



NÁVRH A REALIZÁCIA TROJVALCOVÉHO SPAĽOVACIEHO MOTORA V USPORIADANÍ DO HVIEZDY

Peter Lubják
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

This article looks at different combustion engine topologies and concentrates on designing and building a two-stroke radial engine prototype for use in aircraft. With an emphasis on these engines' application in the aviation sector, the goal is to offer a thorough understanding of the mechanical factors that influence these engines' efficiency and performance. The article's theoretical section discusses the fundamental ideas behind combustion engines and the benefits and drawbacks of various designs. It also emphasizes the Trabant automobile engine, which has been utilized in aircraft; the prototype motor was built using parts from this engine. The design of the building, the use of contemporary simulation tools for design optimization, and the prototype's production processes are all covered in the practical section. The best way to manufacture anything with a CNC milling machine that is readily available is also covered.

Keywords

Engine, Radial engine, Two-stroke engine, Engine prototype, Trabant

1. Úvod

Spôľahlivosť agregátov je veľmi podstatná v leteckom odvetví. Vibrácie spôsobené rôznymi konštrukčnými prevedeniami spaľovacích agregátov sú jedným z faktorov ktoré z veľkej časti ovplyvňujú spoľahlivosť a efektívnosť. Minimalizovanie vibrácií sa dá pomocou šikovne zvolenej konštrukcie. O návrhu a zostrojení experimentálneho motora s novou konštrukciou si viac povieme v tomto článku.

2. Metodika a metódy skúmania

Dôležitým faktorom pri tvorení akéhokoľvek projektu je zvoliť si parametre a ciele.

2.1. Informácie o prototypu

Pred zahájením vývoja tohto motora boli stanovené nasledujúce požiadavky: Objem motora by nemal presiahnuť 1000 kubických centimetrov, konštrukcia by mala byť jednoduchá a náklady na výrobu nízke. Navrhnutý bol hviezdicový dvojtaktný motor bez potreby preplňovania, čo zaručuje jeho jednoduchosť, nízku hmotnosť a výhodnosť pre použitie v leteckom priemysle. Tento koncept je zameraný na minimalizáciu výrobných nákladov podobne ako môj predchádzajúci projekt Bistella 500. Rozhodol som sa preto využiť niektoré súčasti z motorov P60, P63, P66 a 5B, známe tiež ako motory z automobilu Trabant, čo viedlo k výberu pracovného názvu TrabY-motor – motor Trabant usporiadaný do tvaru písmena Ypsilon. Hlavný rozdiel medzi motorom Bistella a TrabY spočíva v dizajne kľukového hriadeľa. Bistella používa tradičný kľukový hriadeľ štvordobého hviezdicového motora, kde sú všetky ojnice pripojené k jednému bodu, ktorý sa otáča okolo centrálnej osi hriadeľa. Tento dizajn umožňuje symetrické zapálenie valcov, avšak neprináša žiadnu prirodzenú vyváženosť motora, čo si vyžaduje prídanie protizávažia, čím zvyšuje hmotnosť rotujúcich častí. Na druhej strane, kľukový hriadeľ motora TrabY má ojnicné čapy

usporiadané každý o 120°, čo vedie k umiestneniu troch valcov jednej hviezdoy do troch rozdielnych rovín, na rozdiel od motoru Bistella, ktorý má päť valcov usporiadaných v jednej rovine. Motor pracuje vďaka koordinovanému pohybu všetkých troch piestov. Keď sa piesty pohybujú smerom nahor, vzniká v kľukovej skrini podtlak, čo spôsobí prúdenie vzduchu cez karburátor. Tu sa vzduch mieša s palivom a vytvára sa vhodná zmes. Za riadenie naplňovania kľukovej skrine zodpovedá rotačný disk, ktorý v určitých fázach otáčania kľukového hriadeľa otvára a zatvára sací kanál. Keď sa piest pohybuje z vrchnej polohy do dolnej, sací kanál sa uzatvára a zmes vo vnútri začína byť stlačená. Keď piesty dosiahnu bod, kde otvoria výpustové kanály, pripravená zmes začne prúdiť týmito kanálmi, čím sa naplní spaľovací priestor a vytlačá sa zvyšok spalín do výfukového systému. Pri ďalšom pohybe piesta smerom nahor sa zatvoria prepúšťacie kanály, ale výfukový kanál zostáva ešte chvíľu otvorený, čo vedie k strate časti čerstvej zmesi. Keď piest uzavrie výfukový kanál, začína fáza kompresie. Krátko predtým, ako piest dosiahne svoju hornú polohu, dojde k zapáľovaniu stlačenej zmesi elektrickým výbojom na zapáľovacej sviečke v každom z valcov. Nasleduje fáza expanzie, ktorá pokračuje až k otvoreniu výfukového kanálu. Výfuková fáza ideálne prebieha od momentu otvorenia výfukového kanálu do otvorenia prepúšťacích kanálov. Po ich otvorení dochádza k opätovnému výplachu a začína sa nový cyklus. Z tohto porovnania vyplýva, že hviezdicový motor TrabY má jednoduchšiu konštrukciu a je výrazne lacnejší na výrobu ako zmieneny hviezdicový motor Bistella. Avšak, kvôli ojnicným čapom umiestneným mimo stredu, je tento typ motora dlhší ako hviezdicový motor tradičnej konštrukcie. Najväčšou výhodou motora TrabY je prirodzená vyváženosť. Kvôli spoločnému pohybu piestov nám vznikajú sily prvého aj druhého rádu, ktorých výslednica je nulová. Dôvodom prečo som nenavrhol tento koncept aby bol štvordobý je pomerne jednoduchý a je ním cena. Hlavnou výhodou konvenčných štvordobých motorov je oddelené mazanie od palivovej sústavy. V tejto konfigurácii nie je možné použiť mazanie s mokrou skriňou. Ak by sme chceli využiť systém

