

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

Spalovací turbíny v dopravě

Bakalářská práce

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Pavel Neuberger, Ph.D.

Vypracoval: Tomáš Martinek

PRAHA 2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Tomáš Martinek

Silniční a městská automobilová doprava

Název práce

Spalovací turbíny v dopravě

Název anglicky

Combustion turbines in transport

Cíle práce

Sestavení rešeršní práce o uplatnění plynových turbín v letecké, silniční, železniční a lodní dopravě.

Metodika

1. Struktura práce by se co nejvíce měla přiblížit schématu:

- A. Úvod
- B. Materiál a metody
- C. Výsledky
- D. Diskuse
- E. Závěr

V práci rešeršního charakteru lze připustit sloučení bodů B a C. Podobně lze slučovat diskusi a závěr.

2. V bakalářské práci by mělo být popsáno základní technické uspořádání spalovací turbíny a zmapován vývoj jeho konstrukčních úprav v letecké, silniční, železniční a lodní dopravě. Uplatnění teoretických prací je vhodné dokladovat na příkladech konkrétních dopravních prostředků. Opomenuty by neměly zůstat ani speciální případy využití, např. mobilní armádní technika.

Práce by měla mapovat historii i současnost využívání spalovací turbíny. Zdůrazněny by měly být i konstrukční trendy, které mohou ovlivnit budoucí využití spalovacích turbín v dopravě.

3. Práci je vhodné doplnit fotografiemi, schématy, grafy a tabulkami. Jednotlivé kapitoly a podkapitoly práce, rovnice, tabulky a obrázky je nutno číselně označovat a na toto značení se v textu odkazovat. Nedílnou součástí práce je i obsah, abstrakt, seznam použitých zkratk a symbolů, obrázků, tabulek a literatury.

Práce může být doplněna přílohami.

4. Při vypracování bakalářské práce je nutno dbát na respektování citačních pravidel dle ČSN ISO 690:2011.

5. Vedoucího práce je nutno čtvrtletně seznamovat s postupem zpracování zadaného tématu.

Doporučený rozsah práce

35 stran včetně tabulek, obrázků a příloh

Klíčová slova

plynová turbína, doprava, konstrukce

Doporučené zdroje informací

SARAVANAMUTTOO, H.; ROGERS, G. F. C.; COHEN, H.; STRAZNICKY, P. Gas Turbine Theory. 6th ed. Essex: Pearson Education Limited, 2008. ISBN 978-0-13-222437-6.

ŠUROVSKÝ, Jan. Mikroturbína – energetická revoluce pro 21. století. Praha: Instalace Praha, 2003. ISBN 978-80-238-9878-1.

ŠUROVSKÝ, Jan. Spalovací turbíny – Od mikroturbín k elektrárnám. Praha: Jan Šurovský, 2013. ISBN 978-80-260-4106-1.

WALSH, P. P.; FLETCHER, P. Gas Turbine Performance. 2nd. ed. Oxford: Bleckwell Science Ltd, 2004. ISBN 0-632-06434-X.

Předběžný termín obhajoby

2016/17 LS – TF

Vedoucí práce

doc. Ing. Pavel Neuberger, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra mechaniky a strojnictví

Elektronicky schváleno dne 19. 2. 2015

doc. Ing. Pavel Neuberger, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 27. 4. 2015

prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

Děkan

V Praze dne 02. 02. 2017

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou/bakalářskou práci na téma: Spalovací turbíny v dopravě vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Jsem si vědom, že moje bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí.

Jsem si vědom, že se na moji bakalářskou práci plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

V Praze dne:

Podpis: _____

Tomáš Martinek

Poděkování

Poděkování patří doc. Ing. Pavlu Neubergerovi, Ph.D. za vedení, ochotu, odborné konzultace a připomínky během psaní této práce. Dále děkuji své rodině za podporu v průběhu celého svého studia.

Abstrakt

Bakalářská práce na téma Spalovací turbíny v dopravě popisuje spalovací turbíny a jejich jednotlivé použití v různých sekcích dopravy. V práci je uvedeno základní konstrukční uspořádání plynových turbín, termodynamické děje a jednotlivé použití turbín v různých druzích dopravy jako silniční, železniční, letecká, lodní doprava a použití v armádní mobilní technice. V závěru práce je nastíněn budoucí vývoj spalovacích turbín v dopravě.

Abstract

Bachelor thesis Combustion turbines in transport describes the use of combustion turbines in individual types of transport. Thesis presents basic construction of gas turbines, thermodynamic processes and their use in the different types of transport such as road, rail, air, ship and their use in military mobile technology. The final part of this work outlines future development of described combustion turbines.

Klíčová slova

doprava, plynová turbína, konstrukce, mikroturbína

Key words

traffic, gas turbine, construction, microturbine

Obsah

1	ÚVOD.....	1
2	MATERIÁL A METODY.....	2
2.1	HISTORIE	2
2.2	SPALOVACÍ TURBÍNA	3
2.2.1	<i>Dělení spalovacích turbín.....</i>	5
2.2.2	<i>Pracovní cykly</i>	5
2.2.3	<i>Konstrukce turbín</i>	8
2.2.4	<i>Turbokompresor</i>	9
2.2.5	<i>Spalovací komora</i>	9
2.2.6	<i>Poháněcí ústrojí.....</i>	10
2.2.7	<i>Filtry.....</i>	11
2.2.8	<i>Separátory vlhkosti.....</i>	11
2.2.9	<i>Provoz turbíny</i>	11
2.2.10	<i>Tlakové ztráty.....</i>	12
2.2.11	<i>Zvýšení účinnosti.....</i>	12
2.2.12	<i>Paliva pro spalovací turbíny.....</i>	15
2.3	POUŽITÍ SPALOVACÍCH TURBÍN V DOPRAVĚ	16
2.3.1	<i>Silniční doprava.....</i>	16
2.3.2	<i>Železniční doprava</i>	19
2.3.3	<i>Letecká doprava</i>	22
2.3.4	<i>Lodní doprava</i>	26
2.3.5	<i>Vojenská technika.....</i>	27
2.3.6	<i>Bezpilotní letadla.....</i>	30
3	DISKUZE	32
3.1	SROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH CYKLŮ S CARNOTOVÝM CYKLEM	32
3.2	POROVNÁNÍ SPALOVACÍCH TURBÍN S MOTORY PÍSTOVÝM	32
3.3	BUDOUCÍ VÝVOJ V SILNIČNÍ DOPRAVĚ	33
3.4	BUDOUCÍ VÝVOJ V LETECKÉ DOPRAVĚ	34
4	ZÁVĚR:.....	36
	POŽITÁ LITERATURA.....	37
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	40
	SEZNAM OBRÁZKŮ	41

1 Úvod

Spalovací turbíny hrají významnou roli v letecké dopravě již od počátku roku 1941, kdy vzlétl první proudový stíhač německé armády. Spalovací turbína je tepelný stroj, který pracuje na principu přeměny chemické energie na mechanickou práci na hřídeli. Pomocí stlačení nasávaného vzduchu a jeho expanzí ve spalovací komoře pomocí vstříknutí paliva.

První část bakalářské práce obsahuje historický vývoj spalovacích turbín. Ve druhé části práce je uveden popis základního konstrukčního uspořádání spalovacích turbín. V této části je také popsán Braytonův a Humphreyův cyklus, pomocí něhož modelujeme termodynamické děje probíhající ve spalovacích turbínách. Další část bakalářské práce obsahuje popis použití spalovacích turbín v silniční, letecké, železniční, lodní a vojenské technice. Celá práce je uzavřena porovnáním jednotlivých termodynamických cyklů, které v turbíně probíhají s Carnotovým cyklem. V této kapitole je rovněž uvedeno porovnání spalovacích turbín se spalovacím motorem a následně popsán budoucí vývoj spalovacích turbín v dopravě. Cílem této práce je sestavení rešeršního textu o uplatnění plynových turbín v letecké, silniční, železniční a lodní dopravě.

2 Materiál a metody

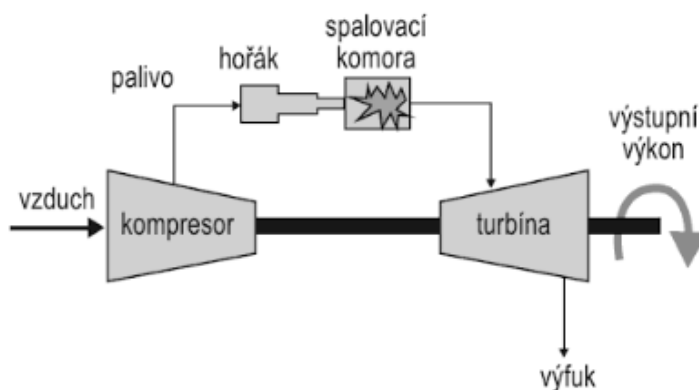
2.1 Historie

Patrně první princip spalovací turbíny byl poprvé patentován roku 1791 Angličanem Johnem Barberem, ale její použití v praktickém životě vykazovalo značné nedostatky [1]. V roce 1902 jistý Dr. Sanford Moss v USA zahájil pokusný provoz prvního plnicího dmyhadla pro pístový motor poháněný plynovou turbínou. První experimentální spalovací turbína byla vynalezena pařížskou firmou Société anonyme des Turbomoteurs roku 1905, používala rovnotlaké spalování a tento princip je využit dodnes. Bohužel tato turbína měla účinnost pouhá 3 %, výkon turbíny byl okolo 308 kW při otáčkách 4250 min⁻¹ a jako palivo sloužil petrolej. Zkonstruována byla inženýry Lemalem a Armangeuem. Firma jejich znalosti dále využila ke konstrukci malé turbínky pro pohon torpéd. Inženýr Holzwarth postavil roku 1909 spalovací turbínu se spalováním za konstantního objemu. Jeho snahou bylo využít fakt, že výbušné spalování má vyšší tepelnou účinnost než spalování rovnotlaké. Vyšší účinnost jeho soustrojí skutečně mělo (cca 14 %), avšak díky technickým komplikacím se používá jen zřídka nebo vůbec.

Další významnou událostí byla konstrukce první turbíny poháněné výfukovými plyny leteckého motoru určeného pro pohon přeplňovaného turbokompresoru. Výrobcem byla na konci první světové války francouzská firma Rateau. Jako další oblasti, kde turbíny našly uplatnění, byly stavby lodí. Nejprve byly použity klasické parní turbíny, později i plynové turbíny. Švédská firma Götawerken nebo švýcarská Sulzer koncem 30. let použily dvoutaktní diesel k pohonu kompresoru a spaliny z motoru dále poháněly turbínu, která uváděla do chodu lodní šroub. Roku 1941 švýcarská společnost Brown Boveri & Cie uplatnila spalovací turbínu v lokomotivě. Spalovací turbíny jako hnací stroje byly rozšířeny tam, kde se mohly uplatnit jejich výhody (nízkou hmotnost v poměru k výkonu a s růstem tlaků a teplot i vysoká účinnost) a kde nevadily jejich nevýhody, především malý krouticí moment, a tedy nemožnost rozběhu proti zatížení. [2]

2.2 Spalovací turbína

Princip spalovací turbíny je znázorněn na obrázku (viz obr. 1). Atmosférický vzduch je do turbíny nasáván kompresorem. V okamžiku, kdy turbína dosáhne startovacích otáček, již kompresor dodává potřebné množství vzduchu a přes soustavu trysek dojde k rozprášení paliva do spalovací komory. V této spalovací komoře dochází k zapálení palivové směsi za pomoci zapalovacích svíček. Hoření dané směsi nastává ve spalovací komoře isobaricky, tzn. za stálého tlaku. Vzniklé spaliny jsou usměrňovány do rozváděcího ústrojí turbíny a zde v důsledku expanze dojde ke zvýšení rychlosti proudu pracovních plynů, které jsou optimálně směřovány na lopatky rotoru turbíny. Pomocí hřídele je turbína spojena s kompresorem a tento kompresor dodává do spalovací komory vzduch s požadovaným tlakem. Tento tlak umožňuje průtok spalin a vzduchu spalovací komorou a následně turbínou. [4]

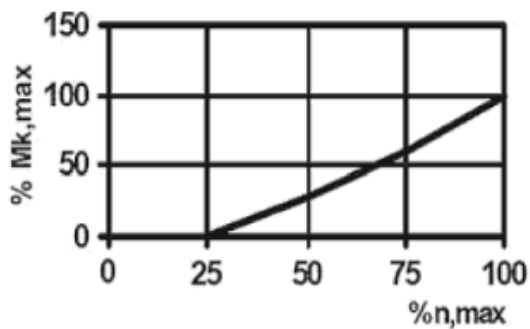


Obrázek 1 Schéma spalovací turbíny [4]

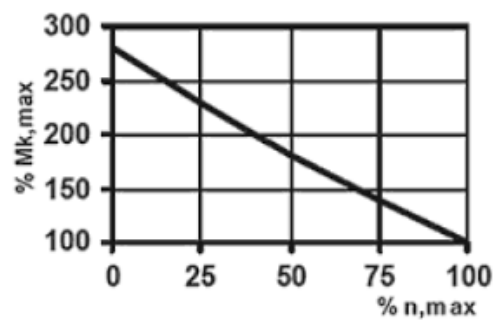
Jestliže se bude výkon pro pohon stroje odebírat z hřídele turbíny, dojde při zvýšení zatížení k poklesu otáček rotoru, a s tím jsou spojeny i otáčky kompresoru, což bude mít za následek pokles potřebného tlaku a také množství vzduchu, které musíme dodat do spalovací komory. Důsledkem toho nastane pokles točivého momentu, který turbína vyvíjí [4].

