



INOVÁCIA SÚSTAV TUBÍNOVÉHO MOTORA SAFÍR 5 – PALIVOVÁ A MAZACIA SÚSTAVA

Jana Plochová
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Jozef Čerňan
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

The thesis focuses on the innovation of the fuel and lubrication systems of the Safír 5 turbine engine, which was used as an auxiliary power unit (APU) as a compressed air generator in the L-39 Albatros aircraft. The main objective of the thesis is to analyse the technical possibilities of modifying this engine to change its original purpose, ensure smooth power regulation, simplify start-up, and increase its reliability. The theoretical part provides a detailed analysis of the operation of turbine engines, the principles of the fuel and lubrication systems of the Safír 5 engine, and their importance for the engine's smooth operation. In the practical part, technical modifications of the fuel and lubrication systems are proposed and implemented, including the construction of a new stand, the design of a fuel tank, and the electrical wiring. The functionality of the modified engine was subsequently verified through a series of tests. The result of the work is a functional and reliable Safír 5 engine with improved parameters, which can serve as a teaching aid or as a basis for further experiments.

Keywords

Turbine engine, auxiliary power unit, Safír 5, fuel system, lubrication system

1. Úvod

Hlavným cieľom práce je analyzovať a navrhnúť technické úpravy palivovej a mazacej sústavy motora Safír 5 tak, aby bolo možné jeho bezpečné a spoľahlivé spustenie a prevádzka mimo lietadla. Dôkladná analýza pôvodného riešenia palivovej a mazacej sústavy motora Safír 5 poskytuje podkladové informácie pre návrh inovácie a technických úprav. Praktická časť práce sa venuje samotnej realizácii navrhovaných úprav. Súčasťou riešenia je konštrukcia nového stojana pre bezpečné uchytenie a manipuláciu s motorom, návrh a výroba samostatnej palivovej nádrže a optimalizácia mazacej a palivovej sústavy. Všetky technické úpravy boli následne overené praktickými testami, ktorých cieľom bolo potvrdiť funkčnosť a spoľahlivosť navrhovaného riešenia. Výsledkom práce je funkčný a spoľahlivý experimentálny motor Safír 5, ktorý umožňuje samostatnú prevádzku mimo leteckého prostredia. Motor je technických úpravách schopný bezpečne štartovať, pracovať v stabilnom režime a reagovať na zmeny výkonu. Takto upravený motor Safír 5 môže slúžiť ako výučbová pomôcka pri praktickej výučbe študentov leteckých odborov, prípadne ako možnosť pre ďalšie technické experimenty.

2. Metodika a metódy skúmania

Primárnym zdrojom pre vypracovanie mojej práce boli internetové zdroje, knižné zdroje, návody a manuály.

Primárne metódy ktoré boli aplikované:

Metóda zberu a spracovania informácií v rámci tejto práce bola aplikovaná na tri hlavné oblasti. Prvou bola analýza dostupných informácií o turbínovom motore Safír 5 a jeho konštrukčných vlastnostiach. Tieto údaje boli získané z odborných kníh a internetových zdrojov. Druhá oblasť sa zameriavala na podrobnú analýzu funkcie palivovej a mazacej sústavy tohto motora, pričom boli využité schémy. Tretia oblasť spočívala v

návrhu a hodnotení technických úprav, ktoré boli založené na zozbieraných dátach.

Metóda analýzy bola v práci aplikovaná v niekoľkých kľúčových oblastiach. Predovšetkým sa využila na analýzu konštrukcie a funkčných vlastností palivovej a mazacej sústavy motora Safír 5. Analýza pomohla odhaliť nedostatky pôvodného návrhu a určiť komponenty, ktoré potrebujú úpravy na zlepšenie výkonu a spoľahlivosti motora.

Metóda syntézy bola v návrhovej časti práce využitá na integráciu poznatkov získaných z analýzy a technických údajov, ktoré viedli k vytvoreniu návrhových schém. Táto metóda umožnila spojenie jednotlivých komponentov palivovej a mazacej sústavy do funkčných celkov, pričom zohľadnila technické požiadavky a operačné podmienky. Syntéza bola konkrétne aplikovaná pri tvorbe upravených schém mazacej a palivovej sústavy.

