



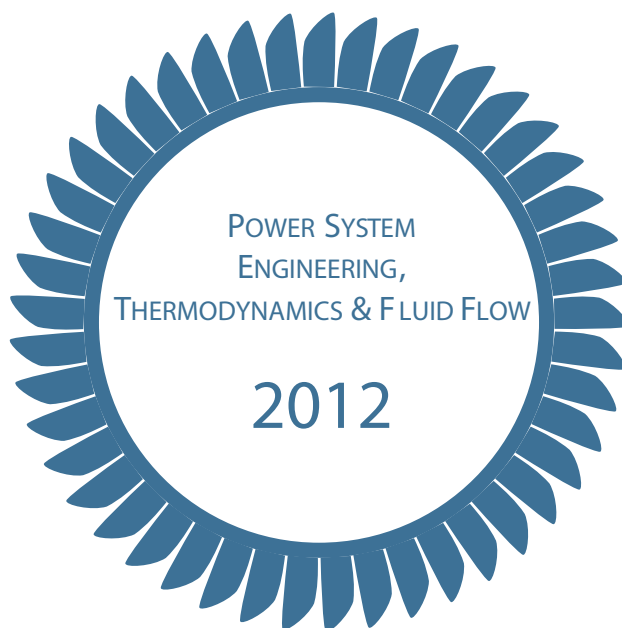
ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ



KATEDRA ENERGETICKÝCH STROJŮ A ZAŘÍZENÍ

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI



JEDNOTLIVÝ PŘÍSPĚVEK ZE SBORNÍKU



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

NÁVRH ÚPRAVY TURBÍNOVÉHO SPOUŠTĚČE TS-20B NA EXPERIMENTÁLNÍ TURBOHŘÍDELOVÝ MOTOR

Ing. HOCKO Marián, Ph.D., Bc. ŽÍŽKA Václav

This article deals with conceptual modification design of small aircraft turbocompressor engine used in school laboratory. Laboratory's objective is to create conditions for research of elementary thermodynamics phenomenon, changes of energy and controlling process in this type of thermal machines.

Klíčová slova: turbínový spouštěč, TS-20B, rám, přívod vzduchu, odvod spalín, letecký, turbokompresor, energetický, zdroj, turbohřídelový

Úvod

Požadavky technické praxe na stále kvalitnější přípravu budoucích odborníků a inženýrů již během studií se dotýkají i Katedry energetických strojů a zařízení Fakulty strojní na Západočeské univerzitě v Plzni. Pro zkvalitnění této přípravy bude sloužit i chystaná školní laboratoř s využitím malého turbohřídelového motoru. Účelem takovéto laboratoře je tedy vytvoření vhodných podmínek pro ukázky principů a praktického využití plynové turbíny a pro zkoumání základních termodynamických jevů doprovázejících složité procesy přeměny tepelné energie v takovémto typu tepelného stroje. Termodynamické procesy jsou již z pohledu teorie poměrně dobře popsány. Praktické úlohy jsou vzhledem k legislativě a k provozním předpisům v reálných podmínkách existujícího průmyslového energetického zařízení neuskutečnitelné. S využitím matematických a fyzikálních modelů tak mohou tyto praktické úlohy řešit studenti v rámci laboratoře, kde budou náklady a organizační nároky na experimenty o mnoho nižší. Dalším cílem je snaha zachytit trend v oblasti využití malých plynových turbín jako kogeneračních decentralizovaných jednotek, pro které mohou sloužit vyřazené plynové turbíny použité u leteckých motorů.

