rho_h \cdot g$$

$$F_{vz} = \frac{4\pi}{3} \cdot r^3 \cdot \rho_0 \cdot g$$

$$\{F_{vz}\} = \frac{4\pi}{3} \cdot 2^3 \cdot 1,225 \cdot 9,80665$$

$$\underline{\underline{F_{vz} \doteq 402,6 \text{ N}}}$$

Výpočet maximální hmotnosti nákladu, který je balón schopný nést ve výšce 4 km nad mořem, vychází z předpokladu rovnosti tíhové a vztlakové síly. Tíhová síla je dána jako součin hmotnosti a tíhového zrychlení. Celková hmotnost se skládá z několika dílčích hmotností, a to hmotnosti konstrukce balónu  $m_k$ , hmotnosti nosného plynu  $m_{H_2}$  a hledané maximální hmotnosti nákladu  $m_n$ . Vztlaková síla se vypočítá dle rovnice 1.6. Hustota  $\rho_h$  figurující ve vztahu pro výpočet vztlakové síly je hustota vzduchu ve výšce 4 km, která se vypočítá dle rovnice 1.4.

$$F_g = F_{vz}$$

$$m \cdot g = V \cdot \rho_h \cdot g$$

$$(m_k + m_{H_2} + m_n) \cdot g = \frac{4\pi}{3} \cdot r^3 \cdot \rho_h \cdot g$$

$$m_k + m_{H_2} + m_n = \frac{4\pi}{3} \cdot r^3 \cdot \frac{p_h}{R \cdot T_h}$$

Teplota vzduchu  $T_h$  a tlak vzduchu  $p_h$  se vyjádří pomocí rovnic 1.1 a 1.2. Hmotnost nosného plynu  $m_{H_2}$  je dána součinem hustoty vodíku a objemu balónu.

$$m_k + m_{H_2} + m_n = \frac{4\pi}{3} \cdot r^3 \cdot \frac{p_0 \left[1 + \frac{\beta \cdot h}{T_0}\right]^{-\frac{g_0}{\beta \cdot R}}}{R(T_0 + \beta \cdot h)}$$

$$m_n = \left[ \frac{4\pi}{3} \cdot r^3 \cdot \frac{p_0 \left[ 1 + \frac{\beta \cdot h}{T_0} \right]^{-\frac{g_0}{\beta \cdot R}}}{R(T_0 + \beta \cdot h)} \right] - (m_k + m_{H_2})$$

$$m_n = \left[ \frac{4\pi}{3} \cdot r^3 \cdot \frac{p_0 \left[ 1 + \frac{\beta \cdot h}{T_0} \right]^{-\frac{g_0}{\beta \cdot R}}}{R(T_0 + \beta \cdot h)} \right] - (m_k + \rho_{H_2} \cdot V)$$

$$m_n = \left[ \frac{4\pi}{3} \cdot r^3 \cdot \frac{p_0 \left[ 1 + \frac{\beta \cdot h}{T_0} \right]^{-\frac{g_0}{\beta \cdot R}}}{R(T_0 + \beta \cdot h)} \right] - \left( m_k + \rho_{H_2} \cdot \frac{4\pi}{3} \cdot r^3 \right)$$

V tomto kroku už jsou všechny veličiny na pravé straně rovnice známe, a proto je možné do rovnice dosadit hodnoty a vypočítat maximální hmotnost nákladu  $m_n$ .

$$\{m_n\} = \left[ \frac{4\pi}{3} \cdot 2^3 \cdot \frac{101325 \left[ 1 - \frac{0,0065 \cdot 4000}{288,15} \right] \frac{9,80665}{0,0065 \cdot 287,05287}}{287,05287 (288,15 - 0,0065 \cdot 4000)} \right] -$$

$$- \left( 1,5 + 0,0899 \cdot \frac{4\pi}{3} \cdot 2^3 \right)$$

$$\underline{\underline{m_n \doteq 22,9 \text{ kg}}}$$

### Příklad 1.6

Určete, jaké platící zatížení (užitečnou hmotnost) může nést horkovzdušný balón. Hmotnost konstrukce je 400 kg, objem balónu je 3 000 m<sup>3</sup> a teplota uvnitř něj je 100 °C. Balón letí ve výšce 1 000 m nad mořem. Uvažujte podmínky mezinárodní standardní atmosféry.

### Řešení

Výpočet maximální hmotnosti platícího zatížení vychází z předpokladu rovnosti tíhové a vztlakové síly. Tíhová síla je dána jako součin hmotnosti a tíhového zrychlení. Celková hmotnost  $m$  je součtem hmotnosti konstrukce balónu  $m_k$ , hmotnosti nosného plynu (horkého vzduchu)  $m_{hv}$  a hmotnosti platícího zatížení  $m_{pz}$ . Vztlaková síla se vypočítá dle rovnice 1.6. Hustota  $\rho_h$  figurující ve vztahu pro výpočet vztlakové síly je hustota vzduchu ve výšce 1 000 m, která se vypočítá dle rovnice 1.4. Hmotnost nosného plynu  $m_{hv}$  je dána součinem objemu balónu a hustoty nosného plynu.

$$\begin{aligned}
F_g &= F_{vz} \\
m \cdot g &= V \cdot \rho_h \cdot g \\
(m_k + m_{hv} + m_{pz}) \cdot g &= V \cdot \rho_h \cdot g \\
m_k + m_{hv} + m_{pz} &= V \cdot \rho_h \\
m_{pz} &= V \cdot \rho_h - (m_k + m_{hv}) \\
m_{pz} &= V \cdot \frac{p_h}{R \cdot T_h} - (m_k + m_{hv}) \\
m_{pz} &= V \cdot \frac{p_0 \left[ 1 + \frac{\beta \cdot h}{T_0} \right]^{-\frac{g_0}{\beta \cdot R}}}{R(T_0 + \beta \cdot h)} - (m_k + V \cdot \rho_{hv})
\end{aligned}$$

Hustotu nosného plynu (horkého vzduchu) lze s pomocí stavové rovnice vyjádřit následovně.

$$\rho_{hv} = \frac{p_{hv}}{R \cdot T_{hv}}$$

Teplota horkého vzduchu  $T_{hv}$  je zadána. Tlak horkého vzduchu uvnitř balónu  $p_{hv}$  odpovídá atmosférickému tlaku, který lze na základě znalosti výšky  $h$  vypočítat pomocí rovnice 1.2.

$$p_{hv} = p_h = p_0 \left[ 1 + \frac{\beta \cdot h}{T_0} \right]^{-\frac{g_0}{\beta \cdot R}}$$

V dalším kroku je možné v rovnici pro výpočet maximální hmotnosti platícího zatížení  $m_{pz}$  vyjádřit hustotu horkého vzduchu  $\rho_{hv}$  pomocí výše uvedených vztahů pro výpočet teploty a tlaku horkého vzduchu.

$$\begin{aligned}
m_{pz} &= V \cdot \frac{p_0 \left[ 1 + \frac{\beta \cdot h}{T_0} \right]^{-\frac{g_0}{\beta \cdot R}}}{R(T_0 + \beta \cdot h)} - [m_k + V \cdot \rho_{hv}] \\
m_{pz} &= V \cdot \frac{p_0 \left[ 1 + \frac{\beta \cdot h}{T_0} \right]^{-\frac{g_0}{\beta \cdot R}}}{R(T_0 + \beta \cdot h)} - \left[ m_k + V \cdot \frac{p_{hv}}{R \cdot T_{hv}} \right] \\
m_{pz} &= V \cdot \frac{p_0 \left[ 1 + \frac{\beta \cdot h}{T_0} \right]^{-\frac{g_0}{\beta \cdot R}}}{R(T_0 + \beta \cdot h)} - \left[ m_k + V \cdot \frac{p_0 \left[ 1 + \frac{\beta \cdot h}{T_0} \right]^{-\frac{g_0}{\beta \cdot R}}}{R \cdot T_{hv}} \right] \\
\{m_{pz}\} &= 3000 \cdot \frac{\frac{9,80665}{101325} \left[ 1 - \frac{0,0065 \cdot 1000}{288,15} \right] \frac{0,0065 \cdot 287,05287}{287,05287 (288,15 - 0,0065 \cdot 1000)}}{287,05287 (100 + 273,15)} - \\
&\quad - \left[ 400 + 3000 \cdot \frac{\frac{9,80665}{101325} \left[ 1 - \frac{0,0065 \cdot 1000}{288,15} \right] \frac{0,0065 \cdot 287,05287}{287,05287 (288,15 - 0,0065 \cdot 1000)}}{287,05287 (100 + 273,15)} \right] \\
\underline{m_{pz}} &\doteq \underline{418 \text{ kg}}
\end{aligned}$$

## 1.6 Závěr

### ! Shrnutí

Atmosféra je plynný obal Země sahající od zemského povrchu do výšky několika desítek tisíc kilometrů, přičemž z pohledu letectví je nejdůležitější troposféra a spodní část stratosféry. Pro potřeby jednotných výpočtů byl mezinárodně přijat model atmosféry zvaný mezinárodní standardní atmosféra, který vystihuje převládající poměry v atmosféře. Dle tohoto modelu je nulová výška na úrovni průměrné výšky hladiny moře, kde jsou definovány konstantní hodnoty základních meteorologických prvků, mj. teploty, tlaku a hustoty vzduchu. Pro jednotlivé veličiny jsou stanoveny jejich průběhy v závislosti na výšce. Změny tlaku vzduchu s rostoucí výškou se využívají pro indikaci výšky barometrickým výškoměrem, přičemž závisí na nastaveném referenčním tlaku (QNH, QFE, QNE). Prostředky lehčí než vzduch, mezi které patří balóny a vzducholoď, jsou schopny letu díky aerostatické vztlakové síle, kterou je možné matematicky vyjádřit aplikací Archimedova zákona.

### ? Kontrolní otázky

1. Co je to atmosféra?
2. Jaké je objemové zastoupení plynů v atmosféře?
3. Na jaké vrstvy se dělí atmosféra podle průběhu teploty s výškou? Čím se jednotlivé vrstvy vyznačují?
4. Do jakých výšek sahá homosféra a heterosféra? Jaký je mezi nimi rozdíl?
5. Co je to mezinárodní standardní atmosféra a proč byla definována?
6. Jaký je teplotní gradient ve spodních 11 km atmosféry dle mezinárodní standardní atmosféry?
7. Co je to tlak vzduchu a jak se mění jeho velikost s rostoucí výškou dle mezinárodní standardní atmosféry?
8. Jak se mění hustota vzduchu s rostoucí výškou dle mezinárodní standardní atmosféry?
9. Jakou výšku bude ukazovat výškoměr, pokud se na něm nastaví referenční tlak QNE, QNH, QFE?
10. Na čem závisí rychlost šíření zvuku v atmosféře?
11. Jaká letadla využívají principu Archimedova zákona v atmosféře?
12. Na čem závisí velikost vztlakové síly působící na aerostaty?

### + Doporučená literatura

DRAXLER, Karel. *Přístrojové systémy letadel II*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-010-2484-9.

DVOŘÁK, Petr. *Letecká meteorologie*. Cheb: Svět křídel, 2004. ISBN 80-868-0809-2.

*Elektronický meteorologický slovník výkladový a terminologický (eMS)* [online]. Česká meteorologická společnost. Dostupné z: <http://slovník.cmes.cz>

HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika*. 2. přepracované vydání. Brno: VUTIUM, 2019. ISBN 978-80-214-4123-1.

ICAO. *Doc 7488-CD Manual of the ICAO Standard Atmosphere: extended to 80 kilometres (262 500 feet)*. 3rd ed. 1993. ISBN 92-9194-004-6.

MINISTERSTVO DOPRAVY ČESKÉ REPUBLIKY. *Letecký předpis: Pravidla létání L2*.

SVOBODA, Emanuel. *Přehled středoškolské fyziky*. 4., upr. vyd. Praha: Prometheus, 2005. ISBN 978-80-7196-307-3.

VĚK, Vratislav a Jana CELERINOVÁ. *Letadlové systémy*. Vyd. 2. přeprac. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-010-2501-2.

## Kapitola 2

# Aerodynamika

### 🎯 Motivace

Aerodynamika je část fyziky zabývající se pohybem plynů a jejich účinkem na tělesa, která jsou v nich ponořena. Díky aerodynamice je možné objasnit princip létání letadel těžších než vzduch. Stěžejní jsou rovnice kontinuity a Bernoulliho rovnice, které lze aplikovat i na proudící vzduch. Díky těmto rovnicím je možné vysvětlit, že celkový tlak vzduchu závisí na atmosférickém tlaku vzduchu v daném místě atmosféry a na dynamickém tlaku vzduchu souvisejícím s pohybem letadla ve vzduchu. Tlaky vzduchu se na letadlech měří speciálními sondami, čehož se využívá např. pro určování rychlosti letadla. Díky aerodynamickému tvaru křídla není obtékání vzduchu nad a pod křídlem stejné, což vede ke vzniku přetlaku a podtlaku. Tím vzniká na křídle vztlak, který působí proti tíhové síle a udržuje letadlo ve vzduchu. Kromě vztlaku a tíhy na letadlo působí tah a odpor. Aby mohlo letadlo letět ustáleným letem, musí být všechny tyto síly v rovnováze.

### 2.1 Proudění

Aerodynamika je část fyziky zabývající se dynamickým působením plynů (vzduchu) při obtékání těles a umožňuje vysvětlit principy letu letadel těžších než vzduch, tzv. aerodynů. Pohybuje-li se vzduch převážně v jednom směru, lze hovořit o proudění vzduchu.

Z rovnice kontinuity, na základě zákona zachování hmotnosti, vyplývá, že každým průřezem proudové trubice proteče za jednotku času stejné množství tekutiny. To lze matematicky vyjádřit jako konstantní hmotnostní průtok, který je dán jako součin obsahu průřezu, rychlosti proudu a hustoty tekutiny. Pokud se jedná o nestlačitelné médium (ideální kapalinu či plyn), je hustota ve všech místech konstantní a vztah lze zjednodušit na součin obsahu průřezu a rychlosti proudu, který se označuje jako objemový průtok.

### Rovnice kontinuity

Při ustáleném proudění tekutiny je hmotnostní průtok v libovolném průřezu proudové trubice konstantní.

$$Q_m = \text{konst.} \quad (2.1)$$

Hmotnostní průtok  $Q_m$  lze vyjádřit jako:

$$Q_m = S \cdot v \cdot \rho, \quad (2.2)$$

kde  $S$  je obsah průřezu,  $v$  je rychlost proudění a  $\rho$  je hustota tekutiny.

Důsledkem rovnice kontinuity je rozdílná rychlost proudění tekutiny v širším a užším průřezu trubice. Za předpokladu nestlačitelné tekutiny jsou velikosti rychlostí proudící tekutiny v trubici nestejného průřezu v opačném poměru než obsahy těchto průřezů.

Ve vodorovné trubici s nestejnými průřezy se mění rychlost proudící tekutiny. V zúžené části trubice, tzn. v části s menším obsahem průřezu, proudí tekutina vyšší rychlostí, a tím pádem má větší kinetickou energii než v širší části trubice. V souladu se zákonem zachování mechanické energie musí být přírůstek kinetické energie kompenzován úbytkem energie potenciální tak, aby celková mechanická energie daná součtem kinetické a potenciální energie zůstala konstantní. Tuto zákonitost popisuje Bernoulliho rovnice, která udává vztah mezi jednotlivými druhy mechanické energie.

### Bernoulliho rovnice

**Energetická forma Bernoulliho rovnice** je dána jako:

$$\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} = e, \quad (2.3)$$

kde  $\frac{v^2}{2}$  představuje pohybovou energii,  $\frac{p}{\rho}$  tlakovou energii a  $e$  celkovou energii, přičemž všechny složky energie jsou vztaženy na jednotku hmoty.

Energetické formě je ekvivalentní **tlaková forma Bernoulliho rovnice** ve tvaru:

$$\frac{1}{2} \rho v^2 + p = p_c, \quad (2.4)$$

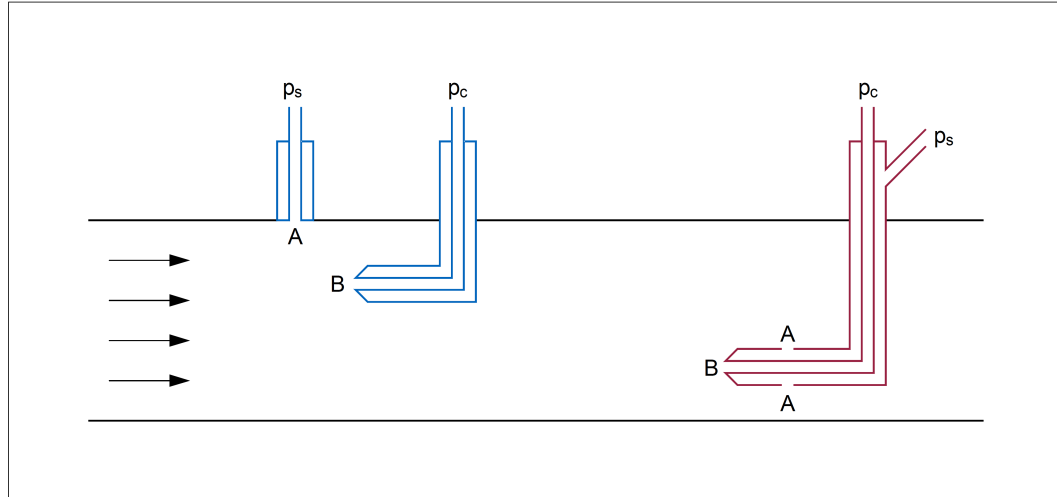
kde  $\frac{1}{2} \rho v^2$  je dynamický tlak,  $p$  je statický tlak a  $p_c$  je celkový tlak. Každý člen v této rovnici představuje energii koncentrovanou v jednotkovém objemu.

Bernoulliho rovnice vyjádřená rovnicí 2.4 umožňuje jednoduché nepřímé měření rychlosti, a to stanovením dynamického tlaku z rozdílu tlaku celkového a statického. Rychlost je pak dána jako:

$$v = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}, \quad (2.5)$$

kde  $\Delta p$  je rozdíl celkového a statického tlaku a  $\rho$  je hustota vzduchu. Přímé měření dynamického tlaku není možné, a proto se na letadle měří tlak celkový a tlak statický. Statický tlak představuje tlak okolního vzduchu neboli atmosférický tlak. Měří se sondou s otvorem kolmo k nabíhajícímu proudu vzduchu. Celkový tlak je součtem atmosférického a dynamického tlaku a měří se sondou s otvorem umístěným proti směru nabíhajícího proudu vzduchu.

Statický (atmosférický) a celkový tlak se na letadlech měří buď dvěma samostatnými sondami, nebo jednou kombinovanou sondou. Obě možná uspořádání sond jsou schematicky naznačena na obr. 2.1. Levá část obrázku znázorňuje dvě samostatné sondy. První z nich je statická sonda (statický port) pro měření statického tlaku  $p_s$  s otvorem A umístěným kolmo k nabíhajícímu proudu vzduchu. Druhou sondou je Pitotova trubice pro měření celkového tlaku  $p_c$  s otvorem B směřovaným proti proudu vzduchu. Na pravé straně obrázku je Pitot-statická trubice kombinující obě sondy.