Z těchto důvodů se např. u vozidlových turbín používá dvouhřídelové uspořádání (na výstupu jsou dvě turbíny). Díky tomuto uspořádání je pohon vozidla odebírán ze samostatné turbíny. První turbína slouží pouze k pohonu kompresoru a spalin z výstupu a tyto spaliny jsou pak dále směřovány na vstup druhé turbíny. Jakmile dojde ke zvýšení zátěže u druhé turbíny, dojde stejně tak k poklesu otáček, ale otáčky první turbíny se nezmění a tím pádem kompresor, který je poháněn touto turbínou, umožňuje dodat do spalovací komory potřebné množství vzduchu. Pokud dodáme stejné množství paliva do spalovací komory, bude i energie přiváděná na lopatky druhé turbíny stejná. Při poklesu otáček rotoru druhé turbíny se síla, kterou způsobil

proud plynů působící na lopatky rotoru turbíny zvyšuje, a vzrůstá tím i točivý moment vyvíjený turbínou druhou. Pokles otáček je nepřímo úměrný nárůstu točivého momentu, tzn., že čím menší jsou otáčky, tím vyšší točivý moment získáme (viz obr. 2,3). Tento princip lze velmi dobře uplatnit např. u vozidel, protože díky lepší akceleraci vozidla můžeme použít menší počet převodových stupňů. Pro příklad při použití dvouhřídelových spalovacích turbín dojde k nárůstu točivého momentu v porovnání s momentem při jmenovitém režimu 2 - 3 krát a u nejlepšího přeplňovaného vznětového motoru pouze 1,5 krát [4].



Obrázek 3 Průběh točivého momentu M_k jednohřídelové turbíny [4]



Obrázek 2 Průběh točivého momentu M_k dvouhřídelové turbíny [4]

2.2.1 Dělení spalovacích turbín

Dle přívodu pracovního plynu rozlišujeme turbíny:

Rovnotlaké (isobarické)

Plyn se přivádí do turbíny za stálého tlaku a tento model lze charakterizovat pomocí Braytonova cyklu nebo také Ericssonova-Braytonova cyklu.

Objemové (isochorické)

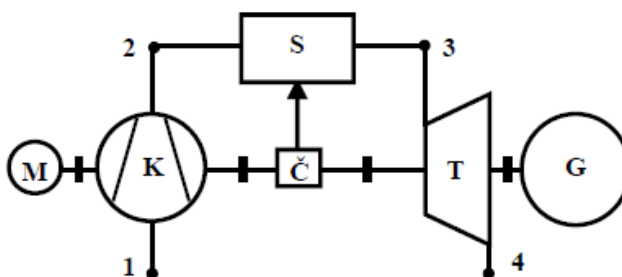
Plyn se přivádí do turbíny v určitých časových impulsech a tento princip můžeme charakterizovat pomocí Humphreyova cyklu.

2.2.2 Pracovní cykly

Oběhy spalovacích turbín se liší od parních oběhů hlavně tím, že látka, se kterou turbína pracuje, nemění svoje skupenství, tzn., že komprese této látky probíhá kompresorem, nikoliv čerpadlem.

Aplikace Braytonova cyklu

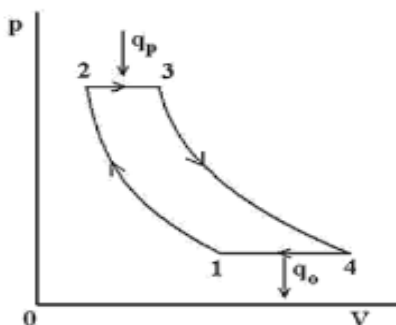
Braytonův tepelný oběh (viz obr. 4) je porovnávacím cyklem pro činnost plynových turbín rovnotlakých. V publikacích je často uváděn jako Ericsson-Braytonův, a to z toho důvodu, že Ericsson již použil tento systém v roce 1933 v rovnotlakém motoru, který spaloval svítiplyn. [5]



Obrázek 4 Schéma Braytonova oběhu. [5]

K kompresní část, **G** generátor, **T** turbína, **M** startovací motor, **S** spalovací komora,
Č palivové čerpadlo

Tento cyklus je tvořen dvěma isobarami a dvěma adiabatami. Uvedený cyklus (viz obr. 5) slouží pouze k porovnání, jelikož se jedná o ideální oběh spalovací rovnotlaké turbíny. U této turbíny dochází ke kompresi pracovní látky v kompresoru bez použití chlazení adiabaticky bod 1→2 a adiabatická změna probíhá taktéž při expanzi plynu bez přívodu tepla bod 3→4. Mezi adiabatickou kompresí a expanzí dochází k ohřevu pracovní látky při konstantním tlaku bod 2→3 přímým spalováním paliva ve spalovací komoře (otevřený cyklus). Druhou možností je přivedení tepla za pomoci výměníku (uzavřený cyklus). Jakmile dojde v turbíně k expanzi plynu, vzniklé spaliny odcházejí buďto do atmosféry bod 4→1 a poté dojde k nasátí nového vzduchu do kompresoru, anebo ochlazením spalin ve výměníku (uzavřený cyklus) (viz obr. 5). [8]



Obrázek 5 Braytonův cyklus v p-v diagramu [8]

Účinnost termická je dána velikostí přivedeného a odvedeného tepla dle (vzorce 1.3) [6]:

Měrné teplo přivedené

$$q_p = c_p(T_3 - T_2) \quad (1.0)$$

Měrné teplo odvedené

$$q_o = c_p(T_4 - T_1) \quad (1.1)$$

Měrná tlaková práce získaná při jednom oběhu

$$a_t = q_p - q_o \quad (1.2)$$

Termická účinnost tohoto porovnávacího oběhu

$$\eta_t = \frac{a_t}{q_p} = \frac{q_p - q_o}{q_p} = 1 - \frac{q_o}{q_p} = 1 - \frac{c_p(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)} \quad (1.3)$$

$$\varepsilon_p = \frac{p_2}{p_1} = \frac{p_3}{p_4} \quad (1.4)$$

$$\varepsilon = \frac{v_1}{v_2} \quad (1.4.1)$$

Stupeň plnění:

$$\varphi = \frac{v_3}{v_2} \quad (1.5)$$

použijeme-li vztah:

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{p_3}{p_4}\right)^{\frac{k-1}{k}} = \varepsilon_p^{\frac{k-1}{k}} \quad \text{a} \quad (1.6)$$

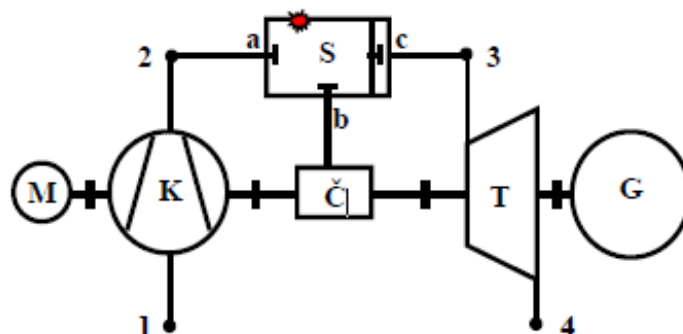
$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = \varepsilon_p^{\frac{k-1}{k}} \quad (1.7)$$

Po dosazení do rovnice (1.3) za teplotu T_3 z rovnice (1.6) a za T_2 z rovnice (1.7) a dostaneme:

$$\eta_t = 1 - \frac{T_4 * T_1}{T_4 * \varepsilon_p^{\frac{k-1}{k}} - T_1 * \varepsilon_p^{\frac{k-1}{k}}} = 1 - \frac{1}{\varepsilon_p^{\frac{k-1}{k}}} \quad (1.8)$$

Aplikace Humphreyova cyklu

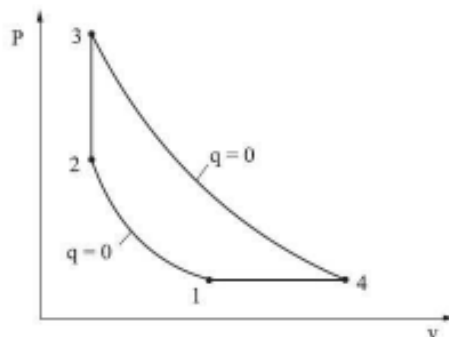
Komprimovaný vzduch proudí vstupním ventilem do komory určené ke spalování, v níž dojde ke vstříknutí paliva a následnému zažehnutí elektrickou jiskrou. Hoření zapálené směsi probíhá za konstantního objemu a následně spaliny vstupují přes trysku do oběžného kola. Oběh se uzavře výfukem (viz obr 6,7). Plyny v turbínách pracující s oběma cykly dosahují teplot až 900 °C, otáček až 20 000 min⁻¹, odstředivých zrychlení až 10⁵ × větších než normální tíhová zrychlení. [31]



Obrázek 6 Schéma Humphreyova cyklu [5]

K kompresor, **S** spalovací komora, **T** turbína, **G** generátor, **M** startovací motor, **Č** palivové čerpadlo, **a,b,c** ventil

Při použití stejného kompresoru u obou cyklů (Humphreyův, Braytonův) můžeme dosáhnout díky isochorickému přívodu tepla vyšší teplotu T_3 než u Braytonova cyklu a následně i vyšší práci cyklu. [7]



Obrázek 7 Schéma Humphreyova cyklu v p-v diagramu [5]

Kompresní poměr:

$$\varepsilon = \frac{v_1}{v_2} \quad (2.0)$$

Stupeň zvýšení tlaku:

$$\Psi = \frac{p_3}{p_2} \quad (2.1)$$

Měrné teplo přivedené

$$q_H = c_v(T_3 - T_2) \quad (2.2)$$

Měrné teplo odvedené

$$q_c = c_p(T_1 - T_4) \quad (2.3)$$

2.2.3 Konstrukce turbín

Materiály používané u spalovacích turbín

Kromě austenitických ocelí a feriticko - perlitických (do 565 °C), vyvinutých již dříve pro vysoké teploty u parních turbín, je pro nejvyšší teploty u plynových turbín k dispozici mnoho dalších speciálních slitin, např. pro rozváděcí a oběžné lopatky. A to z důvodu vyšších teplot, tyto slitiny jsou obohacovány niklem a chromem. Náležitou pozornost musíme také

věnovat možnostem chlazení teplotně vysoce exponovaných částí, jako jsou rozváděcí a oběžné lopatky. [9]

Pokud budou k dispozici vhodné materiály, dostatečné chlazení a v neposlední řadě ošetření povrchu odolnými povlaky nanášenými např. plasmovým nástřikem, můžeme i nadále očekávat zvyšování teploty spalin do turbíny. [9]

2.2.4 Turbokompresor

Jsou to lopatkové stroje, v nichž se uskutečňuje komprese plynů za účelem zvýšení tlakové energie a vnitřní tepelné energie. Lopatkové kanály tvoří difuzor. V difuzoru dochází ke změně kinetické energie pracovní látky na entalpii. K navýšení komprese se používají vícestupňové turbokompresory. [12] Hlavním cílem turbokompresoru je vytvořit potřebnou kompresi pracovního plynu k docílení potřebného vyššího tlaku. Tyto kompresory mohou v porovnání s pístovými kompresory pracovat s mnohem většími objemovými průtoky plynu. Většinou lze uvnitř kompresoru očekávat adiabatickou kompresi plynu proto $q=0$ nebo $q\neq 0$. V některých případech může nastat přenos tepla prostřednictvím okolí tzv. polytropická komprese $q\neq 0$. [10]

Princip turbokompresorů zůstává dle použití stejný, avšak mění se pouze schéma zapojení dle vlastností tekutiny, ve které pracuje a dále jeho požadavky, které souvisí s technikou, v níž je použit. [10]

Pro navrhování a následného připojení turbokompresoru musíme dbát na zařízení, která se budou nacházet v trase stlačeného plynu z důvodu tlakových ztrát a požadavku na kvalitu stlačeného plynu. [10]

Pohon turbokompresoru je nutné navrhnout dle potřeby příkonu, otáček a dále požadavek na regulaci a lokalitu [10].