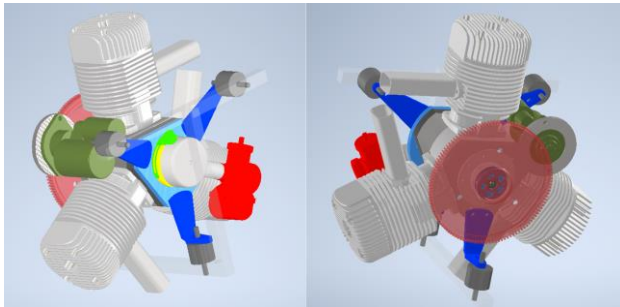
mazania suchou skriňou, potrebovali by sme zložitú odsávaciu sústavu a viacero čerpadiel. Ďalším nepriaznivým faktorom je frekvencia odpaľovania. V prípade dvojdojby konfigurácie nám motor opáli každú otočku a dodáva silu po dobu 120° otočenia kľukového hriadeľa. Takže rotačné ústrojenstvo musí byť dostatočne ťažké aby po dobu 240° dodávalo kinetickú energiu. V prípade štvordobého motora je tento pomer horší. Sila sa síce dodáva po dobu 180° otáčania kľukového hriadeľa, avšak doba kedy motor ide na prázdno je 540° otočenia kľukového hriadeľa. Z toho dôvodu by muselo byť rotujúce ústrojenstvo ešte ťažšie.

2.2. Návrhy súčiastok

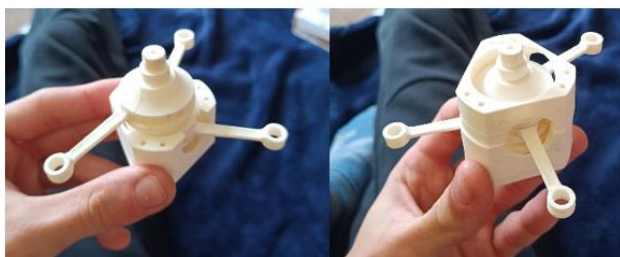
Srdcom motora je kľukový hriadeľ. Zdvih 73 mm ako majú motory P60,P63,P66 a 5B som sa rozhodol zachovať. Dôvod je, že pokiaľ by sme zmenili zdvih motora negatívne by sme narušili časovanie valca, čím by daný motor mohol mať nepriaznivú výkonovú krivku. V rámci zachovania jednoduchosti konštrukcie sa taktiež využili ojnicné ložiská, ktoré sa dajú kúpiť samostatne. Ide o vonkajší krúžok s klietkou a ihličkami a samostatný vnútorný krúžok. Vďaka tomu nemusia byť ojnicné čapy tvrdené a mať špeciálne povrchové leštenie, ale môžu byť vyrobené z rovnakého materiálu ako zbytok kľukového hriadeľa. Tým, že sú všetky diely dodané z už nepoužívaných motorov, je veľká pravdepodobnosť, že budú čiastočne opotrebované. Nie je to ináč ani s ojnicami, ktorých plochy pre spodné ojnicné ložiská vykazujú povrchové poškodenie známe ako pitting. Aj to bolo dôvodom, prečo som vybral ložisko s vonkajším krúžkom a nie len sadu ihličiek v klietke. Pitting nemá skoro žiadny vplyv na pevnosť ojnice avšak ihličky ložiska by mohli byť v krátkej dobe zničené. Mazanie tohoto ložiska zaisťujú mazacie diery, ktoré sa na danom ložisku nachádzajú. Do ojnice sa ložisko nalisuje tak, že diery v ojnici budú splyvať s dierami v novom ložisku. Kvôli minimálnej dĺžke je kľukový hriadeľ navrhnutý tak, aby boli roviny ojnic čo najbližšie pri sebe. Z toho dôvodu sú v častiach kľukového hriadeľa, kde sa nachádzajú spodné ojnicné čapy vyfrézované kruhové miesta kvôli dostatočnému miestu pre spodok ojnice, ktorá je rozšírená kvôli ložisku. Kraje kľukového hriadeľa sú vytvarované s rádiusom pre hladký pohyb zmesi. Spojovacie výkovky dodávajú potrebnú hmotnosť danej konštrukcii. Hlavné ložiská kľukového hriadeľa boli vybrané za účelom najlepších vlastností. Pri navrhovaní som myslel na ľahké skladanie motora, preto som vybral valčekové ložiská XX, keďže daný motor nebude v testovacej fázy namáhaný axiálnymi silami. Pre prípad, že bude daný motor vybavený vrtuľou, ktorá začne namáhať motor axiálnymi silami budeme musieť vymeniť použité valčekové ložiská za guľôčkové ložiská YYY, ktoré sú navrhnuté na dostatočnú pevnosť axiálnych aj radiálnych síl. Na oboch stranách kľukového hriadeľa sú vytvorené dosadacie plochy pre jednotlivé tesniace elementy ako aj pre adaptér na upevnenie zotrvačníka ku kľukovému hriadeľu a osadenie pre rotor zapaľovacej sústavy. Pri navrhovaní bloku motora som implementoval jednu zásadnú technológiu. Ide o vyosenie osí valcov voči osi otáčania kľukového hriadeľa. Má to za následok niekoľko vecí. Prvou je zníženie trenia piestu voči valcu. Pri expanzii nám pôsobí veľká sila, ktorá tlačí na piest z vrchu, pričom kľukový hriadeľ, cez ktorý sa vyprodukovaná rotačná sila prenáša sa pohybuje pomalšie akoby bolo prirodzené pre piest. Z tohoto dôvodu nám ojnica vytvára protisilu, ktorá pôsobí na piest z opačnej strany. Tým, že je ojnica pod uhlom je daný piest nútení sa oprieť o jednu stranu valca. Pokiaľ vyosíme os valcov, zníži sa uhol medzi osou valca a ojnicou. Pri kompresnej fáze je však ojnica pod väčším uhlom, čo spôsobuje, že na opačnej