Obrázek 2.1: Sondy pro měření statického a celkového tlaku vzduchu

Rychlost se v letectví často udává také pomocí Machova čísla, což je bezrozměrné číslo vyjadřující poměr rychlosti proudění (rychlosti letu) k rychlosti zvuku. Je-li Machovo číslo menší než 1, jedná se o rychlost podzvukovou. Naopak v případě Machova čísla většího než 1 se hovoří o rychlosti nadzvukové. Vzhledem k tomu, že rychlost zvuku není konstanta, platí Machovo číslo vždy pro daný stav atmosféry. Rychlost zvuku dle mezinárodní standardní atmosféry lze vypočítat pomocí vztahu 1.5.



### Machovo číslo

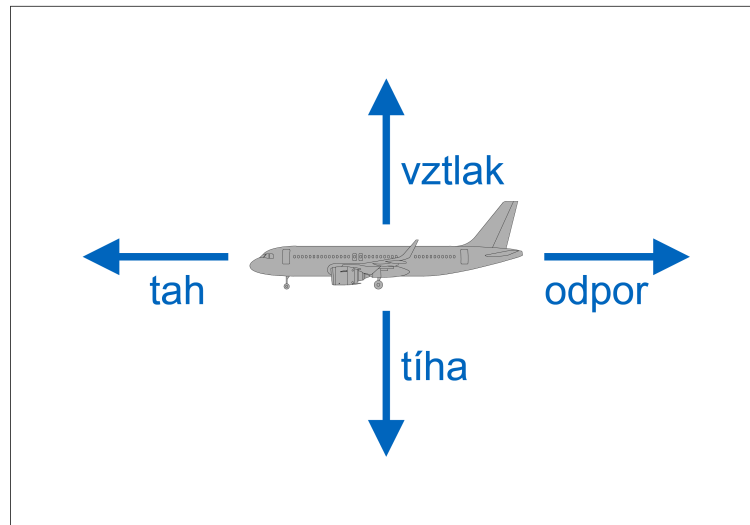
Machovo číslo je relativní číslo dané jako poměr:

$$M = \frac{v}{a}, \quad (2.6)$$

kde  $v$  je rychlost letu a  $a$  je rychlost zvuku.

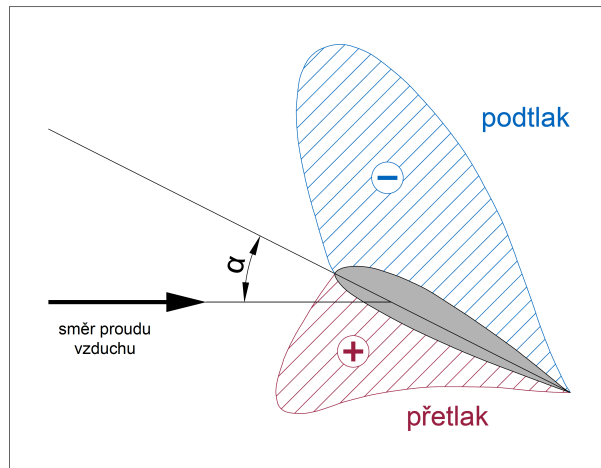
## 2.2 Síly působící na letadlo

Na letící letadlo působí čtyři základní síly – vztlak, tíha, tah a odpor, viz obr. 2.2. Aby letadlo letělo ustáleným letem, tzn. aby nestoupalo či neklesalo a aby nezrychlovalo či nezpomalovalo, musí být tyto síly v rovnováze. Tíhová síla směřující k zemi musí být v rovnováze se vztlakovou silou směřující nahoru, která vzniká díky obtékání nosných ploch letadla vzduchem. Zároveň musí být odporová síla v rovnováze s tahovou silou generovanou pohonnými jednotkami. Tíhová síla je přímo úměrná hmotnosti letadla. Odporová síla překonávaná tahem letadla závisí na tvaru letadla a tření vzduchu o jeho povrch.



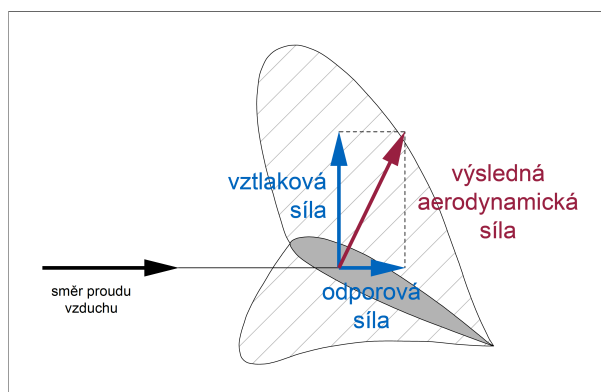
Obrázek 2.2: Síly působící na letadlo

Vztlaková síla letadla vzniká v důsledku obtékání vzduchu kolem jeho nosných ploch – křídel, přičemž klíčový je profil křídel, tj. tvar příčného průřezu. Příklad profilu křídla je vidět na obr. 2.3. Profil má aerodynamický tvar. Na náběžné hraně (na obrázku vlevo) je zaoblený, zesponu poměrně plochý, na horní straně naopak vyklenutý. Horní a spodní část profilu se sbíhá do ostré odtokové hrany (na obrázku vpravo). Nejdelší spojnice mezi náběžnou a odtokovou hranou se nazývá tětiva. Úhel  $\alpha$ , který svírá tětiva s proudem nabíhajícího proudu vzduchu, je tzv. úhel náběhu.



Obrázek 2.3: Profil křídla a tlakové rozložení

Křídlo letadla je při jeho pohybu obtékáno vzduchem, který proudí nad i pod křídlem. Vlivem zakřivení profilu dochází ke zhušťování proudnic na horní straně profilu. Horní strana profilu je obtékána vyšší rychlostí, naopak částice vzduchu na spodní části profilu jsou zpomalovány. Výsledkem je vznik podtlaku na horní straně profilu a přetlaku na spodní straně. Tlakové rozložení nad a pod profilem křídla je vidět na obr. 2.3. Tlakové rozdíly je možné vysvětlit díky Bernoulliho rovnici. Pokud vzduch proudí rychleji, musí klesnout tlak tak, aby byl přírůstek kinetické energie kompenzován úbytkem potenciální energie a naopak. Rychlejším prouděním vzduchu nad křídlem proto klesá tlak vzduchu a dochází v těchto místech k podtlaku (sání). Opačná situace nastává pod křídlem, kde dochází k přetlaku vzduchu. Výsledná síla působící na křídlo je vztlak, který je zhruba ze dvou třetin dán sáním nad křídlem a z jedné třetiny přetlakem pod křídlem. Vzhledem k tomu, že z větší části je vztlak způsoben podtlakem nad křídlem, neumísťují se nad křídlo žádná zařízení, jako jsou motory či zbraňové systémy.



Obrázek 2.4: Výsledná aerodynamická síla

Vztlaková síla je vždy kolmá k nabíhajícimu proudu vzduchu, odporová síla je vždy kolmá k vztlakové síle, resp. je rovnoběžná s nerušeným proudem vzduchu (viz obr. 2.4). Výsledná síla vyvozená ze vztlaku a odporu je výsledná aerodynamická síla. Jak je vidět na obrázku, výsledná aerodynamická síla  $\vec{R}$  je dána vektorovým součtem síly vztlakové  $\vec{L}$  a síly odporové

$\vec{D}$ . Vztlak se v literatuře běžně označuje písmenem L (z angl. lift) nebo písmenem Y, pro odpor se používá písmeno D (z angl. drag) nebo písmeno X.

$$\vec{R} = \vec{L} + \vec{D} \quad (2.7)$$

Velikost vztlaku závisí na dynamickém tlaku, součiniteli vztlaku a velikosti nosné plochy (ploše křídla). Dynamický tlak závisí na hustotě vzduchu a rychlosti. Čím vyšší je rychlost, tím větší je i aerodynamická vztlaková síla (vztlaková síla roste s druhou mocninou rychlosti). Je-li rychlost nulová, je nulová i vztlaková síla. Aby se letadlo vzneslo do vzduchu, musí mít dostatečnou rychlost pro dosažení vztlakové síly větší než je síla tíhová. Na velikost vztlakové síly má vliv i výška nad mořem, neboť dynamický tlak závisí na hustotě vzduchu, která není ve všech místech atmosféry stejná.

### Vztlaková síla

Aerodynamická vztlaková síla je dána jako:

$$L = q \cdot c_L \cdot S = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot c_L \cdot S, \quad (2.8)$$

kde  $q$  je dynamický tlak,  $\rho$  je hustota vzduchu,  $v$  je rychlost,  $c_L$  je součinitel vztlaku a  $S$  je nosná plocha.

Aerodynamická odporová síla se vypočítá obdobně jako síla vztlaková. Odporová síla závisí na dynamickém tlaku, resp. na hustotě vzduchu a rychlosti, dále na součiniteli odporu a nosné ploše křídla.

### Odporová síla

Aerodynamická odporová síla je dána jako:

$$D = q \cdot c_D \cdot S = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot c_D \cdot S, \quad (2.9)$$

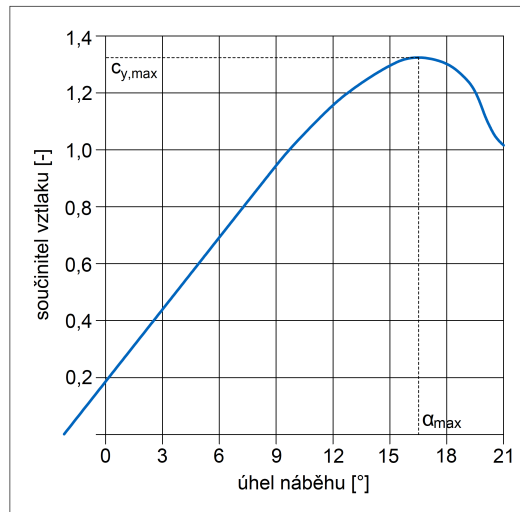
kde  $q$  je dynamický tlak,  $\rho$  je hustota vzduchu,  $v$  je rychlost,  $c_D$  je součinitel odporu a  $S$  je nosná plocha.

Součinitel vztlaku a součinitel odporu jsou bezrozměrná čísla. Součinitel vztlaku se většinou označuje jako  $c_L$  nebo  $c_Y$ , součinitel odporu jako  $c_D$  či  $c_X$ . Hodnoty součinitelů se určují na základě experimentálního měření v aerodynamickém tunelu nebo vyspělých simulacích obtékání. Hodnoty jsou dopočítány z naměřených hodnot ostatních veličin. Např. součinitel vztlaku se vypočítá jako:

$$c_L = \frac{2L}{\rho \cdot v^2 \cdot S}, \quad (2.10)$$

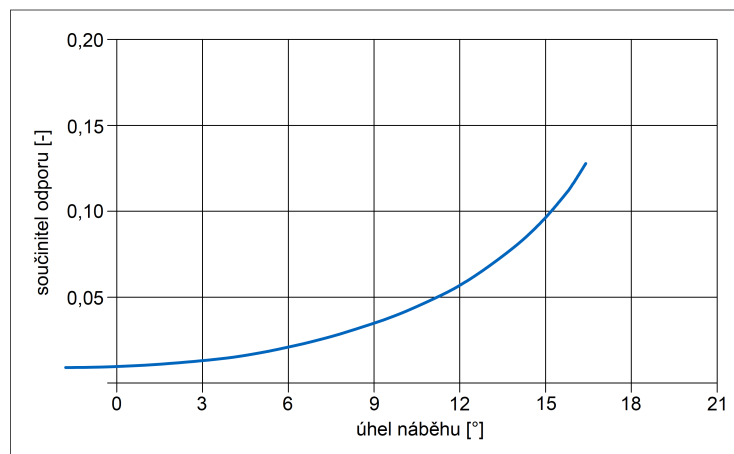
příčemž vztlková síla, hustota vzduchu, rychlost proudění a nosná plocha jsou naměřeny. Hodnota součinitele vztlaku závisí především na tvaru obtékaného tělesa, tj. na profilu křídla, a úhlu náběhu. Součinitel odporu se odvíjí od tvaru tělesa (tvarový odpor) a jeho povrchu (třecí odpor).

Jak je uvedeno výše, součinitel vztlaku závisí na úhlu náběhu. Tuto závislost udává tzv. vztlková čára, viz obr. 2.5. Zvětšováním úhlu náběhu lze dosáhnout většího součinitele vztlaku. Při kritickém úhlu náběhu  $\alpha_{max}$  je dosažen maximální součinitel vztlaku  $c_{y,max}$ . Po překročení kritického úhlu náběhu součinitel vztlaku prudce klesá. V takovém případě dochází k „odtržení“ proudu vzduchu. Proudění okolo křídla se poruší a dojde ke ztrátě vztlaku.



Obrázek 2.5: Vztlková čára

Křivka závislosti součinitele vztlaku na úhlu náběhu se nazývá odporová čára, viz obr. 2.6. Se zvětšujícím se úhlem náběhu roste součinitel odporu, a tedy i aerodynamický odpor.



Obrázek 2.6: Odporová čára

## 2.3 Řešené příklady

### Příklad 2.1

Vypočítejte, jakou rychlostí v  $\text{km h}^{-1}$  letí letoun ve výšce 10 400 m, pokud je celkový tlak 333,76 hPa. Uvažujte podmínky mezinárodní standardní atmosféry.

### Řešení

Z rovnice pro celkový tlak vzduchu, který je součtem statického a dynamického tlaku, je třeba vyjádřit rychlost.

$$p_c = p + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \quad \Rightarrow \quad v = \sqrt{\frac{2(p_c - p)}{\rho}}$$

Statický tlak  $p$  odpovídá atmosférickému tlaku  $p_h$  v zadané výšce a lze ho vypočítat vztahem 1.2. Hustotu vzduchu lze vyjádřit pomocí rovnice 1.4.

$$v = \sqrt{\frac{2(p_c - p_h)}{\rho_h}}$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \left[ p_c - p_0 \left[ 1 + \frac{\beta \cdot h}{T_0} \right]^{-\frac{g_0}{\beta \cdot R}} \right]}{\frac{p_h}{R \cdot T_h}}}$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \left[ p_c - p_0 \left[ 1 + \frac{\beta \cdot h}{T_0} \right]^{-\frac{g_0}{\beta \cdot R}} \right]}{\frac{p_0 \left[ 1 + \frac{\beta \cdot h}{T_0} \right]^{-\frac{g_0}{\beta \cdot R}}}{R \cdot (T_0 + \beta \cdot h)}}}$$

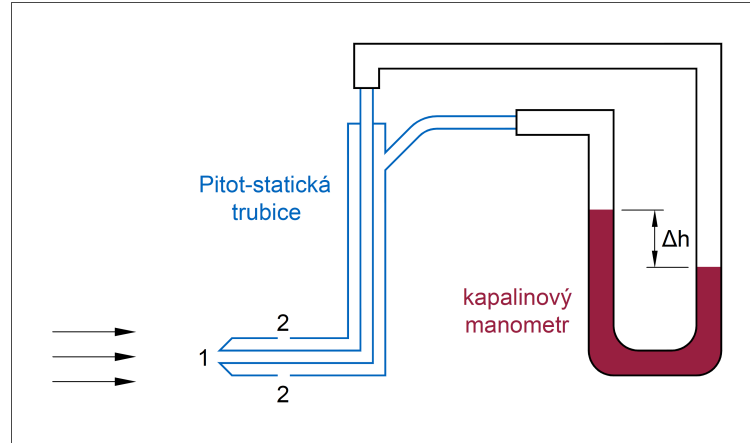
$$\{v\} = \sqrt{\frac{2 \left[ 33376 - 101325 \left[ 1 - \frac{0,0065 \cdot 10400}{288,15} \right] \frac{9,80665}{0,0065 \cdot 287,05287} \right]}{\frac{101325 \left[ 1 - \frac{0,0065 \cdot 10400}{288,15} \right] \frac{9,80665}{0,0065 \cdot 287,05287}}{287,05287 \cdot (288,15 - 0,0065 \cdot 10400)}}}$$

$$v \doteq 208,3 \text{ m s}^{-1}$$

$$\underline{\underline{v \doteq 750 \text{ km h}^{-1}}}$$

**Příklad 2.2**

Určete rychlost proudění vzduchu v okolí Pitot-statické trubice, pokud je rozdíl výšek hladin v manometrické trubici tvaru U roven 1,5 cm. Uvažujte hustotu vzduchu  $1,225 \text{ kg m}^{-3}$  a manometr naplněný rtuť o hustotě  $13,534 \text{ g cm}^{-3}$ .

**Řešení**

Rovnoběžně s nabíhajícíím proudem vzduchu ① se měří celkový tlak vzduchu  $p_c$ , který je součtem statického a dynamického tlaku, a kolmo k proudu vzduchu ② se měří statický (atmosférický) tlak vzduchu  $p_s$ .

$$\left. \begin{array}{l} \textcircled{1} \quad p_1 = p_c = p_s + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \\ \textcircled{2} \quad p_2 = p_s \end{array} \right\} p_1 - p_2 = p_c - p_s$$

Rozdíl tlaků  $p_1$  a  $p_2$  je dán rozdílem výšek hladin rtuti v ramenech manometrické trubice.

$$p_1 - p_2 = \Delta h (\rho_{Hg} - \rho) g$$

Rychlost proudění vzduchu se získá z rovnice pro celkový tlak vzduchu.

$$v = \sqrt{\frac{2(p_c - p_s)}{\rho}}$$

Rozdíl celkového a statického tlaku je dán jako rozdíl tlaků  $p_1$  a  $p_2$ .

$$v = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}$$

Diference tlaků se vyjádří pomocí rozdílu tlaků z manometrické trubice.

$$v = \sqrt{\frac{2\Delta h (\rho_{Hg} - \rho) g}{\rho}}$$

$$\{v\} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,015 \cdot (13534 - 1,225) \cdot 9,80665}{1,225}}$$

$$\underline{\underline{v \doteq 57 \text{ m s}^{-1}}}$$

**Příklad 2.3**

Vypočítejte Machovo číslo pro případ, kdy letadlo letí rychlostí  $820 \text{ km h}^{-1}$  ve výšce 9,5 km nad mořem. Uvažujte podmínky mezinárodní standardní atmosféry.