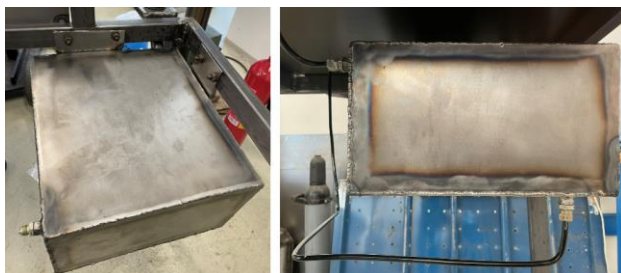
3. Praktická realizácia a overenie funkčnosti upraveného motora

3.1. Palivová sústava

3.1.1. Výroba palivovej nádrže

Palivová nádrž bola navrhnutá tak, aby svojim objemom zabezpečila uskladnenie paliva na minimálne 10 minút chodu motora. Pri výrobe sme využili plech s hrúbkou 2 mm. Rozmery nádrže sú 36 x 40 x 20 cm čo nám poskytne objem 28,8 litrov, respektíve 23 kilogramov JET-A1 ak uvažujeme hustotu 0,8 kg/l. Nádrž disponuje výstupom pre prívod paliva do motora, ktorý na nachádza v najnižšom bode nádrže a vstupom pre spätnú vetvu paliva z motora, ktorá sa nachádza na hornej časti nádrže. Výstup a vstup je štandardizovaný na rozmer AN5 (Army-Navy) s vonkajším priemerom 7,9 mm. Nádrž taktiež disponuje

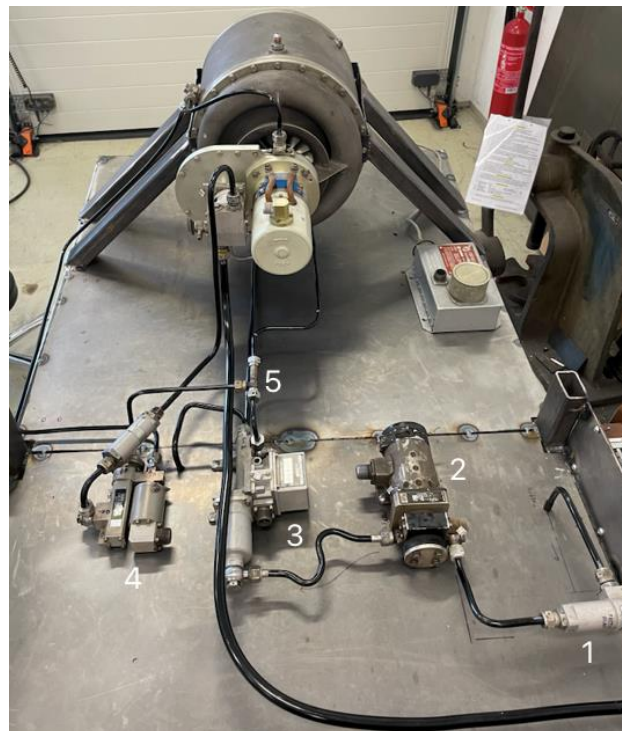
tankovacím hrdlom, pomocou ktorého sa palivo môže dopĺňať do nádrže. Nádrž je pripevnená o rám stojana pomocou dvoch ramien a štyroch skrutiek. Na výrobu nádrže sme použili metódu zvárania TIG.



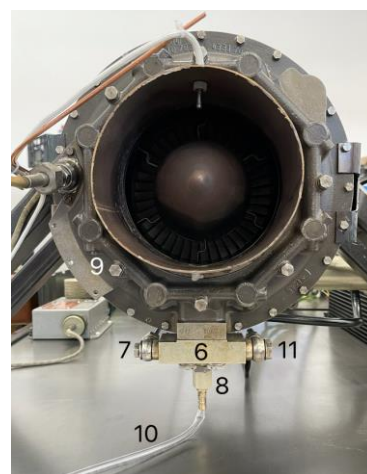
Obrázok 1 Upevnenie palivovej nádrže Zdroj: autor