strane nám vzniká zvýšené trenie. Dôležité je, že celkové trenie sa zníži, keďže trenie piestu produkované počas expanzie je násobne väčšie ako trenie piestu počas kompresie. Ďalšou výhodou tejto technológie je zmenené časovanie motora. Počas pohybu piestu z hornej úvrati k dolnej úvrati sa otočí kľukový hriadeľ o niekoľko stupňov viac ako v prípade, že sa pohybuje piest z dolnej úvrati k hornej. Príklad: 193°-167°. Vďaka tomu má horiaca zmes viac času na prehorenie. Tým pádom je motor efektívnejší a má vyšší výkon. Toto vyosenie valcov je obvyčajne s výskytom nesymetrických vibrácií. Je to spôsobené práve nerovnomerným pohybom piestu pri prvej polovici rotácie kľukového hriadeľa voči druhej polovici. Táto nerovnováha má dopad na sily prvého aj druhého rádu. V mojej konštrukcii je však výslednica síl nulová vďaka sústrednému smerovaniu piestov. Ináč povedané, akékoľvek nesymetrické vibrácie jedného piestu, budú vyrušené spoločným pohybom piestov. Najväčší problémom, s ktorým som sa musel vysporiadať bolo zostrojenie bloku motora tak, aby som ho bol schopný vytvoriť a zároveň aby bolo možné celý motor poskladať. Dôvodom mojich obáv je to, že kľukový hriadeľ je lisovaný, pričom ojnice sú súčasťou kľukového hriadeľa. Tým pádom musí byť blok motora navrhnutý tak, aby sa doň dala vložiť kľuka so všetkými ojnicami. Tento problém som vyriešil tak, že som blok motora rozdelil na dva hlavné bloky. Tak môže byť kľuka uložená do bloku a vyriešil sa hlavný problém. Jednu časť bloku uzatvára rovný kus dosky, vytvarovanej, aby kopíroval tvar jadra bloku a zároveň bol nosnou časťou pre prvé hlavné ložisko kľukového hriadeľa. V tejto časti motora sa nachádza výstupný hriadeľ, na ktorý som v tomto prípade pripevnil zotrvačník. Zotrvačník je použitý z agregátu automobilu VW BUS T2. Profil ozubenia totižto dokonale pasuje do pastorku štartéra agregátu automobilov Škoda Felícia 1,3 MPI. Tento štartér je osadený v spomínanej doske a je vyosený tak, že zapadá presne medzi dva valce. Kvôli dostatočnej tolerancii je v danej doske určité vybratie, ktoré umožňuje správny kontakt štartéra a zotrvačníka. Na prepojenie kľukového hriadeľa a zotrvačníka využijeme prírubu, ktorá sa jednou skrutkou priskrutkuje k dosadacej ploche kľukového hriadeľa. O adekvátny prenos sily sa nám postará uloženie s perom. Obe časti motora sú utesnené labyrintovým tesnením z motora 5B. Na tejto strane sa však musel zväčšiť vnútorný rozmer tesniaceho labyrintového krúžku. Na opačnej strane sa nachádza uloženie druhého hlavného ložiska. V tejto časti motora som sa rozhodol umiestniť sací otvor, ktorý je ovládaný/zatváraný rotujúcim diskom. Pre tento typ sacieho rozvodu som sa rozhodol kvôli mojim skúsenostiam s úpravami tohoto typu sania z agregátov P60,P63,P66 a 5B. Pri navrhovaní som rozmýšľal aj nad typom rozvodu klapkovým ventilom, avšak nepodarilo sa mi nájsť potrebné miesto na jeho uloženie. Bočná časť motora sa preto skladá z dvoch častí, medzi ktorými sa pohybuje daný disk. K vonkajšej časti je prichytená prírubu, na ktorú sa cez gumovú hadicu prichytí karburátor. K vonkajšej časti je prichytený aj držiak, v ktorom je nalisovaný tesniaci labyrint. K tomuto držiaku je po obvode prichytený snímač kľukového hriadeľa, ktorý má možnosť byť čiastočne posunutý na obe strany a tým sa môže doladiť správne časovanie zapaľovania. Stator zapaľovania je taktiež prichytený o tento držiak pomocou troch dlhých skrutiek, ktoré ho držia aj s vymedzovacou podložkou. Rotor zapaľovania je prichytený o kľukový hriadeľ pomocou vystreďovacieho palca a dlhej skrutky. Pôvodný návrh mal tri držiaky motora na strane od zapaľovania. Avšak takáto konštrukcia sa ukázala ako príliš slabá kvôli váhe motora. Preto som dva držiaky silenblokov prerobil, aby držali silenblok uložený pod motorom. Vďaka tejto konštrukcii je motor