**Řešení**

Machovo číslo je dáno rovnicí 2.6 jako poměr rychlosti letu a rychlosti zvuku.

$$M = \frac{v}{a}$$

Rychlost zvuku závisí na stavu vzduchu. Dle mezinárodní standardní atmosféry ji lze vyjádřit pomocí teploty vzduchu dle rovnice 1.5.

$$M = \frac{v}{\sqrt{\kappa \cdot R \cdot T}}$$

Teplota vzduchu v dané výšce se vypočítá pomocí rovnice 1.1.

$$M = \frac{v}{\sqrt{\kappa \cdot R \cdot (T_0 + \beta \cdot h)}}$$

$$\{M\} = \frac{\frac{820}{3,6}}{\sqrt{1,4 \cdot 287,05287 \cdot (288,15 - 0,0065 \cdot 9500)}}$$

$$\underline{\underline{M \doteq 0,76}}$$

**Příklad 2.4**

Boeing 747 o hmotnosti 283 350 kg letí rychlostí 420 kt v letové hladině 340. Nosná plocha křídel je  $510,97 \text{ m}^2$ , koeficient vztlaku je 0,52. Jak velká bude vztlaková síla? Uvažujte podmínky mezinárodní standardní atmosféry.

**Řešení**

Letová hladina 340 odpovídá výšce 34 000 ft (1 stopa je 0,3048 m). Rychlost je zadána v uzlech a je třeba ji převést (1 uzel je 1 námořní míle za hodinu, tj.  $1,852 \text{ km h}^{-1}$ ).

$$h = 34\,000 \text{ ft} = 10\,363,2 \text{ m}$$

$$v = 420 \text{ kt} = 777,84 \text{ km h}^{-1} \doteq 216,07 \text{ m s}^{-1}$$

Vztlaková síla se vypočítá dle rovnice 2.8.

$$L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot c_L \cdot S$$

Hustotu vzduchu je možné vyjádřit pomocí rovnice 1.4.

$$L = \frac{1}{2} \cdot \frac{p_h}{R \cdot T_h} \cdot v^2 \cdot c_L \cdot S$$

Teplotu a tlak vzduchu v zadané výšce lze vypočítat pomocí 1.1 a 1.2.

$$L = \frac{1}{2} \cdot \frac{p_0 \left[ 1 + \frac{\beta \cdot h}{T_0} \right]^{-\frac{g_0}{\beta \cdot R}}}{R \cdot (T_0 + \beta \cdot h)} \cdot v^2 \cdot c_L \cdot S$$

$$\{L\} = \frac{1}{2} \cdot \frac{101325 \left[ 1 - \frac{0,0065 \cdot 10363,2}{288,15} \right]^{\frac{9,80665}{0,0065 \cdot 287,05287}}}{287,05287 \cdot (288,15 - 0,0065 \cdot 10363,2)} \cdot 216,07^2 \cdot 0,52 \cdot 510,97$$

$$\underline{\underline{L \doteq 2\,446 \text{ kN}}}$$

## 2.4 Závěr

### ! Shrnutí

Aerodynamika se zabývá dynamickým působením plynů (vzduchu) při obtékání těles. Existují dvě základní rovnice týkající se proudění, a to rovnice kontinuity a Bernoulliho rovnice. Z Bernoulliho rovnice vyplývá, že celkový tlak vzduchu je součtem dynamického tlaku a statického, resp. atmosférického tlaku. Na letadlech se pomocí sond měří statický a celkový tlak. Z jejich rozdílu se stanovuje dynamický tlak, což umožňuje nepřímé měření rychlosti. V letectví se pro vyjádření rychlosti také často používá Machovo číslo. Základními silami působícími na letadlo jsou vztlak, tíha, tah a odpor. Pro ustálený let musí být tyto síly v rovnováze. Vztlak letadla je dán díky obtékání vzduchu kolem křídla. Vlivem zakřivení profilu křídla proudí vzduch nad křídlem rychleji a pod křídlem pomaleji. Výsledkem je podtlak na horní straně křídla a přetlak na spodní straně. Vektorovým součtem vztlakové a odporové síly je dána výsledná aerodynamická síla. Velikost vztlakové a odporové síly závisí na dynamickém tlaku, velikosti nosné plochy a součiniteli vztlaku či odporu.

### ? Kontrolní otázky

1. Jak zní rovnice kontinuity a jak ji lze matematicky vyjádřit?
2. Jak zní Bernoulliho rovnice a jak ji lze matematicky vyjádřit?
3. Jaké tlaky vzduchu a čím jsou na letadle měřeny?
4. Jak se určuje rychlost letu pomocí měření tlaků vzduchu?
5. Co je to Machovo číslo?
6. Jaké základní síly působí na letadlo? Jakým směrem působí?
7. Co je to profil křídla?
8. Jaký je princip vzniku vztlaku na křídle?
9. Co je to výsledná aerodynamická síla?
10. Na čem závisí velikost vztlaku a odporu?
11. Co ukazuje vztlaková čára?



12. Co ukazuje odporová čára?

### **+** Doporučená literatura

BROŽ, Václav. *Aerodynamika nízkých rychlostí*. Vyd. 5. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-010-2347-8.

DRAXLER, Karel. *Přístrojové systémy letadel II*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-010-2484-9.

HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika*. 2. přepracované vydání. Brno: VUTIUM, 2019. ISBN 978-80-214-4123-1.

SVOBODA, Emanuel. *Přehled středoškolské fyziky*. 4., upr. vyd. Praha: Prometheus, 2005. ISBN 978-80-7196-307-3.

VĚK, Vratislav a Jana CELERINOVÁ. *Letadlové systémy*. Vyd. 2. přeprac. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-010-2501-2.

## Kapitola 3

# Konstrukce letadel

### 🌀 Motivace

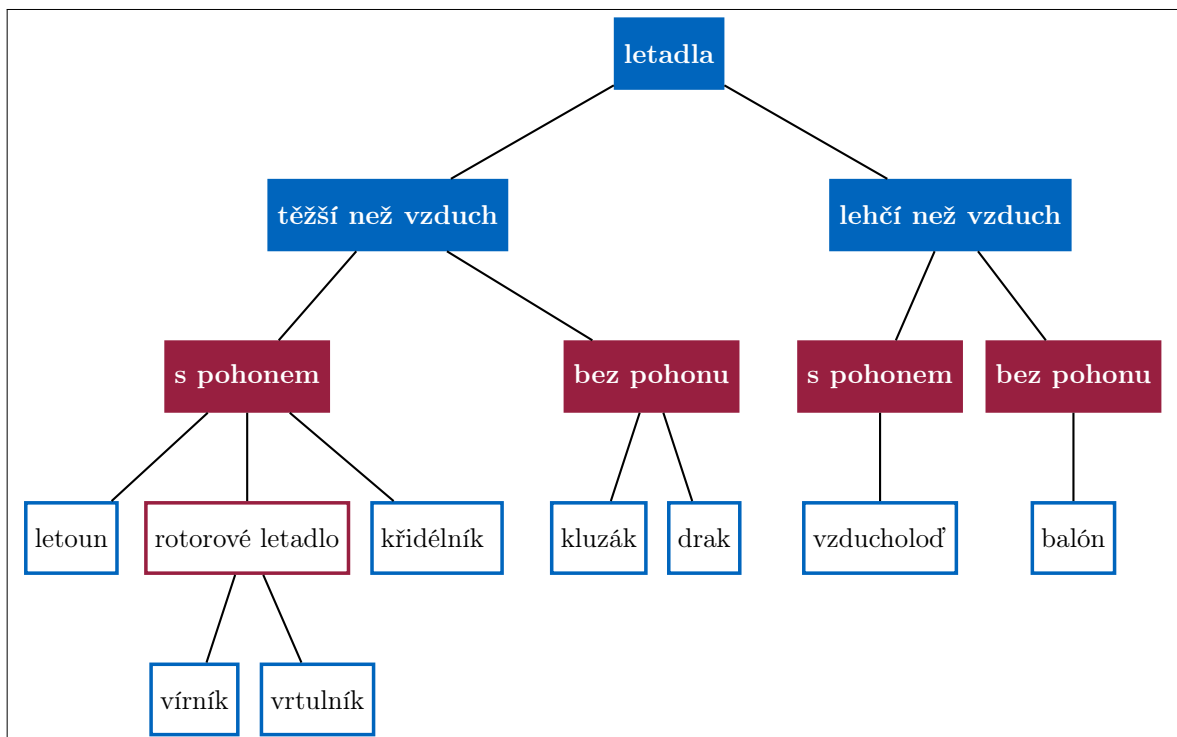
Letadlo je obecný pojem zahrnující v podstatě všechny létající prostředky. Jednotlivé druhy letadel mají svůj název a odlišují se mj. tím, jaká síla je nese v atmosféře, jestli mají pohon a zda mají pevné nosné plochy či nikoli. Aby mohla být letadla řízena, jsou součástí jejich konstrukce různé ovladatelné aerodynamické plochy. Jejich účelem je nejen manévrování, ale také stabilizace letadla. Některé z prostředků jsou téměř na všech letadlech, jiné jsou jen na některých druzích nebo se využívají pouze u vojenské techniky. Kromě řízení se na letadlech vyskytuje mnoho dalších systémů, které zastávají důležité funkce nezbytné k provozu letadla. Jedná se o systémy zajišťující tlakový vzduch potřebný pro klimatizaci a přetlakování kabiny, přívod paliva k motorům, výrobu elektrické energie, rozvod hydraulické kapaliny k ovládaným prvkům a další.

### 3.1 Dělení letadel

Obecná definice říká, že letadlo je zařízení schopné vyvozovat síly nesoucí jej v atmosféře z reakcí vzduchu, které nejsou reakcemi vůči zemskému povrchu. Letadla se dělí na dvě základní skupiny, a to letadla lehčí než vzduch a letadla těžší než vzduch, viz obr. 3.1.

Letadla lehčí než vzduch, nazývaná též aerostaty, jsou letadla nesená v atmosféře především aerostatickými silami. Tyto prostředky jsou nadlehčovány aerostatickou vztlakovou silou vznikající na principu Archimedova zákona (blíže vysvětleno v podkapitole 1.4). Řadí se mezi ně balóny, což jsou bezmotorová letadla lehčí než vzduch, a vzducholodě, což jsou letadla s pohonem lehčí než vzduch. Balóny mohou být buď volné, nebo upoutané, tj. balóny upoutané k zemi v určité výšce nad zemským povrchem. Vzducholodě se dle typu konstrukce dělí na neztužené, částečně ztužené a ztužené.

Letadla těžší než vzduch, tzv. aerodynny, jsou letadla, která vyvozují vzlak za letu především aerodynamickými silami (viz podkapitolu 2.1). Dělí se na letadla těžší než vzduch s pohonem a bez pohonu. Mezi bezmotorová letadla těžší než vzduch se řadí draky a kluzáky. Kluzák je bezmotorové letadlo těžší než vzduch vyvozující vzlak za letu hlavně z aerodynamických sil na plochách, které za daných podmínek letu zůstávají vůči letu nepohyblivé. Druhou skupinou aerodynů jsou letadla s pohonem. Mezi ně se řadí letouny, rotorová letadla a křídelníky. Letounem je letadlo těžší než vzduch s pohonem vyvozující vzlak za letu hlavně z aerodynamických sil na plochách, které za daných podmínek letu zůstávají vůči letadlu nepohyblivé. Křídelník je letadlo těžší než vzduch schopné letu hlavně působením aerodynamických sil, které vznikají na křídlech máváním listu. Rotorové letadlo je letadlo těžší než vzduch s pohonem schopné letu působením aerodynamických sil vznikajících na jednom nebo více rotorech. Rotorová letadla se dále dělí na vírníky a vrtulníky. Vrtulníky mají na rozdíl od vírníků poháněný rotor, příp. více rotorů.



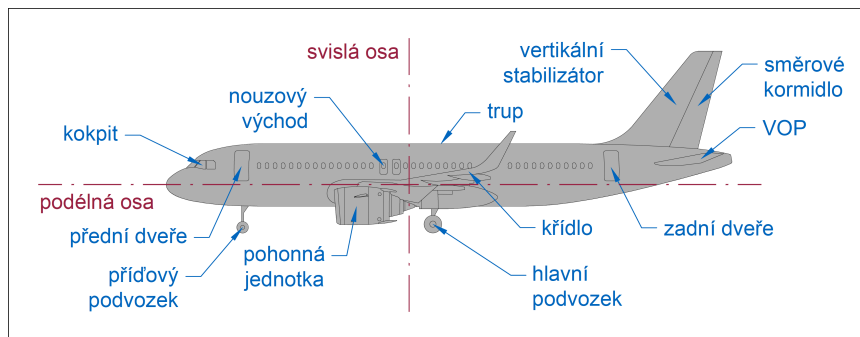
Obrázek 3.1: Dělení letadel

### 3.2 Hlavní části letounů

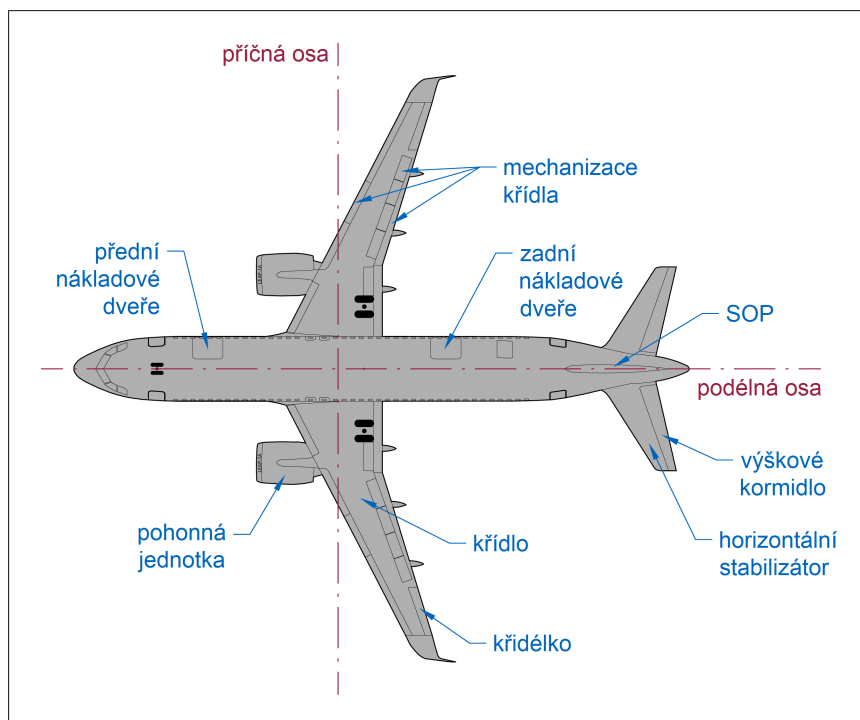
Letouny se skládají z několika základních částí, mezi které patří trup, křídla, ocasní plochy a pohonné jednotky. Některé z uvedených částí letounů se nacházejí i na jiných druzích letadel. Trup letadla tvoří hlavní část, ke které jsou připojena křídla a další plochy nezbytné pro zajištění říditelnosti a stability letadla. Uvnitř trupu letadla se nachází pilotní prostor (kokpit), kabina pro cestující a nákladový prostor. Podle šířky trupu se letouny běžně dělí

na úzkotrupé (angl. narrow-body), které mají v kabině pro cestující jednu uličku mezi sedadly, a na širokotrupé (angl. wide-body), ve kterých jsou dvě uličky. Části letounu jsou vidět na obr. 3.2 a 3.3.

Letadla se pohybují v prostoru a mohou se tedy otáčet kolem tří os. Otáčení kolem podélné osy je klonění, otáčení kolem příčné osy je klopení a otáčení kolem svislé osy je zatačení. Pro řízení letadla se používají řídicí plochy, jejichž vychylováním se mění proudění vzduchu kolem nich a dochází k otáčení letadla kolem os. Mezi řídicí plochy patří křídélka, výškové kormidlo, směrové kormidlo a další prostředky nacházející se na křídlech či trupu. Plochy na konci trupu se dělí na svislé ocasní plochy (SOP), které se skládají z vertikálního stabilizátoru (kýlové plochy) a směrového kormidla, a na vodorovné ocasní plochy (VOP) skládající se z horizontálního stabilizátoru a výškového kormidla.

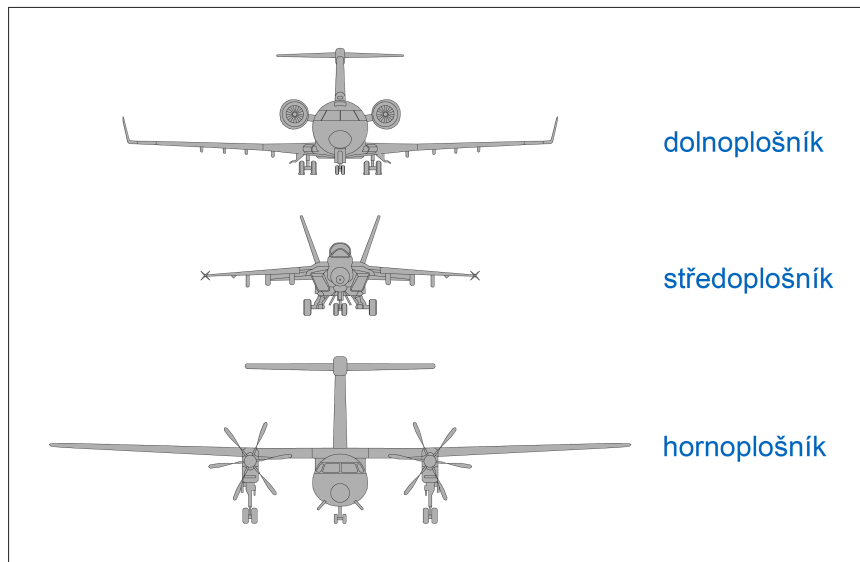


Obrázek 3.2: Části letounu – boční pohled



Obrázek 3.3: Části letounu – pohled shora

Křídla letadla jsou spojena s trupem. V závislosti na tom, zda jsou křídla připojena k trupu v jeho spodní, střední nebo horní části, se rozlišují dolnoplošníky, středoplošníky a hornoplošníky, viz obr. 3.4. Křídla se liší mj. svým tvarem, rozpětím (vzdáleností mezi konci křídel), hloubkou (vzdáleností mezi náběžnou a odtokovou hranou). Jednotlivé parametry křídel se odvíjejí v závislosti na velikosti letadla, provozním využití, dosahované rychlosti letu atd. Součástí křídel jsou různé pohyblivé plochy, které slouží k řízení letadel a které se souhrnně označují jako tzv. mechanizace křídla. Na křídlech mohou být zavěšeny pohonné jednotky, jak je vidět např. na obr. 3.4 u hornoplošníku. Pohonné jednotky se také umisťují na trup letadla, jak je vidět na příkladu dolnoplošníku, nebo dovnitř trupu, což je případ zobrazeného středoplošníku. Na koncích křídel některých letadel jsou tzv. winglety, což jsou pomocné plochy, které ovlivňují víry vznikající na koncích křídel vyrovnáváním tlaku. Winglety snižují indukovaný odpor, a tím pádem snižují také spotřebu paliva.