3.1.2. Zapojenie palivovej sústavy

Palivo je odvádzané z palivovej nádrže do systému pomocou hliníkovej trubky s rozmerom AN5. To následne prechádza cez palivový filter (1) do palivového čerpadla (2). Palivové čerpadlo je napájané pomocou dvoch 12V batérií zapojených do série. Spúšťanie a vypínanie čerpadla riadi obsluha pomocou spínača na ovládacom paneli. Z čerpadla je palivo následne tlačené do palivového regulátora (3) cez hliníkovú trubku s rozmerom AN5. Ten zabezpečuje konštantný prietok paliva na výstupe z regulátora. Palivo následne pokračuje cez hliníkovú trubku s rozmerom AN4 s vonkajším priemerom 6,35 mm do T-spojky (5), ktorá rozdeľuje palivo do rozdeľovača oleja (4) a do drenáže paliva (6), ktorá sa nachádza v zadnej časti motora. Zo spojky sú tiež vedené hliníkové trubky s rozmerom AN4. Drenáž disponuje jedným vstupným otvorom (7) pre prívod paliva a dvoma výstupnými otvormi. Jeden z výstupných otvorov (8) slúži na odvod paliva zo spaľovacej komory v prípade mokrého štartu alebo zostatkového paliva po vypnutí motora v palivovej rampe (9). V drenáži sa nachádzajú guľôčkové ventily. Jeden z ventilov sa zatvorí v prípade tlak paliva v palivovej rampe presiahne 0,14 baru a otvorí sa v prípade že tlak v palivovej rampe klesne pod túto hodnotu. Druhý ventil sa zatvára pri štarte motora keď tlak v spaľovacej komore presiahne hodnotu 0,35 baru a otvorí sa pri vypnutí motora, keď hodnota klesne pod túto hodnotu. Na tento otvor je priskrutkovaný holender na ktorý je napojená hadica (10), ktorá odvádzá palivo do nádoby, aby bolo možné palivo recyklovať. Druhý z výstupných otvorov (11) slúži na odvod paliva do spätnej vetvy. Palivo je odvádzané pomocou hliníkovej trubky s rozmerom AN5 do palivového regulátora.



Obrázok 2 Zapojenie palivovej sústavy Zdroj: autor



Obrázok 3 Zapojenie palivovej sústavy Zdroj: autor

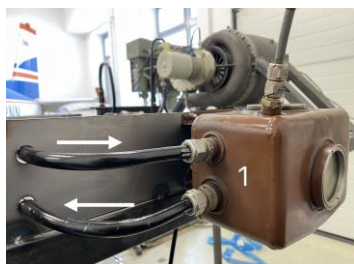
Keďže regulácia výkonu motora Safír 5 pracuje na princípe škrtenia spätnej vetvy, vstupuje palivo do servoventilu, ktorý sa nachádza v palivovom regulátore. Pokiaľ do servoventilu nie je privádzaný elektrický prúd, pružina ho vráti do otvorenej polohy. Riadenie servoventilu funguje pomocou modulácie prúdu. My využívame 24V, 150mA a moduláciu šírky impulzu (PWM) s maximálnou frekvenciou 250Hz. Riadiaca jednotka v tomto prípade vytvára prúd zo štvorcovou moduláciou znázornenou na obrázku číslo 44. Pri takomto spôsobe riadenia servoventil kmitá a tým vytvára odpor v spätnej vetve. Čím vyššou frekvenciou kmitá, tým väčší odpor vytvára v spätnej vetve a o to viac paliva sa cez palivovú rampu a palivové dýzy dostáva do spaľovacej komory. V prípade, že servoventil prepúšťa palivo cez spätnú vetvu je odvádzané z palivového

regulátora späť do palivovej nádrže cez hliníkovú trúbku s rozmerom AN5.

3.2. Mazacia sústava

3.2.1. Zapojenie mazacej sústavy

Na uskladnenie motorového oleja sme využili pôvodnú olejovú nádrž (1) pre Safír 5. Tá nám poskytla dostatočný objem pre uskladnenie oleja a zároveň umožňuje kontrolu hladiny oleja a odvzdušňovanie olejovej vetvy. Nádrž sme umiestnili na vonkajší okraj rámu pomocou štyroch skrutiek. Odtiaľ je olej odčerpávaný olejovým čerpadlom (2) cez hliníkové trúbky s rozmerom AN8 s vonkajším priemerom 12,7 mm. Zubové čerpadlo následne tlačí olej cez hliníkovú trúbku s rozmerom AN5 a cez jednosmerný ventil (3) do rozdeľovača oleja (4). Ten pomocou membrány riadi či olej môže, alebo nemôže pretekať ďalej do motora na základe tlaku paliva v palivovom okruhu. Z rozdeľovača oleja je olej tlačенý cez hliníkovú trúbku s rozmerom AN4 a T-spojku (5) do skrine náhonov a do ložísk hriadeľa. Zo skrine náhonov je olej odvádzaný pomocou hliníkovej trúbky s rozmerom AN5 do spoločného uzla, kde sa stretáva spätný olej aj z ložísk hriadeľa. Z uzla je olej odvádzaný pomocou hliníkovej trúbky s rozmerom AN8 cez olejový chladič (6) do olejovej nádrže.