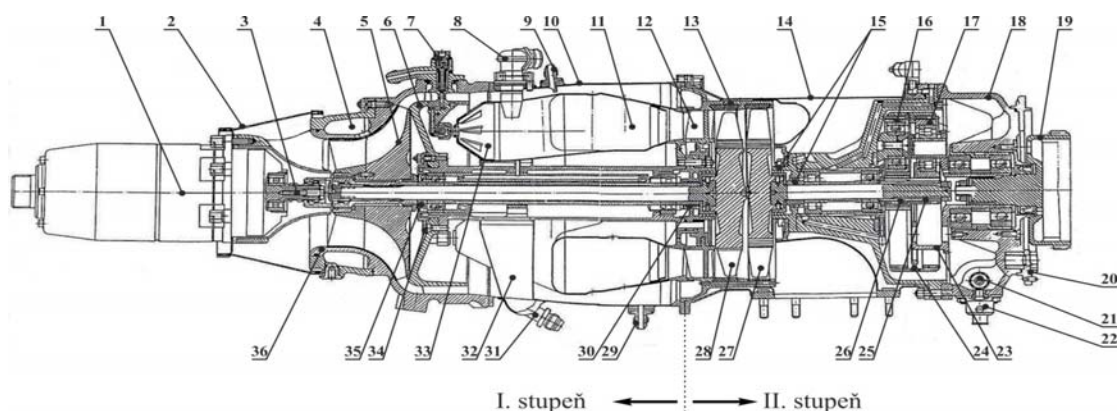
Takto vyřazené motory mohou i přes svoji zbytkovou živostnost sloužit jako pozemní energetické jednotky nebo jako zdroj náhradních dílů, protože se jedná o drahé a sofistikované zařízení vyrobené kvalitními technologiemi z vysoce legovaných materiálů především drahými a vzácnými prvky. Jedním z takto vyřazených spouštěčů motorů, a tedy vhodným objektem pro praktické úlohy, je turbínový spouštěč „TS-20B“ velkého leteckého jednoproudého motoru „AL-7F-1“, který je nyní v majetku KKE. [1] Turbínový spouštěč však není ze své podstaty uzpůsoben provozu v laboratoři. Proto je nutné provést nejprve návrhy základních úprav, které jsou zaměřeny na způsob uchycení, na přívod vzduchu a na odvod spalín. Požadavkem na všechny navrhované úpravy, s ohledem na životní prostředí, je univerzálnost s možností záměny za jiný turbínový spouštěč či pomocnou pohonnou jednotku APU (auxiliary power unit) s co nejmenšími dalšími nároky a náklady na změnu použitého vybavení a zařízení.

Smyslem připravované realizace školní laboratoře turbokompresorových motorů s využitím malého leteckého turbohřídelového motoru je tedy umožnit studentům provádět praktické experimenty za přijatelných ekonomických podmínek. Jak ukázaly zkušenosti z podobného, již existujícího, pracoviště na Katedře leteckého inženýrství Letecké fakulty Technické univerzity v Košicích, je možné v takových modelových podmínkách provádět specifické experimenty se

zajímavými výsledky, které není možné v průmyslových zařízeních realizovat. Z ekonomického hlediska je pak varianta přípravy vlastního experimentálního zařízení oproti nákupu hotového řešení výhodnější.

2. Turbínový spouštěč TS-20B

Jedná se o plynový turbínový motor malých rozměrů umístěného na skřini pohonů. Je určen pro pozemní spouštění velkého leteckého motoru „AL-7F-1“. Tento turbínový spouštěč pracuje jako jednorežimní. Jeho účelem je zajistit pouze roztočení velkého leteckého motoru na volnoběžný režim. Je konstruován pro velmi krátkou dobu činnosti, omezenou teplotou před turbínou. Turbínový spouštěč (obr. 1) je reaktivní turbokompresorový motor, nevytváří však tah a výstupem je tak jen krouticí moment. Skládá se ze dvou stupňů, které jsou k sobě spojeny přírubou. Prvním stupněm je turbokompresor a druhým stupněm je spouštěcí turbína s reduktorem. Má jednostupňový radiální kompresor s jednostranným oběžným kolem, sdruženou spalovací komoru, jednostupňovou nechlazenou reakční plynovou turbínu, nechlazenou reakční spouštěcí turbínu bez rozváděcího kola s mechanickým výstupem přes reduktor a radiální nátrubek pro výstup spalín.