2.2.5 Spalovací komora

V této části spalovací turbíny dochází především ke spalování paliva, ale také ke smíchání komprimovaného vzduchu z kompresorové části s palivem. Dimenzování spalovací komory výrazně ovlivní podmínky, za jakých spalování probíhá, a to buďto difúzně, anebo kineticky.

Difúzní - komory jsou velkých rozměrů z důvodu pomalého míchání vzduchu a paliva, které probíhá až při procesu hoření.

Kinetické - komory jsou podstatně menších rozměrů, protože se míchání paliva se vzduchem uskutečňuje ve směšovací komoře. Díky tomuto spalování se podstatně zkracuje doba hoření.

Hlavní podmínku pro hoření ve spalovací komoře, je pokud možno co nejmenší tlaková ztráta komprimovaného vzduchu se zachováním malého objemu, a to při teplotách 1300 až 1500 °C. Takto velké teploty způsobují vznik NO_x ze vzdušného dusíku, což vede k minimálním přebytkům vzduchu a důkladnému smíchání palivové směsi (turbulizace). Ke snížení vzniku NO_x lze do horkých spalin vstříkovat páru.

Podmínkou pro správnou funkčnost spalovací komory je rychlost proudění pracovního plynu přes komory a výkonové zatížení. [11]

2.2.6 Poháněcí ústrojí

Rotor turbíny

Rotor turbíny je lopatkový stroj, kde se pracovní látka přivádí na rotor, a tím získává tato látka kinetickou energii a následně tím zvýší svoji rychlost.

Tento lopatkový stroj nám umožňuje vytvoření potřebného tahu. Tah je síla, která v případě letounu uvádí tento stroj do pohybu, anebo jedná-li se o rovnoměrný pohyb, tak slouží ke zdolání tíhových sil a aerodynamického odporu. Účinnost lopatek je ovlivněna dvěma veličinami, a to tahem a rychlostí např. letounu [13].

Lopatky

U materiálu lopatek je hlavně dbáno na vysokou kvalitu materiálu a povrchovou úpravu. Tyto dva aspekty bohužel nestačí k požadované pevnosti, jelikož na ně působí vysoké teploty pracovní látky, a proto je zapotřebí patřičného chlazení. To může být realizováno například chlazením závěsů lopatek nebo chlazením celé lopatky, v níž se nacházejí chladicí kanálky. Nejčastěji používaným chladicím médiem je vzduch.

Za předpokladu, že bude probíhat dostatečně účinné chlazení lopatek i při teplotě vstupních spalin 1100 °C, pak povrchová teplota lopatek nepřekročí 850 °C. [9]

Kvůli takto vysoké teplotě působí na lopatky navíc vysoko teplotní koroze. Vysoko teplotní koroze vzniká spolupůsobením tlaku, chemických vlastností a rychlosti proudění spalin. Lopatkové materiály na základě niklu a chromu vykazují velmi dobrou odolnost proti vysoko teplotní korozi (viz tab. 1) [9].

	C	N _i	C _o	C _r	A _l	T _i	M _o	F _e
Nimonic 80A	0,1	75	-	19,5	1,4	2,3	-	<3
Nimonic 91	0,04	47,5	20	28,5	1,2	2,3	-	-
Nimonic 101	0,04	49,16	19,7	24,2	1,4	3	1,5	<1
Udimet 520	0,04	57,16	12,5	19	2	3,1	6,2	-
Udimet 720	0,035	56,46	15	18	2,5	5	3	-
S 590	0,4	20	20	20	-	-	4	24
A 286	0,05	25,5	-	15	0,2	2	1,3	55,95

Tabulka 1 [9]

Jako příklad uvádím některé tuzemské slitiny, které jsou používány u oběžných a rozváděcích lopatek (viz tab. 1).

Hutní značka	maximálně do teploty [°C]		typ
	rozdávěcí lopatky	oběžné lopatky	
VZÚ 60	800	700	Cr15NiCoWMoTi
Poldi AKNC	800	700	Cr20NiTiAl
Poldi AKND	800	800	Cr20Co20NiTiAl

Tabulka 2 [9]

2.2.7 Filtry

Největší důraz je kladen na instalaci filtrů u sání kompresoru, a to z důvodu hrozícího nebezpečí vniknutí nečistoty, např. prachu společně s nasávaným médiem. Pro zlepšení kvality filtrace se provádí několikastupňová filtrace. Filtry lze rozdělit na suché (textilie, papír) a mokré (olejový). [14]

2.2.8 Separátory vlhkosti

Separátory vlhkosti slouží k odloučení kapek vody z komprimovaného proudu vlhkého vzduchu. Bývají nejčastěji umístěny za chlazenou část kompresoru a mezichladičem z toho důvodu, že v těchto místech dochází ke strhávání kapek vody vlivem proudění vzduchu. [14]

2.2.9 Provoz turbíny

Startování spalovací turbíny

Start spalovacích turbín je poměrně rychlý a je ovlivněn např. druhem použitého paliva a mazacím systémem turbíny. Pokud se jedná o komprimovaný plyn, dojde k roztočení turbíny pomocí stlačeného plynného paliva. Start turbíny lze také provést použitím stlačeného vzduchu z kompresoru, který proudí do spalovací komory. Tento typ startu se používá u paliv kapalných.

U leteckých motorů se používá ke startu malá pomocná turbína se stlačeným vzduchem (PEJ - pomocná energetická jednotka, která se startuje pomocí elektrického startéru), PEJ může být také vybavena elektrickým generátorem ke startu hlavní turbíny pomocí elektrického protáčecího zařízení. [14]

Regulace

Regulace výkonu u spalovacích turbín se provádí především regulací vstřikování množství paliva, čímž se mění teplota. Vstříknutím menšího množství paliva poklesne i teplota, a tím se sníží objemový průtok turbínové části (průtočné průřezy turbíny jsou konstantní), což má za následek pokles tlaku za kompresorovou částí. [14]

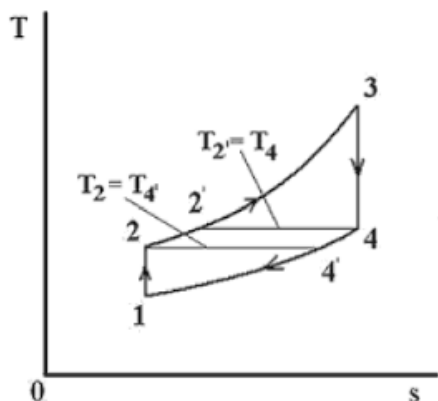
Regulaci můžeme také provádět změnou komprese, ale k této regulaci je zapotřebí, aby kompresorová část byla k těmto účelům patřičně vybavena. U proudových motorů se mění i otáčky při regulaci. Podstatný vliv má i teplota nasávaného vzduchu a změna okolního tlaku. U leteckých turbín se používá vířivých zařízení předřazením lopatek u prvních stupňů kompresorové části. Tato část vytváří vír u špic rotorových lopatek a díky tomu se minimalizuje vznik odtržení proudu od profilu. Toto opatření má za následek snížení kompresního poměru, ale zároveň dojde ke zlepšení akceleračních charakteristik. [14]

2.2.10 Tlakové ztráty

Tyto ztráty značně ovlivňují účinnost stroje, jelikož rychlosti proudění bývají velmi vysoké a navíc dochází i k velkému víření v oblasti spalovacích komor. Tyto ztráty vznikají u ústí turbokompresoru ve filtrech, tlumičích hluku, vstupním hrdle a dále ve spalovacích komorách, výstupních hrdlech atd. Ztráty v jednotlivých sekcích soustrojí přímo ovlivňují měrnou vnitřní práci pracovní látky [14]

2.2.11 Zvýšení účinnosti

Dosažení potřebné termické účinnosti lze dosáhnout za předpokladu, bude-li přívod tepla při zvýšené teplotě z T_2 na T_2' , což nám umožní tepelný výměník spojený s odvodem tepla $4 \rightarrow 4'$ viz T-s diagramu (viz obr. 8) [4].



Isoentropická komprese 1→2

Isobarický přívod tepla 2→3

Isoentropická expanze 3→4

Isobarický odvod tepla 4→1

Obrázek 8 schéma v T-s diagramu [4]

U dokonalé výměny tepla se snižuje hmotnostní jednotka množství přivedeného tepla na:

$$q_p = c_p(T_3 - T_{2'}) = c_p(T_3 - T_4) \quad (2.1)$$

a tepla odvedeného na

$$q_o = c_p(T_{4'} - T_1) = c_p(T_2 - T_1) \quad (2.2)$$

U spalovací turbíny s výměníkem tepla zjistíme maximální tepelnou účinnost spalovací turbíny pomocí vztahu [4]

$$\eta_t = 1 - \frac{Q_o}{Q_p} = 1 - \frac{T_2 - T_1}{T_3 - T_4} \quad (2.3)$$

použitím poměrných tlaků ze stavových rovnic (rovnice 2.4) a teploty T_4 (rovnice 2.5) [4]

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{k}{k-1}} = \left(\frac{T_3}{T_4}\right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (2.4)$$

$$T_4 = T_3 * \frac{T_1}{T_2} \quad (2.5)$$

je tepelná účinnost

$$\eta_t = 1 - \frac{T_2}{T_3} \quad (2.6)$$

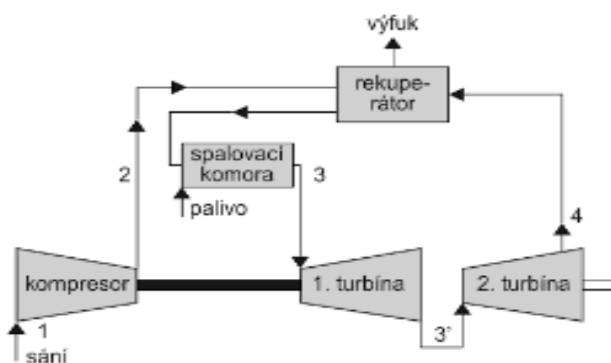
nebo při použití tlaků

$$\eta_t = 1 - \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (2.7)$$

Turbíny vyrobené v dnešní době jsou schopné dosáhnout tepelné účinnosti až 35 %. Abychom docílili vyšší tepelné účinnosti, používá se regenerace tepla, mezichlazení stlačeného vzduchu nebo dodatečné spalování [4].