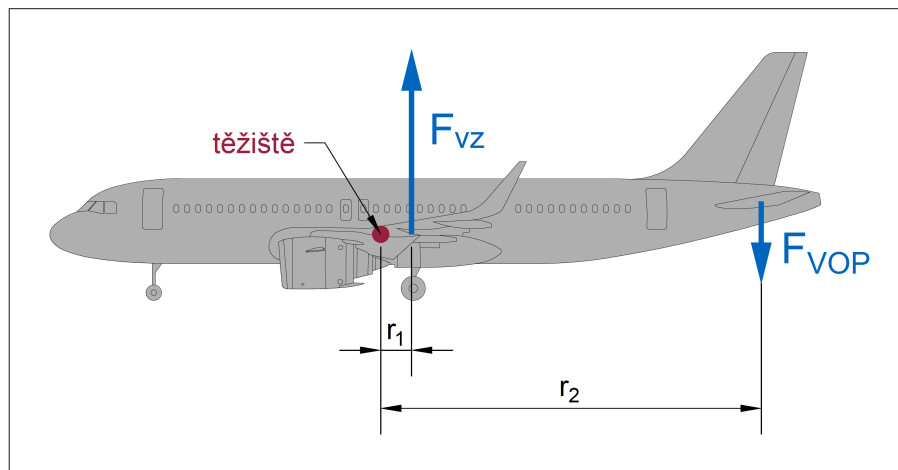
Obrázek 3.4: Možnosti umístění křídel a pohonných jednotek

### 3.3 Řízení letadel a mechanizace křídla

Řízení letadla je proces změn silových účinků působících na letadlo nezbytný k vedení letadla po zadané trajektorii. Podle způsobu přenosu řízení od řididla (řídící páky, pedálu apod.) k výkonnému členu (např. kormidlu) se rozeznává přenos mechanický, elektrický a optický. Řízení se dělí na primární, které je zajišťováno kormidly, a sekundární, do kterého patří mj. mechanizace křídla a stavitelný stabilizátor.

Pro podélné řízení letadla slouží aerodynamické prostředky pro klopení. Jejich funkcí je vyvážení v ustálených režimech a změna momentů pro přechod mezi jednotlivými režimy. Výkonnými členy podélného řízení jsou výškové kormidlo, horizontální stabilizátor a elevony. Výškové kormidlo je pohyblivá plocha umístěná většinou na ocasní části letadla za horizon-

tálním stabilizátorem sloužící k výškovému řízení (stoupání a klesání). Některé typy letadel mají místo výškového kormidla elevony, což jsou pohyblivé plochy kombinující funkci výškového kormidla a křídélek. Pokud se elevony na obou křídlech vychylují stejným směrem, fungují jako výškové kormidlo, v opačném případě zastávají funkci křídélek. Hlavní funkcí horizontálního stabilizátoru je zajištění podélné stability. Působíště vztlakové síly vznikající na křídlech není shodné s těžištěm letadla. Vztlaková síla  $F_{vz}$  tak způsobuje na rameni  $r_1$  klopivý moment, který tlačí příď letadla směrem dolů, viz obr. 3.5. Aby mohlo letadlo letět horizontálním letem, musí být tento klopivý moment vyvažován silou  $F_{VOP}$  způsobující moment na rameni  $r_2$ . Tato síla vzniká díky obtékání vzduchu kolem vodorovných ocasních ploch. Jedná se o stejný princip, jakým vzniká vztlak na křídle, s tím rozdílem, že směr působení je opačný. Co do velikosti menší síla  $F_{VOP}$  způsobuje na větším rameni moment, který kompenzuje klopivý moment vztlakové síly. Horizontální stabilizátor bývá u velkých letadel přestavitelný, aby pro udržení horizontálního letu nebylo nutné vychylovat výškové kormidlo. Během letu se centráž (těžiště letadla) mění např. v důsledku spotřebovávání paliva nebo vysouvání klapek, a proto se mění klopivý moment vztlakové síly, který je třeba kompenzovat opačně působící silou na vodorovných ocasních plochách.



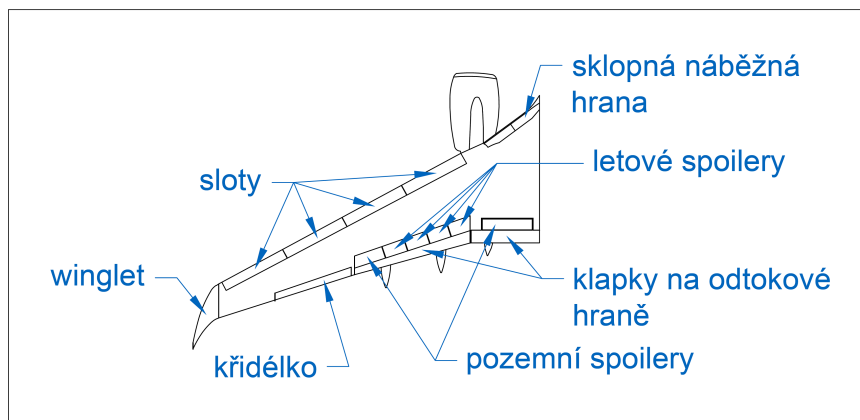
Obrázek 3.5: Funkce horizontálního stabilizátoru

Směrové řízení je zajišťováno pomocí směrového kormidla. Jeho funkcí je manévrování a stabilizace. Většinou je konstruováno tak, že na pevnou kýlovou plochu navazuje pohyblivé kormidlo. Jeho vychýlení doleva či doprava se používá pro provedení zatáčky. V případě bočního větru by bylo letadlo snášeno mimo požadovanou trajektorii, a proto se vychýlí směrové kormidlo, které kompenzuje účinek větru. Směrové kormidlo se též používá za situace vysazení pohonné jednotky jako kompenzace nežádoucího momentu daného nesouměrným tahem.

Příčné řízení je prováděno aerodynamickými prostředky pro klonění. Výkonnými členy příčného řízení jsou křídélka, flaperony, elevony a spoilery. Křídélka jsou pohyblivé plochy nacházející se na koncích křídel na odtokové hraně. Křídélka se vychylují nahoru či dolů, čímž ovlivňují obtékání křídla a dochází tak ke klonění letadla. Flaperony jsou pohyblivé plochy,

kteřé kombinují funkci klapek a křídélek. Elevony zastávají funkci výškového kormidla a křídélek, viz výše.

Kromě již uvedených výkonných členů se na křídlech nacházejí další pohyblivé plochy, které slouží k řízení a které se souhrnně označují jako tzv. mechanizace křídla, viz obr. 3.6. Při vzletu a přistání, kdy je rychlost letadla nízká, je potřeba dosáhnout dostatečného vztlaku jiným způsobem než vysokou rychlostí. Dle rovnice pro aerodynamickou vztlakovou sílu 2.8 závisí vztlak kromě rychlosti na hustotě vzduchu, součiniteli vztlaku a velikosti nosné plochy. Většího vztlaku je možné dosáhnout ovlivněním posledních dvou zmíněných veličin. K tomu slouží prostředky pro zvýšení vztlaku, které více zakřívují profil křídla a zvětšují nosnou plochu křídla. Jedná se o různé typy vztlakových klapek na odtokové hraně křídla, výsuvné sloty na náběžné hraně, sklopnou náběžnou hranu a další prostředky. Na křídlech se nacházejí i prostředky s opačným účinkem, tedy prostředky pro snížení vztlaku. Takovými prostředky jsou spoilery, což jsou výklopné desky na horní straně křídla. Vyklopením spoilerů se poruší obtékání vzduchu v dané části křídla, čímž dojde ke ztrátě části vztlaku. Spoilery se používají během letu pro řízení sestupové dráhy vyklopením na obou křídlech a také pro příčné řízení vyklopením pouze na jednom křídle (na křídle, které má klesat). Na zemi se spoilery používají pro rušení vztlaku při dosednutí. To je žádoucí z důvodu přitlačení letadla k zemi a zvýšení adheze pneumatik. Pro zvýšení odporu při přistání se na velkých letadlech používá reverz tahu. Jedná se o systém, který obrací tah motorů směrem dopředu za účelem decelerace letadla. Na některých převážně vojenských letadlech se používají brzdící štíty a brzdící padáky.



Obrázek 3.6: Mechanizace křídla

### 3.4 Letadlové systémy

Letadlové systémy jsou součástí konstrukce letadla a zabezpečují provoz letadla. Ne všechny soustavy se nacházejí v každém letadle. Použití jednotlivých soustav a jejich rozsah se liší v závislosti na daném typu letadla. Mezi letadlové systémy patří např. palivový systém, klimatizace a přetlakování, systém ochrany proti námraze, kyslíkový systém, protipožární systém

a energetické systémy, jako je hydraulický, pneumatický a elektrický systém.

Důležitou součástí letadel je podvozek, jehož účelem je zajištění bezpečného pohybu na zemi či vodě při vzletu a přistání. Podvozek musí být konstruován tak, aby zajistil stabilitu letadla a jeho říditelnost. Stabilita je dána vhodným rozložením styčných bodů (např. pneumatik) vůči těžišti. Říditelnost je zajištěna natáčením kol podvozku, příp. diferencovaným brzděním. Podle určení existuje několik základních druhů podvozků. Podvozky určené pro pohyb po zemi jsou kolové nebo lyžové. Pro pohyb na vodě se používají plovákové podvozky nebo plovákový trup (trup slouží zároveň jako podvozek). Existuje i kombinace v podobě obojživelného letadla, které je schopné pohybu po vodě i po zemi, tzv. amfibie. Podvozky mohou být pevné či zatahovací. Pevné podvozky jsou konstrukčně jednodušší, avšak způsobují větší aerodynamický odpor. Zatahovací podvozky jsou sice složitější, ale zlepšují aerodynamický tvar letadla, což má pozitivní dopad na spotřebu paliva.

Motorová letadla se neobejdou bez palivového systému. Palivo je v letadlech uskladňováno v nádržích, které mohou být tuhé, měkké tvořené nádobou z pryže v kleci nebo se může jednat o tzv. integrální nádrž, u které nádobu tvoří primární konstrukce draku. U dopravních letadel se integrální nádrže nacházejí v křídlech, příp. také v horizontálním stabilizátoru. Nádrže jsou většinou umístěny uvnitř letadla (v trupu, křídlech, stabilizátoru), některá letadla však mají i vnější nádrže, které jsou pevné nebo odhazovatelné. Dodávka paliva z nádrže k motoru je řešena spádově nebo tlakově. Součástí palivového systému jsou různé armatury, potrubí, palivová čerpadla, čističe a tepelné výměníky. Plnění paliva probíhá atmosféricky (spádem) nebo tlakově. Speciálním případem je plnění za letu, čehož jsou schopna některá vojenská letadla.

Pneumatický systém zajišťuje tlakový vzduch, jeho úpravu (ve smyslu filtrace, vyloučení vody, regulace teploty a tlaku) a rozvod. Pneumatický systém se používá pro silové pohony, přetlakování, klimatizaci, ochranu proti námraze, chlazení avioniky, spouštění motorů. V případě použití pro silový pohon se tlaková energie mění na mechanickou práci. Výhodou je menší hmotnost takového řešení a vysoký krátkodobý výkon. Nevýhodou je nejednoznačná vazba mezi zdrojem a spotřebičem díky stlačitelnosti vzduchu, energetická ztráta vypouštěním vzduchu do atmosféry, kondenzace vody v systému. Zdrojem může být kompresor, tlaková láhev a na zemi také pozemní zdroj.

S pneumatickým systémem úzce souvisí klimatizace a přetlakování kabiny. Bezpečná hranice pro dlouhodobý pobyt lidského organismu je výška 3 km. Dopravní letadla však létají mnohem výše, a proto je nutné kabinu letadla přetlakovat. Výhodou letu ve velké výšce je menší odpor (menší hustota vzduchu) a absence turbulencí. Systém přetlakování udržuje vyšší tlak vzduchu v kabině než je tlak atmosférický. Pro vyjádření tlaku v kabině se používá tzv. kabinová výška, která udává tlak v kabině vyjádřený odpovídající výškou dle mezinárodní standardní atmosféry. Klimatizace se stará o složení vzduchu, teplotu (chlazení a topení)



a vlhkost vzduchu.

Letadla, která létají za podmínek, kdy se může tvořit námraza, jsou vybavena systémem proti námraze. Námraza zhoršuje aerodynamické vlastnosti letadla, může vést ke ztrátě funkce některých snímačů, omezuje výhled pilotů, je nebezpečím pro pohonné jednotky. Proti námraze se na letadlech chrání především náběžné hrany křídel a stabilizátoru, vstup do motorů, listy vrtule a snímače (např. Pitotova trubice). Systémy ochrany proti námraze jsou pneumaticko-mechanické, které opakovaně nafukují a odsávají vzduch z pryžových potahů; chemické, které ostříkují exponovaná místa speciální kapalinou; horkovzdušné, které vyhřívají daná místa horkým vzduchem z kompresoru; a elektrické.

Hydraulický systém zajišťuje tlak v pracovní kapalině pomocí hydrogenerátoru, který přenáší tlakovým potrubím k řízeným prvkům letadla, kde jej pomocí pracovních válců transformuje na mechanický pohyb těchto prvků. Hydraulický systém se používá pro primární řízení, tzn. pro pohyb kormidel, pro sekundární řízení (vysouvání a zasouvání vztlakové mechanizace, spoilerů), vysouvání a zasouvání podvozku, řízení podvozku, brzdění, reverz tahu, pohon nákladových dveří. Zdrojem tlaku pracovní kapaliny je hydrogenerátor (čerpadlo), který je poháněn mechanicky (pohonnou jednotkou, APU nebo ručně), elektricky, hydraulicky (nattlakováním jednoho hydraulického okruhu druhým) nebo pomocí náporové turbíny sloužící jako nouzový pohon. Součástí hydraulického systému jsou hydraulické nádrže, akumulátory, armatury, potrubí a koncové pracovní prvky, kterými jsou hydromotory (aktuátory).

Elektrický systém je základní energetickou sítí letadla. Úkolem elektrického systému je výroba, regulace a rozvod elektrické energie po letadle. Systém zásobuje elektrickou energií vnitřní a vnější osvětlení letadla, letové, navigační a komunikační přístroje, motorové přístroje, systém řízení letadla, palubní kuchyně a další. Primární zdroj elektrické energie je zdroj poháněný motorem letadla (generátor, alternátor). Sekundární zdroje jsou baterie, zdroj poháněný APU, nouzový zdroj na náporové turbíně. Na zemi se používá pozemní zdroj připojený k letadlu.

APU (z angl. auxiliary power unit) je pomocná energetická jednotka, která se používá na velkých letounech a dodává energii při nespouštěných motorech. APU pohání generátor či alternátor a je tak zdrojem elektrické energie v případech, kdy nejsou spuštěny motory a letadlo není připojeno na pozemní zdroj. Na APU je také připojen kompresor poskytující tlakový vzduch pro zajištění běhu klimatizace na zemi a pro roztáčení motorů při jejich spouštění.

### 3.5 Závěr

#### Shrnutí

Letadlo je obecný pojem zahrnující všechny prostředky vyvozuující síly z reakcí vzduchu nesoucí tyto prostředky v atmosféře. Dělí se podle toho, zda se jedná o aerostatické nebo aero-

dynamické síly a zda je letadlo vybaveno pohonem nebo se jedná o bezmotorový prostředek. Mezi základní části letounů patří trup, křídla, svislé a vodorovné ocasní plochy a pohonné jednotky. Letadlo se může otáčet kolem podélné, příčné a svislé osy. Tyto pohyby se nazývají klonění, klopení a zatáčení. Řízení je zabezpečeno pomocí aerodynamických prostředků ovlivňujících obtékání vzduchu kolem nich. Řízení se dělí na primární, které je zajištěno kormidly (směrovým kormidlem, výškovým kormidlem a křídélky), a na sekundární, do kterého spadají vztlakové klapky, sloty, spoilery, stabilizátor a další prostředky. Součástí konstrukce jsou také letadlové systémy zabezpečující různé funkce důležité pro provoz letadla. Těmi nejdůležitějšími letadlovými systémy jsou palivový systém, klimatizace a přetlakování, systém ochrany proti námraze a energetické systémy, mezi které patří pneumatický, hydraulický a elektrický systém. Na velkých letounech se používají pomocné energetické jednotky APU.

### Kontrolní otázky

1. Co je to letadlo?
2. Jak se dělí aerodynamika?
3. Jak se dělí aerostaty?
4. Co je to klonění, klopení a zatáčení?
5. Z čeho se skládají vodorovné a svislé ocasní plochy?
6. Jaké prostředky patří do primárního a jaké do sekundárního řízení?
7. Jaká je funkce horizontálního stabilizátoru?
8. Jaké výkonné členy se používají pro podélné, příčné a směrové řízení?
9. Jaké existují prostředky pro zvýšení vztlaku?
10. Jaké existují prostředky pro zvýšení odporu?
11. K čemu slouží spoilery?
12. K čemu slouží winglety?
13. Jaké jsou základní druhy podvozků?
14. K čemu slouží palivový systém?
15. Jak lze plnit letadlo palivem?
16. Co je to integrální palivová nádrž?
17. K čemu se využívá pneumatický systém?
18. Co je to přetlaková kabina a proč se používá?
19. Co je to kabinová výška?
20. Co je na letadle potřeba chránit proti námraze?
21. K čemu se využívá hydraulický systém?
22. Z jakých zdrojů se na letadlech získává elektrická energie?
23. Co je to APU?

**+ Doporučená literatura**

EVANS, Julien. *Jak létají dopravní letadla*. Praha: Grada, 2012. ISBN 978-80-247-3933-5.

MINISTERSTVO DOPRAVY ČESKÉ REPUBLIKY. *Letecký předpis: Poznávací značky letadel L7*.

SLAVÍK, Svatomír. *Drak a systémy, nouzové vybavení letounů*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. Učební texty pro teoretickou přípravu dopravních pilotů dle předpisu JAR-FCL 1. ISBN 80-720-4437-0.

VĚK, Vratislav a Jana CELERINOVÁ. *Letadlové systémy*. Vyd. 2. přeprac. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-010-2501-2.

# Kapitola 4

## Pohonné jednotky

### 🎯 Motivace

Pohonné jednotky jsou nezbytnou součástí motorových letadel. Jejich základním účelem je překonání aerodynamické odporové síly působící na letící letadlo. K tomu je zapotřebí motoru, který zajišťuje mechanickou energii přeměnou z energie paliva, a propulsního systému, který přeměňuje mechanickou energii na užitečný tah. Princip fungování propulsních systémů je založen na Newtonových zákonech. V současné době se v letectví stále využívají hlavně spalovací motory. U menších vrtulových letounů jsou to pístové spalovací motory, u větších vrtulových a proudových letounů jsou to motory turbínové. Historicky prvními proudovými motory byly motory jednoproudové, v dnešní době převažují efektivnější dvouproudové motory.

### 4.1 Účel pohonné jednotky

Pohonná jednotka přeměňuje energii obsaženou v palivu na tah potřebný k překonání odporu při letu a ke zvyšování potenciální energie letadla. Pro let letadla těžšího než vzduch je zapotřebí tahové síly  $F_T$ , která koná výkon:

$$N_T = F_T \cdot w_L, \quad (4.1)$$

kde  $w_L$  je rychlost letu. Pro konstantní rychlost letu je tahový výkon roven potřebnému výkonu letadla:

$$N_T = N_P = D \cdot w_L, \quad (4.2)$$

kde  $D$  je aerodynamická odporová síla (viz podkapitolu 2.2).

