
PROVEDENÍ TURBODMYCHADEL

Jiří Škorpík, skorpik.jiri@email.cz

Úvod	18.3
Výběr dmyhadla	18.3
Zapojení a regulace turbodmychadel	18.4
Nežádoucí chování turbodmychadla ve spojení se spalovacím motorem a jeho poruchy	18.6
Provozní a konstrukční parametry turbodmychadel	18.7
Odkazy	18.9

Author: Jiří, Škorpík (first name, surname)

Issue date: May, 2023

Title: Provedení turbodmychadel

Journal: Transformační technologie (on-line journal at transformacni-technologie.cz; turbomachinery.education; stirling-engine.education)

ISSN: 1804-8293

Copyright©Jiří Škorpík, 2023

All rights reserved.

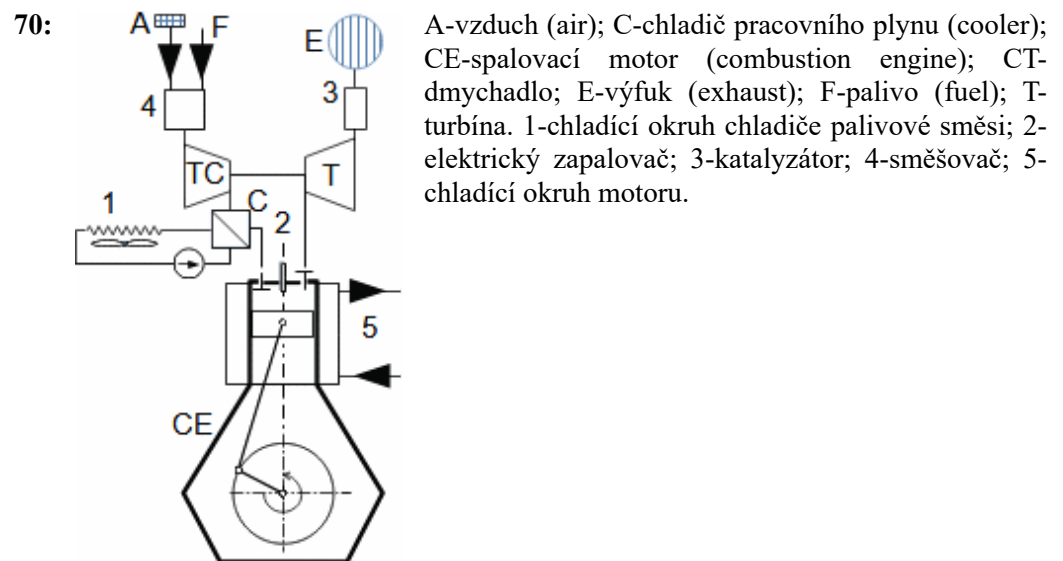
Úvod

Přepřehování
Dmychadlo

Dmychadla pracující v součinnosti se spalovacím motorem za účelem zvýšení tlaku vzduchu na sání nebo spalovací směsi, jestliže je palivem plyn (tzv. přepřehování). Zvýšením hustoty se zvýší i počet přítomných molekul kyslíku a hořlaviny ve válci motoru a tedy i výkon válce. Dmychadla mohou být poháněna mechanickým převodem od hřídele motoru, elektromotorem a nebo malým turboexpandérem využívající expanzi spalin ze spalovacího motoru při výfuku, taková soustrojí se nazývají turbodmychadla. Další způsoby přepřehování jsou uvedeny například v [Kožoušek, 1978], [Jan and Ždánský, 2010].

Turbodmychadlo

Na Obrázku 163 je příklad zapojení turbodmychadla a spalovacího motoru v bioplynové stanici. V turbíně expandují spaliny vyfukované spalovacím motorem a obvykle její celý výkon je spotřebován pro pohon dmychadla. Turbodmychadlo stlačuje obvykle pouze vzduch, ale u plyných paliv se stlačuje už směs paliva a vzduchu, tak jak je to na obrázku. Za turbodmychadlem bývá chladič, který ještě více zvýší hustotu vzduchu.