prichytený na štyroch miestach z čoho dva sú pod motorom. Pred samotnou výrobou jednotlivých komponentov som si jednotlivé časti vytlačil na 3D-tlačiarňi a vyskúšal som kompatibilitu jednotlivých častí a postupov skladania.



Obrázok 1. 3D model prototypu motora TrabY



Obrázok 2. Kontrola koštrukcie prototypu na zmenšom 3D modeli

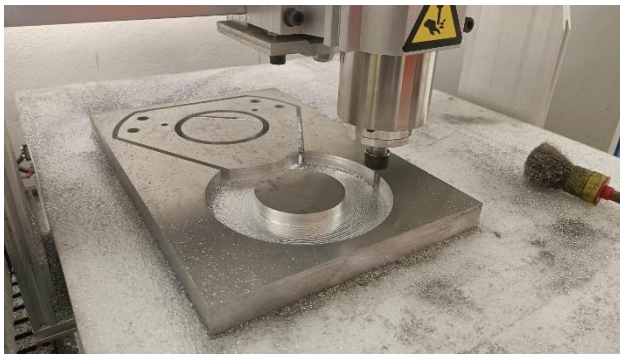
2.3. Výroba súčiastok

Pri výrobe jednoduchých súčiastok som sa rozhodol využiť možnosti rezania laserom. išlo o výfukové príruby, prírubu karburátora, rotačný disk sania aj s protikusom, ktorý je nalisovaný na kľukový hriadeľ. V neposlednom rade to boli držiaky silenblokov. Spomínané držiaky silenblokov boli vypálené ešte v starom návrhu, takže som ich musel rozrezať a pozvárať v 90° uhle. Na výpalok príruby karburátora som navaril oceľové kolienko správneho rozmeru. Výfuky v tejto prototypovej konfigurácii budú zabezpečovať jakle navarené k jednotlivým výfukovým prírubám. Na blok motora som využili guľatinu z duralu. Najskôr som ju narezal na rozmery, ktoré umožnia obrábanie na školskej trojosej frézke. Ide o CNC frézka 600x400 800W. Jej zdvih je rovných 100 mm. Prvá časť bloku motor sa vyrábala z duralovej dosky. Táto doska sa pripevnila obojstrannou páskou. Na obrábanie som používal frézky, ktoré boli súčasťou CNC frézky. Jednalo sa o 3mm dvojbritvú frézku. Tento typ frézky bol veľmi krehký a rýchlosť obrábania bola pomerne pomalá. Z dôvodu rýchlejšieho obrábania som zakúpil dvojbritvé 6mm frézky. Ich najväčšou výhodou bola vyššia rýchlosť obrábania, ktorou vedľajším efektom bolo priveľké zohrievanie obrábaného materiálu. Z dôvodu ochrany koštrukcie bola na dosadacej ploche umiestnená doska z pevnejšieho molitanu. Zvýšenou teplotou sa stratil daný molitan pevnosť a po čase sa začal taviť. Z tohoto dôvodu som prešiel na ochranu povrchu dosadacej plochy doskou tvorenou drevotrieskou. Taktiež som musel zmeniť typ uchytenia, keďže obojstranná páska nebola adekvátnym pojivom. Použil som samorezné skrutky do dreva, ktoré držali pomocou kovových profilov obrábaný materiál na mieste. Problém s prehrievaním som riešil pomocou malého ventilátora zo stolného počítača umiestneného tak, aby chladil obrábaný blok, a pritom odfúkal duralovú triesku. Ďalšou obrábanou časťou bol plát