Regenerace tepla

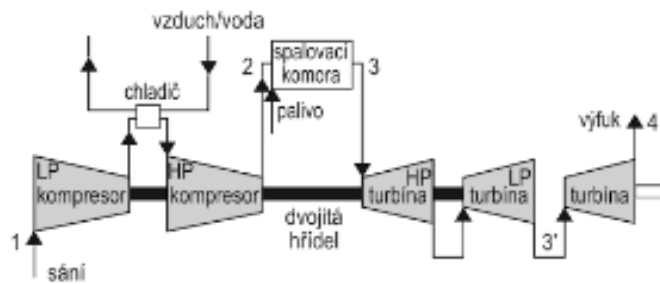
Zvýšení účinnosti pomocí regenerace tepla docílíme tak, že ohřejeme stlačený vzduch za kompresorem pomocí horkých spalin odcházejících na výstupu z turbíny. Díky tomu se zmenší potřebné množství tepla, které je přiváděno do spalovací komory a zároveň i docílíme snížení teploty spalin na výstupu z turbíny. K uskutečnění regenerace tepla je zapotřebí i další zařízení, a to tepelný výměník. K tomuto účelu se používají rekuperační výměníky tepla (vzduch a spaliny nám odděluje teplosměnná plocha) a ojediněle i regenerační výměníky tepla (vzduch a spaliny smáčí stejnou teplosměnnou plochu střídavě). U malých spalovacích turbín s malým poměrem tlaku se používají otáčivé regenerační výměníky s keramickou maticí. (viz obr. 8) [14].



Obrázek 8 Schéma turbíny s rekuperátorem [4]

Mezichlazení stlačeného vzduchu

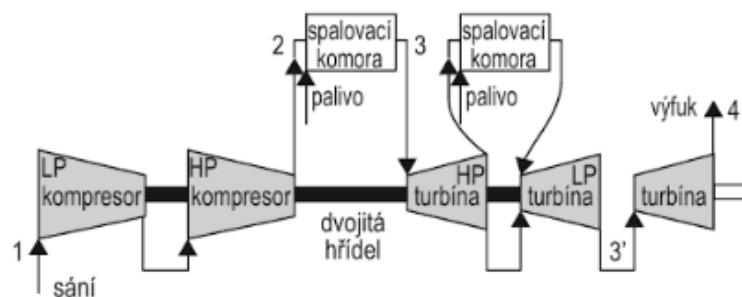
Jednou z dalších metod pro zvýšení účinnosti spalovací turbíny je snížení odběru výkonu kompresoru. Chladič vzduchu je umístěn mezi dva stupně, na které byl rozdělen kompresor. Takto je i rozčleněna turbína, která pohání kompresory. Stlačený vzduch a jeho následné chlazení můžeme realizovat např. pomocí náporu okolního vzduchu nebo u vodních plavidel lze použít okolní vodu. Spalovací turbína používající dvoustupňový kompresor s mezi chlazením stlačeného vzduchu je na (viz obr. 9) [4].



Obrázek 9 Schéma turbíny s mezi chlazením stlačeného vzduchu [4]

Dodatečné spalování

Poslední volbou, jak docílit vyšší účinnosti je zvýšit teplotu spalování pokud možno co na nejvyšší teplotu. Pokles teploty spalin je zapříčiněn jejich expanzí v turbíně. Pokud spalovací turbína pracuje s přebytkem vzduchu, je možné pomocí dodatečného přidání paliva expandované plyny dohřívat. Kvůli technické náročnosti se souvislé dohřívání nepoužívá. V praxi se rozdělují turbíny na dvě části a spalovací komoru, která umožňuje při průchodu spalin z jedné části do druhé ohřátí těchto spalin. Pomocí tohoto způsobu lze docílit navýšení účinnosti spalovací turbíny o 1-3 %. (viz obr 10) [4].



Obrázek 10 Schéma turbíny s dodatečným spalováním [4]

2.2.12 Paliva pro spalovací turbíny

Spotřeba paliva spalovací turbíny je dána maximální přípustnou pracovní teplotou na výstupu ze spalovací komory. Vysokoteplotní kobaltové a niklové legury nám mohou při jejich použití výrazně snížit spotřebu paliva. Jako další možnost k docílení snížení množství paliva se používá keramických materiálů, které nám umožní výrazně navýšit pracovní teplotu. Jako palivo pro tyto turbíny lze použít např. stlačený zemní plyn, nafta, propan-butan, petrolej, kerosen aj. [4].

2.3 Použití spalovacích turbín v dopravě

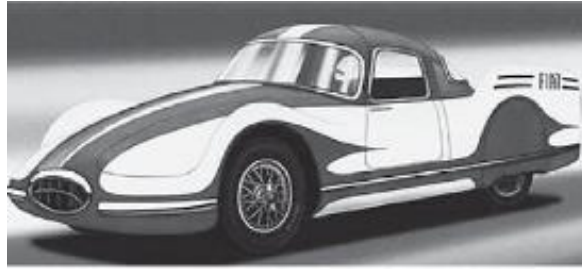
2.3.1 Silniční doprava

Anglický konstruktér automobilky Rover F. R. Bell v roce 1950 sestrojil první turbínou poháněný osobní automobil. Turbína byla umístěna ve vozidle za sedačkami a vozidlo bylo určeno pro dvoučlennou posádku. Vzduch vstupující do turbíny byl po stranách vozidla a v horní části zádě vycházely spaliny do ovzduší. Vozidlo dosahovalo maximální rychlosti 140 km.h⁻¹ a otáčky turbíny byly 50 000 min⁻¹. Jako palivo sloužila nafta, benzín, anebo petrolej. Vozidlo nebylo bohužel sériově vyráběno kvůli vysoké spotřebě paliva, a tak prototyp vozidla skončil v londýnském Science muzeu. Osobní automobil Jet 1 (viz obr. 11) [4].



Obrázek 11 Osobní automobil Jet1[4]

Roku 1954 italská firma Fiat vystavila na turínském autosalonu koncept sportovního vozidla Turbina, které bylo poháněno spalovací turbínou (viz obr. 12). Toto vozidlo započalo svůj vývoj v roce 1948 a v dubnu roku 1954 bylo vyzkoušeno na zkušební dráze v Lingottu. Motorová část obsahovala dva turbínové kompresorové stupně a udávaný výkon turbíny byl 221 kW (300k) při otáčkách 22 000 min⁻¹. Výkon byl přiváděn na zadní kola přes redukční převodovku. Maximální rychlost vozidla byla 250 km.h⁻¹. Základem vozidla Turbina bylo nezávislé zavěšení kol a trubkový rám. Po měsíci testovacích zkoušek byl projekt ukončen, a to z důvodu trvalých problémů s přehříváním a vysoké spotřebě. Tento jedinečný prototyp můžeme nyní vidět v turínském automobilovém muzeu. [4]



Obrázek 12 Vozidlo Turbina [4]

V USA probíhala spolupráce firem General Motors a Chrysler na vývoji spalovací turbíny pro vozidla. Výsledkem jejich spolupráce bylo vozidlo General Motors, které neslo název Firebird a vznikly tři vývojové řady Firebird I, Firebird II, Firebird III. [4]. Roku 1963 byl poprvé použit rekuperátor ke zvýšení účinnosti spalovací turbíny u vozidla společnosti Chrysler. [4]

O mnoho let později roku 2000 byl vytvořen první motocykl používající spalovací turbínu. Výkon turbíny byl 283 kW a maximální rychlost, která byla otestována, činila 365 km.h⁻¹. Tento motocykl se zapsal do Guinnessovy knihy rekordů jako nejdražší a nejrychlejší motocykl, cena motocyklu je 185 000 \$ [4]. Veškeré snahy konstruktérů použít ve vozidlech spalovací turbínu k jejich pohonu se neosvědčily, a tak jejich použití zůstává historickou událostí. [4]

Čínská automobilka minulý rok na autosalonu v Ženevě představila koncept hypersportu s označením AT96 a GT 96. Tyto vozy používají hybridní pohonné ústrojí, které se nazývá TREV (Turbine - Recharging Electric Vehicle), tedy turbínou dobíjené elektrické vozidlo. Oba vozy jsou vybaveny mikroturbínou, která slouží k pohonu generátoru a tento generátor následně dobíjí baterie vozidla. Vozidlo s označením AT96 je zkratka pro Aviation Turbine a spaluje paliva klasická tekutá. GT96 je zkratka pro Gas Turbine a tato turbína spaluje paliva plynná. Díky velkým rozměrům nádrží by tato vozidla měla ujet vzdálenost až 2000 km [29].

Použití mikroturbín společnosti Capstone

Velmi kompaktní jsou mikroturbíny společnosti Capstone, které byly vyvíjeny pro mobilní použití. Turbína C65 váží 135 kg a měří 67*89*76 cm. C30 váží 91 kg. Stejnoseměrné napětí autobaterie převádí inventar na elektrický proud pro generátor, který je ve funkci startéru. Váží 23 kg a i tento blok pracuje na nejrůznější paliva [15].

Autobusová doprava

Společnost Capstone pro silniční vozidla, hlavně tedy pro autobusy, dodala více jak 100 ks turbín. Rázy a vibrace, jež způsobuje běžný silniční provoz, akceptuje turbína dobře. Hybridní elektrobusy mají navíc generátor s mikroturbínou a díky tomu se prodlužuje dojezd ze 100 km eventuálně až na 800 km vzhledem k ekologickému dobíjení. [15]

Výhody mikroturbín zvětšují výhody elektrobusů, protože:

- Prodlužují dojezd autobusů vlivem průběžného dobíjení baterií.
- Dodávají energii pro klimatizaci i pro vytápění.
- Napomáhají zvýšení výkonu při akceleraci vozidla.

Při stání vozidla ve stanicích, při chodu motoru na volnoběh nebo s malým výkonem jsou baterie dobíjeny. Při dobíjení má mikroturbína optimální a konstantní otáčky. Stabilní rotační pohyb turbíny je nesrovnatelně lepší z ekologického hlediska než naftový motor díky mnoha přechodovým jevům, které jsou způsobeny přerušovaným hořením, proto jsou autobusy vybaveny turbínou mnohem tišší než dieselové. [15]

Jako palivo pro tyto turbíny slouží stlačený zemní plyn, nízko sirná nafta, propan-butan i kerosen aj. Lze si představit dvě koncepce dle poměru cen energií. Pokud možné s co nejmenší turbínou, která umožní navýšit dojezd oproti bateriím pouze na minimální požadovaný výkon, dále k dodávce tepla, popřípadě chladu. Druhou možnou variantou je turbínový výkon daleko větší a tento výkon se už značně podílí na akceleraci vozidla a baterie mají pak nižší hmotnost. Jakmile začne vozidlo brzdit, využívá se rekuperace, díky které jsou baterie dobíjeny. Chlazení u těchto typů turbín je vzduchové, odpadá velké množství mechanických částí jako startér, vodní čerpadlo, chladič, řemenový převod a výrazně se snižují náklady spojené s údržbou. [15]

Společnost DesignLine dodala autobusy vybaveny turbínami Capstone do New Yorku, Austrálie, Baltimoru, Hongkongu aj. Modernizované verze se nazývají ECO Saver. V USA splňují bez úpravy výfukových plynů normy čistoty ovzduší. [15]

Nákladní vozidla

V 50. a 60. letech minulého století bylo prováděno mnoho experimentů s použitím spalovacích turbín. Jako jeden z příkladů bylo použití spalovací turbíny v nákladním vozidle, který nesl název Turbo Titan II (viz obr 13) a zrealizovala jej společnost Chevrolet a světlo světa spatřil roku 1966. Na první pohled byl patrný nadčasový design vozu, který zdaleka

nepřipomínal vzhled tehdejších nákladních vozidel. Kabina byla zaoblena kvůli lepší aerodynamice a v dolních rozích byly otvory, jimiž se nasával vzduch. Pístový motor nahradila plynová turbína GT-309, kterou vytvořila společnost General Motors. [29]