Pohonná jednotka se skládá ze zdroje mechanické energie a zařízení, které ji přeměňuje na tahovou sílu. Zdrojem mechanické energie je motor. Většinou se jedná o tepelný spalovací motor, který spalováním paliva přeměňuje chemickou energii obsaženou v palivu na tepelnou energii,

kterou transformuje na energii mechanickou. Motor dodává mechanickou energii propulsní soustavě, která působí na propulsní látku.

K zajištění pohybu letadla je nezbytná hnací síla – tah vyvíjený propulsní soustavou. Tah lze využít nejen pro překonávání odporu, ale také jako náhradu za aerodynamickou vztlakovou sílu, např. v případě kolmého startu. Propulsní soustava působí na propulsní látku, kterou je v případě vrtulového či proudového pohonu vzduch a v případě raketového pohonu látka nesená na palubě. Při silovém působení propulsního systému se propulsní látka urychluje ve směru působící síly. Uplatňuje se zde 2. Newtonův zákon (zákon síly), který říká, že síla působící na těleso po určitý časový interval vyvolá změnu jeho hybnosti, viz rovnici 4.3. Propulsní látka jako jedno kontinuum protéká propulsní soustavou a působením síly propulsní soustavy dochází ke zvýšení její rychlosti z počáteční rychlosti, jakou látka vstupuje do propulsní soustavy, na rychlost, jakou z propulsní soustavy vystupuje.

### Druhý Newtonův zákon (zákon síly)

Časová změna hybnosti tělesa je rovna síle, která na těleso působí.

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{d(m\vec{v})}{dt} \quad (4.3)$$

Silovým působením propulsní soustavy na vzduch či jinou propulsní látku dochází ve směru působící akční síly k urychlování propulsní látky. Dle 3. Newtonova zákona (zákon akce a reakce) působí na propulsní soustavu síla opačná, a to reakční tahová síla.

### Třetí Newtonův zákon (zákon akce a reakce)

Pokud na těleso působí síla (akce), tak současně existuje síla (reakce), která má stejnou velikost, ale je opačně orientovaná.

Velikost tahové síly je možné vyjádřit jako tok hybnosti propulsní látky (zvýšení hybnosti). Velikost tahové síly je tedy obecně dána jako:

$$F_T = \dot{m} \cdot (w_2 - w_1), \quad (4.4)$$

kde  $\dot{m}$  je hmotnostní tok propulsní látky,  $w_2$  je rychlost propulsní látky po urychlení a  $w_1$  je vstupní rychlost propulsní látky. Hmotnostní tok vyjadřuje hmotnost tekutiny, která proteče průřezem proudové trubice za jednotku času, viz rovnici 4.5. Hmotnost tekutiny  $dm$ , která proteče trubicí za čas  $dt$ , odpovídá objemu  $dV$  násobenému hustotou dané tekutiny  $\rho$ . Objem  $dV$  lze vyjádřit jako součin průřezu trubice  $A$  a vzdálenosti  $dx$ . Vzdálenost  $dx$  za čas  $dt$  je

rychlost. Základní jednotkou hmotnostního toku je kilogram za sekundu.

$$\dot{m} = \frac{dm}{dt} = \rho \cdot \frac{dV}{dt} = \rho \cdot A \cdot \frac{dx}{dt} = \rho \cdot A \cdot v \quad (4.5)$$

Jak je vidět z rovnice 4.4, stejného tahu lze dosáhnout malým urychlením velkého množství látky nebo velkým urychlením malého množství látky. Tah vrtulového pohonu vzniká urychlováním proudu vzduchu, který obtéká motor pohánějící vrtuli. V případě proudového pohonu je tah generován urychlováním vzduchu, který protéká motorem. U raketového pohonu je urychlována impulsní látka, kterou si nese raketa s sebou.

Letadlové motory lze dělit na motory s přerušovaným pracovním cyklem, motory s kontinuálním pracovním cyklem a raketové motory. Mezi motory s přerušovaným pracovním cyklem se mj. řadí pístové spalovací motory a pulsační náporový motor. Motory s kontinuálním pracovním cyklem zahrnují turbínové motory (jednoprúdové, dvouprúdové, hřídelové) a náporové motory.

## 4.2 Vrtulový pohon

Vrtule je lopatkový stroj, který se skládá z rotoru o dvou a více vrtulových listech uložených ve vrtulové hlavě. Listy jsou nastaveny tak, aby byly účinně obtékány vzduchem. Vrtule mohou být buď pevné, nebo u větších letadel stavitelné. Účinkem aerodynamických sil, kterými působí rotující listy vrtule, se vzduch protékající vrtulí urychluje. Vlivem těchto sil vzniká před vrtulí podtlak a za vrtulí přetlak, a proto je vzduch před vrtulí „nasáván“ a za vrtulí „vytlačován“. Celková tahová síla vrtule působí v její ose a je dána součtem dílčích sil jednotlivých rovnoměrně rozložených listů vrtule. V porovnání s proudovým pohonem vrtule urychluje velké množství vzduchu na menší rychlost. Tah vrtule lze vypočítat následovně.

### Tah vrtule

Tah vrtule je dán jako:

$$F_T = \dot{m} (w_2 - w_L), \quad (4.6)$$

kde  $\dot{m}$  je hmotnostní tok vzduchu protékajícího vrtulí,  $w_2$  je rychlost vzduchu za vrtulí a  $w_L$  je rychlost letu, resp. rychlost vzduchu před vrtulí.

Hmotnostní tok vzduchu, který protéká vrtulí, lze vypočítat dle rovnice 4.5, tedy:

$$\dot{m} = A_v \cdot w_v \cdot \rho, \quad (4.7)$$

kde  $A_v$  je průtočný průřez vrtule,  $w_v$  je rychlost protékajícího vzduchu v rovině listů vrtule a  $\rho$  je hustota vzduchu. Rychlost vzduchu v rovině listů vrtule je dána jako aritmetický průměr rychlostí  $w_L$  a  $w_2$ .

Jak již bylo uvedeno, tahová síla koná tahový výkon. Tahový výkon vrtule se vypočítá jako součin tahové síly a rychlosti letu, viz rovnici 4.8. Mechanický výkon, který je přiveden do propulsní soustavy, je roven přírůstku kinetické energie protékajícího vzduchu a vypočítá se dle rovnice 4.9. Účinnost využití mechanického výkonu propulsního systému na užitečný tahový výkon vrtule se označuje jako propulsní účinnost. Propulsní účinnost je poměr tahového a mechanického výkonu propulsní soustavy, viz rovnici 4.10.

### Výkon vrtule a propulsní účinnost

Tahový výkon propulsní soustavy – vrtule je:

$$N_T = F_T \cdot w_L, \quad (4.8)$$

kde  $F_T$  je tahová síla a  $w_L$  je rychlost letu.

Mechanický výkon propulsní soustavy – vrtule odpovídá přírůstku kinetické energie vzduchu a je dán jako:

$$N_m = \Delta \dot{E}_{kin} = \frac{1}{2} \dot{m} (w_2^2 - w_L^2), \quad (4.9)$$

kde  $\dot{m}$  je hmotnostní tok vzduchu protékajícího vrtulí,  $w_2$  je rychlost vzduchu za vrtulí a  $w_L$  je rychlost letu.

Propulsní účinnost vrtulového pohonu je:

$$\eta_p = \frac{N_T}{N_m}, \quad (4.10)$$

kde  $N_T$  je tahový výkon a  $N_m$  je mechanický výkon propulsní soustavy.

## 4.3 Motory s přerušovaným pracovním cyklem

Motory s přerušovaným pracovním cyklem jsou motory, jejichž pracovní cyklus je periodický. Pracovní cyklus probíhá pravidelně s určitým množstvím pracovní látky, která je po dobu jednoho cyklu uzavřená v pracovním prostoru motoru. Mezi motory s přerušovaným pracovním cyklem patří pístové spalovací motory, rotační motory, pulsační náporový motor, Stirlingův motor.

Pístový spalovací motor je motor s přerušovaným pracovním cyklem, neboť průtok vzduchu a paliva je přetržitý. V letectví se používají zážehové spalovací motory pro pohon vrtule. Využívají se pro lety v malých výškách a při nízkých rychlostech. Ve větších výškách je nutné přepřehování motoru. V zážehovém spalovacím motoru je tepelná energie vznikající spalováním paliva transformována na mechanickou práci. Tato transformace probíhá pohybujícím se pístem ve válci, ve kterém se nachází pracovní prostor motoru. Expanze plynu uzavřeného

v pracovním prostoru působí statickým tlakem na pohybující se píst, který dále přenáší expanzní práci plynu vhodným mechanismem na hnací ústrojí motoru. Lineární pohyb pístu ve válci je převáděn pomocí klikového mechanismu na rotační pohyb hřídele. Krajiní polohy pístu se nazývají horní a dolní úvrať, přičemž vzdálenost mezi nimi je zdvih. Zdvih spolu s průměrem pístu určuje zdvihový objem válce motoru.

Chod pístového spalovacího motoru je nestacionární, s časem se mění tlak i teplota plynu ve válci. Motor působí navenek dynamickými silovými účinky a je zdrojem dynamického buzení pohonné jednotky a jejího uložení v konstrukci letadla. Za účelem minimalizace tohoto buzení jsou pístové motory konstruovány jako víceválcové. Podle způsobu uložení válců a klikového hřídele existují různá uspořádání motoru, jako řadové motory, řadové motory invertní, motory uspořádané do V, motory uspořádané do W, motory uspořádané do H, motory s protilehlými válci (boxer), motory hvězdicové a další.

Nejčastěji používané čtyřdobé zážehové motory pracují ve čtyřech dobách, přičemž pracovní cyklus se opakuje po dvou otáčkách klikového hřídele. Jednotlivé doby pracovního cyklu jsou sání, komprese, expanze a výfuk. Během sání se pohybuje píst od horní k dolní úvrati, sací ventil je otevřený a do válce se nasává směs paliva a vzduchu. Následuje komprese, při které se píst pohybuje od dolní k horní úvrati a stlačuje směs paliva a vzduchu. Před horní úvrati dochází k zažehnutí směsi elektrickým výbojem zapalovací svíčky. Ve válci prudce stoupá tlak i teplota. Během expanze se píst pohybuje od horní k dolní úvrati a expandující plyny konají práci. Poslední dobou je výfuk. Je otevřený výfukový ventil a píst pohybující se od dolní k horní úvrati vytlačuje spaliny z válce do výfukového potrubí.

Tepelná účinnost motoru (nejen pístového, ale i dalších uvedených motorů) zásadně ovlivňuje provozní ekonomiku motoru a vypočítá se jako poměr mechanického výkonu a přivedeného tepla. Přivedené teplo do motoru je dáno výhřevností použitého paliva a jeho spotřebou vyjádřenou hmotnostním tokem.

### Tepelná účinnost

Tepelná účinnost motoru je dána jako:

$$\eta_t = \frac{N_m}{\dot{Q}} = \frac{N_m}{H_u \cdot \dot{m}_p} \quad (4.11)$$

kde  $N_m$  je mechanický výkon,  $\dot{Q}$  je tok přivedeného tepla,  $H_u$  je výhřevnost paliva a  $\dot{m}_p$  je hmotnostní tok paliva.

Celková účinnost pohonné jednotky závisí na účinnosti transformace tepelné energie na mechanickou práci a účinnosti využití mechanického výkonu na tahový (propulsní) výkon. Celková účinnost je tedy součinem tepelné účinnosti motoru a propulsní účinnosti propulsního systému.



**Celková účinnost**

Celková účinnost pohonné jednotky je dána jako:

$$\eta_c = \eta_t \cdot \eta_p \quad (4.12)$$

kde  $\eta_t$  je tepelná účinnost a  $\eta_p$  je propulsní účinnost.

Pulsační náporový motor je tryskový bezlopatkový motor vyznačující se pulsačním pracovním cyklem. Funguje na principu periodického uzavírání spalovací komory ve vstupním průřezu a pulzačního spalování směsi vzduchu a paliva. Nejprve je do motoru nasát vzduch vlivem podtlaku ve spalovací komoře. Nasátý vzduch je smíchán s palivem. Následně je směs zapálena a dochází k prudkému nárůstu tlaku. To způsobí uzavření ventilu na vstupu a expandující plyny odchází pouze přes výstupní trysku motoru. Během výfuku spalin z motoru se ve spalovací komoře vytvoří nižší tlak než atmosférický, čímž se otevře vstupní ventil a je nasát čerstvý vzduch.

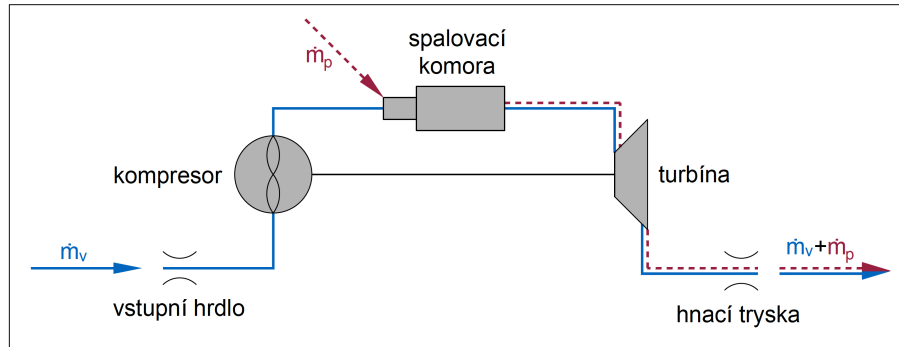
Cyklus nasátí vzduchu, vytvoření směsi, zážeh a výfuk spalin probíhá v pulsačním náporovém motoru velmi rychle. Motor tak přenáší do motorového lože a celé konstrukce letadla pulzující sílu a je silným zdrojem hluku. Oproti náporovému motoru, viz dále, dosahuje pulsační motor lepší účinnosti při podzvukových rychlostech. Jeho použití je omezeno na pohon bezpilotních prostředků a střel. V minulosti se tento typ pohonu používal na německých raketách V1.

#### 4.4 Motory s kontinuálním pracovním cyklem

Motory s kontinuálním pracovním cyklem jsou motory, ve kterých transformace tepelné energie na mechanickou práci probíhá nepřetržitě. Mezi motory s kontinuálním pracovním cyklem patří turbínové motory a náporové motory. Turbínové motory lze rozdělit na motory jednoproudové, dvouproudové a hřídelové.

Tepelný oběh turbínových motorů je kontinuální, a to díky kontinuálně protékaným lopatkovým strojům (kompresor a turbína) a kontinuálnímu spalování paliva ve spalovací komoře. Průtoky vzduchu a paliva motorem jsou tedy ustálené. Pracující motor nepůsobí navenek dynamickými silovými účinky, až na případné vibrace od drobných nevyvážených hmot na rotorech. Dynamické buzení je velmi nízké, působící síly se mění s časem pomalu – jen při změnách režimů chodu motoru. Turbínové motory se používají pro pohon dopravních i vojenských proudových letounů, pro pohon vrtulí větších letounů, pro pohon rotorů vrtulníků a také se používají jako pomocné energetické jednotky (APU).

Proudový pohon je zajišťován propulsní soustavou proudového motoru, ve které je integrován tepelný motor, který přeměňuje energii uloženou v palivu na mechanickou práci, i propulsor, jenž přeměňuje mechanickou práci motoru na tahový výkon. Na obr. 4.1 je znázorněno tepelné schéma jednoproudového motoru sestávajícího ze vstupního hrdla, kompresoru, spalovací komory, turbíny a hnací trysky.



Obrázek 4.1: Schéma jednoproudového motoru

Přední část motoru tvoří vstupní hrdlo, kterým se dostává vzduch o hmotnostním toku  $\dot{m}_v$  do motoru rychlostí letu  $w_L$ . Vzduch je dále nasáván kompresorem, který vzduch stlačuje, čímž roste tlak i teplota vzduchu. Ve spalovací komoře se do vzduchu vstříkují palivo o hmotnostním toku  $\dot{m}_p$  a dochází ke spalování vytvořené směsi. Horké plyny roztáčejí turbínu, která pomocí hřídele pohání kompresor v přední části motoru. Hnací plyny (spaliny paliva a vzduchu) mají za turbínou stále vysokou energii, která je v propulsoru – hnací trysce transformována na kinetickou energii příslušející výstupní rychlosti hnacích plynů z trysky  $w_{tr}$ .

Tah jednoproudového motoru je generován urychlením vzduchu procházejícího motorem a paliva. V proudovém motoru je urychlován vzduch i palivo. Vzhledem k tomu, že palivo se pohybuje s motorem (letadlem), má relativní vstupní rychlost do motoru rovnou nule. Tah motoru je dán zvýšením hybnosti pracovní látky a lze ho vypočítat pomocí následujícího vztahu. První člen udává hybnost hnacích plynů (spalin paliva a vzduchu), které vystupují z hnací trysky rychlostí  $w_{tr}$ , druhý člen vyjadřuje hybnost vzduchu vstupujícího do motoru rychlostí letu  $w_L$ .

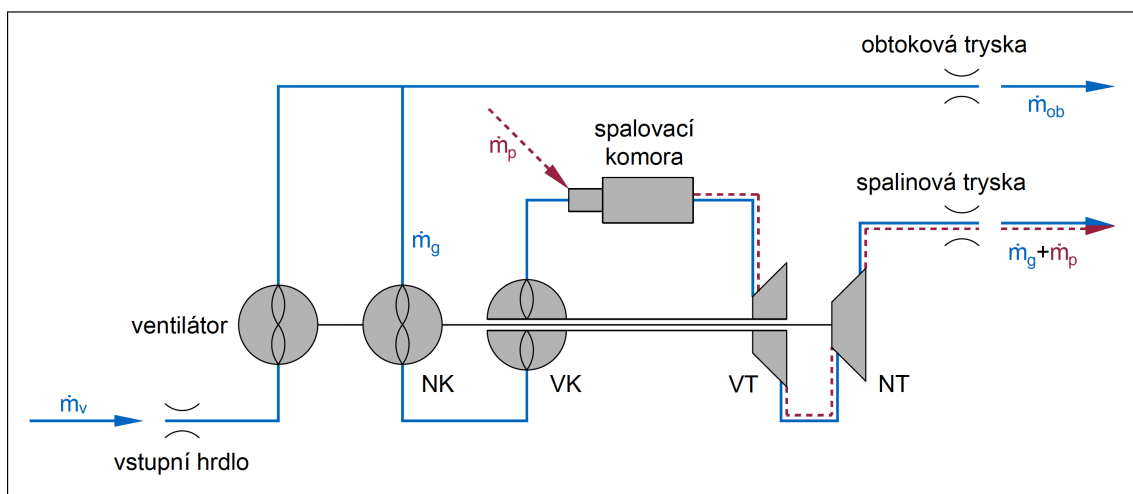
#### Tah jednoproudového motoru

Tah jednoproudového motoru je dán jako:

$$F_T = (\dot{m}_v + \dot{m}_p) w_{tr} - \dot{m}_v \cdot w_L, \quad (4.13)$$

kde  $\dot{m}_v$  je hmotnostní tok vzduchu vstupujícího do motoru,  $\dot{m}_p$  je hmotnostní tok paliva,  $w_{tr}$  je rychlost výstupních plynů a  $w_L$  je rychlost letu.