Obr. 1: Axiální řez turbínovým spouštěčem TS-20B [2]

1 – elektrostartér, 2 – ochranné sítko, 3 – spojka, 4 – protipumpážní prostor, 5 – disk kompresoru, 6 – lopatkový difuzor, 7 – palivová tryska, 8 – zapalovací svíčka, 9 – odběr tlaku, 10 – plášť spalovací komory, 11 – plamenec, 12 – rozváděcí kolo, 13 – věnec turbíny, 14 – výstupní plášť, 15 – labyrintová ucpávka, 16 – parazitní ozubené kolo, 17 – planetové ozubené kolo, 18 – těleso reduktoru, 19 – výstupní ozubené kolo s rohatkou, 20 – příruba, 21 – ejekční čerpadlo, 22 – vypouštěcí ventil, 23 – hnací ozubení odstředivého vypínače, 24 – ozubený věnec, 25 – hnací ozubené kolo, 26 – hnané ozubené kolo, 27 – spouštěcí turbína, 28 – turbína turbokompresoru, 29 – nátrubek pro odvod odpadového paliva, 30 – labyrintová ucpávka, 31 – nátrubek odvodu oleje, 32 – spodní spojovací žebro, 33 – předkomora plamence, 34 – kryt, 35 – přední odrazník, 36 – těleso vstupního ústrojí

Základní technické údaje turbínového spouštěče:

| | | |
|--|-----|-----------------|
| Obrysové rozměry turbínového spouštěče LxD | ... | 888 ±5 x 236 mm |
| Hmotnost bez obsluhujících zařízení | ... | maximálně 39 kg |

| | | |
|--|-----|--|
| Doba nepřetržitě činnosti | ... | maximálně 52 ± 3 s |
| Maximální otáčky turbokompresoru | ... | $50\,500 \text{ min}^{-1}$ |
| Otáčky vypnutí turbínového spouštěče podle výstupního hřídele | ... | $2950 + 200 \text{ min}^{-1}$ |
| Krouticí moment na výstupní hřídeli | ... | $288,4 \text{ až } 263,9 \text{ N} \cdot \text{m}$ ($29,4 \text{ až } 26,9 \text{ kp} \cdot \text{m}$) při otáčkách $2000 \pm 25 \text{ min}^{-1}$ |
| Spotřeba vzduchu (výpočtová) | ... | $1,3 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ |
| Otáčky spouštěcí turbíny | ... | při výpočtovém momentu $31\,000 \text{ min}^{-1}$, maximální otáčky v době vypnutí $49\,000 \text{ min}^{-1}$ |
| Teplota spalin před plynovou turbínou při maximálních otáčkách turbokompresoru | ... | 850°C |
| Maximální teplota výstupních spalin za spouštěcí plynovou turbínou | ... | 760°C (po dobu 2 až 3 s maximálně 900°C) |

V počáteční době rozběhu motoru otáčí kompresorem elektrostartér (1) napájený elektrickou energií z vnějšího zdroje. Okolní vzduch, který je nasáván vlivem otáčení kompresoru (5), proudí skrze vstupní ústrojí (36). Dále postupuje přes lopatky záběrníku a radiální žebra odstředivého kompresoru (5), ve kterém se stlačuje a uděluje se mu kinetická energie. Vzduch následně v bezlopatkovém a lopatkovém difuzoru (6) statoru kompresoru mění svoji kinetickou energii na tlakovou. Takto stlačený vzduch vstupuje do spalovací komory (10).

Ve spalovací komoře je vzduch rozdělen. Primární vzduch, kterého je zhruba 30%, je mísen se vstřikovaným palivem přivedeným palivovými tryskami (7). Sekundární vzduch, tvořen většinovým podílem, je přiveden do spalin vzniklých hořením po zapálení vzducho-palivové směsi elektrickou jiskrou ze zapalovací svíčky (8) v plamenci (11), aby snížil celkovou teplotu proudících spalin a tak chránil turbínový spouštěč před nepříznivou vysokou teplotou.

Spaliny ochlazené sekundárním vzduchem proudí prstencovou částí plamence na usměrňovací statorové (13) a následně rotorové lopatky prvního stupně plynové turbíny (28). Většina předané energie spalin je spotřebována v turbíně prvního stupně na pohon radiálního kompresoru. Zbylá energie je částečně využita na spouštěcí plynové turbíně (27) pro vytvoření krouticího momentu na výstupní hřídeli (19) reduktoru (18). Nevyužitá energie je prostřednictvím proudu spalin odvedena výstupním pláštěm (14) do okolní atmosféry.