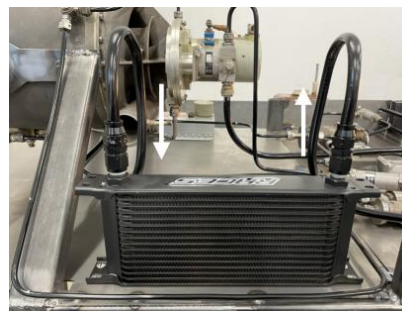


Obrázok 4 Umiestnenie olejovej nádrže Zdroj: autor



Obrázok 5 Zapojenie mazacej sústavy Zdroj: autor

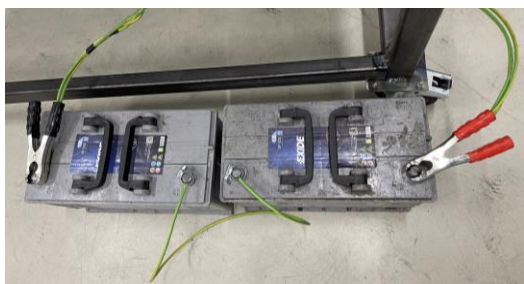
Na chladenie oleja sme využili 16-radový olejový chladič. Výhodou tohto chladiča je, že dokáže zabezpečiť maximálnu účinnosť chladenia pri minimálnom protitlaku. To je pre tento systém dôležité, pretože v spätnej vetve potrebujeme zabezpečiť čo najmenší odpor, keďže systém nedisponuje spätným olejovým čerpadlom.



Obrázok 6 Umiestnenie olejového chladiča Zdroj: autor

3.3. Elektrické zapojenie

Ako zdroj elektrickej energie sme použili dve 12V batérie. Tie sa skladajú zo šiestich článkov s olovenými elektródami a využívajú kyselinu sírovú ako elektrolyt. Výhodou takýchto batérií je veľkosť prúdu, ktorý dokážu poskytnúť. Pri štarte motora totiž využívame prúd 200A pri 24V pre štartér a zapaľovač. Batérie sú medzi sebou prepojené 3,2 mm káblom cez kladný a záporný pól. Následne sú prepojené pomocou krokosvoriek na kábel odberu štartéra a zapaľovača. Dva káble sú použité pre štartér a zapaľovač, a jeden na napájanie zvyšných komponentov.



Obrázok 7 Zdroj elektrickej energie Zdroj: autor

Na štart motora využívame pôvodný elektromotor s jednosmerným prúdom, ktorý pracuje pri 24V a 180A. Motor je štvorpólový so sériovým budením. Zapaľovací zdroj motora Safír 5 využíva 24V a 20A. Prúd dodávaný z batérie je dodávaný do primárneho obvodu zapaľovacieho zdroja a je prerušovaný Wagnerovým kladivkom. Tento prerušovač je premostený primárnym kondenzátorom. Elektrické impulzy vysokého napätia, ktoré vznikajú v sekundárnom vinutí cievky, nabíjajú cez usmerňovač sekundárny kondenzátor. Pokiaľ napätie na sekundárnom kondenzátore dosiahne hodnotu preskokového napätia iskrišťa, vybíja sa tento kondenzátor cez iskrište a nízkonapäťovú sviečku. Po skončení činnosti sa vybíja zvyšný náboj sekundárneho kondenzátora cez zvodový rezistor. Nízkonapäťová sviečka pracuje s povrchovým nábojom na povrchu polovodiča. Pracuje s napätím s 1,9 až 2,6 kV. Štartér a zapaľovač sú spúšťané pomocou 24V relé s maximálnym prúdom 200A. To je spínané pomocou prepínača, respektíve ECU. Relé disponuje dvoma ovládacími konektormi z ktorých záporný pól je napojený na prepínač a ECU pomocou CYKY-J 1,5 mm² káblu. Kladný pól je napojený cez svorkovnicu na kladný pól batérie využitím toho istého typu kábla.

