

IGNITION SYSTEMS OF COMBUSTION PISTON ENGINE AND POSSIBILITY OF ITS OPTIMIZATION

SYSTÉMY ZAPALOVÁNÍ PÍSTOVÝCH ZÁŽEHOVÝCH MOTORŮ A MOŽNOSTI JEJICH OPTIMALIZACE

Marek Vorlíček
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina
marekvorlicek@icloud.com

Jozef Čerňan
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina
Jozef.cernan@fpedas.uniza.sk

Abstract

This paper explains the basic definition of ignition, combustion and description of the ignition system functionality. The ignition systems are divided according to established criteriums into the most used types and descriptions of each ignition system components. It focuses on ignition timing and circumstances that affect it and how they influence the observed parameters. I am using ignition timing as an instrument for the observation and optimization of ignition. These practices are tested on piston engine in the practical part of this paper. It describes the modification of the timing curve, measuring of engine power and comparison between each curve. It is an analysis of engine performance under different conditions. The most efficient timing curve is chosen and further evaluated. The used engine for this paper was a rebuild from a car engine used in Trabant 601, VEB Automobilwerke automobile.

Keywords

ignition system, ignition, combustion, ignition timing, piston engine

1. Úvod

V roce 1887 Karl Benz, sestrojil první automobil se spalovacím motorem. Srdcem strojů byly zážehové motory. Jejichž základním principem bylo (a je) přeměnit energii obsaženou v palivu na energii tepelnou a následně mechanickou. Toho je docíleno zapálením a hořením směsi paliva (benzínu) a vzduchu. Směs se připravovala v injektorech nebo karburátorech a byla vedena do válců. Při kompresi válce, bylo nutné směs zapálit. K tomu se využívaly plamínkové zapalovače, nebo později elektrické soustavy, rozpojovací kontakty přímo ve válci, ale následně se začali využívat zapalovací svíčky, které jsou jedním z komponentů zapalovací soustavy do dnes. Když se postupem času začal klást důraz na zvyšování výkonu motorů, musely se zdokonalit i zapalovací soustavy. Ke slovu se dostal předstih zážehu nebo princip dvojího zapálení.

Když vznikaly první letouny (na přelomu 19. a 20. st.), využily se poznatky z už dobře známých zážehových motorů, které sice měly odlišnou konstrukci, ale princip byl stále stejný. Z chemické energie obsažené v palivu získat energii mechanickou, kterou následně bylo nutné přenést na vrtuli. A tedy zapalovací soustavy byly z počátku velmi podobné těm, které se instalovaly v motorech automobilových. Až když se letecká doprava začala zdokonalovat, tedy když lidé chtěli létat „rychleji a výše“, bylo nutné i ty nejjednodušší mechanismy pozměnit.

2. Zapalovací soustava

Zapalovací soustava slouží na zapálení pracovní směsi paliva a vzduchu ve válci. Na zapálení je využívána elektrická jiskra, která

vzniká mezi dvěma elektrodami elektrické zapalovací svíčky, v důsledku výboje vysokého napětí. Elektrickou energii můžeme získávat z několika zdrojů. Těmi hlavními jsou akumulátory a magneta. Elektrický proud směřuje z baterie na primární vinutí cívk, tím vybudí v jádru cívk magnetický tok. Pokud je tok přerušovaný, v sekundárním vinutí se indukuje vysoké napětí. Které je úměrné rychlosti změny magnetického toku a počtem závitů. [1]

2.1. Průrazné napětí

Směs ve válci není elektricky vodivá. Při vytvoření velmi vysokého elektrického napětí na elektrodách svíčky se atomy plynů kladně a záporně nabijí a ty nazýváme ionty. Intenzita ionizace je přímo úměrná napětí na elektrodách.