Elektrostartér je odpojen automaticky pomocí speciální spojky (3) při dosažení volnoběžných otáček turbokompresoru, tedy plynová turbína vytváří svojí prací dostatečný výkon k pohonu odstředivého kompresoru. Zvýšení otáček na volnoběžné trvá zhruba jednu třetinu celkové doby činnosti turbínového spouštěče. Otáčky turbokompresoru se pak dále nemění a zůstávají tak prakticky konstantní. Spouštěcí plynová turbína své otáčky zvyšuje s narůstajícím zbytkovým výkonem neseného proudem spalin z plynové turbíny turbokompresoru. Při dosažení potřebných otáček, a tedy dosažení doby potřebného provozu turbínového spouštěče pro roztočení velkého leteckého motoru, je díky odstředivému vypínači na reduktoru přerušeno

přívod elektrické energie do motoru palivo-olejového čerpadla, a tím turbínový spouštěč vypnut a ukončena jeho činnost.

3. Koncepční návrh laboratoře malých turbokompresorových motorů

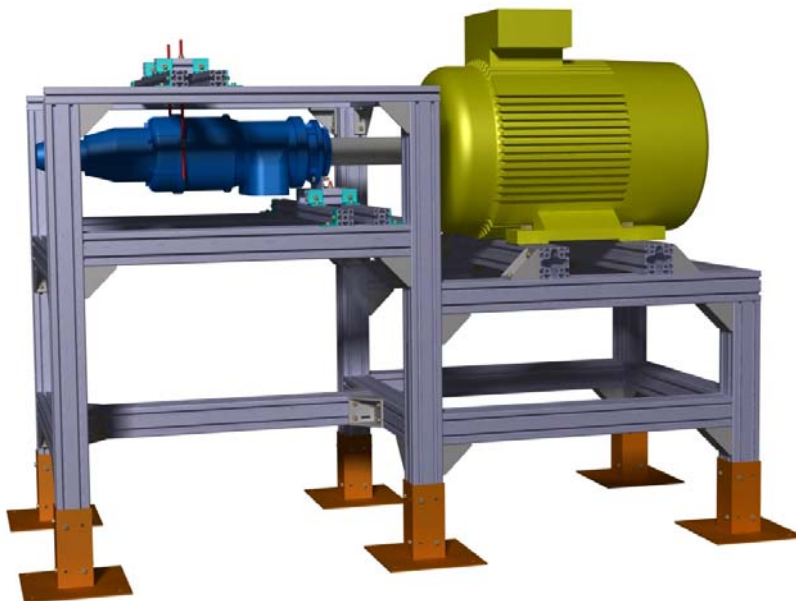
Cílem koncepčního návrhu laboratoře malých turbokompresorových motorů je analyzovat základní problémy, které bude potřebné vyřešit pro vytvoření funkční laboratoře v podmínkách Katedry energetických strojů a zařízení Fakulty strojní, ZČU. Uvedenou problematiku je možné rozdělit do tří základních bloků problémů:

1. návrh základních úprav,
2. zabezpečení celkové funkčnosti objektu měření,
3. návrh a realizace měření základních parametrů, zpracování signálů a získaných dat.

3.1 Návrhy základních úprav

3.1.1 Návrh uchycení

Zvolený způsob uchycení využívá původních míst sloužících k připevnění turbínového spouštěče v podvěsu leteckého motoru. Při návrhu rámu je uvažováno i se zařízením, které bude odebírat mechanický výkon turbínového spouštěče a které bude mít vliv na zatížení rámu (obr. 2). Jako ukázka je zvolen převod mechanického výkonu na elektrický pomocí asynchronního motoru pracujícího v režimu jako generátor elektrické energie.