Dvouproudový motor se skládá z proudového turbínového motoru označovaného jako generátor, ve kterém se uskutečňuje přeměna energie paliva na mechanickou energii, a dále z ventilátoru, který je poháněn zmíněným generátorem. Část vzduchu, která protéká ventilátorem, je vedena do obtokové hnací trysky motoru. Zbylá část vzduchu protéká generátorem a využívá se pro spalování paliva ve spalovací komoře. Tato část vzduchu vytéká spalninovou hnací tryskou. Dvouproudový motor má tedy dvě propulsní soustavy. Schéma dvouproudového motoru je vidět na obr. 4.2. Hlavní části dvouproudového motoru jsou vstupní hrdlo, ventilátor (nebo též dmychadlo), nízkotlaký kompresor (NK), vysokotlaký kompresor (VK), spalovací komora, vysokotlaká turbína (VT), nízkotlaká turbína (NT), obtoková hnací tryska a spalninová hnací tryska.



Obrázek 4.2: Schéma dvouproudového motoru

Přední část dvouproudového motoru tvoří vstupní hrdlo, kterým se vzduch o hmotnostním toku  $\dot{m}_v$  dostává k ventilátoru. Ventilátor vzduch stlačuje, přičemž dále je vzduch rozdělen do dvou proudů. Část ventilátorem stlačeného vzduchu o hmotnostním toku  $\dot{m}_{ob}$  proudí obtokovým kanálem a dále do obtokové hnací trysky, ze které vystupuje rychlostí  $w_{ob}$ . Zbylá část vzduchu o hmotnostním toku  $\dot{m}_g$  prochází generátorem (vnitřní částí dvouproudového motoru). Tato část vzduchu je stlačována nízkotlakým a vysokotlakým kompresorem. Ve spalovací komoře se do vzduchu vstříkuje palivo o hmotnostním toku  $\dot{m}_p$  a dochází ke spalování vytvořené směsi. Spaliny nejprve prochází vysokotlakou turbínou pohánějící vysokotlaký kompresor a poté nízkotlakou turbínou pohánějící nízkotlaký kompresor a ventilátor. Spaliny vystupují z motoru spalninovou hnací tryskou rychlostí  $w_{tr}$ . V popsaném uspořádání se v dvouproudovém motoru nacházejí dva hřídele. Existuje však i konstrukce se třemi hřídele. V takovém případě je za nízkotlakou turbínou samostatná turbína pohánějící pouze ventilátor.

Tah dvouproudového motoru je generován urychlením vzduchu procházejícího obtokem, a urychlením vzduchu procházejícího generátorem a paliva. Poměr mezi množstvími vzduchu udává parametr zvaný obtokový poměr:

$$\mu = \frac{\dot{m}_{ob}}{\dot{m}_g}, \quad (4.14)$$

kde  $\dot{m}_{ob}$  je hmotnostní tok vzduchu protékajícího obtokovým kanálem a  $\dot{m}_g$  je hmotnostní tok vzduchu protékajícího generátorem. Tah dvouproudového motoru je podobně jako u jednoproudového motoru dán zvýšením hybnosti pracovní látky, viz rovnici 4.15. První člen udává hybnost vzduchu vstupujícího do motoru rychlostí letu  $w_L$ , druhý člen hybnost spalin vystupujících ze spalínové hnací trysky rychlostí  $w_{tr}$  a třetí člen hybnost obtokového vzduchu vystupujícího z obtokové hnací trysky rychlostí  $w_{ob}$ . Hmotnostní toky vzduchu  $\dot{m}_g$  a  $\dot{m}_{ob}$  dají v součtu celkové množství vzduchu vstupujícího do motoru  $\dot{m}_v$ .

#### Tah dvouproudového motoru

Tah dvouproudového motoru je dán jako:

$$F_T = \dot{m}_{ob} \cdot w_{ob} + (\dot{m}_g + \dot{m}_p) w_{tr} - \dot{m}_v \cdot w_L, \quad (4.15)$$

kde  $\dot{m}_{ob}$  je hmotnostní tok vzduchu protékajícího obtokovým kanálem,  $w_{ob}$  je výstupní rychlost obtokového vzduchu,  $\dot{m}_g$  je hmotnostní tok vzduchu protékajícího generátorem,  $\dot{m}_p$  je hmotnostní tok paliva,  $w_{tr}$  je výstupní rychlost spalin,  $\dot{m}_v$  je hmotnostní tok vzduchu vstupujícího do motoru ( $\dot{m}_v = \dot{m}_{ob} + \dot{m}_g$ ) a  $w_L$  je rychlost letu.

Tahový výkon jednoproudového i dvouproudového motoru je stejně jako u vrtulového pohonu dán součinem tahu a rychlosti letu. Mechanický výkon proudových motorů odpovídá přírůstku kinetické energie vzduchu a spalin a vypočítá se dle rovnic 4.17 a 4.18. Propulsní účinnost proudových motorů je stejně jako propulsní účinnost jakéhokoli propulsního systému dána poměrem tahového a mechanického výkonu.

#### Výkon proudového motoru a propulsní účinnost

Tahový výkon proudového motoru je:

$$N_T = F_T \cdot w_L, \quad (4.16)$$

kde  $F_T$  je tah vypočítaný dle vztahu 4.13 nebo 4.15 a  $w_L$  je rychlost letu.

*pokračování na další straně*

Mechanický výkon proudového motoru odpovídá přírůstku kinetické energie vzduchu a spalin. Mechanický výkon jednoproudového motoru je:

$$N_m = \frac{1}{2} [(\dot{m}_v + \dot{m}_p) w_{tr}^2 - \dot{m}_v \cdot w_L^2], \quad (4.17)$$

kde  $\dot{m}_v$  je hmotnostní tok vzduchu vstupujícího do motoru,  $\dot{m}_p$  je hmotnostní tok paliva,  $w_{tr}$  je rychlost výstupních plynů a  $w_L$  je rychlost letu; a mechanický výkon dvouproudového motoru je:

$$N_m = \frac{1}{2} [\dot{m}_{ob} \cdot w_{ob}^2 + (\dot{m}_g + \dot{m}_p) \cdot w_{tr}^2 - \dot{m}_v \cdot w_L^2], \quad (4.18)$$

kde  $\dot{m}_{ob}$  je hmotnostní tok vzduchu protékajícího obtokovým kanálem,  $w_{ob}$  je výstupní rychlost obtokového vzduchu,  $\dot{m}_g$  je hmotnostní tok vzduchu protékajícího generátorem,  $\dot{m}_p$  je hmotnostní tok paliva,  $w_{tr}$  je výstupní rychlost spalin,  $\dot{m}_v$  je hmotnostní tok vzduchu vstupujícího do motoru a  $w_L$  je rychlost letu.

Propulsní účinnost proudového motoru je:

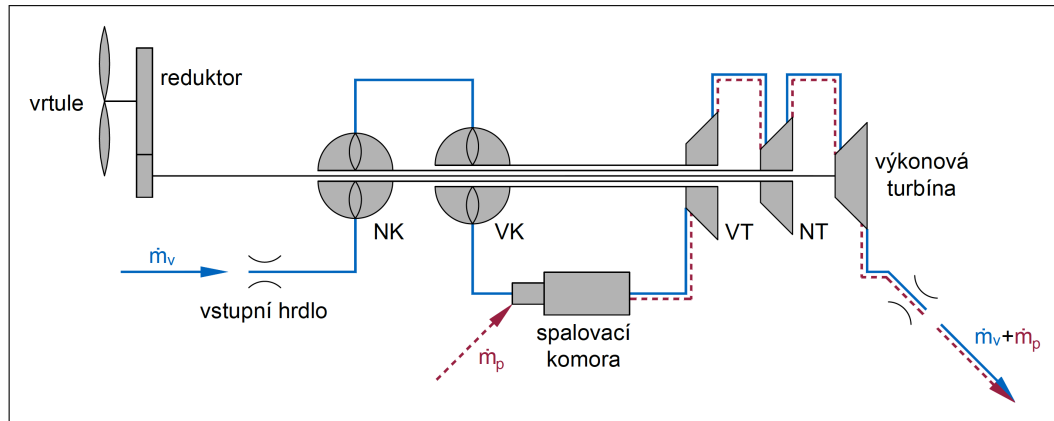
$$\eta_p = \frac{N_T}{N_m}, \quad (4.19)$$

kde  $N_T$  je tahový výkon a  $N_m$  je mechanický výkon propulsní soustavy.

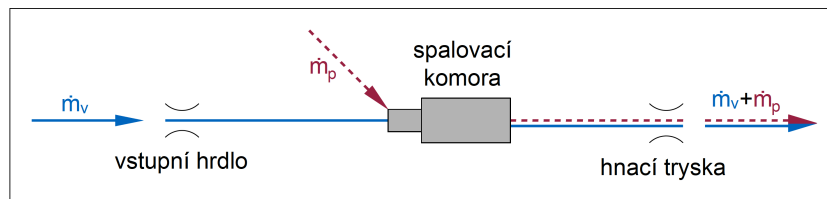
Dalšími typy turbínových motorů jsou turbínové motory hřídelové. Jedná se o proudové motory s výkonovými turbínami, které pohánějí hřídel a dodávají mechanický výkon pro pohon vrtule (turbovrtulový motor) či rotoru vrtulníku (turbohřídelový motor). Turbínové motory hřídelové se také používají jako pomocné energetické jednotky (APU), které na některých typech letadel slouží jako zdroj elektrické energie a stlačeného vzduchu pro klimatizaci a spouštění motorů.

Na obr. 4.3 je znázorněno schéma turbovrtulového pohonu. Jedná se o konstrukci se třemi hřídeli, existují však i jiná konstrukční řešení, která nemají kompresor a turbínu rozdělenou na nízkotlakou a vysokotlakou část. Stejně jako u výše popsaného proudového motoru vzduch vstupuje do turbovrtulového motoru vstupním hrdlem a je stlačován kompresorem. Ve spalovací komoře se do vzduchu vstříkuje palivo a dochází ke spalování vytvořené směsi. Spaliny roztáčí turbíny, které pohánějí kompresor či kompresory a přes reduktor vrtuli. V případě turbovrtulových motorů jsou spaliny za turbínou zavedeny do hnací trysky a konají užitečný tah (celkový tah je ale z větší části generován vrtulí).

Posledním uvedeným motorem s kontinuálním pracovním cyklem je náporový motor, což je proudový bezlopatkový motor. Náporový motor tedy nemá žádné rotační části, součástí jeho konstrukce není kompresor ani turbína. Tepelný oběh motoru je během letu zajištěn náporovým účinkem. Schéma náporového motoru je vidět na obr. 4.4. Motor se skládá ze vstupního hrdla, spalovací komory a hnací trysky.



Obrázek 4.3: Schéma turbovrtulového motoru



Obrázek 4.4: Schéma náporového motoru

Proud vzduchu přitéká rychlostí letu  $w_L$  do motoru přes vstupní hrdlo. Ve spalovací komoře je do vzduchu vstříkováno palivo. Spalováním dochází k uvolnění tepla a ke zvýšení teploty vzduchu a spalin. Na rozdíl od turbínových motorů je díky absenci turbíny možné dosáhnout mnohem vyšších teplot. Spaliny následně expandují v hnací trysce. Náporový motor je konstrukčně jednoduchý typ reaktivního motoru a lze ho efektivně využít pro nadzvukové rychlosti. Nevýhodou je, že náporový motor nelze provozovat z nulové rychlosti letu, a proto je potřeba daný prostředek nejprve urychlit na určitou provozní rychlost. Tah náporového motoru se vypočítá stejně jako tah proudového motoru na základě zvýšení hybnosti pracovní látky, viz rovnici 4.20.

### Tah náporového motoru

Tah náporového motoru je dán jako:

$$F_T = (\dot{m}_v + \dot{m}_p) w_{tr} - \dot{m}_v \cdot w_L, \quad (4.20)$$

kde  $\dot{m}_v$  je hmotnostní tok vzduchu vstupujícího do motoru,  $\dot{m}_p$  je hmotnostní tok paliva,  $w_{tr}$  je rychlost výstupních plynů a  $w_L$  je rychlost letu.

## 4.5 Řešené příklady

### Příklad 4.1

Vypočítejte tah vrtule pohánějící letoun, který letí ve výšce 2 km nad mořem rychlostí 360 km h<sup>-1</sup>. Průtočný průřez vrtule je 2,5 m<sup>2</sup>, rychlost vzduchu za vrtulí je 150 m s<sup>-1</sup>. Uvažujte podmínky mezinárodní standardní atmosféry.

### Řešení

Tah vrtule je dán rozdílem hybností propulsní látky – vzduchu a vypočítá se dle rovnice 4.6.

$$F_T = \dot{m} (w_2 - w_L)$$

Hmotnostní tok vzduchu protékajícího vrtulí lze vyjádřit pomocí rovnice 4.7. Rychlost vzduchu v rovině listů vrtule  $w_v$  je dána jako aritmetický průměr rychlostí vzduchu před a za vrtulí.

$$F_T = A_v \cdot w_v \cdot \rho \cdot (w_2 - w_L)$$

$$F_T = A_v \cdot \frac{w_L + w_2}{2} \cdot \rho \cdot (w_2 - w_L)$$

Hustotu vzduchu protékaného vrtulí je možné vypočítat dle rovnice 1.4, přičemž teplotu a tlak vzduchu v dané výšce je třeba vyjádřit pomocí vztahů 1.1 a 1.2.

$$F_T = A_v \cdot \frac{w_L + w_2}{2} \cdot \frac{p_h}{R \cdot T_h} \cdot (w_2 - w_L)$$

$$F_T = A_v \cdot \frac{w_L + w_2}{2} \cdot \frac{p_0 \left[ 1 + \frac{\beta \cdot h}{T_0} \right]^{-\frac{g_0}{\beta \cdot R}}}{R (T_0 + \beta \cdot h)} \cdot (w_2 - w_L)$$

V tomto kroku jsou všechny veličiny na pravé straně rovnice známe a je možné dosadit jejich hodnoty.

$$\{F_T\} = 2,5 \cdot \frac{\frac{360}{3,6} + 150}{2} \cdot \frac{101325 \left[ 1 - \frac{0,0065 \cdot 2000}{288,15} \right]^{\frac{9,80665}{0,0065 \cdot 287,05287}}}{287,05287 (288,15 - 0,0065 \cdot 2000)} \cdot \left( 150 - \frac{360}{3,6} \right)$$

$$\underline{\underline{F_T \doteq 15\,726\text{ N}}}$$

### Příklad 4.2

Vypočítejte rychlost vzduchu po urychlení vrtulí o špičkovém průměru 2 000 mm a patním průměru 500 mm. Vrtule pohání letoun letící rychlostí 288 km h<sup>-1</sup>. Tah vrtule je 20 kN. Hustota okolního vzduchu je 0,95 kg m<sup>-3</sup>.

**Řešení**

Tah vrtule je dán rozdílem hybností propulsní látky – vzduchu a vypočítá se dle rovnice 4.6.

$$F_T = \dot{m} (w_2 - w_L)$$

Hmotnostní tok vzduchu protékajícího vrtulí lze vyjádřit pomocí rovnice 4.7. Rychlost vzduchu v rovině listů vrtule  $w_v$  je dána jako aritmetický průměr rychlostí vzduchu před a za vrtulí.

$$F_T = A_v \cdot w_v \cdot \rho \cdot (w_2 - w_L)$$

$$F_T = A_v \cdot \frac{w_L + w_2}{2} \cdot \rho \cdot (w_2 - w_L)$$

Průtočný průřez vrtule odpovídá ploše mezikruží vymezené špičkovým a patním průměrem vrtule.

$$F_T = \frac{\pi}{4} (D_2^2 - D_1^2) \cdot \frac{w_L + w_2}{2} \cdot \rho \cdot (w_2 - w_L)$$

Posledním krokem je z rovnice vyjádřit hledanou rychlost vzduchu po urychlení vrtulí  $w_2$ .

$$\frac{w_L + w_2}{2} (w_2 - w_L) = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{F_T}{(D_2^2 - D_1^2) \rho}$$

$$w_2^2 - w_L^2 = \frac{8}{\pi} \cdot \frac{F_T}{(D_2^2 - D_1^2) \rho}$$

$$w_2 = \sqrt{\frac{8 \cdot F_T}{\pi (D_2^2 - D_1^2) \rho} + w_L^2}$$

$$\{w_2\} = \sqrt{\frac{8 \cdot 20 \cdot 10^3}{\pi \cdot (2^2 - 0,5^2) \cdot 0,95} + \left(\frac{288}{3,6}\right)^2}$$

$$\underline{\underline{w_2 \doteq 144 \text{ m s}^{-1}}}$$

**Příklad 4.3**

Vypočítejte propulsní účinnost jednoproudového motoru při rychlosti letu  $250 \text{ m s}^{-1}$ , kterým protéká  $100 \text{ kg s}^{-1}$  vzduchu. Hmotnostní tok paliva je  $2 \text{ kg s}^{-1}$  a výstupní rychlost plynů z hnací trysky je  $500 \text{ m s}^{-1}$ .

**Řešení**

Propulsní účinnost je dána jako poměr tahového a mechanického výkonu. Tahový výkon se vypočítá jako součin rychlosti letu a tahu, pro který v případě jednoproudového motoru platí vztah 4.13. Mechanický výkon jednoproudového motoru se vypočítá dle vztahu 4.17.

$$\eta_p = \frac{N_T}{N_m}$$

$$\eta_p = \frac{F_T \cdot w_L}{N_m}$$



$$\eta_p = \frac{[(\dot{m}_v + \dot{m}_p) w_{tr} - \dot{m}_v \cdot w_L] \cdot w_L}{\frac{1}{2} [(\dot{m}_v + \dot{m}_p) w_{tr}^2 - \dot{m}_v \cdot w_L^2]}$$

$$\{\eta_p\} = \frac{[(100 + 2) \cdot 500 - 100 \cdot 250] \cdot 250}{\frac{1}{2} [(100 + 2) \cdot 500^2 - 100 \cdot 250^2]}$$

$$\underline{\underline{\eta_p \doteq 0,68}}$$

**Příklad 4.4**

Vypočítejte tah dvouproudového motoru pohánějícího letoun letící rychlostí  $200 \text{ m s}^{-1}$ . Do motoru přitéká  $450 \text{ kg s}^{-1}$  vzduchu a ve spalovací komoře se spálí za hodinu  $2786 \text{ kg}$  paliva. Z obtokové trysky vytéká vzduch rychlostí  $300 \text{ m s}^{-1}$  a ze spalinové trysky spaliny rychlostí  $400 \text{ m s}^{-1}$ . Obtokový poměr je 8.