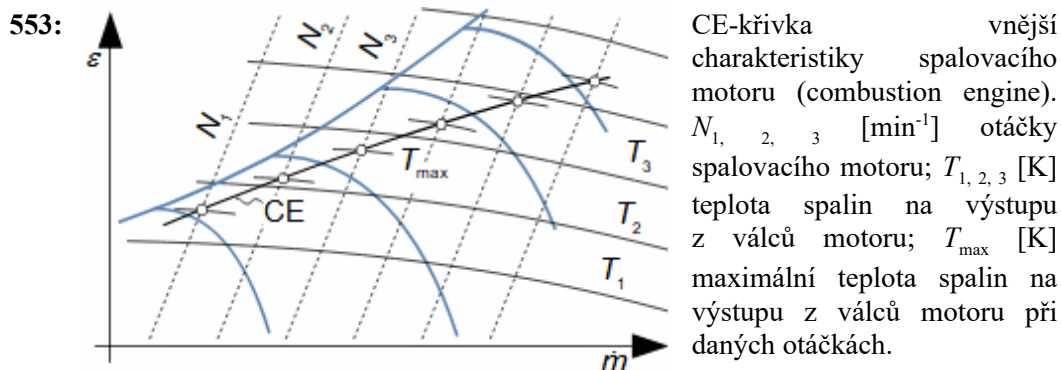
Výběr dmychadla

Výkonnost dmychadla

Při výběru dmychadla pro daný motor je nejpodstatnější jaký pracovní rozsah je od dmychadla očekáván. Spalovací motor je pístový stroj a dmychadlo stroj lopatkový odtud plynou určité problémy se součinností dmychadla spalovacího motoru.

Výkonnost turbodmychadel pístových spalovacích motorů se pohybuje od $500 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ vzduchu (motor o výkonu cca 100 kW), do $20\,000 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ vzduchu (stacionární motory o výkonech mezi 5 až 7 MW), u lodních motorů může být ještě vyšší.

Výkonnost dmyhadla se vybírá podle vnější charakteristiky motoru. Při určitých otáčkách a tlaku vzduchu před válcem lze určit i konkrétní množství nasátého vzduchu do válce, které roste lineárně, protože nasávaný objem je stále stejný. Výkon motoru pak závisí na množství dodávaného paliva, toho může být určité maximální množství, při kterém ještě nedojde k poškození motoru, takovému maximálnímu výkonu odpovídá i určitá teplota spalin na výstupu z válce. Spojnice těchto bodů je vnější charakteristika motoru (Obrázek 553) [Kožoušek, 1978, s. 115].



Křivka vnější charakteristiky motoru musí být pod pumpovní čarou charakteristiky vybraného turbodmyhadla. Při dobrém výběru turbodmyhadla by tato křivka měla být od pumpovní čarou vzdálena asi 5 až 15 % hmotnostního průtoku vzduchu [Kožoušek, 1978, s. 117]. Pro posun pumpovní čary lze použít opatření popsaná výše pro turbokompresory, např. přepouštění nadbytečného vzduchu do výfuku před turbínu a pod. Musí se také přihlížet v jakých oblastech charakteristiky má turbodmyhadlo maximální účinnost. Také je potřeba sledovat jak se sníží teplota spalin za turbodmyhadlem, protože případný katalyzátor potřebuje ke správné funkci taky určitou teplotu.

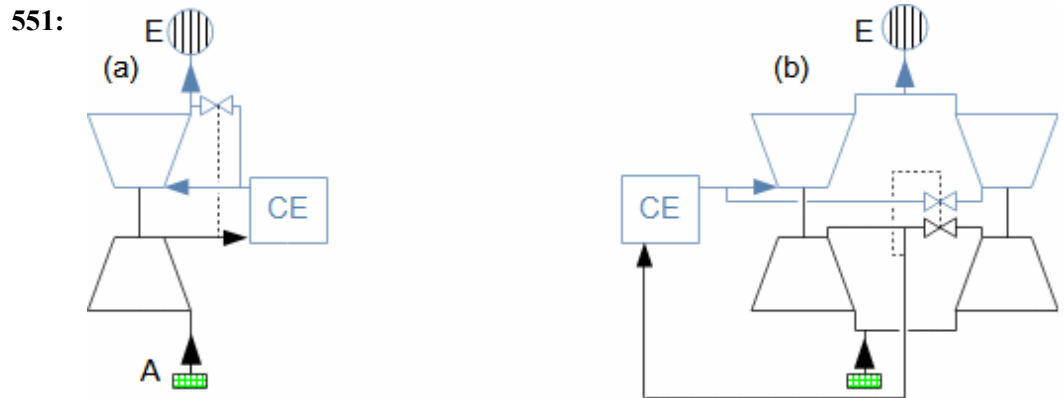
Zapojení a regulace turbodmychadel

Existuje velké množství způsobů regulace turbodmychadel podle konstrukce turbodmyhadla, ale většinou se jedná o modifikace tří základních způsobů, kterými jsou regulace odklonem výfukových plynů před turbínou, regulace natáčením statorových lopatek turbíny a regulace hybridním pohonem.