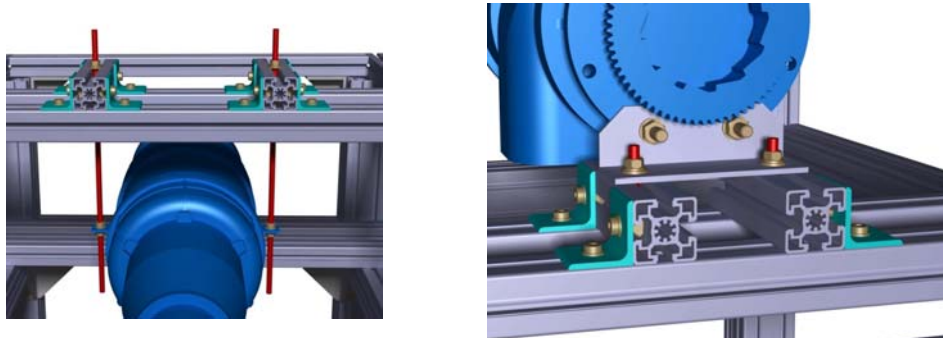


Obr. 2: Návrh lůžka uchycení

Bude se tedy jednat o montovaný rám, který bude tvořen profilovými prizmatickými nosníky o rozměrech 90x90 a 45x45 mm. Nosníky jsou vyrobeny z hliníkové slitiny Al Mg Si 0,5 F 25 podle DIN 3.3206.72, jejichž povrch je pokryt přírodní vrstvou eloxu, který tak konstrukci chrání před korozí. [3] Profily jsou vnitřně vyztuženy. Jednotlivé profily budou vzájemně spojeny za pomoci úhelníků a šroubů s maticí.

Systém uchycení (obr. 3) tak splňuje požadavky variability konstrukce, v případě nahrazení zvoleného turbínového spouštěče za jiný. Dále umožňuje připevnění dalších zařízení pro

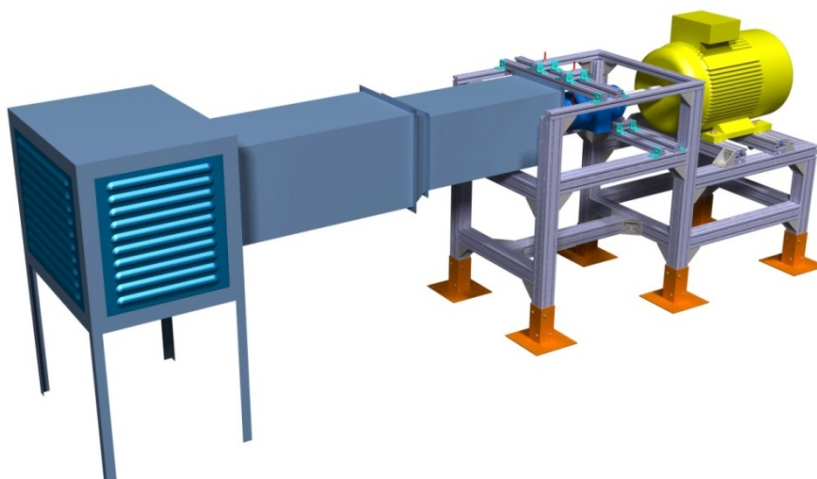
měření, palivového a olejového systému, systému protipožární ochrany, zdroje napájení a řídicích prvků.



Obr. 3: Detaily míst uchycení

3.1.2 Návrh přívodu vzduchu

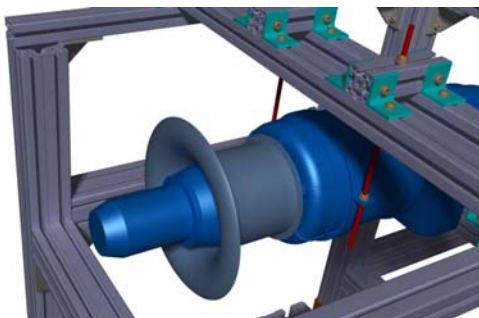
K bezpečnému provozu turbínového spouštěče musí být zajištěna plynulá dodávka čerstvého vzduchu v dostatečném množství a kvalitě. Navrhovaný způsob zajištění dostatečného množství vzduchu je obdobný s přívodem vzduchu u průmyslových plynových turbín (obr. 4).



Obr. 4: Návrh přívodu vzduchu

Vstupní ústrojí přívodu vzduchu z vnějšího prostředí je řešeno jako plechová skříň opatřená ventilačními plechy na bočních stěnách. Na začátku přívodního potrubí je nasazeno ochranné síto proti vniku jemnějších pevných nečistot do potrubního systému nebo až do turbínového spouštěče.