Výkon turbíny činil 215 kW a točivý moment byl $186 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ od volnoběhu. Provozní otáčky byly $35\,000 \text{ min}^{-1}$ a díky převodovce se dále snížily na 4000 min^{-1} . Výfukové plyny z turbíny byly směřovány do regenerátoru, který ohříval vzduch pro vytápění kabiny a dále pokračoval plochým výfukem. Bylo využito zhruba 90 % tepla výfukových plynů pro topení, ale třeba také pro snížení spotřeby paliva a regenerátor fungoval i jako tlumič výfuku. Vozidlo Turbo Titan II mělo vlastní návěs, který byl vyroben z nerez. Bohužel toto vozidlo mělo vysoké emisní limity oxidu dusíku a produkce tohoto pohonného systému byla velmi drahá, došlo k zastavení vývoje, ale i přesto najezdilo mnoho mil po celých Spojených státech. [29]



Obrázek 13 Vozidlo Turbo Titan II [29]

2.3.2 Železniční doprava

Turbínová lokomotiva

Turbína, jakožto jedno z jednodušších soustrojí, vždy lákala konstruktéry. První turbína byla parní a to ve 30. letech minulého století u německé parní lokomotivy. Údržba byla náročná a užitná hodnota se nezvýšila, čili toto řešení se neujalo. K použití plynové turbíny v kolejové dopravě došlo ve 40. letech 20. století. [16]

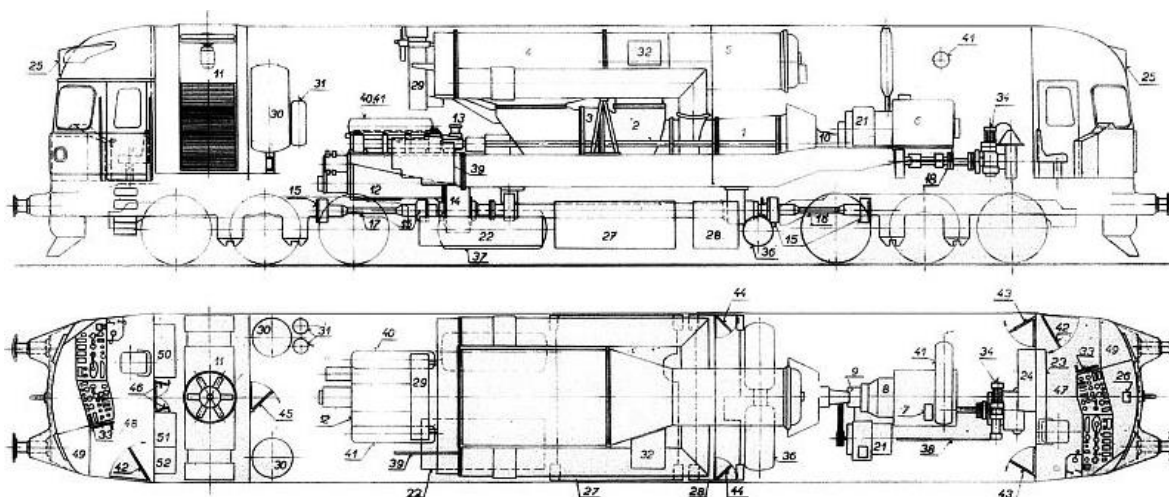
Jako palivo lze použít prakticky cokoliv, většinou se však používal těžký topný olej, protože v 50. letech byl odpadem i zbytkem při zpracování ropy a jeho cena byla velmi nízká. Ve spojených státech došlo ke konstrukci několika lokomotiv na práškové uhlí. K použití plynových turbín v lokomotivách v 50. letech 20. století velkou mírou přispěl i dostatek nafty

v období, kdy se hledal náhradní pohon za parní lokomotivy. V Evropě bylo do roku 1960 postaveno 18 prototypů lokomotiv s turbínou a některé byly využity v provozu. [16]

Lokomotiva Škody Plzeň

Tato lokomotiva má dvouhřídelové provedení, což znamená, že turbína je rozdělena mechanicky na hnací turbínu (pohon lokomotivy) a generační (pohon plnicího axiálního kompresoru). V jednom tělese se nacházejí obě turbíny a výhodou pro trakci je vhodný průběh krouticího momentu. Tento moment s poklesem otáček hnací turbíny roste a umožňuje i mechanický přenos výkonu. [15]

Česká lokomotiva byla postavena v plzeňské Škodovce (dříve Závody Vladimíra Iljiče Lenina). Měla dvouhřídelové provedení a mechanický přenos výkonu, označení nesla 1 Tlo. Realizace byla zahájena roku 1954 a upřesněné zadání až v roce 1957 a bylo chápáno jako státní úkol. Lokomotiva měla být vystavena na výstavě v Bruselu roku 1958. Velice krátký termín dokončení a špatná dostupnost se západními vyspělými zeměmi směřovaly k tomu, že bylo zapotřebí vyrobit žárovebný materiál z vlastních surovin a hnací agregát včetně mechanického přenosu výkonu konstruovali pracovníci, kteří neměli žádné zkušenosti s kolejovými vozidly, tyto nedostatky měly za následek mnoho závad při provozu např. únavové lomy apod. Dle plánu vznikly dvě turbínové jednotky pro 2 lokomotivy, které nesly označení TL 659.001 (viz obr. 14) a 002. Vzniklé závady a jejich následné opravy na turbíně začínaly vždy výrobou materiálu. [15]



Obrázek 14 TL 659.001 [15]

- 1 axiální 18° kompresor (nasává až 20 m³ za vteřinu vzduchu na 425 kPa)
- 2 turbína (hnací 1° výkon 2335 kW – max. 5800 ot., generační 2° max. 5500 ot.)
- 4 výměník ohřevu vzduchu

- 5 spalovací komora
- 6 motor TATRA 111 pro roztáčení turbíny a pojezd lokomotivy
- 11 chladicí blok oleje turbíny a převodovky
- 12 dvoustupňová převodová skříň
- 13 brzda turbíny, která drží turbínu zastavenou během stání vlaku
- 14 redukční převod (výměnou kol pro nákladní/rychlík)
- 16, 17 kloubové hřídele pohonu podvozků
- 21 dynamo 36 kW/115 V
- 22 vzduchojem
- 27 palivová nádrž turbíny
- 28 palivo motoru T 111
- 34 kompresor 1 MPa [15]

Lokomotiva byla dlouhá 23 500 mm mezi nárazníky, hmotnost 125 t, rozvor podvozku 2 x 1550 mm, skříň je zavěšena na každý třinápravový podvozek čtyřmi šikmými závěskami, které zajišťují natáčení podvozku a příčné vypružení. Účinnost byla 12,2 % a turbíny 17,5 %, rychlost nákladních lokomotiv byla 60 / 80 km/h (rychlíková verze 94 / 125 km/h). [16]

U modelu lokomotivy TL 659.002 byl zjištěn výkon 2098 kW na hřídeli. Účinnost tohoto typu byla 10,8 % a turbíny 14,1 %. Nižší účinnost byla zapříčiněna odstraněním výměníku z výfuku. V době, kdy docházelo k vývoji této lokomotivy, nebyla žádná zkušební zařízení, takže se vše testovalo za provozu. Během provozu bylo zjištěno, že pro železniční provoz nejsou spalovací turbíny vhodné, protože turbína má vlastnost hydrodynamického převodu a kvůli velké tažné síle musí být otáčky generační turbíny vysoké. Od volnoběžných až po maximální otáčky trval přechod 1 minutu, což mělo za následek zdržení rozjezdu. Dalším velkým problémem byl start studené turbíny, protože turbína se mohla po startu zatěžovat až po 10 minutách. Doběh turbíny po vypnutí paliva trval 10 minut a pak muselo následovat 20. minutové protáčení kvůli rovnoměrnému chlazení. Při volnoběžných otáčkách byla spotřeba paliva velmi vysoká asi 30 % spotřeby u maximálního výkonu. Díky velkému objemu výfukových plynů nebylo možné tlumit zvuk, a proto byla lokomotiva velmi hlučná.

Provoz české lokomotivy byl až do dne 30. 9. 1965, kdy nastala porucha lopatek hnací turbíny a lokomotiva už nebyla znovu opravena. [16]

TGV 001

Myšlenka pro konstrukci nejrychlejšího vlaku TGV vznikla 20 roků před jeho skutečným použitím. Koncem 60. let se zrodila nová koncepce. SNCF chtěli dosáhnout zvýšení rychlostí neelektrifikovaných tratí ze 180 km.h⁻¹ na 200 km.h⁻¹ díky pohonu benzínových turbín. V této době byla elektrická energie levná a použitím plynových turbín (původně

sestrojené pro helikoptéry) se dalo lehce a účinně dodržovat požadavky na zvýšení síly. SNCF předvedli benzínový pohon turbíny u turbovlaků ETG (jednotka benzínové turbíny) v Paříži roku 1970. Společný program SNCF a průmyslu pro vývoj turbínových jednotek nesl kódové označení CO3. Slibné výsledky dosahoval X4200 TGS (předchůdce ETG) při zkušební rychlosti $252 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ v roce 1971.

Na tento popud postavila společnost Alsthom prototyp rychlého turbovlaku. Tak vznikl turbovlak TGV 001 (viz obr. 15). Tento vlak byl zkušebním pro rozsáhlý výzkumný program zahrnující: pohon, dynamiku, brzdění, aerodynamiku atd. Byl postaven pouze jeden vlak. TGV 01 byl složený ze dvou lokomotiv, mezi kterými byly vloženy tři vozy, přičemž celý vlak byl pevně spojen dohromady. Nápravy byly poháněny elektrickým motorem. Každá lokomotiva měla dvojici turbín (TURMO IIIG a poté TURMO X, které byly použity v helikoptéře Sud Aviaton's) a mohly udržovat stálou rychlost. Vlak TGV 001 absolvoval 5227 zkušebních jízd, přičemž najezdil 500 000 km, při rychlosti $300 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. U 175. jízdy dosáhl svoji nejvyšší rychlost, a to $318 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ roku 1972. Tato rychlost je stále světovým rekordem pro neelektrický vlak. [28]



Obrázek 15 TGV 001[28]

2.3.3 Letecká doprava

Letadla

Dne 30. března 1941 v 15:18 vzlétl z letiště Rostock - Marienehe první německý proudový stíhací letoun Heinkel He 280 V2 na světě. O šest týdnů později, dne 15. května vzlétl ve Velké Británii první britský proudový letoun s odstředivým motorem W1X s tahem $3,12 \text{ kN}$ (2. na světě). Projekt s označením P 1065V1 byl kvůli špatné dostupnosti proudových motorů osazen i pístovým motorem Junkers Jumo 210G s výkonem 545 kW spojený s dvoulistou vrtulí. Tento stroj dostal označení Messerschmitt Me 262 V1 a poprvé vzlétl 18. dubna 1941. Jeho nástupce nesl označení Me 262 V3 (viz obr. 16) a byl osazen jednotkami Jumo 004, které

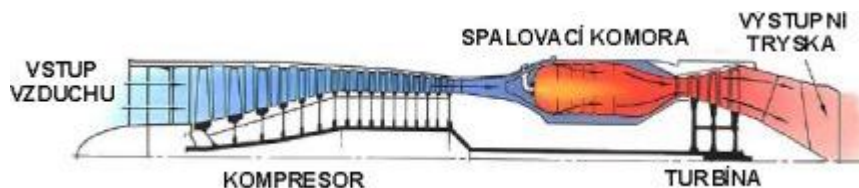
dosahovaly statického tahu 5,88 kN (600 kg). Podařilo se odstranit mnoho počátečních závad a tento stroj byl poháněn čistě proudovými motory, pístový motor z předešlé generace byl odstraněn. Stroj vzlétl v červenci roku 1942. Konečná verze Me 262 V6 s jednotkami Jumo 004B vzlétla 17. října roku 1943 a byla vybavena zatahovacím podvozkem, prostorem pro střely a výstřelnými kanály, elektricky nastavitelnou vodorovnou ocasní plochu a vysokorychlostní křídlem s automatickými sloty na náběžné a klapkami na odtokové hraně [3].