Regulace odklonem spalin
 Pumpáž kompresoru
 Paralelní zapojení
 Sériové zapojení

Regulace odklonem spalin je nejjednodušší způsob regulace turbodmyhadla. Jestliže je turbodmyhadlo regulováno odklonem proudu před turbínou, pak je navrženo především pro nižší výkony, respektive dosahuje potřebných otáček při nižším průtoku výfukových plynů. Nevýhodou je, že při dosažení

jmenovitého výkonu turbodmychadla je už nadbytečné množství spalin bez užitku přepouštěno do výfuku, aby nedošlo k pumpáži kompresoru, proto se velmi často řadí dvě turbodmychadla paralelně. Při paralelním provozu se druhé turbodmychadlo zapojí až je množství spalin dostatečné pro obě turbodmychadla, viz Obrázek 551.



(a) regulace odklonem spalin (ventil odklonu spalin je řízen od tlaku na výtlaku turbodmychadla); (b) regulace dvou turbodmychadel řazených paralelně odklonem spalin. Modře je prokreslena trasa spalin.

Sériovo/paralelní
zapojení
Obtok

U turbodmychadel řazených paralelně existuje velké množství variant včetně sériovo/paralelního zapojení s automatickým přepínáním mezi sériovým a paralelním provozem jako na Obrázek 482. Na tomto obrázku je zapojení turbodmychadel a spalovacího motoru 2.0 CTDI Biturbo od společnosti Opel. Jedná se o čtyřválcový naftový motor vybavený dvěma turbodmychadly. Turbodmychadla jsou propojena paralelními vedeními spalin i vzduchu, takže mohou pracovat paralelně i sériově či každé samostatně. Sestava je vybavena dvěma chladiči. Pro ovládání tak složité soustavy turbodmychadel slouží pět ventilů. Turbodmychadla pracují společně v sérii do otáček motoru cca 3000 min^{-1} , a velký vzduchový chladič funguje jako mezichlazení a menší chlazený



b-obtok kolem nízkootáčkového turbodmychadla dochlazovače.

vodou jako dochlazovač před vstupem vzduchu do válce. Nad 3000 min^{-1} se odpojuje nízko otáčkové turbodmychadlo s dochlazovačem plným otevřením obtoku-b. Motor dosahuje výkonu 143 kW [Anon., 2014].

Regulace natáčením lopatek

Regulace natáčením statorových lopatek hnací části turbodmychadla je sice plynulejší a účinnější než regulace odklonem spalín, ale samotné turbodmychadlo je složitější a tedy náchylnější k poruchám a je především dražší.

Motorová brzda

Turbodmychadlo s natáčivými lopatkami lze použít i jako součást motorové brzdy. Pomocí natáčivých lopatek lze totiž při brzdění motorem téměř úplně uzavřít průchod spalín turbodmychadlem a tím zvýšit škrcení výfukových plynů [Jan and Ždánský, 2010, s. 133], respektive vzduchu, protože v kombinaci s tímto uzavřením výfuku se musí otevřít řízeně před koncem komprese výfukový ventil ve válci, aby se tak zmařila kompresní práce pístu.

Regulace hybridním pohonem

Lze také kombinovat různé typy turbodmychadel napojených na jeden spalovací motor a doplnit tuto sestavu i dmychadlem pohaněné mechanicky od motoru nebo dokonce i elektricky [Anon., 2016], tak aby bylo zabezpečeno přeplňování i při malých otáčkách motoru. Existují i turbodmychadla propojené s elektrickým motorem, které slouží k pohonu dmychadlové části v době nedostatku spalín – při přebytku výkonu turbodmychadlo funguje jako el. generátor. Takové kombinace jsou typické pro sportovní automobily, kde je vysoký požadavek na výkon a současně pružnost jeho změn.