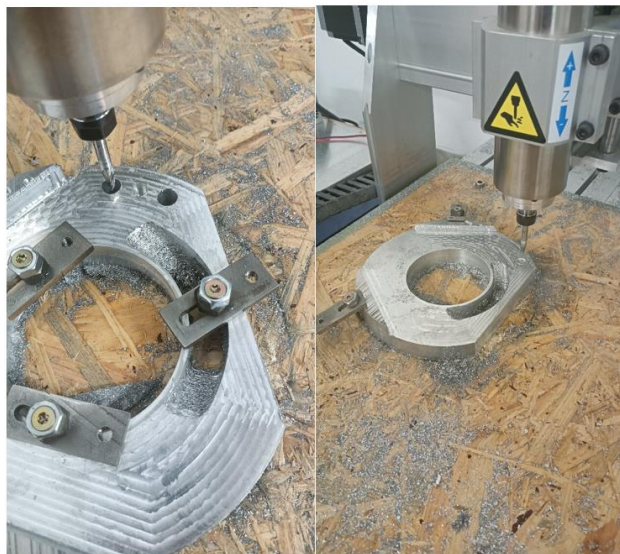
uloženia druhého hlavného ložiska a sacieho kanálu. Nasledovalo obrábanie dvoch hlavných častí jadra bloku motora. V tejto fázy som zistil, že drevotriesková doska nemá dostatočné pevnostné charakteristiky a musel som obrábané časti pripevniť pomocou závitových tyčí, ich zámkom, ktoré zapadli do drážok v profiloch CNC frézy a kovových profilov, ktoré spolu držali obrábaný kus na mieste. Tieto časti boli natoľko vysoké, že som sa rozhodol ich vyfrézovať na dva-krát t. j. najskôr z jednej strany, potom daný kus otočiť a dofrézovať zo strany druhej. Pri frézovaní takto vysokého bloku však začal nastávať problém nadmerného ohrievania, ktorý vygradoval do stavu, kedy sa začal taviť materiál priamo na britvy frézky. Riešením bolo zníženie rýchlosti obrábania. Ďalším problémom, ktorý sa vyskytol bola nedostatočná dĺžka vybratí pre odvod obrobeneho materiálu t. j. duralovej triesky. Z dôvodu absencie adekvátnej frézky som si použitú frézku upravil. Upol som ju do sústruhu a brúsením som odobral materiál z krku frézky. Vďaka tomu sa zväčšila vzdialenosť medzi rotujúcou frézku a obrábaným materiálom, čím sa vyriešil problém s natavovaním materiálu na krk frézky. Z dôvodu príliš pomalého obrábania som začal pátrať akoby sa dalo frézovať efektívnejšie. Zistil som, že dvojbritvé frézky sú dobré pre obrábanie kovových materiálov, ale na dural sú najlepšie jednobritvé frézky. Rozhodol som sa ich objednať cez online obchod. Do ich príchodu som naďalej pracoval s dvojbitvými 6mm frézkami. Podarilo sa mi opracovať obidve časti jadra bloku. Na presné obrábanie druhej strany som však potreboval referenčné body na kalibráciu CNC frézky. Urobil som to tak, že som prevrtil na stojanovej vrtačke predvrtané 10mm diery. Vďaka tomu som mal referenčné body. V tej dobe prišli jednobritvé frézky. Tie umožnili čistejšie frézovanie a najmä rýchlejšie. Vďaka svojmu tvaru odvádzali triesku efektívne preč z obrábaného materiálu a problém s prehrievaním obrábaného materiálu zmizol. Po dokončení obrábania z oboch strán som ručnou frézku doladil všetky ostré hrany a nedokonalosti. Z dôvodu nepresného vystredenia boli jednotlivé časti zľahka posunuté. Tieto nepresnosti sa ladili neskôr. Následne som zložil blok motoru na sucho, pričom bolo potrebné doladiť súososť 10mm dier pre štifty motora. Štifty motora som vytvoril zo závitovej tyče zarezanej a opracovanej na presných dĺžkach. Pomocou vyrobených štiftov som zoskrutkoval vyrobený blok. Popri tom som vytváral motorové lôžko. Použil som kovovú koštrukciu z bývalého leteckého simulátora. Do tejto koštrukcie som navaril jakel, o ktorý sa chytali spodné silenbloky motora. Do tohoto motorového lôžka som upevnil blok motora, ktorého dosadacie plochy som zarovnal. Avšak spomínané vyosenie jednotlivých častí spôsobovalo nerovnosť na dosadacích plochách valcov motora. Tieto nerovnosti som na hrubo zarovnal uhlovou brúskou. Následne som excentrickou brúskou zahladil daný povrch, ktorý som doladil ručne hoblíkom na brúsny papier. Rovnosť plochy som si kontroloval uholníkom. Otvory pre valce však nemohli byť dofrézované na CNC frézke. Bolo ich treba doladiť ručne. Postupoval som tak, že po obvode som vyvrátil veľké množstvo dier. Následným obrátnym úderom kladiva sa oddelila odvrátená časť bloku. Následne som ručnou frézou doladil nedokonalosti vzniknuté týmto postupom. Pomocou tesnenia valca som si naznačil miesta, kde sa budú nachádzať štifty, vyvrátil som kolo diery a narezal som príslušný závit. Štifty som vyrobil zo závitovej tyče, ktorú som narezal a upravil na stanovené rozmery. Ako posledné som vytvoril držiaky tesniacich labyrintov bloku. Ich výroba bola rýchla a bezproblémová.