Pro snížení ztrát na vstupu do turbínového spouštěče je odstraněno originální sítko, které je nahrazeno velkým sítem již na vstupu do přívodního potrubí. Dalším snížením ztrát vstupního ústrojí se dosáhne použitím speciálně tvarovaného nátrubku (obr. 5). Nátrubek je tvarován podle křivky Bernoulliho lemniskáty, která je popsána matematickým vztahem a která svým tvarem zajišťuje nátrubku nejnižší hydraulické ztráty.

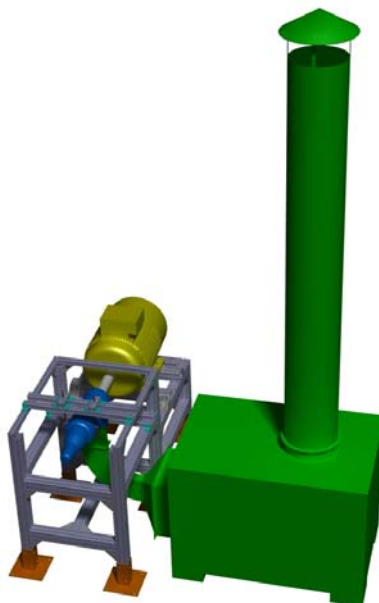


Obr. 5: Nátrubek přívodu vzduchu

3.1.3 Návrh odvodu spalin

Na výstupu z turbínového spouštěče TS-20B mají spaliny ještě poměrně vysokou rychlost ($c_6 = 70 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) a teplotu (maximální dovolená teplota na výstupu je 760°C). V původním řešení byly spaliny vedeny mimo trup letadla krátkým výfukem připojeným k radiálnímu výstupnímu nátrubku turbínového spouštěče. Výstup spalin je radiální a to směrem k zemi. Orientace výstupu je dána původním umístěním turbínového spouštěče v rámci letadla a způsobu odvodu oleje z turbínového spouštěče. Spaliny z turbínového spouštěče není možné z bezpečnostních důvodů přímo vypouštět do místnosti nebo haly laboratoře, ve které se bude zařízení nacházet. Je nutné je bezpečně odvádět mimo prostor laboratoře tak, aby nemohly nijak ohrozit vlastní zařízení, prostory laboratoře a ani hliníkovou konstrukci rámu.

Celé výstupní potrubí (obr. 6) pro vedení spalin bude nutné vyrobit z plechu ze žáruvzdorné oceli, dokonale ho utěsnit a zaizolovat. Jako izolace může sloužit vysokoteplotní izolace SIBRAL [4], která se běžně používá k izolaci žhacích pecí. Součástí odvodu spalin je i zvláštní skříň se speciální vestavbou pro tlumení hluku výstupních spalin, tvořenou keramickým porézním materiálem ve formě desek. Snížení hluku se dosáhne i vstřikováním vody do výstupních spalin. Ze skříně budou pak spaliny volně vedeny komínem nad střechu laboratoře.



Obr. 6: Návrh odvodu spalin

3.2 Funkčnost objektu

Pro uvedení turbínového spouštěče „TS-20B“ (obr. 7) do funkčního stavu je nutné vyřešit celou řadu otázek a problémů, které jsou spojené s funkčností jeho základních systémů, mezi které patří spouštěcí systém, palivo-regulační systém, olejový systém, systém kontroly činnosti motoru apod. Dané problémy je možné řešit dvěma základními způsoby. První předpokládá využití originálních prvků a agregátů, které byly použité v letecké technice (stíhací-bombardovací letadlo Su-7). Tento postup je z časového hlediska velmi výhodný, avšak je spojený s komplikovaným získáváním originálních prvků a agregátů, které jsou velmi často k dispozici už jen v leteckých muzeích. Ve druhém případě je potřebné řešit návrh a realizaci nových částí jednotlivých soustav. Tento postup je odborně a časově velmi náročný. Podobné problémy byly už řešené na Katedře leteckého inženýrství Letecké fakulty TUKE a zkušenosti je možné využít. [5]