Obrázek 16 Me 262 V3 [3]

Jednoprúdové motory

Jedny z prvních jednoprúdových motorů (viz obr. 17) se objevily ve 30. letech 20. století. První bojové nasazení měly koncem 2. světové války. Po skončení války nastal jejich obrovský rozmach a většina nových konstrukčních řešení letounů vycházela z jednoprúdových motorů. Konec jednoprúdových motorů nastal v 70. a 80. letech z důvodu nástupu dvoprúdových motorů. Dle odhadů budou první dvě desetiletí 21. století znamenat ukončení většiny větších jednoprúdových motorů. Jednoprúdové motory mohou dosahovat výkonu až 200 kN, jelikož mají vysokou výstupní rychlost plynů při nízké rychlosti, dosahují nízké propulzní účinnosti., ale při vysoké (nadzvukové) rychlosti ($M > 2$) pracují s účinností vysokou. Použit byl například u letounu Su-7. [17]



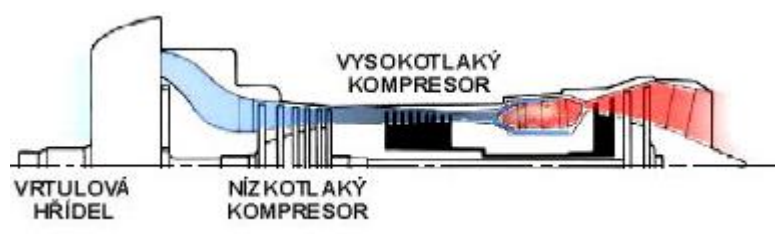
Obrázek 17 Schéma jednoprúdového motoru [16]

Turbovrtulové motory

K rozšíření turbovrtulových motorů (viz obr. 18) došlo v první polovině 50. let, a to nejdříve na bombardovacích a transportních letounech. Následně našly uplatnění i v civilních lehkých letounech. V dnešní i budoucí době budou nejlepší u letounů, které dají přednost ekonomickému provozu před vysokou rychlostí. [17]

Motory jednoproudové fungují s nižší účinností při nízkých rychlostech, proto vznikly pro pomalé letouny motory turbovrtulové. Vrchní hranice, kdy vrtulové motory mají vyšší propulzní účinnost než proudové, je zhruba $800 - 900 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Od rychlosti cca $550 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ začíná klesat účinnost, jelikož při této rychlosti je rychlost proudění vzduchu přes vrtulové listy hodně velká a dochází ke vzniku turbulencí a klesá tak energie (kolem zvukové rychlosti) špiček vrtulových listů. Reduktor (vrtule) je poháněn buď vlastní turbínou, anebo stávající. Je zapotřebí, aby turbína využila celou energii spalin, protože potřebný tah není vyvolán proudem horkého vzduchu, jako je tomu u proudových motorů, ale vrtulí urychlující vzduch. Za turbínou klesá tak až na hodnotu tlaku atmosférického.

Jedním z nejvýkonnějších turbovrtulových motorů je sovětský NK-12 z bombardéru Tu-95, jeho výkon nejsilnější verze je 11033 kW. [17]



Obrázek 18 Schéma turbovrtulového motoru [17]

Dvouproudové motory

Návrh dvouproudového motoru (viz obr. 19) vznikl v počátcích proudového věku, ale použit v letadlech byl až v polovině 60. let a ke většímu rozmachu došlo až v 70. letech. V 80. letech se stal dvouproudový motor u nově projektovaných letounů samozřejmostí. V dnešní době je to nejvhodnější koncepce pro letouny, které dosahují max. rychlostí $900 - 2500 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Pomocí přídavného spalování u nadzvukových letounů dosahuje maximální tah motorů 300 kN, v případě velkých bombardérů u stíhacích letounů se dostáváme pod hranici 150 kN. Velké dvouproudové motory s vysokým obtokovým poměrem používající se u velkých dopravních letounů dosahují tahu blížícího se 450 kN.

Početná skupina dvouproudových motorů řeší nedostatky jedнопroudových a turbovrtulových motorů. Rozsah působení těchto motorů je cca od rychlosti machu $M = 0,7$, do $M = 2,0$ až $2,5$ a díky tomuto intervalu mohou pracovat efektivněji než jiné typy. Dvouproudový motor se také označuje jako turbodmychadlový. Ve spojitosti s dvouproudovými motory se objevil nový parametr, a to obtokový poměr. Udává nám poměr mezi průtokem vzduchu vnějším a vnitřním proudem. Pokud je celkový průtok $160 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ a obtokový poměr $0,6$, jádrem proteče $100 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ a vnějším proudem $60 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$. [17]

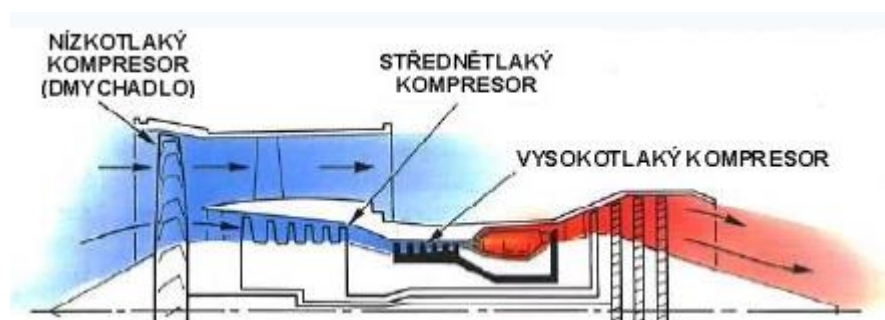
Mezi výhody dvouproudových motorů patří:

- Hlučnost motorů klesá díky zvýšení průtoku vzduchu a snížení rychlosti výstupních plynů.
- Průměrná teplota výstupních plynů klesá, a to díky mísení horkých spalin z jádra a studeného vzduchu z vnějšího proudu.

Plyny vystupující z motoru jsou pomalejší, ale motorem obvykle protéká více vzduchu. Jak známo, kinetická energie roste se čtvercem výstupní rychlosti plynů. S výstupní rychlostí roste tah lineárně. Jelikož kinetická energie vzniká přeměnou energie dodané pomocí spalování, pak zjistíme, že čím je rychlost výstupních plynů nižší, tím dostaneme menší tah, ale také menší spotřebu paliva. Díky tomuto principu využijeme dodanou energii na tah efektivněji [17].

Nevýhody dvouproudových motorů:

- Vyšší cena
- Nákladnější údržba [16]



Obrázek 19 Dvouproudový, tříhřídelový motor s vysokým odtokovým poměrem [17]

Vrtulníky

Turbo hřídelové motory

Rozvoj turbo hřídelových motorů (viz obr. 20) nastal koncem 50. let 20. století díky počátku rozvoje vrtulníků. Turbo hřídelový motor je koncepčně stejný jako motor turbovrtulový, avšak turbo hřídelový motor se používá pouze pro pohonné jednotky vrtulníků, nikoliv letadel. Hřídel, která vystupuje z motoru, je hnána přes reduktor nízkotlakou turbínou. [17]



Obrázek 20 Turbo hřídelový motor [17]

2.3.4 Lodní doprava

Queen Mary II

Nejdelší výletní loď na světě o délce 345 m a výtlaku 75 000 tun Queen Mary II používá ke svému pohonu kombinaci pístových spalovacích motorů a dvou turbínových jednotek LM2500. Celkový výkon pístových i turbínových motorů je 117,2 MW, z toho turbínové jednotky LM2500 dodávají 50 MW. Turbína LM2500 je tvořena aero derivátem vycházejícího z leteckého motoru GE CF6-6 o tahu 234 kN, který je využit i u Boeingu 747. Generátor s turbínou jsou uloženy ve speciálním kontejneru, který je konstruován pro utlumení vibrací a odhlučnění. K pohonu lodí slouží vyrobená elektřina s elektrickými motory, které jsou umístěny v gondolách mimo trup lodi. Kvůli koroznímu prostředí, které způsobuje nasávaný okolní mořský vzduch, musí být průtočné části turbíny z materiálu odolávajícímu korozi. Aero deriváty LM2500 nalezneme nad palubní částí lodi u sání vzduchu a výfuku. Pod těžištěm lodi nalezneme umístěné klasické spalovací motory. [18]

Plavidlo třídy Visby

Plavidlo třídy Visby (viz obr. 21) vstoupilo v roce 2009 do operační služby armády. Toto plavidlo provozuje vojenské námořnictvo Švédska. Tato loď disponuje technologií stealth, která umožňuje obtížnou detekovatelnost. Na klidném moři je plavidlo zjištěné na vzdálenost menší než 22 km, při nepříznivém počasí až na 13 km. Ocel, která je nedílnou součástí

konstrukce lodi, byla nahrazena uhlíkovým kompozitem kvůli zanechávání minimální magnetické stopy. Stealth technologie neumožňuje, aby bylo plavidlo zcela neviditelné, ale pouze aby bylo zjistitelné pro radar mnohem později. U tohoto plavidla byl lodní šroub umožňující pohon nahrazen hydrodynamickým pohonem firmy Rolls-Royce. Tento pohon výrazně snižuje hydroakustickou stopu a stává se tak obtížně zjistitelný pro ponorky. Pro odstranění magnetické stopy plavidla byl použit bronz místo tradiční oceli. O pohon se starají dva diesellové motory MTU 16V 2000 N90 nebo čtyři plynové turbíny TF 50 A od společnosti Honeywell. Při použití diesellových motorů dosahuje plavidlo rychlosti až 15 uzlů (27,7 km.h⁻¹) a v případě použití plynových turbín dosahuje loď rychlosti až 35 uzlů (64 km.h⁻¹). [19]



Obrázek 21 Plavidlo třídy Visby [19]

2.3.5 Vojenská technika

Vozidlo TZ-74

Toto vozidlo bylo postaveno na automobilním podvozku a na něm byl umístěn letecký proudový motor. Vozidlo TZ-74 (viz obr. 22) sloužilo k čištění bojové techniky kontaminované radioaktivními, biologickými a otravnými látkami, sloužilo i k mnoha dalším pozemním účelům, jako např. rozmrazování a odstraňování sněhu. Využito mohlo být také k zadýmování vstříkovaním nafty, oleje nebo jejich směsí do proudového motoru. Hlavní částí zařízení je podvozek z vozidla Tatra T-148 a proudový motor z cvičného letounu L-29 Delfín. Palivo a voda jsou umístěny v dělené nádrži o objemu 7000 l. Aby voda nezamrzala, je vyhřívána naftovým generátorem. Hlavní předností tohoto vozidlo bylo, že mohlo pracovat i za nízkých teplot (pod 0 °C) a v minimální závislosti na terénních a povětrnostních podmínkách. [20]



Obrázek 22 Vozidlo TZ-74[20]

Objekt 219

Takto bylo pojmenováno vozidlo, na kterém probíhaly první experimenty s turbínovým motorem GTD-1000T. Turbína byla umístěna na upravený podvozek tanku T-64. Při počátečních zkouškách bylo zjištěno, že pojezdové ústrojí tanku T-64 bude při vyšších rychlostech vlivem extrémních vibrací kol a kovových pásů, pohonnou jednotku s plynovou turbínou omezovat. Na základě těchto poznatků došlo v roce 1971 ke konstrukční změně zavěšení kol. V letech 1968-1971 se vyrobily prototypové série čítající cca 60 kusů, na kterých se prováděly různé zkoušky.