**Řešení**

Tah dvouproudového motoru se vypočítá dle rovnice 4.15.

$$F_T = \dot{m}_{ob} \cdot w_{ob} + (\dot{m}_g + \dot{m}_p) \cdot w_{tr} - \dot{m}_v \cdot w_L$$

Hmotnostní toky vzduchu protékajícího obtokovým kanálem  $\dot{m}_{ob}$  a generátorem  $\dot{m}_g$  nejsou zadány. Jejich hodnoty lze dopočítat na základě znalosti celkového hmotnostního toku vzduchu  $\dot{m}_v$  a obtokového poměru, který udává poměr mezi hmotnostními toky  $\dot{m}_{ob}$  a  $\dot{m}_g$ , viz vztah 4.14. Hmotnostní tok  $\dot{m}_g$  lze zapsat jako rozdíl  $\dot{m}_v$  a  $\dot{m}_{ob}$ , a z rovnice vyjádřit  $\dot{m}_{ob}$ .

$$\mu = \frac{\dot{m}_{ob}}{\dot{m}_g} = \frac{\dot{m}_{ob}}{\dot{m}_v - \dot{m}_{ob}} \Rightarrow \dot{m}_{ob} = \frac{\mu \cdot \dot{m}_v}{1 + \mu}$$

Podobně lze pro vyjádření  $\dot{m}_g$  zapsat  $\dot{m}_{ob}$  jako rozdíl  $\dot{m}_v$  a  $\dot{m}_g$ .

$$\mu = \frac{\dot{m}_{ob}}{\dot{m}_g} = \frac{\dot{m}_v - \dot{m}_g}{\dot{m}_g} \Rightarrow \dot{m}_g = \frac{\dot{m}_v}{\mu + 1}$$

Hmotnostní toky vzduchu vyjádřené pomocí obtokového poměru lze dosadit do rovnice pro výpočet tahu.

$$F_T = \frac{\mu \cdot \dot{m}_v}{1 + \mu} \cdot w_{ob} + \left( \frac{\dot{m}_v}{\mu + 1} + \dot{m}_p \right) \cdot w_{tr} - \dot{m}_v \cdot w_L$$

Hmotnostní tok paliva je zadán jako hodinová spotřeba paliva, proto je nutné hodnotu přepočítat na  $\text{kg s}^{-1}$ .

$$\{F_T\} = \frac{8 \cdot 450}{1 + 8} \cdot 300 + \left( \frac{450}{8 + 1} + \frac{2786}{3600} \right) \cdot 400 - 450 \cdot 200$$

$$\underline{\underline{F_T \doteq 50\,310 \text{ N}}}$$

## 4.6 Závěr

### ! Shrnutí

Hlavním účelem pohonné jednotky je překonání odporové síly. Pohonná jednotka se skládá z motoru, který transformuje energii uloženou v palivu na mechanickou energii, a z propulsního systému, který mechanickou energii přeměňuje na užitečný tah. Propulsní systém urychluje propulsní látku a dle 2. Newtonova zákona zvyšuje její hybnost. Propulsní soustava tedy působí akční silou na propulsní látku a v opačném směru podle 3. Newtonova zákona působí na propulsní soustavu reakční tahová síla. Velikost tahové síly (tahu motoru) je dána rozdílem hybnosti propulsní látky. Na letounech se používá vrtulový pohon, přičemž motorem pohánějícím vrtuli může být pístový spalovací motor a turbovrtulový motor, nebo proudový pohon, který zajišťuje jednoproudový či dvouproudový motor. Jednoproudové a dvouproudové motory jsou typy turbínových motorů, mezi které dále patří motory hřídelové používané pro pohon vrtule, pohon rotoru vrtulníku či jako pomocná energetická jednotka. Tahový výkon propulsní soustavy je dán součinem tahu a rychlosti letu. Mechanický výkon odpovídá přírůstku kinetické energie propulsní látky. Propulsní účinnost udává poměr tahového a mechanického výkonu. Celková účinnost pohonu je dána součinem propulsní účinnosti a tepelné účinnosti motoru.

### ? Kontrolní otázky

1. Jaký je účel pohonné jednotky?
2. Jaké fyzikální zákony souvisí s tahovou silou pohonné jednotky?
3. Co je to hmotnostní tok a v jakých jednotkách se udává?
4. Co je to tah pohonné jednotky?
5. Jak vzniká tah u vrtulového pohonu?
6. Jak vzniká tah u proudového pohonu?
7. Jaké doby pracovního cyklu má čtyřdobý zážehový motor?
8. Co jsou to motory s kontinuálním pracovním cyklem?
9. Jaké jsou základní části jednoproudového motoru a jak tento motor funguje?
10. Jaké jsou základní části dvouproudového motoru a jak tento motor funguje?
11. Co udává obtokový poměr?
12. Co jsou to turbínové motory hřídelové a k čemu se využívají?
13. Jak funguje náporový motor?
14. Co je to propulsní účinnost a tepelná účinnost pohonné jednotky?

**+** Doporučená literatura

ADAMEC, Josef a Jindřich KOCÁB. *Letadlové motory*. Praha: Corona, 2008. ISBN 978-80-86116-54-9.

ADAMEC, Josef. *Pohonná jednotka*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. Učební texty pro teoretickou přípravu dopravních pilotů dle předpisu JAR-FCL 1. ISBN 80-720-4477-X.

HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika*. 2. přepracované vydání. Brno: VUTIUM, 2019. ISBN 978-80-214-4123-1.

HANUS, Daniel. *Pohon letadel*. Vyd. 3. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2008. ISBN 978-80-01-04104-8.

# Kapitola 5

## Letiště

### 🕒 Motivace

Pod pojmem letiště se rozumí vymezená plocha určená pro přílety, odlety a pozemní pohyby letadel; včetně budov, zařízení a dalšího vybavení. Součástí letiště je jedna či více vzletových a přistávacích drah, systém pojezdových drah, plochy pro pozemní odbavení letadel, terminály, hangáry, administrativní budovy, radionavigační zařízení atd. V závislosti na tom, jakému okruhu uživatelů a jakému provozu letiště slouží, se letiště dělí na několik základních druhů. Každé letiště a dráhy, jež jsou jeho součástí, nesou určité označení dle stanovených pravidel. Plochy letiště určené pro pohyby letadel se dělí z hlediska svého umístění a funkce. Jednotlivé vymezené plochy mají své pojmenování a jsou pro ně stanovené vlastnosti a parametry, které musí splňovat.

### 5.1 Dělení a označování letišť

Letiště je dle definice vymezená plocha na zemi nebo na vodě, včetně budov, zařízení a vybavení, určená buď zcela, nebo zčásti pro přílety, odlety a pozemní pohyby letadel. Podle vybavení, provozních podmínek a základního určení se letiště dělí na vnitrostátní a mezinárodní. Vnitrostátní letiště jsou letiště určená a vybavená k uskutečňování vnitrostátních letů, při nichž není překročena státní hranice, a letů, při nichž není překročena vnější hranice (tzv. vnitřní lety). Mezinárodní letiště jsou celní letiště určená a vybavená k uskutečňování jak vnitrostátních a vnitřních letů, tak i letů, při nichž je překročena vnější hranice. Vnitřní a vnější hranice se vztahují k Schengenskému prostoru. Mezi Českou republikou a ostatními zeměmi Schengenského prostoru je vnitřní hranice, mezi Českou republikou a zeměmi, které nejsou součástí Schengenského prostoru, vnější hranice. Podle okruhu uživatelů a charakteru letiště se letiště dělí na civilní a vojenská. Civilní letiště jsou letiště určená pro potřeby civilní letecké dopravy, která mohou být buď veřejná, nebo neveřejná. Vojenská letiště jsou letiště určená

pro potřeby ozbrojených sil.

Pro označování letišť se používají ICAO a IATA kódy. ICAO kódy (kódy dle Mezinárodní organizace pro civilní letectví) se skládají ze čtyř písmen, přičemž první písmeno se vztahuje k části Země, druhé písmeno ke konkrétnímu státu a poslední dvě písmena k letišti v daném státu. Všechna letiště v České republice nesou označení ve tvaru LKXX, kde L označuje jižní Evropu a K Českou republiku. IATA kódy (kódy dle Mezinárodní asociace leteckých dopravců) jsou pouze třímístné a nemají pevně stanovená pravidla. Většinou se jedná o zkratku příslušného letiště. ICAO kódy se používají v oficiálních dokumentech, letových plánech, leteckých mapách apod. Cestující se spíše setkávají s IATA kódy, které se používají v letových řádech, na letenkách či zavazadlových štítcích. Např. největší české letiště Praha/Ruzyně má ICAO kód LKPR a IATA kód PRG.

Z pohledu infrastruktury je důležité tzv. kódové značení letiště, které je specifikováno předpisem. Skládá se ze dvou prvků vztahujících se k výkonovým charakteristikám a rozměrům letounů, pro které má být infrastruktura určena. Kódové značení obsahuje kódové číslo, které nabývá hodnot od 1 do 4 podle jmenovité délky dráhy vzletu letounu, a z kódového písmene A až F, které se vztahuje k rozpětí křídel (viz tabulku 5.1). V závislosti na kódovém značení jsou předpisem kladeny požadavky týkající se fyzických vlastností a vybavení letišť.

Tabulka 5.1: Kódové značení letišť

Kódové číslo	Jmenovitá délka dráhy vzletu [m]	Kódové písmeno	Rozpětí křídel [m]
1	<800	A	<15
2	⟨800; 1200⟩	B	⟨15; 24⟩
3	⟨1200; 1800⟩	C	⟨24; 36⟩
4	≥ 1800	D	⟨36; 52⟩
		E	⟨52; 65⟩
		F	⟨65; 80⟩

Část letiště, která je určená pro vzlety, přistání a pojezdění letadel, se nazývá pohybová plocha. Pohybová plocha letiště sestává z provozní plochy, která je souhrnným označením pro dráhy (runway) a pojezdové dráhy, a z odbavovacích ploch, příp. více odbavovacích ploch. Jednotlivé části pohybové plochy jsou blíže vysvětleny v následujících podkapitolách.

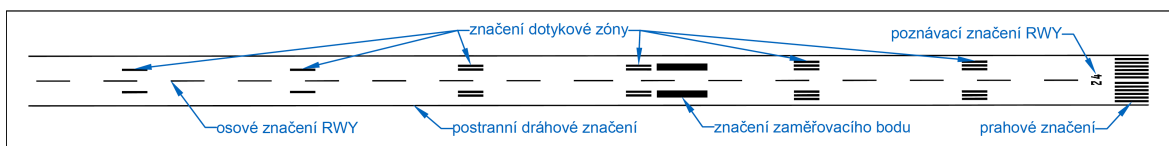
## 5.2 Dráha

Dráha (angl. runway), někdy nazývaná jako vzletová a přistávací dráha, je vymezená pravoúhlá plocha na pozemním letišti upravená pro přistání a vzlety letadel. Pro dráhu se používá zkratka RWY. Každá dráha má své označení ve tvaru dvojmístného čísla, které je v případě

rovnoběžných drah doplněno ještě o písmeno. Číslo vyjadřuje nejbližší desítku magnetického severu při pohledu ze směru přiblížení na přistání. Pokud jsou na letišti zřízeny čtyři paralelní dráhy nebo více, je jedna skupina sousedních drah číslována nejbližší desítkou magnetického azimutu a další skupina sousedních drah vedlejší (sousední) nejbližší desítkou magnetického azimutu. V případě jednomístného čísla musí být předřazena nula. Je-li magnetický azimut z jednoho směru přiblížení např.  $64^\circ$ , pak je označení RWY z tohoto směru 06 a ze druhého směru 24. V tomto případě lze dráhu souhrnně označit jako RWY 06/24. Vzhledem k tomu, že druhý (opačný) směr přiblížení na jednu dráhu se liší o  $180^\circ$ , čísla označující dráhu se vždy liší o 18. U paralelních drah se k číslu doplňuje písmeno L (z angl. left), R (z angl. right) nebo C (z angl. center). V případě dvou paralelních drah se používají písmena L a R, a to v pořadí zleva doprava při pohledu ze směru přiblížení. Pro tři paralelní dráhy se používají písmena L, C, R; pro čtyři L, R, L, R; pro pět L, C, R, L, R nebo L, R, L, C, R; pro šest L, C, R, L, C, R.

Začátek části dráhy, která je použitelná pro přistání, se nazývá práh dráhy. Pokud se práh dráhy nenachází na začátku dráhy, označuje se jako posunutý práh dráhy. Práh dráhy může být posunutý buď trvale, např. z důvodu členitosti okolního terénu, nebo pouze dočasně, např. z důvodu stavebních prací. Za prahem dráhy se nachází dotyková zóna, což je část dráhy, na které se předpokládá první dotyk přistávajícího letounu.

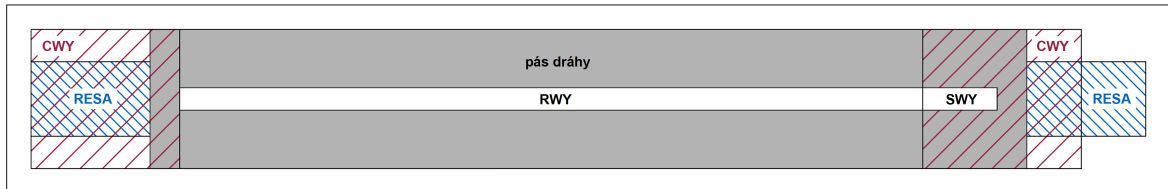
Veškeré značení používané na dráze má bílou barvu, viz obr. 5.1. Na prahu dráhy se nachází prahové značení sestávající z řady podélných pruhů rozložených souměrně k ose dráhy, jejichž počet se odvíjí podle šířky dané dráhy. Dále je na prahu vyznačeno poznávací značení dráhy, které se skládá z dvoumístného číselného označení, příp. ještě písmene, jak je vysvětleno výše. Dotyková zóna je vyznačena pomocí značení dotykové zóny, které má podobu několika dvojic podélných pruhů rozložených souměrně k ose dráhy v předepsaných vzdálenostech. Osové značení dráhy tvoří přerušovaná čára vedená v ose dráhy. Postranní dráhové značení má podobu nepřerušované čáry a nachází se na každém z okrajů dráhy.



Obrázek 5.1: Značení dráhy

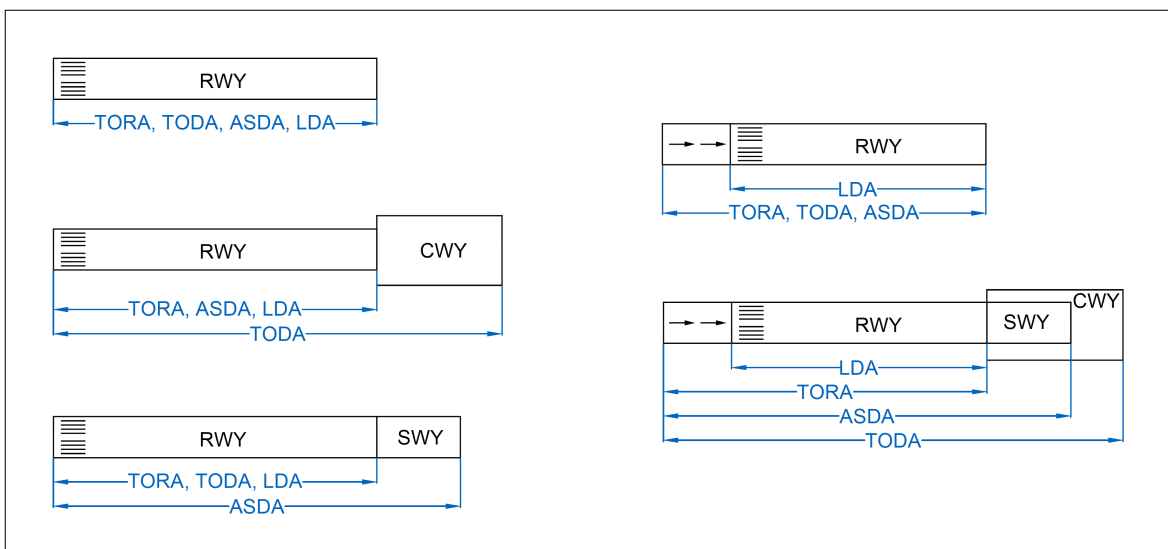
Kolem dráhy je tzv. pás dráhy, který zahrnuje dráhu a plochu kolem ní sahající do určité vzdálenosti od osy dráhy a přesahující před a za konec dráhy. Pás dráhy slouží ke snížení nebezpečí poškození letadla v případě vyjetí z dráhy a také k zajištění bezpečnosti letadla letícího nad tímto pásem při vzletu a přistání. Na konec pásu dráhy navazuje koncová bezpečnostní plocha (angl. runway end safety area, zkratka RESA) určená ke snížení nebezpečí v případě předčasného dosednutí nebo vyjetí za konec dráhy. Za koncem dráhy se vymezuje pravoúhlá plocha zvaná předpolí (angl. clearway, zkratka CWY), nad kterou může letoun

provést část svého počátečního stoupání do stanovené výšky. Všechny tyto plochy, které se vymezují kolem dráhy, přispívají ke zvýšení bezpečnosti a musí být prosty objektů, jež by představovaly pro letadlo překážku. V některých případech je za koncem dráhy zřizována také dojezdová dráha (angl. stopway, zkratka SWY), což je vymezená pravoúhlá plocha upravená tak, aby na ní mohlo letadlo zastavit při přerušném vzletu. Dráha a plochy vymezené kolem ní jsou vidět na obr. 5.2.