Ionizovaný plyn je schopen přenést elektrický výboj z jedné elektrody svíčky na druhou. Napětí roste a ve správném okamžiku dojde k nárůstu na hodnotu, která představuje tzv. průrazné napětí. [1]

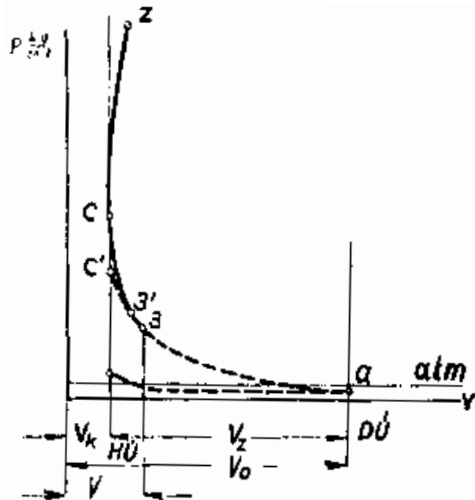
2.2. Hoření směsi

Spalováním neboli hořením směsi, přeměňujeme energii obsaženou v palivu na energii tepelnou, což označujeme jako oxidaci. Hoření rozdělujeme do dvou fází. První induktivní perioda hoření a druhá fáze viditelného hoření.

V první fázi ještě nevidíme plamen. Jde o interval, trvající 0,0005-0,001 s, od vzniku jiskry až po záblesk plamene, po kterém následuje pokles napětí na svíčke. Tento interval se

nazývá prodleva zážehu. Zvyšování tlaku v první fázi je docíleno pouze stlačováním pístu, nikoli vznikající jiskrou, což můžeme pozorovat na obrázku 1, mezi body 3 a 3'. Během této doby dochází ke štěpení molekul paliva a ty se připravují na intenzivní chemické sloučení s molekulami kyslíku. Doba první fáze hoření by měla trvat asi 15 % z celkové doby potřebné na hoření.

Druhá fáze je započata prvním zábleskem a končí v okamžiku úplného zapálení směsi. Hoření směsi způsobuje zvyšování tlaku a teploty až do úplného dohoření. [1] [2]



Obrázek 1: Diagram průběhu hoření. Zdroj: [2].

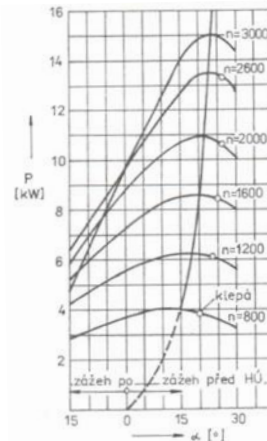
3. Předstih zážehu

Pro dosažení nejvyššího výkonu zážehových motorů, je nutné, aby bylo dosaženo nejvyššího tlaku ve válci v době, kdy je píst za HÚ v rozmezí 10 až 15° úhlu natočení klikové hřídele. Za předpokladu, že doba hoření je nenulová, je pro dosažení této podmínky nutné, vytvořit jiskru a zapálit směs dříve – tedy v předstihu – než píst (z pravidla) dosáhne HÚ. Předstih zážehu neboli též předzápal, udává okamžik, vytvoření jiskry ve stupních úhlu klikové hřídele před HÚ. [2] [3]

Předstih zážehu ovlivňuje výkon motoru, spotřebu paliva a složení spalin. Cílem správného seřízení je optimalizace těchto parametrů: otáčky motoru, zatížení motoru, oktanové číslo paliva, směšovací poměr palivové směsi, tepelný stav motoru, kompresní poměr, relativní vlhkost vzduchu, barometrický tlak.[3]

Všechny činitelé, které způsobují zvýšení rychlosti hoření zmenšují optimální předstih zážehu. Při zvětšování předzápalu tlaky narůstají strměji, roste tvrdost chodu i maximální tlaky. [4]

3.1. Vliv předstihu zážehu na výkon motoru



Obrázek 2: Závislost výkonu motoru na předstihu zážehu a na otáčkách motoru. Zdroj: [4].