Do štartéra je privádzaný elektrický prúd cez zdvojené 3,2 mm káble, ktoré sú uchytené na svorkách elektromotora. Pri zapájaní sme spojili konce dvoch káblov do tvaru oka a spevnili ich cínom. Rovnaký princíp sme použili aj na svorkách relé. Kladný pól je napojený cez relé na kladný pól batérie a záporný pól je cez svorkovnicu napojený na záporný pól batérie.



Obrázok 8 Privod elektrického prúdu do štartéra Zdroj: autor

Do zapaľovača je privádzaný elektrický prúd cez 2,5 mm² CYKY-J kábel, ktorý sme zvolili kvôli jeho odolnosti voči zmenám teplôt a chemikáliám s ktorými by mohol dôjsť ku kontaktu. Je tiež odolný voči ultrafialovému žiareniu a proti šíreniu plameňa.

Zapaľovač disponuje zásuvkou VŠ 17 B2 Š1 do ktorého sa napája konektor VŠ 17 KPN2G1. Konektor VŠ 17 KPN2G1 bol rozobratý, vyčistený od oxidácie a boli nanovo nacinované vodiče. Odtiaľ vedie kábel do rozbočovacej krabice v ktorej je kladný pól napojený cez relé na kladný pól batérie. Záporný pól je napojený cez svorkovnicu do záporného pólu batérie.



Obrázok 9 Konektor VŠ 17 KPN2G1 a zásuvka VŠ 17 B2 Š1 Zdroj: autor

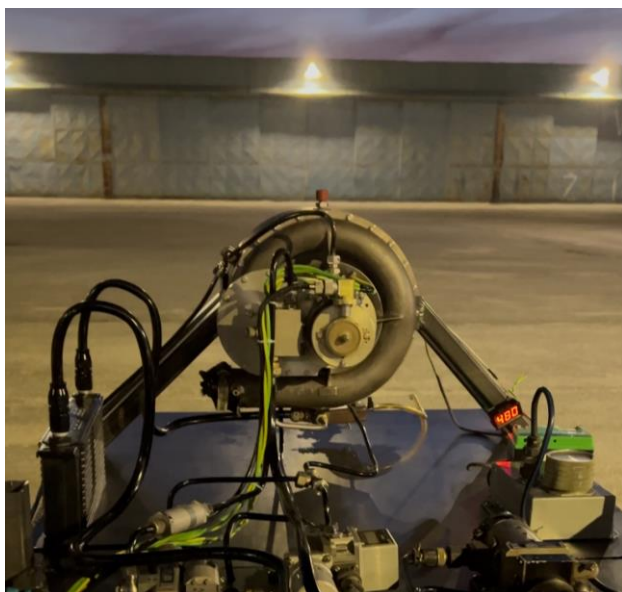
4. Overenie funkčnosti

Pri prvom štarte sme sa stretli s viacerými prevádzkovými problémami. Najzávažnejším problémom bola vysoká teplota výstupných plynov. Palivo v dôsledku nedostatočnej dodávky vzduchu z kompresora nedokázalo v plameni všetko zhorieť a z tohto dôvodu z motora vystupovali plamene. Zmes bola príliš bohatá. Z tohto dôvodu motor tiež nedokázal udržať voľnobežné otáčky a v tom prípade sa dokázal udržať len pri spustenom štartéri. Motor tiež nemal dostatočný tlak za kompresorom, a preto dochádzalo aj k úniku oleja do spaľovacej komory cez labyrintové tesnenia pre ktoré je kritické aby na nich pôsobil tlak vzduchu. Bez tohto tlaku vzduchu nedokážu zabrániť pretečeniu oleja do spaľovacej komory. Ďalší problém s ktorým sme sa stretli bola nefunkčná regulácia výkonu. To sme identifikovali ako dôsledok nesprávnych nastavení v ECU. Čo sa týka ECU, bol tiež nesprávne nakalibrovaný otáčkomer a z tohto dôvodu sme dostávali klamlivé informácie o otáčkach motora. To, že sme dostávali nesprávne informácie o otáčkach motora zapríčinilo že štartovacia sekvencia nepracovala tak ako sme chceli. Štartér so zapaľovačom bol totiž naďalej aktívny aj po prekonaní otáčok pri ktorých sa mali vypnúť.