Obrázek 5.2: Vymezené plochy kolem dráhy

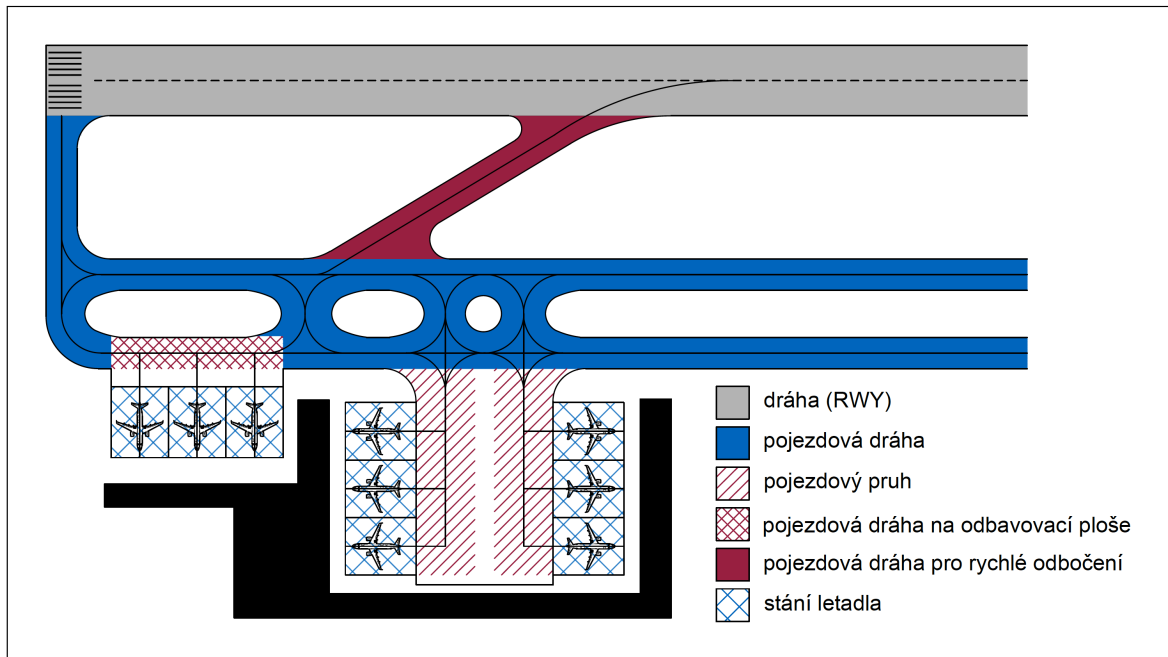
Pro každou dráhu jsou publikovány tzv. vyhlášené délky – použitelná délka rozjezdu, použitelná délka vzletu, použitelná délka přerušného vzletu a použitelná délka přistání. Použitelná délka rozjezdu (angl. take-off run available, zkratka TORA) je délka RWY, která je vyhlášena za použitelnou a vhodnou pro rozjezd letounu při vzletu. Použitelná délka vzletu (angl. take-off distance available, zkratka TODA) je použitelná délka rozjezdu zvětšená o délku předpolí, pokud je zřízeno. Použitelná délka přerušného vzletu (angl. accelerate stop distance available, zkratka ASDA) je použitelná délka rozjezdu zvětšená o délku dojezdové dráhy, pokud je zřízena. Použitelná délka přistání (angl. landing distance available, zkratka LDA) je délka dráhy, která je vyhlášena za použitelnou a vhodnou pro dosednutí a dojezd přistávajícího letounu. Na obr. 5.3 jsou znázorněny vyhlášené délky pro různé dráhy, vždy pro směr zleva doprava.



Obrázek 5.3: Vyhlášené délky

### 5.3 Pojezdové dráhy a odbavovací plocha

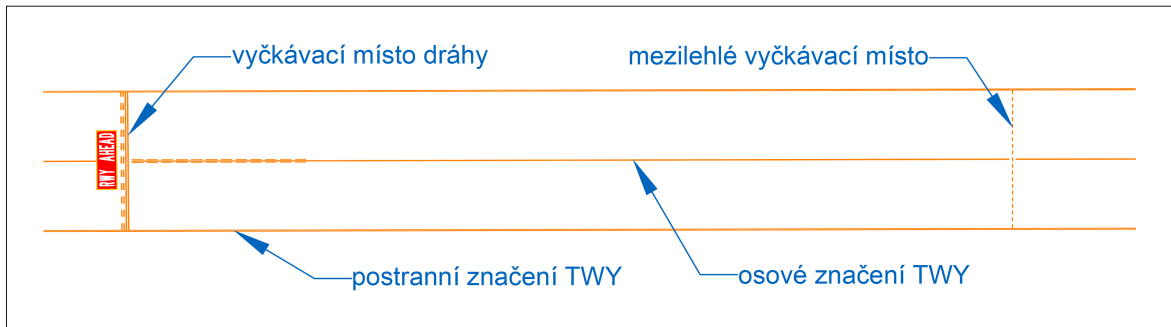
Pojezdová dráha (angl. taxiway, zkratka TWY) je vymezený pás na pozemním letišti zřízený pro poježdění letadel a určený ke spojení jedné části letiště s druhou. Na letištích se nachází komplexní systém pojezdových drah, který propojuje jednotlivé části letiště, jako jsou dráhy, odbavovací plochy, odmrazovací stání, hangáry a další. Součástí systému pojezdových drah jsou také specifické typy pojezdové dráhy, a to pojezdový pruh, pojezdová dráha na odbavovací ploše a pojezdová dráha pro rychlé odbočení (viz obr. 5.4). Pojezdový pruh je část odbavovací plochy určená jako pojezdová dráha a umožňující přístup letadel pouze ke stáním. Pojezdová dráha na odbavovací ploše je část systému pojezdových drah umístěná na odbavovací ploše umožňující průjezd odbavovací plochou. Pojezdová dráha pro rychlé odbočení je pojezdová dráha připojená k dráze (RWY) v ostrém úhlu a projektovaná tak, aby umožnila přistávajícím letounům odbočit při vyšších rychlostech, než jakých dosahují na jiných výjezdech na pojezdové dráhy a tím snížit na minimum dobu obsazení dráhy.



Obrázek 5.4: Typy pojezdových drah

Značení používané na pojezdových drahách má žlutou barvu, viz obr. 5.5. Osově značení pojezdové dráhy má podobu souvislé čáry. Postranní značení pojezdové dráhy tvoří dvě souvislé čáry nacházející se na každém z okrajů pojezdové dráhy. Na pojezdových drahách sloužících jako přístup na dráhu, jsou vyznačována vyčkávací místa dráhy, na kterých musí letadla zastavit a vyčkat, dokud jim není řízením letového provozu povoleno poježdět na dráhu a následně provést vzlet. Na jiných místech, kde je potřeba řídit provoz, např. na křižovatkách pojezdových drah, se vyznačují mezilehlá vyčkávací místa, přes která mohou letadla pokračovat opět pouze s povolením řízení letového provozu.





Obrázek 5.5: Značení pojezdové dráhy

Další částí pohybové plochy letiště je odbavovací plocha. Jedná se o vymezenou plochu na pozemním letišti určenou k umístění letadel pro nastupování nebo vystupování cestujících, nakládání nebo vykládání pošty nebo zboží, pro jejich plnění pohonnými hmotami, parkování nebo údržbu. Na odbavovací ploše se nacházejí jednotlivá stání letadel, což jsou vymezené plochy na odbavovací ploše určené pro parkování letadel. Podle způsobu, jakým letadla vjíždějí na stání a jakým způsobem ho opouštějí, se rozlišuje několik základních typů stání. Na otočná stání zajíždějí letadla vlastní silou motorů a takto i stání opouštějí, přičemž buď během zajíždění na stání, nebo během vyjíždění ze stání se letadla otáčejí. Na průjezdná stání letadla zajíždějí vlastní silou motorů a stejně tak i stání opouštějí, ale na rozdíl od stání otočných se letadla nemusejí otáčet. Na nose-in stání letadla zajíždějí vlastní silou a po odbavení jsou ze stání vytlačena speciálním mechanizačním prostředkem.

## 5.4 Řešené příklady

### Příklad 5.1

Určete označení dráhy, je-li magnetický azimut z jednoho směru přibližně  $134^\circ$ .

### Řešení

Nejbližší desítka pro magnetický azimut  $134^\circ$  je 13.

$$134^\circ \rightarrow 130 \rightarrow 13$$

V jednom směru ponese dráha označení 13, ve druhém směru, který se liší o  $180^\circ$ , ponese označení 31.

$$13 + 18 = 31$$

Označení dráhy bude RWY 13/31.

**Příklad 5.2**

Určete označení každé ze tří paralelních drah, je-li magnetický azimut z jednoho směru přibližně  $52^\circ$ .

**Řešení**

Nejbližší desítka pro magnetický azimut  $52^\circ$  je 5. Protože se jedná o jednomístné číslo, musí být předřazena nula.

$$52^\circ \rightarrow 50 \rightarrow 05$$

Označení každé dráhy musí být doplněno o písmeno L, C nebo R, a to v pořadí zleva doprava ze směru přiblížení. V jednom směru ponese dráhy označení 05L, 05C a 05R, ve druhém směru, který se liší o  $180^\circ$ , ponese označení 23R, 23C a 23L.

$$5 + 18 = 23$$

Označení tří paralelních drah bude RWY 05L/23R, RWY 05C/23C a RWY 05R/23L.

**Příklad 5.3**

Určete označení každé z pěti paralelních drah, je-li magnetický azimut z jednoho směru přibližně  $103^\circ$ .

**Řešení**

Nejbližší desítka pro magnetický azimut  $103^\circ$  je 10.

$$103^\circ \rightarrow 100 \rightarrow 10$$

Pro pět paralelních drah je potřeba využít i další nejbližší desítku, tj. 11. Jedna skupina drah bude nést označení 10 doplněné o písmeno L, C nebo R. Druhá skupina paralelních drah ponese označení 11 doplněné o písmeno L nebo R. V jednom směru ponese dráhy označení 10L, 10C, 10R, 11L a 11R, a ve druhém směru, který se liší o  $180^\circ$ , ponese označení 28R, 28C, 28L, 29R a 29L.

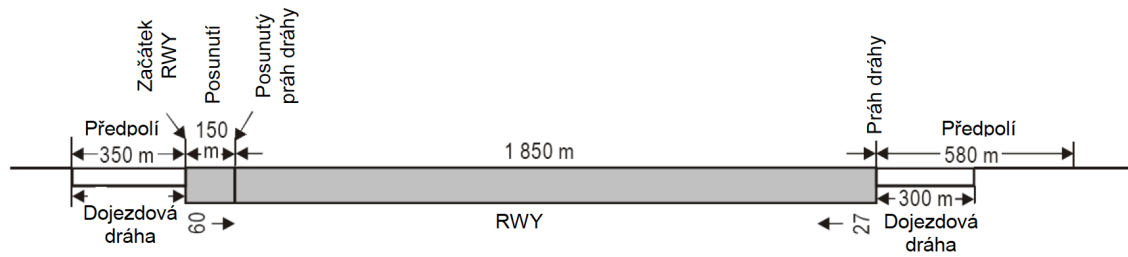
$$10 + 18 = 28$$

$$11 + 18 = 29$$

Označení pěti paralelních drah bude RWY 10L/28R, RWY 10C/28C, RWY 10R/28L, RWY 11L/29R a RWY 11R/29L.

**Příklad 5.4**

Vypočítejte vyhlášené délky TORA, TODA, ASDA a LDA pro oba směry RWY 09/27.

**Řešení**

Vyhlášené délky pro RWY 09 (na obrázku směr zleva doprava) se vypočítají následovně. Do použitelné délky rozjezdu se započítá celá délka dráhy včetně části před posunutým prahem. Do použitelné délky vzletu se navíc započítá délka předpolí a do použitelné délky přerušeno vzletu délka dojezdové dráhy. Použitelná délka přistání se počítá až od posunutého prahu dráhy.

$$TORA = (150 + 1850) \text{ m} = 2000 \text{ m}$$

$$TODA = (150 + 1850 + 580) \text{ m} = 2580 \text{ m}$$

$$ASDA = (150 + 1850 + 300) \text{ m} = 2300 \text{ m}$$

$$LDA = 1850 \text{ m}$$

Pro opačný směr, tedy pro RWY 27 (na obrázku směr zprava doleva) se vyhlášené délky vypočítají následovně. Použitelná délka rozjezdu je dána celkovou délkou dráhy. Do použitelné délky vzletu se navíc započítá délka předpolí a do použitelné délky přerušeno vzletu délka dojezdové dráhy. Použitelná délka přistání je v tomto případě stejná jako použitelná délka rozjezdu. Posunutý práh neovlivňuje vyhlášené délky pro směr 27.

$$TORA = (1850 + 150) \text{ m} = 2000 \text{ m}$$

$$TODA = (1850 + 150 + 350) \text{ m} = 2350 \text{ m}$$

$$ASDA = (1850 + 150 + 350) \text{ m} = 2350 \text{ m}$$

$$LDA = (1850 + 150) \text{ m} = 2000 \text{ m}$$

**Příklad 5.5**

Vypočítejte vyhlášené délky TORA, TODA, ASDA a LDA pro oba směry RWY 04/22. Délka dráhy je 2500 m. Na konci RWY 04 je předpolí o délce 400 m. Na konec RWY 22 navazuje dojezdová dráha o délce 250 m a předpolí o délce 350 m.

**Řešení**

Vyhlášené délky pro RWY 04 se vypočítají následovně. Do použitelné délky rozjezdu se započítá pouze délka dráhy. Do použitelné délky vzletu se navíc započítá délka předpolí. Použitelná délka přerušného vzletu je stejná jako použitelná délka rozjezdu, protože není zřízena dojezdová dráha. Použitelná délka přistání je dána délkou dráhy.

$$TORA = 2500 \text{ m}$$

$$TODA = (2500 + 400) \text{ m} = 2900 \text{ m}$$

$$ASDA = 2500 \text{ m}$$

$$LDA = 2500 \text{ m}$$

Vyhlášené délky pro RWY 27 se vypočítají následovně. Do použitelné délky rozjezdu se započítá pouze délka dráhy. Do použitelné délky vzletu se navíc započítá délka předpolí a do použitelné délky přerušného vzletu délka dojezdové dráhy. Použitelná délka přistání je dána délkou dráhy.

$$TORA = 2500 \text{ m}$$

$$TODA = (2500 + 350) \text{ m} = 2850 \text{ m}$$

$$ASDA = (2500 + 250) \text{ m} = 2750 \text{ m}$$

$$LDA = 2500 \text{ m}$$

**5.5 Závěr****! Shrnutí**

Základní dělení letišť je na vnitrostátní a mezinárodní, a na civilní a vojenská. Pro označení letišť se používají čtyřmístné ICAO kódy a třímístné IATA kódy. Z pohledu infrastruktury letiště a předpisových požadavků je důležité kódové značení letiště, které se skládá z kódového čísla vztahujícího se ke jmenovité délce dráhy vzletu a kódového písmene vztahujícího se k rozpětí křidel. Plocha letiště určená pro vzlety, přistání a pozemní pohyby letadel se nazývá pohybová plocha letiště, která sestává z provozní plochy zahrnující dráhy a pojezdové dráhy, a z odbavovací plochy či více odbavovacích ploch. Dráha je plocha upravená pro vzlety a přistání letadel. Každá dráha letiště má své jedinečné označení, které se skládá z dvoumístného

čísla a v případě paralelních drah ještě písmene. Veškeré značení na dráze má bílou barvu. Z důvodu bezpečnosti se kolem dráhy vymezují různé plochy, jako je pás dráhy, předpolí, koncová bezpečnostní plocha. Pro každou dráhu se publikují vyhlášené délky – použitelná délka rozjezdu, použitelná délka vzletu, použitelná délka přerušného vzletu a použitelná délka přistání. Pro pojíždění letadel a spojení jednotlivých částí letiště se zřizují pojezdové dráhy, mezi které patří i pojezdová dráha pro rychlé odbočení, pojezdová dráha na odbavovací ploše a pojezdový pruh. Značení používané na pojezdových drahách má žlutou barvu. K umístění letadel pro nastupování a vystupování cestujících, nakládání a vykládání zboží a další činnosti slouží odbavovací plocha, na které se nacházejí jednotlivá stání letadel. Základními typy stání letadel jsou otočná stání, průjezdná stání a nose-in stání.

### **?** Kontrolní otázky

1. Co je to letiště?
2. Jaké je dělení letišť?
3. Co je vnitrostátní a mezinárodní letiště?
4. Jak vypadá ICAO a IATA kód letiště?
5. Co je to kódové značení letišť a z čeho se skládá?
6. Co je to pohybová a provozní plocha letiště?
7. Jak se stanovuje označení RWY?
8. Jaké značení se nachází na RWY a jakou má barvu?
9. K čemu slouží předpolí, dojezdová dráha a koncová bezpečnostní plocha?
10. Jaké existují vyhlášené délky?
11. Co je to pojezdová dráha?
12. K čemu slouží pojezdová dráha pro rychlé odbočení?
13. Co je to odbavovací plocha?
14. Jaké existují typy stání letadel?

### **+** Doporučená literatura

MINISTERSTVO DOPRAVY ČESKÉ REPUBLIKY. *Letecký předpis: Letiště L14*.

KERNER, Libor, Viktor SÝKORA a Ludvík KULČÁK. *Provozní aspekty letišť*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-010-2841-0.

ŽIHLA, Zdeněk. *Technologie a řízení letecké dopravy*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2000. ISBN 80-719-4291-X.

ŽIHLA, Zdeněk. *Provozování podniků letecké dopravy a letišť*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2010. ISBN 978-80-7204-677-5.

# Literatura

ADAMEC, Josef a Jindřich KOCÁB. *Letadlové motory*. Praha: Corona, 2008. ISBN 978-80-86116-54-9.

ADAMEC, Josef. *Pohonná jednotka*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. Učební texty pro teoretickou přípravu dopravních pilotů dle předpisu JAR-FCL 1. ISBN 80-720-4477-X.

BROŽ, Václav. *Aerodynamika nízkých rychlostí*. Vyd. 5. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-010-2347-8.

DRAXLER, Karel. *Přístrojové systémy letadel II*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-010-2484-9.

DVOŘÁK, Petr. *Letecká meteorologie*. Cheb: Svět křídel, 2004. ISBN 80-868-0809-2.

*Elektronický meteorologický slovník výkladový a terminologický (eMS)* [online]. Česká meteorologická společnost. Dostupné z: <http://slovník.cmes.cz>

EVANS, Julien. *Jak létají dopravní letadla*. Praha: Grada, 2012. ISBN 978-80-247-3933-5.

HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika*. 2. přepracované vydání. Brno: VUTIUM, 2019. ISBN 978-80-214-4123-1.

HANUS, Daniel. *Pohon letadel*. Vyd. 3. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2008. ISBN 978-80-01-04104-8.

ICAO. *Doc 7488-CD Manual of the ICAO Standard Atmosphere: extended to 80 kilometres (262 500 feet)*. 3rd ed. 1993. ISBN 92-9194-004-6.

KERNER, Libor, Viktor SÝKORA a Ludvík KULČÁK. *Provozní aspekty letišť*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-010-2841-0.

MINISTERSTVO DOPRAVY ČESKÉ REPUBLIKY. *Letecký předpis: Letiště L14*.

MINISTERSTVO DOPRAVY ČESKÉ REPUBLIKY. *Letecký předpis: Poznávací značky letadel L7*.

MINISTERSTVO DOPRAVY ČESKÉ REPUBLIKY. *Letecký předpis: Pravidla létání L2.*

SLAVÍK, Svatomír. *Drak a systémy, nouzové vybavení letounů.* Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. Učební texty pro teoretickou přípravu dopravních pilotů dle předpisu JAR-FCL 1. ISBN 80-720-4437-0.

SVOBODA, Emanuel. *Přehled středoškolské fyziky.* 4., upr. vyd. Praha: Prometheus, 2005. ISBN 978-80-7196-307-3.

VĚK, Vratislav a Jana CELERINOVÁ. *Letadlové systémy.* Vyd. 2. přeprac. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-010-2501-2.

ŽIHLA, Zdeněk. *Technologie a řízení letecké dopravy.* Pardubice: Univerzita Pardubice, 2000. ISBN 80-719-4291-X.

ŽIHLA, Zdeněk. *Provozování podniků letecké dopravy a letišť.* Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2010. ISBN 978-80-7204-677-5.