Nežádoucí chování turbodmychadla ve spojení se spalovacím motorem a jeho poruchy

Nepříjemnou vlastností turbodmychadla je prodleva výkonu turbodmychadla za výkonem spalovacího motoru, tzv. turboefekt. Pro vyšší průtok vzduchu potřebuje turbodmychadlo vyšší otáčky, ty se zvýší až potom, co se zvýší objem spalín z motoru, navíc se zpoždění zvyšuje s momentem setrvačnosti rotorové soustavy turbodmychadla. Menší turbodmychadla mají i menší moment setrvačnosti a tak reagují na zvýšený výkon motoru rychleji, proto turbodmychadla s regulací obtokem mají celkem rychlou odezvu, a také proto se požívají dvě menší turbodmychadla než jedno velké. Turbodmychadla některý

motorů jsou pro co nejrychlejší odezvu zapojeny asymetricky tzn. že jsou poháněny spaliny jen z části válců motoru, ale vzduch dodávají do všech, takové turbodmychadlo je velmi malé. Rychleji také reagují dmychadla mechanicky spojené přímo s motorem. Co se týká zpožděné reakce kvůli čekání na navýšení průtoku spalin, tak to lze eliminovat pouze nezávislým pohonem dmychadla, například elektromotorem.

Turbodmychadlo je další relativně složitá součást motoru, což zvyšuje pravděpodobnost poruchy. Nejčastější poruchy turbodmychadla jsou přímo spojena s nárůstem vůle hřídele. To způsobuje jednak netěsnost olejového systému a jednak vibrace rotorové soustavy, což může vést až ke zničení lopatek v důsledku styku rotoru a statoru. V případě netěsnosti hřídele může olej ve větším než návrhovém množství unikat do spalínového rozvodu, či hůře do vzduchového rozvodu motoru. Ze spalínového rozvodu následně odtéká do katalyzátoru a do výfuku. Pokud olej uniká do vzduchového rozvodu, tak se dostane až do válce motoru, kde se zúčastňuje hoření. Olej působí jako dodatečné palivo, jehož množství ovšem nelze regulovat, a tak při větším úniku oleje způsobuje atypické chování motoru. V extrémním případě může být množství oleje takové, že způsobí přetočení motoru a tedy jeho poškození – například, když se náhle uvolní olej usazený na vnitřních částech chladiče vzduchu (při zvýšení tlakové ztráty se může z těchto povrchů olej náhle uvolnit). Situace může u motorů s velkým kompresním poměrem dospět tak daleko, že ani při vypnutí zapalování se chod motoru nezastaví v důsledku spalování oleje.

Netěsnost má dvě příčiny. Při startu motoru za studeného stavu, kdy je olej tuhý a má nedostatečné mazací schopnost, proto se nedoporučuje ihned po startu nadměrně zatěžovat motor, ale počkat až se olej dostatečně prohřeje. Druhá příčina souvisí s vysokou teplotou ploch turbínové části turbodmychadla. Při styku s těmito plochami olej karbonuje za vzniku tuhých částic, které následně odírají rotor. Proto se doporučuje těsně po velké zátěži motor ihned nevypínat, ale počkat až klesne teplota spalin a tedy i povrchu turbodmychadla, ve kterém po vypnutí přestane olej cirkulovat a tedy i chladit teplotně exponované části turbodmychadla.

Provozní a konstrukční parametry turbodmychadel

Radiální stupeň
Axiální stupeň

Expanzní části turbodmychadel jsou obvykle tvořeny pouze jedním radiálním stupněm. Axiální stupně u turbodmychadel se používají u velkých stacionárních motorů s malou změnou

průtoku velkého objemu spalin. Kompresorové oběžné kolo turbodmychadla bývá radiální. Difuzor za oběžným kolem kompresoru bývá obvykle bezlopatkový, pokud je nutná vyšší účinnost na úkor regulovatelnosti lze použít i lopatkové difuzory.

Obvodová rychlost
Meridiální rychlost

Obvodová rychlost oběžného kola kompresoru se pohybuje v rozmezí 460 až 80 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (čím vyšší teplota na výstupu z rotoru tím vyšší). Rychlost vzduchu, respektive meridiální rychlost, na sání se pohybuje od 100..150 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, pro snížení Machova čísla se před oběžné kolo kompresoru dávají předřazené lopatky, které dodají vzduchu obvodovou složku rychlosti cca 40..50 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ [Kožoušek, 1978, s. 93]. Předřazené lopatky také zlepšují absolutní charakteristiku kompresoru, což dává širší možnosti při výběru turbodmychadla podle vnější charakteristika spalovacího motoru.