Jedním z hlavních problémů bylo nasávání prachu, které bylo pro turbínu zcela nežádoucí, a proto byl zlepšen systém vzduchových filtrů a použity pryžových protiprachových zástěr. Vojenské zkoušky v roce 1973 zjistily, že nebylo možné splnit požadavek životnosti 500 provozních hodin a tato vozidla vykazují abnormální spotřebu paliva. Díky všem těmto nevýhodám byl tento projekt na pokraji zrušení, ale díky nástupu Dmitrije Ustinova, došlo 6. srpna 1976 k jeho náhlému schválení k výrobě pod vojenským označením T-80 (viz obr. 23). Problémy, se kterým se potýkalo toto vozidlo, měly být dle slov Ustinova odstraněny až při sériové výrobě. [21]



Obrázek 23 T-80 [21]

MBT M1 Abrams

M1 Abrams (viz obr. 24) je hlavním pilířem obrněných amerických jednotek a svůj název nese po generálu Creightonu Abramsovi a byl uveden do provozu v roce 1980. Vyrábí ho firma General Dynamics. Na masivním podvozku je umístěna velká otočná věž přibližně ve tvaru pětiúhelníku. Pancéřování je složeno z ocelových plátů a keramických bloků, které jsou spojeny polyuretanovou pěnou, kritická místa jsou zesílena díly z ochuzeného uranu. O pohon tohoto vozidla se stará dvou kompresorový turbínový benzínový motor AGT-1500 o výkonu 1154 kW. Hydrokinetická plně automatická převodovka zajišťuje převody tanku, poskytuje 4 rychlosti vpřed (maximální rychlost $67,72 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ a v terénu $48,3 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$), dále 2 rychlosti vzad, neutral a otočení na místě. Při jízdě zpět lze dosáhnout maximální rychlosti $40 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Akcelerace tanku je z 0 na $30 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ za 7,2 s. Akční rádius je cca 426 km. Tank je schopný překonat vertikální překážky vysoké 106,68 cm, zákop široký 274 cm. [22]



Obrázek 24 M1 Abrams [21]

MAZ-7907

V roce 1985 Minské Automobilové Závody (MAZ) dokončily dva sovětské prototypy, které měly převážet největší rakety. Jednalo se o nákladní vozy, které měly 16, resp. 24 kol a poháněná byla všechna kola. Roku 1984 se ukázal projekt Celina-2, pod nímž se skrývala vozidla MAZ-7606 (viz obr. 25), jež měla 16 kol. O potřebný výkon se starala plynová turbína z tanku, která posílala na kola 961 kW, a kromě této turbíny disponovalo vozidlo také obyčejným vznětovým motorem o výkonu 253 kW. Dvě hydromechanické převodovky se staraly o přenos výkonu. Stroj byl široký 6.8 m, dlouhý 32.2 m, vysoký téměř 3,5 m a mohl uvést až 220 t. [23]



Obrázek 25 MAZ-7606 [23]

2.3.6 Bezpilotní letadla

Perspektivním oborem pro použití spalovacích turbín se jeví bezpilotní letadla (viz obr. 26, 27), pilotovaná na dálku, přesněji dálkově ovládaná. V US Air Force mají pro tato letadla různé názvy, jako např. „Reaper“ (sekačka), „Predator“ (dravec) nebo „Global Hawk“ (jestřáb). Tato skupina se dohromady nazývá drony. Doba, kterou mohou strávit ve vzduchu, je až kolem 20 h. Obsluha skýtá několik lidí, kteří se nacházejí v řídicím středisku. Dle druhu můžeme tyto letouny rozdělit na průzkumné, taktické, bojové atp. K pohonu slouží od pístových spalovacích motorů přes turboprotulové i dvouproudové motory. [27].



Obrázek 27 RQ-4 Global Hawk s Rolls-Royce [27]



Obrázek 26 MQ-9 Reaper- Honeywell turboprop 671 kW [27]

Střely s plochou dráhou letu Tomahawk

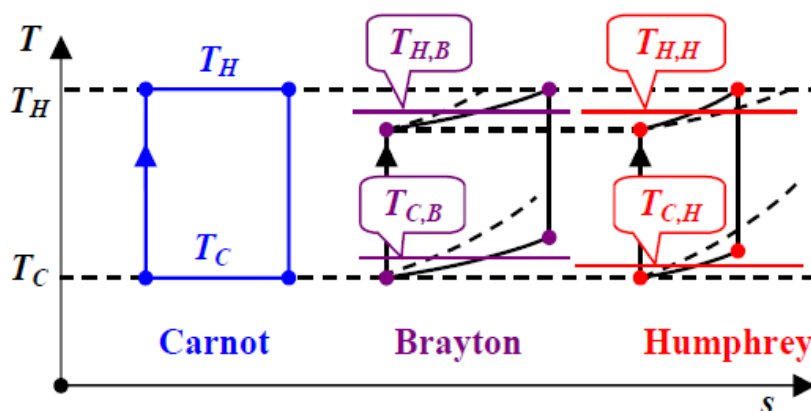
Tomahawk je řízená střela s plochou dráhou letu (viz obr. 29), která má válcový tvar a je uzavřena v hermetickém kontejneru. Tento kontejner lze umístit do svislé šachty na lodi, či ponorce, nebo do torpédometu ponorky. Z torpédometu, či svislé šachty je střela vypuštěna tlakem vzduchu nebo vody. V okamžiku, kdy střela opustí odpalovací zařízení a dostane se nad hladinu (v případě vypuštění rakety pod vodou), zažehne se raketový motor na tuhé palivo, který má za úkol dodat střele potřebnou rychlost a dopravit ji do požadované výšky a zhruba po 12 sekundách letu je odhozen. Poté dojde ke spuštění proudového motoru Williams F107-WR-400, který je umístěn na zádi rakety a jeho úkolem je udržovat potřebnou rychlost rakety, která může být až $900 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Krom sepnutí proudového motoru dojde také k rozložení nosných ploch, takže Tomahawk pokračuje k cíli fakticky jako malé proudové bezpilotní letadlo. Navigaci za letu umožňuje systém TERCOM (Terrain Contour Matching), který porovnává reálně snímaný obraz terénu s údaji, jež jsou uloženy v paměti střely před jejím odpálením. [33]



Obrázek 28 Tomahawk C (TLAM-C) britského královského námořnictva za letu [33]

3 Diskuze

3.1 Srovnání jednotlivých cyklů s Carnotovým cyklem



Obrázek 29 Porovnání jednotlivých cyklů v T-s diagramu [8]

- Humphreyův cyklus má větší účinnost μ_t při zachování stejného kompresního poměru ϵ než Braytonův cyklus ($T_{C,H} < T_{C,B}$), ale potřebuje specifické zařízení. [5]
- Carnotův cyklus má pokaždé větší termickou účinnost při stejných extrémních teplotách. [5]
- Při použití stejného kompresoru u obou cyklů (Humphreyův, Braytonův), můžeme dosáhnout při isochorickém přívodu tepla vyšší teplotu T_3 než u Braytonova cyklu a následně i vyšší práci cyklu. [5]

3.2 Porovnání spalovacích turbín s motory pístovým

Kromě zvýšení točivého momentu při poklesu otáček má turbína i mnoho dalších výhod v porovnání s klasickým pístovým motorem jako např.:

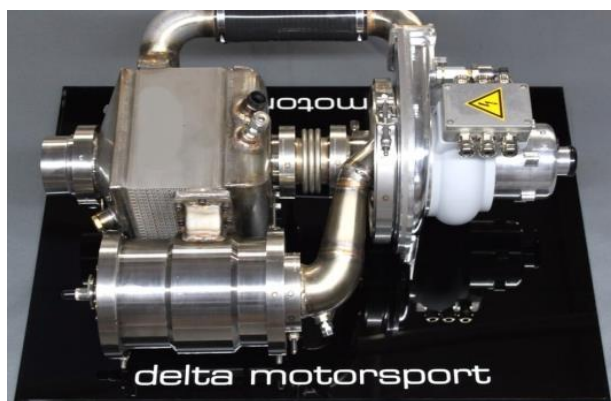
- Díky tomu, že turbína vykonává pouze rotační pohyb, dochází tím i k menším vibracím
- Výkonová hmotnost nižší cca o 15 %
- Turbína dokáže pracovat ve všech klimatických podmínkách bez chlazení
- Nižší nároky na startovací výkon, včetně jednoduchého spouštění za nízkých teplot
- Spotřeba mazacího oleje je v současnosti asi 5 krát menší než u pístových spalovacích motorů ($0,07$ až $0,14 \text{ g.kWh}^{-1}$)
- Díky vysokému přebytku vzduchu při hoření paliva, se ve spalinách nachází menší obsah CO a HC. [4]
- Menší nároky na údržbu díky použití minimálního množství pohyblivých součástí. [15]

Nevýhody:

- Dlouhá časová prodleva na změnu zatížení.
- Nároky na brzdovou soustavu jsou vyšší kvůli nízké účinnosti brzdění motorem.
- Větší nároky na převody k redukci otáček výstupní hřídele turbíny na otáčky, které jsou vhodné pro převod vozidla.
- Nízká ekonomičnost provozu z důvodu velké měrné efektivní spotřeby paliva, převážně při částečných zatíženích. [4]

3.3 Budoucí vývoj v silniční dopravě

Britská firma Delta Motorsport pracuje na konstrukci mikroturbíny MiTRE (viz obr. 30), která by měla prodloužit dojezd elektromobilů. Osvědčený technologický model turbíny MiTRE má výkon 17 kW. Britské automobilky Morgan a Ariel spolu s Delta Motorsport vyvíjejí pokročilý model této turbíny o výkonu 17 kW až 35 kW. Výhodou MiTRE je, že může pracovat na nejrůznější druhy paliva, ale také verze s výkonem 35 kW bude dle výpočtů o 40 % menší a 50 % lehčí než obdobný pístový motor. Delta Motorsport věří, že dosáhnou tepelné účinnosti turbíny až 35 %. Tato hodnota je srovnatelná s pístovými spalovacími motory. Díky použití nejnovějších materiálů lze navýšit teplotu v turbíně, a také zvýšit životnost turbíny. Snížit tření, a tím i navýšit otáčky, umožňují moderní ložiska. (např. mikroturbína TREV(Turbine-Recharging-Electric-Vehicle) s výkonem 36 kW má otáčky až $96\,000\text{ min}^{-1}$. [24]



Obrázek 30 mikroturbína MiTRE [23]

Automobil CMT-380 Hybrid

V roce 2010 byl na autosalonu v Los Angeles představen společností Capstone Turbine sportovní hybrid. Pro ukázkou výhod mikroturbíny vzniklo vozidlo CMT-380 Hybrid. Mikroturbína umístěná v tomto vozidla spaluje naftu či bionaftu. Celá hybridní jednotka byla umístěna do závodního automobilu Factory Five Racing GTM. Vozidlo dokáže ujet vzdálenost až 130 km beztoho, aniž by spotřebovalo jedinou kapku paliva. Jakmile dojde k vybití baterií, aktivuje se mikro turbínový motor, který zahájí dobíjení baterie. Baterie mohou být dobíjeny také tzv. plug-in (ze síťové zásuvky), nebo na dobíjecích stanicích. Jelikož je elektrický generátor umístěn na společné hřídeli s mikroturbínou, není proto nutné vozidlo opatřit chladicí nebo mazací kapalinou, protože mikro turbínový motor používá tzv. vzduchová ložiska. [26]

3.4 Budoucí vývoj v letecké dopravě

Pro novou generaci proudových motorů GE9X vyvíjí společnost General Electric kompozitní lopatky. Tyto motory mají být použité pro připravované dopravní letadlo Boeing 777X. Uplatnění nalezne také u všech dopravních letadel ať už civilních, nebo vojenských. Motor GE9X je konstruován s menším počtem lopatek z kompozitních materiálů o menší tloušťce. Motor má menší hmotnost a naopak větší průtok vzduchu přes motor, a to má za následek nižší spotřebu paliva o 5 %. [25]

Vrtulníky

PBS Velká Bíteš úspěšně provádí projekt turbo hřídelového motoru TS100ZA, který je v helikoptéře VV-2. Pro pohon vrtulníku VV-2, který je určen pro pilotované nebo bezpilotní použití, realizuje firma PBS Velká Bíteš turbo hřídelový motor TS100. [30]

Proudové motory

TJ80

PBS Velká Bíteš vyvíjí malý proudový motor TJ80 (viz obr. 31). Tento motor je konstruovaný pro střely, bezpilotní cíle a bezpilotní prostředky. [30]

Hlavní vlastnosti:

- Kompaktní konstrukce.
- Výborný poměr hmotnost / síla.
- Bezúdržbový provoz.

- El start s možností restartu za letu.
- Možnost nastartování za vysokých rychlostí a ve velkých nadmořských výškách.