Obrázok 3. Rezanie materiálu



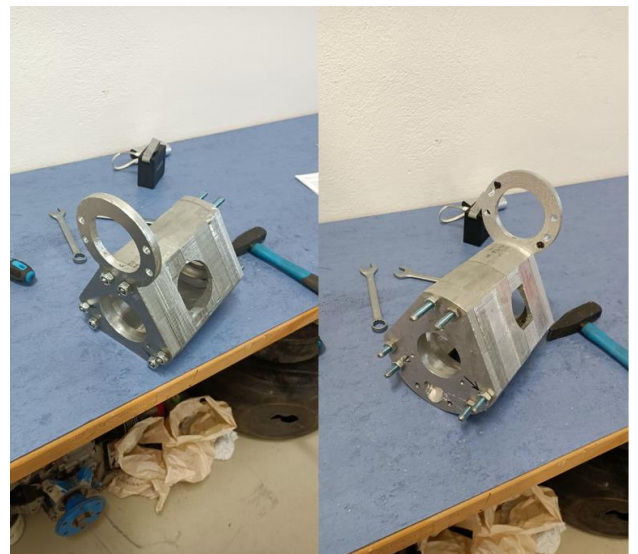
Obrázok 4. Obrábanie materiálu



Obrázok 5. Obrábanie materiálu



Obrázok 6. Úprava nástroja a ukážka "lepenia" hliníku na nástroj



Obrázok 7. Zložený blok motora

2.4. Výroba kľukového hriadeľa

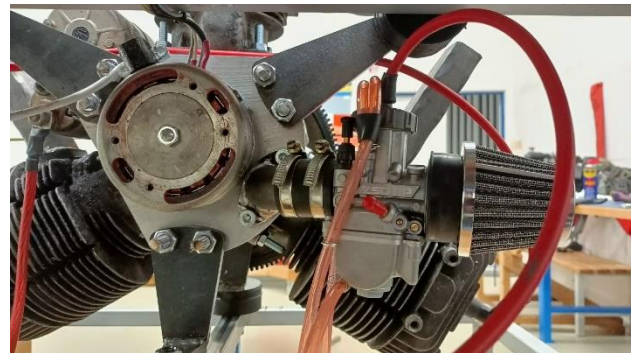
Kľukový hriadeľ musí byť kvôli svojej konštrukcii zložený z viacerých častí. Ide o samotné časti kľukového hriadeľa, ložiská a ojnice. Ojnice a ložiská sa stávajú súčasťou kľukového hriadeľa pri jeho lisovaní. Nosné časti kľukového hriadeľa sa vyrábajú na sústruhu obrábaním ocelevej guľatiny. Môj pôvodný plán bolo vyrobiť tieto na sústruhu nachádzajúcom sa v priestoroch katedry. Bohužiaľ takto veľký a najmä ťažký kus ocele nie je možné upnúť do skľučovadla sústruhu nachádzajúceho sa v dielni. Kľukový hriadeľ som si musel dať vyrobiť. Išlo o výrobu ojnicných čapov, krajných častí, vnútorných výkrovkov a príruby na uchytenie zotrvačníka. Ojnicné čapy sa vytvárali z menšej guľatiny kvôli úspore odpadového materiálu. Na ostatné komponenty sme využili 130mm oceľovú guľatinu ktorú som pre sústružníka narezal na požadované rozmery. Krajné časti sa upli do sústruhu, vytvoril sa potrebný profil obrábacím nožom, pričom dosadacia plocha na ložisko sa zabrusila brúsny kameňom na potrebné rozmery. Na ručnej fréžke sa odrážovalo vybratie materiálu okolo spodného ojnicného oka a následne sa vytvorila diera pre spodný ojnicný čap. Vnútorne výkrovky sa