Teplota spalin

Teplota spalin na výfuku spalovacího motoru, respektive před vstupem do turbodmychadla, záleží na typu spalovacího motoru (u zážehových jsou vyšší než u vznětových) a dosahuje maximálně 800 °C, odtud se také řídí výběr materiálu pro stavbu.

Kompresní poměr
Samovznícení

Celkový tlak spalin před expanzní části turbodmychadel je menší než tlak vzduchu na výstupu z turbodmychadla, přičemž kompresní poměr bývá od 1,5 (motory pro osobní automobily) až po 4,5. Kompresní poměr je dán požadavky spalovacího motoru a nebývá vyšší kvůli možnosti samovznícení směsi ve válci, což je problém především u benzínových motorů. Při vyšších kompresních poměrech se používá i dvoustupňová komprese vzduchu nejčastěji ve dvou turbodmychadlech řazených za sebou nebo ve dvojstupňové kompresní části jednoho turbodmychadla.

Otáčky

Při návrhu lopatkových částí turbodmychadla se přistupuje k vysokým otáčkám především u menších turbodmychadel. To je dáno relativně malým průtokem, aby průtočná plocha lopatkovými kanály nebyla malá, respektive aby nebyly příliš krátké lopatky (vysoké ztráty) musí se zvýšit otáčky a zmenšit průměr oběžného kola (všimněte si podobného problému v rámci [Úlohy 726](#) v článku Termodynamika turbokompresorů). Rotorová soustava je konstruována na jmenovité otáčky nad 10 000 min^{-1} až 120 000 min^{-1} , ale výjimkou mezi turbodmychadly nejsou otáčky i 200 000 min^{-1} .

Mazací okruh
Ložiska

Mazací okruh turbodmychadla je velice často spojen s mazacím okruhem spalovacího motoru, ale v některých případech má vlastní mazací okruh popřípadě je vybaveno valivými ložisky, pokud se tím výrazně nezvýší poruchovost a je provozováno při nižších otáčkách.

Hrdlo

Tvar hrdla turbínové části ovlivňuje způsob transformace celkové entalpie spalin na výfuku z válců motoru. Záleží jestli se

Pulzační
turbodmychadlo
Rovnotlakové
turbodmychadlo

jedná o pulzační turbodmychadlo nebo rovnotlaké. Rozdíl je v tom, že při pulzačním je průtok a rychlost spalin v pulzech tak, jak vystupují z válce spalovacího motoru [Kožoušek, 1978, s. 85]. U rovnotlakého je před turbodmychadlem směšovač spalin ze všech válců, takže se sice na výstupu z válců nastaví určitý protitlak, ale průtok spalin turbodmychadlem je rovnoměrnější. V takovém případě za spirálním hrdlem je bezlopatkový nebo lopatkový rozvaděč s natáčivými lopatkami (u pulzačního turbodmychadla by lopatkový rozvaděč těžko plnil svou funkci). Pulzační má obvykle vyšší ztráty při proudění i v turbodmychadle, i když nabízí o něco větší využitelný spád ve spalinách.

U velkých turbodmychadel se uplatňuje i tepelná izolace mechanických částí nebo naopak i chlazení skříně turbíny – na horkých částech může lehce degradovat mazací olej a chlazení tomu zabraňuje.

Turbodmychadlo je spojeno se spalovacím motorem nejen pneumaticky, ale i pomocí regulačních prvků. Pro případné ovládní lopatek se používají elektromagnetické nebo elektropneumatické prvky propojené s měřením tlaku na výtlaku turbodmychadla. Podobně jsou ovládány i obtokové ventily v případě regulace turbodmychadla obtokem.

Odkazy

- ANON., 2014, Náš test: Opel Insignia vybavený dvoulitrem biturbo CDTI, *Technický týdeník*, 12/2014, Business Media CZ, Praha, ISSN 0040-1064.
- ANON., 2016, Diesel z kategorie Super, , *Technický týdeník*, 15/2016, Business Media CZ, Praha, ISSN 0040-1064.
- KOŽOUŠEK, Josef, 1978, *Výpočet a konstrukce spalovacích motorů I*, SNTL, Praha.
- JAN, Zdeněk, ŽDÁNSKÝ, Bronislav, 2010, *Automobily – Motory*, Avid, spol. s.r.o., Brno, ISBN 978-80-87143-15-5.