Obrázek 31 proudový motor TJ80 [30]

TJ 40 – G1

Malý proudový motor TJ 40 – G1 (viz obr. 32) byl vyvinut pro větší modelářské aplikace, různé bezpilotní aplikace a kluzáky. Tento motor získal významné ocenění v roce 2015 na veletrhu IDET v Brně. [30]



Obrázek 32 TJ 40 – G1 [30]

4 Závěr:

Plynové turbíny jsou zajímavý zdroj energie, avšak jejich nevýhody vedou k závěru, že turbíny nejsou vhodné pro pohon osobních ani nákladních automobilů. Z důvodu vysoké ceny oproti spalovacím motorům. Uplatnění pro pohon naleznou zejména u letadel, lodí a tanků, zvláště u vojenské mobilní techniky. Hlavní předností se jeví možnost spalovat různá paliva, a tím zlepšit mobilitu vozidla a další výhodou je jednoduchá údržba. U automobilů a autobusů lze očekávat uplatnění v podobě spalovacích mikroturbín, které budou sloužit společně s generátorem u elektromobilů nebo elektro busů k dobíjení baterií, a tím zvýšení jejich dojezdu bez možnosti dobíjení. Další uplatnění můžeme očekávat u vojenských i civilních bezpilotních prostředků.

Požítá literatura

- [1] FamousInventors.org, 2017. *John Barber* [online]. [cit. 2017-1-6]. Dostupné z: <http://www.famousinventors.org/john-barber>
- [2] Fronta. *Www. fronta.cz* [online]. [cit. 2017-01-6]. Dostupné z: <http://www.fronta.cz/co-predchazelo-pouziti-proudovych-motoru-v-letadlech>
- [3] DONALD, David, ed. *Bojová letadla Luftwaffe*. Praha: Naše vojsko, 2014. ISBN 978-80-206-1476-6.
- [4] HROMÁDKO, Jan. *Speciální spalovací motory a alternativní pohony: komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol*. Praha: Grada, 2012. ISBN 978-80-247-4455-1.
- [5] HEJZLAR, Radko. *Termodynamika*. ČVUT, 1994.
- [6] HLOUŠEK, Jiří. *Termomechanika*. Brno: VUT Brno, 1992. ISBN 80-214-0387-x.
- [7] Jiří Škorpík: *Transformační -technologie* [online]. Brno, 2015-10 [cit. 2017-01-18]. Dostupné z: <http://www.transformacni-technologie.cz/06.html#menu>
- [8] Doc. Ing. Jiří Míka, CSc. *Teplovzdušné motory – motory budoucnost* [online]. Ostrava, s. 1-72 [cit. 2017-0-16]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/14230220-Teplovzdušne-motory-motory-budoucnosti.htm>
- [9] ŠKOPEK, Jan. *Tepelné turbíny a turbokompresory*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2010. ISBN 978-80-7043-862-6.
- [10] Jiří Škorpík: *Transformační-technologie* [online]. Brno, 2015-10 [cit. 2017-01-18]. Dostupné z: <http://www.transformacni-technologie.cz/26.html#menu>
- [11] Jiří Škorpík, . *Transformační-technologie* [online]. Brno, 2015-10 [cit. 2017-01-19]. Dostupné z: <http://www.transformacni-technologie.cz/navrh-a-konstrukce-tepelnych-turbin-a-turbokompresoru.html#spalovaci-komory-spalovacich-turbin>

- [12] Jiří Škorpík: *Transformační technologie* [online]. Brno, 2015-10 [cit. 2017-01-20].
Dostupné z: <http://www.transformacni-technologie.cz/11.html#295#zakladni-typy-a-aplikace-lopatkovych-stroju>
- [13] Jiří Škorpík: *Transformační technologie* [online]. Brno, 2015-10 [cit. 2017-01-20].
Dostupné z: <http://www.transformacni-technologie.cz/13.html#vrtule>
- [14] Jiří Škorpík: *Transformační technologie* [online]. Brno, 2015-10 [cit. 2017-01-20].
Dostupné z: <http://www.transformacni-technologie.cz/plynova-turbina-v-technologickem-celku.html#menu>
- [15] ŠUROVSKÝ, Jan: *Spalovací turbíny*. Česko: J. Šurovský, 2013.
ISBN 978-80-260-4106-1.
- [16] FRANTIŠEK FLANDERA: Turbínová lokomotiva ze Škody Plzeň. České dráhy, a.s. [online]. [cit. 2017-01-22]. Dostupné z: http://www.cd.cz/old/TCD2009/9_7tloko.htm
- [17] Zdeněk Kussior: Typy leteckých motorů. *Leteckemotory* [online]. [cit. 2017-01-28].
Dostupné z: <http://www.leteckemotory.cz/teorie/typy-leteckych-motoru/>
- [18] Jiří Škorpík: Tepelné turbíny a turbokompresory. *Transformační technologie* [online]. Brno, 2014-02 [cit. 2017-01-30]. Dostupné z: <http://www.transformacni-technologie.cz/23.html#165>
- [19] Jančar Rostislav: *První neviditelná loď na světě nastupuje do armády* [online]. 2009 [cit. 2017-02-03]. Dostupné z: http://technet.idnes.cz/prvni-neviditelna-lod-na-svete-nastupuje-do-armady-f8f-vojenstvi.aspx?c=A090209_225407_tec_technika_rja
- [20] Ing. Kratochvíl Jiří: TZ-74. *ČESKOSLOVENSKÁ LIDOVÁ ARMÁDA: ČESKOSLOVENSKA LIDOVA ARMADA* [online]. [cit. 2017-02-06]. Dostupné z: <http://www.csla.cz/technika/specialtech/tz74.htm>
- [21] STEVEN J. ZALOGA a ILUSTROVAL TONY BRYAN. *Střední tank T-80: poslední šampion tankových vojsk Sovětské armády*. Praha: Grada, 2011. ISBN 8024738392.
- [22] Military-today. *Military-today: M1 Abrams* [online]. [cit. 2017-02-10]. Dostupné z: http://www.military-today.com/tanks/m1_abrams.htm

- [23] Bednář Marek. *Autoforum* [online]. [cit. 2017-02-13]. Dostupné z:
<http://www.autoforum.cz/fascinace/maz-7907-tajny-obri-nakladak-sovetu-mel-24-hnanych-kol>
- [24] Jan Grohmann. *Hybrid* [online]. 2016 [cit. 2017-02-13]. Dostupné z:
<http://www.hybrid.cz/mitre-mikroturbina-pro-hybridni-auta>
- [25] Jan Grohmann. *Hybrid* [online]. 2014 [cit. 2017-02-13]. Dostupné z:
<http://www.hybrid.cz/usporne-proudove-motory-s-kompozitnimi-lopatkami>
- [26] Ondřej Martinek. *Hybrid* [online]. 2010 [cit. 2017-02-14]. Dostupné z:
<http://www.hybrid.cz/novinky/mikroturbiny-budoucnost-hybridnich-aut>
- [27] Zdeněk Sedláček. *Walterjinonice* [online]. 2013 [cit. 2017-02-16]. Dostupné z:
<http://www.walterjinonice.cz/wp-content/uploads/turb%C3%ADnov%C3%A9-proudov%C3%A9-motory.pdf>
- [28] *Hochgeschwindigkeitssuege* [online]. 2004 [cit. 2017-02-18]. Dostupné z:
<http://www.hochgeschwindigkeitssuege.com/frankreich/tgv-001.php>
- [29] Marek Bednář. *Autoforum* [online]. 2015 [cit. 2017-02-20]. Dostupné z:
<http://www.autoforum.cz/fascinace/chevrolet-turbo-titan-3-s-plynovou-turbinou-mel-byt-tahacem-budoucnosti-nebyl/>
- [30] První brněnská strojírna Velká Bíteš, a. s. : *VV-2 poháněný motorem TS100 ZA* [online]. 2015 [cit. 2017-02-20]. Dostupné z: <http://www.pbsvb.cz/aktualne/vv-2-powered-by-our-ts100-za>
- [31] Jan Voženílek. *Motory* [online]. 2015 [cit. 2017-02-21]. Dostupné z:
<http://jan.gfxs.cz/studium/files/termika/motory2.pdf>
- [32] Ing. Zbyněk Novotný. *Militarybox* [online]. 2014 [cit. 2017-03-16]. Dostupné z:
<http://www.militarybox.cz/news/tomahawk-nejznamejsi-strela-s-plochou-drahou-letu/>

Seznam použitých zkratek

a_0	[J/kg]	měrná práce cyklu
η_t	[%]	termická účinnost
q_p	[J/kg]	měrné přivedené teplo
q_0	[J/kg]	měrné odvedené teplo
c_p	[J/kg. K]	měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku
c_v	[J/kg. K]	měrná tepelná kapacita za konstantního objemu
T	[°K]	teplota
ε	[-]	kompresní poměr
φ	[-]	stupeň plnění
ε_p	[-]	tlakový kompresní poměr
κ	[-]	Poissonova konstanta
p	[Pa]	tlak
v	[m ³ /kg]	měrný objem
r	[J/kg. K]	měrná plynová konstanta
ψ	[-]	stupeň zvýšení tlaku
M_κ	[N.m ⁻¹]	točivý moment
n	[min ⁻¹]	otáčky

Seznam obrázků

OBRÁZEK 1 SCHÉMA SPALOVACÍ TURBÍNY [4]	3
OBRÁZEK 2 PRŮBĚH TOČIVÉHO MOMENTU MK JEDNOHŘÍDELOVÉ TURBÍNY [4]	4
OBRÁZEK 3 PRŮBĚH TOČIVÉHO MOMENTU MK DVOUHŘÍDELOVÉ TURBÍNY [4]	4
OBRÁZEK 4 SCHÉMA BRAYTONOVA OBĚHU. [5]	5
OBRÁZEK 5 BRAYTONŮV CYKLUS V P-V DIAGRAMU [8]	6
OBRÁZEK 6 SCHÉMA HUMPHREYOVA CYKLU [5]	7
OBRÁZEK 7 SCHÉMA HUMPHREYOVA CYKLU V P-V DIAGRAMU [5]	8
OBRÁZEK 8 SCHÉMA TURBÍNY S REKUPERÁTOREM [4]	14
OBRÁZEK 9 SCHÉMA TURBÍNY S MEZI CHLAZENÍM STLAČENÉHO VZDUCHU [4]	15
OBRÁZEK 10 SCHÉMA TURBÍNY S DODATEČNÝM SPALOVÁNÍM [4]	15
OBRÁZEK 11 OSOBNÍ AUTOMOBIL JET1[4]	16
OBRÁZEK 12 VOZIDLO TURBINA [4].....	17
OBRÁZEK 13 VOZIDLO TURBO TITAN II [29]	19
OBRÁZEK 14 TL 659.001 [15]	20
OBRÁZEK 15 TGV 001[28].....	22
OBRÁZEK 16 ME 262 V3 [3]	23
OBRÁZEK 17 SCHÉMA JEDNOPROUDOVÉHO MOTORU [16].....	23
OBRÁZEK 18 SCHÉMA TURBOVRTULOVÉHO MOTORU [17]	24
OBRÁZEK 19 DVOUPROUDOVÝ, TŘÍHŘÍDELOVÝ MOTOR S VYSOKÝM ODTOKOVÝM POMĚREM [17]	25
OBRÁZEK 20 TURBO HŘÍDELOVÝ MOTOR [17]	26
OBRÁZEK 21 PLAVIDLO TŘÍDY VISBY [19]	27
OBRÁZEK 22 VOZIDLO TZ-74[20]	28
OBRÁZEK 23 T-80 [21]	28
OBRÁZEK 24 M1 ABRAMS [21]	29
OBRÁZEK 25 MAZ-7606 [23].....	30
OBRÁZEK 26 MQ-9 REAPER- HONEYWELL TURBOPROP 671 KW [27].....	30
OBRÁZEK 27 RQ-4 GLOBAL HAWK S ROLLS-ROYCE [27]	30
OBRÁZEK 28 TOMAHAWK C (TLAM-C) BRITSKÉHO KRÁLOVSKÉHO NÁMOŘNICTVA ZA LETU [33]	31
OBRÁZEK 29 POROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH CYKLŮ V T-S DIAGRAMU [8].....	32
OBRÁZEK 30 MIKROTURBÍNA MITRE [23]	33
OBRÁZEK 31 PROUDOVÝ MOTOR TJ80 [30]	35
OBRÁZEK 32 TJ 40 – G1 [30]	35