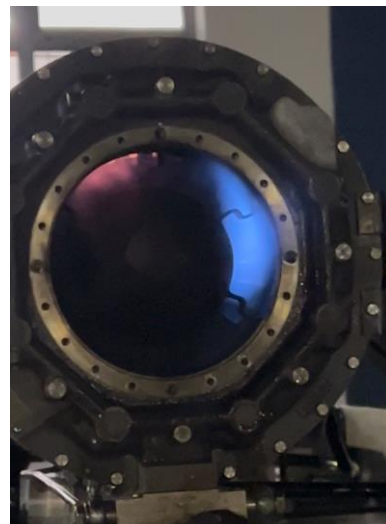
Pred ďalšími štartmi sme museli zabezpečiť správne fungovanie systémov, ktoré zlyhali pri prvom štarte. Ako prvé sme museli zabezpečiť dostatočnú dodávku vzduchu do spaľovacej komory. Dôvod prečo sme nedostávali dostatočný objem vzduchu do spaľovacej komory bol ten, že priveľa vzduchu bolo odpúšťaného z kompresora vplyvom nedostatočného blokovania odvodu pre vzduchový systém motora Safír 5. Pre tento účel sme si vyrobili zátku z izolačnej pásky, ktorá má dobrú odolnosť materiálu pri meniacej sa teplote a je odolná proti roztrhnutiu a opotrebovaniu. To sme vnímali ako výhodu pri cyklickom namáhaní pásky kvôli viacnásobným štartom a vypínaniam motora. Zároveň odolnosť pri meniacej sa teplote nám prišla výhodná, keďže teplota vzduchu z kompresora môže byť rozdielna voči teplote nasávaného vzduchu až do 160 °C vrátane. Táto páska bola po obvode dodatočne prichytená pomocou hadicovej spony. Ďalší problém, ktorý bolo potrebné vyriešiť bola regulácia výkonu motora. To sme upravili nastavením v ECU. Pôvodne sme mali zle nakalibrovanú páku príjmu, ktorú bolo potrebné znovu nakalibrovať. V ECU bolo

tiež nastavené využitie iba 30% výkonu ako maximálne možné nastavenie. To bolo tiež potrebné zmeniť aby sme mohli dosiahnuť vyšších otáčok motora. V ECU bolo tiež nutné znovu nakalibrovať otáčkomer spôsobom zmerania rozmerov zubov a medzier a následným prepočítaním na uhly.

Následnými štartmi sme zistili, že pri úplnom uzavretí odpúšťania vzduchu má motor potrebu väčšieho odberu paliva, aby dokázal udržať voľnobežné otáčky, respektíve tieto voľnobežné otáčky pri takejto konfigurácii sú vyššie ako boli na pôvodnom motore. To sme vyriešili vytvorením otvoru v páske, ktorá blokovala odpúšťanie vzduchu z kompresora. Vďaka jej pružnosti sa pri zvyšujúcom tlaku otvor dokázal zväčšiť a tým mohlo unikáť viac vzduchu z kompresora, a tým sa zabezpečil plynulý chod motora. Aby sme vedeli monitorovať teplotu výstupných plynov lepšie ako len vizuálne, pridali sme do systému aj senzor teploty výstupných plynov s malou obrazovkou na ktorej sa nám zobrazuje teplota. To je kľúčové pre zabezpečenie bezpečnosti prevádzky motora, pretože v prípade príliš vysokých teplôt na prvom alebo na druhom stupni plynovej turbíny by mohlo dôjsť k ulomeniu alebo roztaveniu lopatiek, a tým aj k deštrukcii plynovej turbíny alebo ďalších komponentov motora. Keďže výrobca nepočíta s takýmto využitím motora Safir 5, nemáme prístup k maximálnym teplotám výstupných plynov aké dokážu turbíny spracovať. Preto sme si pri testovaní určili hranicu maximálne 600 °C keďže meriame teplotu až vo výstupnom ústrojenstve za plynovými turbínami.