Obr. 7: Současný stav TS-20B v majetku KKE

3.3 Návrh měřicího řetězce

Na základě předpokládaného využití měřeného objektu je důležitá otázka návrhu a realizace měřicího řetězce. Za předpokladu, že budou měřené základní provozní a termodynamické parametry měřeného objektu, je potřebné uvažovat s umístěním a uchycením základních snímačů, zpracováním nasnímaných signálů v převodnicích do formy, která je vhodná pro výpočetní techniku. Pro navrhovaný měřený objekt je nutné uvažovat o následujících snímačích parametrů motoru:

- snímač otáček,
- snímač průtoku paliva,
- snímač tlaku paliva,
- snímač teploty oleje,
- snímač tlaku vzduchu za kompresorem,
- snímač teploty vzduchu za kompresorem,
- snímač teploty plynu před plynovou turbínou,
- snímač teploty plynu za plynovou turbínou,
- snímač tlaku plynu na výstupu z motoru,
- snímač otáček volné plynové turbíny,
- snímač krouticího momentu výstupního hřídele.

Zpracování naměřených dat bude probíhat v reálném čase. Pro jejich rychlé zpracování je tedy třeba navrhnout vhodný hardware a software. Zde opět mohou pomoci zkušenosti z úspěšně realizovaných experimentů v laboratoři malých proudových motorů na Katedře leteckého inženýrství Letecké fakulty Technické univerzity v Košicích.

Experimenty se mohou například týkat zkoumání závislosti získaného výkonu (krouticího momentu) na změnách termodynamických veličin. Tyto termodynamické veličiny jsou především ovlivněny množstvím vstupujícího vzduchu, dále množstvím, tlakem a druhem paliva a lze je i pomocí teoretických vztahů analyticky vyjádřit.

Závěr

Před samotným zprovozněním bylo nejprve potřeba vyřešit návrh lůžka uchycení turbínového spouštěče. Do návrhu rámu a systému uchycení je i zahrnut návrh způsobu využití mechanického výkonu turbínového spouštěče. K úplnému zprovoznění turbínového spouštěče bylo také zapotřebí vyřešit systém přívodu vzduchu k turbínovému spouštěči a systém odvodu spalín od turbínového spouštěče. Tyto systémy jsou zpracovány především jako ideový návrh, protože kompletní rozměrový návrh je pak spojen s rozhodnutím o přesném umístění celého zařízení.

Jak ukázaly zkušenosti z podobného pracoviště na Katedře leteckého inženýrství Letecké fakulty TU v Košicích, je možné v takto vzniklých modelových podmínkách realizovat specifické experimenty se zajímavými výsledky, které není možné v reálných podmínkách průmyslového zařízení realizovat. K celkovému zprovoznění turbínového spouštěče TS-20B je třeba vyřešit celou řadu komplexních problémů. Jejich konkrétní teoretické a praktické řešení je možno realizovat v podobě bakalářských nebo diplomových prací.

Literatura

- [1] Motor AL-7F-1, Technický popis, Let-21-33/1, Ministerstvo národní obrany, Praha 1968
- [2] *Dvigatel 31 (serija 5) - Rukovodstvo po remontu: Remont, sborka i ispitanie turbostartera TS-20B.*
- [3] ALUTEC K&K, a.s. [Online]. <http://www.aluteck.cz/>
- [4] KRAN-IZOL s.r.o. [Online].
<http://www.kran-izol.cz/show.php?kat=vysokoteplotni-izolace-sibral>
- [5] Hocko M. *Malý průřadový motor MPM-20*. Košice: VLA M.R.Š., 2003.
- [6] Žižka V.: *Návrh úpravy turbínového spouštěče TS-20B na laboratorní experimentální turbohřídelový motor*, Diplomová práce, ZČU Plzeň 2012, 104 str.

Ing. HOCKO Marián, Ph.D., Letecká fakulta, Technická univerzita v Košiciach, Rampová 7, 042 21 Košice, +421903684174, marian.hocko@tuke.sk

Bc. ŽIŽKA Václav, ZČU, KKE, Kamenný vrch 5272, 430 04, Chomutov, +420721408065, vzizka@students.zcu.cz