zarovnali na stanovené rozmery a na ručnej frézke sa vytvorili vybratia a diery. Poslednou časťou, ktorá bola sústružená, je príruha na zotrvačník. Najskôr sa vytvoril potrebný profil ubratím materiálu. Následne sa naznačila a vyvrtala päťcia dier v stanovenej rozteči. Nakoniec sa v tejto rozteči vyrezali potrebné závit. Po vytvorení daných komponentov bolo potrebné zaručiť ich pevnosť. Preto som sa rozhodol pre tepelnú povrchovú úpravu kalením. Jednotlivé časti kľukového hriadeľa som zohrial na vopred stanovenú teplotu a následne som ich ponoril do oleja. Pri tomto procese môže nastať deformácia tvarov kaleného objektu. Preto som všetky kritické rozmery ešte viac krát prekontroloval. Na výsledné lisovanie kľukového hriadeľa som využil ručný lis v dielňach katedry, prípravky vyrobené z kovu ale aj vytlačené na 3D tlačí. Ako prvé som osadil ojnicné čapy vnútornými krúžkami spodného ojnicného ložiska. Následne som osadil krajinú časť kľukového hriadeľa na lis, mierne nahrial, vystredil a nalisoval pripravený zmrazený spodný ojnicný čap. Tento čap som osadil ojnicou s ložiskom. Prichystal som prípravky na lisovanie stredného výkrovku. Daná výkrovok som vystredil, mierne nahrial a nalisoval som na nalisovaný čap z krajnej časti kľukového hriadeľa. Tento postup sa opakuje pri všetkých častiach kľukového hriadeľa. Po nalisovaní a zrovnaní teplôt som kľukový hriadeľ upevnil na stolicu, kde som pomocou odchytkomerov zmeral hádzavosť kľukového hriadeľa. Po sérii obrátých úderov som docielil požadovanú hodnotu hádzavosti.

2.5. Finálne zostrojenie prototypu

Prvým krokom bude očistenie a odmastenie všetkých častí bloku motora. Druhým krokom je namazanie všetkých ložísk kľukového hriadeľa olejom. Následne si nasunieme zohriate vnútorné krúžky hlavných ložísk na kľukový hriadeľ. Zbytok valčekových ložísk nalisujeme do krajných častí bloku motora. Ďalším krokom je umiestniť šesť dlhých pevnostných skrutiek M10 spolu s podložky do krajnej časti bloku tak, aby boli hlavičky na hladkej strane tejto časti bloku, pričom na spodnej strane bude umiestnený držiak silenbloku. Na príslušnú časť jadra bloku rovnomerne naniesieme špeciálny motorový tmel odolný voči benzínu. Túto časť nasunieme na skrutky a rukou dotlačíme na krajinú časť bloku. Následne sa vloží kľukový hriadeľ do tejto zloženej polovičky bloku. Pokiaľ používame guľôčkové ložiská je potrebné, aby bolo ložisko nalisované na kľuke. Prípravná časť bloku sa zľahka nahreje a kľukový hriadeľ sa vloží/nalisuje do tejto zloženej polovičky bloku. V ďalšom kroku naniesieme vrstvu motorového tmelu na druhú polovicu jadra bloku a následne ju nasunieme na zbytok motora. Týmto istým spôsobom namontujeme držiak druhého hlavného ložiska. V prípade guľôčkových ložísk musíme tento kus bloku nahriať. Pokračujeme nalisovaním zohriateho protikusu rotačného disku. Po krátkom vychladnutí vložíme rotačný disk do vybratia a skontrolujeme jeho správne časovanie. Poslednou časťou bloku motora je kryt rotačného disku. Naniesieme naň motorový tmel a vložíme ho správnou orientáciou na zbytok bloku motora. Posledným krokom pri stavbe motora je nasadenie troch držiakov silenblokov, na ktoré sa nasadia položky s maticami a celý blok sa dotiahne do kríža na 80Nm. Motorový tmel musí schnúť 24 hodín, kým sa pokúsime o spustenie motora. Takto zložený blok osadíme silenblokami a vložíme do motorovej stolicy. Počas doby kedy schne tmel, môžeme osadiť zbytok bloku tesniacimi labyrintami a ich držiakmi. Následne vložíme príruhu na kľukový hriadeľ a zľahka dotiahneme centrálnu skrutku M12 tak, aby sa príruha nevyvsunula. Na príruhu

nasadíme zotrvačník, ktorý zaistíme voči rámu motorovej stolicy tak, aby sa nepohol. Prvé dotiahneme skrutky M10, ktoré držia zotrvačník na moment 70Nm. Poslednú dotiahneme centrálnu maticu M12 na moment 120 Nm. Zotrvačník odistíme a vyskúšame voľnú rotáciu kľukového mechanizmu. Následne si nasadíme štartér dvoma skrutkami M10. Na druhej strane skompletizujeme zapalovaciu sústavu t. j. nasadíme stator, rotor a snímač otáčok motora. Na príruhu karburátora naniesieme jemnú vrstvu tmelu a pripevníme k saciemu otvoru. Karburátor pripevníme o príruhu gumovou hadicou, ktorú dotiahneme kovovými sťahovacími páskami. V ďalšom kroku zostrojíme všetky tri piestne sústavy. Počas procesu treba dbať na dostatočné mazanie povrchov jednotlivých súčiastok. Pred nasadením valcov poriadne namažeme piestne sústavy aj vnútorné plochy valcov. Na spodné časti valcov naniesieme motorový tmel, následne ich nasadíme na jednotlivé piestne sústavy a dotiahneme k bloku motora. Na utesnenie hláv použijeme hliníkové tesnenia, ktoré taktiež namažeme olejom. Hlavy nasadíme spolu s namazanými tesneniami a dotiahneme matice M10 do kríža na moment 40Nm. Pripravené výkrovkové zvody pripevníme spolu s tesneniami na jednotlivé valce. Ako posledné zapojíme všetko príslušenstvo ako je kabeláž a prívod paliva do karburátora.