Obrázok 10 Znáznornenie snímania teploty z výstupného ústrojenstva Zdroj: autor



Obrázok 11 Pohľad na motor zozadu počas prevádzky Zdroj: autor

Po niekoľkých testoch motora sme zabezpečili plynulý a automatický štart. Okrem automatického štartu dokážeme aj regulovať výkon motora v súlade s maximálnou teplotou výstupných plynov. Okrem informácie o teplote výstupných plynov nám ECU poskytuje aj informáciu o otáčkach motora. Toto všetko by však nebolo možné bez toho aby sme zabezpečili pevnú a stabilnú konštrukciu, spoľahlivú mazacu sústavu s chladením oleja a palivovú sústavu s ktorou je regulácia výkonu možná.

5. Záver

Hlavným cieľom práce bolo upraviť motor Safir 5 tak, aby mohol byť použitý ako samostatný funkčný celok, nezávislý od palubných systémov lietadla, s využitím pre výučbové a experimentálne účely. Praktická časť práce sa venovala návrhu a realizácii technických úprav. Kľúčovým krokom bola rekonštrukcia palivovej sústavy, kde bola navrhnutá a zhotovená nová palivová nádrž prispôbená pre samostatnú prevádzku motora. Úpravy zahŕňali aj nový návrh palivovej sústavy, optimalizáciu prívodu a odvodu paliva, ako aj zabezpečenie plynulej regulácie prietoku paliva. Rovnako dôležité boli úpravy mazacej sústavy, kde bol prepracovaný celý okruh mazania a zabezpečené spoľahlivé mazanie všetkých dôležitých častí motora počas celého prevádzkového režimu. Súčasťou realizácie bola aj výroba nového stojana, ktorý zabezpečuje stabilitu motora pri štarte a počas celej prevádzky. Stojan zároveň umožňuje bezpečnú manipuláciu s motorom a jednoduchý prístup k jednotlivým komponentom počas testovania a údržby. Dôležitou etapou bola aj realizácia elektrického zapojenia, ktoré umožňuje štart motora, reguláciu jeho výkonu, ako aj monitorovanie základných prevádzkových parametrov. Po ukončení všetkých technických úprav bola vykonaná séria praktických testov zameraná na overenie funkčnosti celého systému. Testovanie potvrdilo, že navrhnuté a realizované úpravy umožňujú bezproblémový štart motora, jeho stabilný chod, plynulú reguláciu otáčok a spoľahlivú funkciu palivovej a mazacej sústavy. Výsledkom diplomovej práce je funkčný a samostatne prevádzkovateľný systém turbínového motora Safir 5, ktorý je pripravený na ďalšie využitie. Vďaka realizovaným

úpravám môže slúžiť ako výučbová pomôcka pri vzdelávaní študentov leteckých odborov, kde umožní názorné oboznámenie sa s princípmi fungovania turbínových motorov, ich palivových a mazacích sústav, ako aj s procesom ich spúšťania a regulácie. Realizácia tejto práce zároveň preukázala, že aj starší letecký motor je možné modernizovať a plnohodnotne využiť v nových podmienkach, čím sa predlžuje jeho životnosť a zvyšuje jeho prínos pre technickú prax. Práca tak spája teoretické poznatky s praktickým riešením a ponúka využiteľný výsledok, ktorý môže nájsť uplatnenie v oblasti technického vzdelávania a výskumu.

Referencie

[1] Nauka spouštěcí jednotky SAPHIR 5. 2. vyd. Piešťany, 1975. 290 s.

[2] 16 radový olejový chladič. In: race-shop.sk [online] [cit. 12.04.2025]. Dostupné na internete: https://race-shop.sk/univerzalne-olejove-chladice/45430-16-radovy-olejovy-chladic-330x125x50mm.html#/1559-vstup_a_vystup-an8/163-farba-cierna

[3] BATTERY IMPORT SK. VŠETKO O AUTOBATÉRII - Battery Import SK. In: battery-import.sk [online] [cit. 12.04.2025]. Dostupné na internete: <https://www.battery-import.sk/vsetko-o-autobaterii/>

[4] Cyky káble: Aké majú označenie a ktoré kedy použiť? (blog). In: Murat.sk [online] [cit. 12.04.2025]. Dostupné na internete: <https://www.murat.sk/blog/cyky-kable-ake-maju-oznacenie-a-ktore-kedy-pouzit>