Obrázok 9. Detailný záber na karburátor a zapalovanie motora Traby



Obrázok 9. Zložený prototypový motor Traby

3. Výsledky

Tento prototyp je skonštruovaný hlavne na overenie výhod tejto konfigurácie. Treba však povedať, že súčasné odpaľovanie valcov jednej hviezdy prináša nevýhodu v podobe veľkého časového okna medzi jednotlivými expanziami. Vďaka svojej modulovateľnej konštrukcii je možné vytvoriť dve, prípadne tri rady valcov. V prípade usporiadania do dvojhviezdy by sa zmenšilo časové okno medzi jednotlivými expanziami. Usporiadanie do trojhviezdy by malo ešte lepšie vlastnosti vďaka

nulovému časovému oknu medzi expanziami. Toto usporiadanie by bolo stále možné efektívne chladiť vzduchom. V prípade ďalšieho vývoja tohto konceptu by som zväžil použitie valcov menšej kubatúry napríklad z nejakej modernej motorovej dvojdoberj píli. Totižto agregáty z automobilu trabant boli navrhnuté koncom päťdesiatych rokov, čo má za následok, že nemajú tak efektívnu geometriu jednotlivých kanálov ako moderné motory, ktoré boli vyvíjané s väčším porozumením prúdenia a najmä so simulovaním v rôznych CFD modelovacích prostrediach. Taktiež ich výukové systémy sú optimalizované na kompaktné rozmery. Konceptia malej dvojhviezdy by bola veľmi vhodná pre väčšie UAV. Agregát by ponúkal nízku hmotnosť, nulové vibrácie a adekvátny výkon.

4. Záver

Venovali sme sa v tomto článku návrhu a realizácii trojvalcového dvojdoberého spaľovacieho motora v usporiadaní do hviezdy. Mojm cieľom bolo skonštruovať a vyrobiť funkčný prototyp motora. Po dôkladnom štúdiu teoretických poznatkov o spaľovacích motoroch som pristúpil k návrhu a výrobe jednotlivých súčiastok motora. V tejto fáze som musel preukázať svoje technické a konštruktérske zručnosti, aby som dosiahol požadovanú pevnosť, tuhosť a hmotnosť motora. Výsledky tejto práce potvrdzujú, že sa mi podarilo skonštruovať a vyrobiť funkčný trojvalcový spaľovací motor v usporiadaní do hviezdy s potenciálom pre rôzne využitie. V budúcnosti by som sa chcel venovať optimalizácii konštrukcie motora a rozvoju riadiaceho systému pre jeho reguláciu a optimalizáciu výkonu.

Podakovanie

Článok je publikovaný ako jeden z výstupov projektu Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky KEGA 024ŽU-4/2023 s názvom "Integrácia najnovších vedných poznatkov v rámci zvyšovania kvality praktickej a laboratórnej výučby študijného programu Letecká doprava".

Referencie

- [1] BELL, A. G., (2022). Two-Stroke Performance Tuning. J H Haynes & Co Ltd, 2022. ISBN 978-17-8521-856-9.
- [2] KRÍŽ, J., (2008). *Pohonná jednotka*. EDIS, 2008. ISBN 978-80-8070-872-6.
- [3] LUBJÁK, P., (2022). Návrh trojvalcového hviezdového dvojdoberého motora. Bakalárska práca; online. doc. Ing. Jozef Čerňan, PhD. (vedúci záverečnej práce). Žilinská univerzita v Žiline, 2022. Dostupné na: <https://opac.crzp.sk/?fn=detailBiblioFormChildO1C9TU&sid=CAD4058F471880B8254985ED6788&seo=CRZP-detail-kniha>
- [4] ŠLEHOFER, V., (1974). *Údržba a opravy vozů Trabant 600 a 601*. SNL – Nakladatelství technické literatury, 1974. ISBN 04-233-74.
- [5] ŠTEFÁNIK F. et al., (1985). *Športové lietanie, lietadlá, letci*. Vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry, 1985. ISBN 63-118-85.
- [6] ŠTEFÁNIK F. et al., (1988). *Športové lietanie, lietadlá, letci*. Vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry, 1988. ISBN 063-072-87.