Správně nastaveným předstihem docílíme nejvyšší možný výkon motoru. Na obrázku 2, je vyobrazena závislost optimálního předstihu na otáčkách klikové hřídele. Při zvyšování otáček motoru, musí zákonitě dojít i ke zvětšení předstihu zážehu. A to z důvodu, že rychlost hoření se mění pomaleji než rychlost otáčení motoru. Experiment na motoru M-38 (nejedná se o stejný motor, pro který je uvedena závislost výkonu na obrázku) ukázal, že při zvýšení otáček motoru o čtyřnásobek, se rychlost hoření zvýší pouze o 2,5násobek, a tento jev pozorujeme i u jiných motorů. Tedy křivka předzápalu má exponenciální charakter a pro motor na obrázku vychází, že při změně o $n = 2200$ se předzápal musí změnit o 9° a při maximálních otáčkách jeho výkon činí až 15 kW. [2] [3]

Pokud je předstih menší než optimální (stupeň pootočení je nižší k HÚ), pak směs hoří ještě v průběhu expanze. Kvůli tomu není možné využít veškerý tepelný potenciál obsažený v palivu, dochází k velkým tepelným ztrátám, k přehřátí motoru, protože se teplo vstřebává do stěn válce a pístu, a tudíž dochází ke snížení výkonu motoru a počtu otáček.

Pokud je předstih naopak větší než optimální (stupeň pootočení je větší k HÚ), pak směs shoří ještě před dosažením pístu HÚ, takže maximální tlak neodpovídá správné poloze klikového mechanismu a tlaková špička může působit i proti pohybu pístu. Motor se projevuje detonačně – velmi se snižuje výkon motoru, zvyšuje se jeho opotřebení a počet otáček se snižuje. [2] [3]

3.2. Vliv předstihu zážehu na spotřebu paliva

Pokud není předstih zážehu nastaven správně, dosahuje výkon nižších hodnot. Výkon je nepřímo úměrný specifické spotřebě paliva, a tedy se snižujícím výkonem, roste měrná spotřeba paliva. Měrná indikovaná spotřeba je definována jako spotřeba paliva na vykonání práce jedné kilowat hodiny.

Měrná spotřeba paliva je nepřímo úměrná předstihu zážehu. Tedy při zvětšování předzápalu dochází ke snížení měrné spotřeby. Je tomu naopak oproti objemu emisí škodlivin, proto je při nastavování motorů nutné hledat ekvilibrium.

4. Optimalizace zapalování

Pro ověření dosavadních teoretických znalostí využiji pístový, zážehový, dvoutaktní, dvouválcový motor s objemem válců 594,5 cm³, využívaný v automobilech Trabant 601 značky VEB Automobilwerke.

Mým úkolem byla modelace různých křivek předstihu zážehu a následné porovnání výkonu motoru při jednotlivých křivkách. Dále jsem se zaměřil na rychlost nastartování, tedy interval mezi sepnutím obvodu startéru a volnoběžnými otáčkami. Hodnoty jsem měřil na zahřátém motoru ve dvouhodinovém intervalu, abych minimalizoval nepřesnosti způsobené teplotou a tlakem okolního vzduchu.

Motor bylo nutné přestavět na invertní letecký motor s převodem na vrtuli. Následně jej osadit základní palivovou soustavou, kterou tvoří palivová nádrž, palivové potrubí, hlavní palivový kohout a karburátor značky BVF, typ 28HB2-8, jenž disponuje sytičem, který zjednodušuje proces startování „studeného“ motoru. V neposlední řadě jsme doplnili karburátor o vzdálený mechanický ovladač plynu. Dále jsme vyrobili výfuk s objemem vypočítaným pro správný čistící účinek válců v taktech výfuku a sání. Zapalovací soustava se skládá ze zdroje elektrické energie, v mém případě se jedná o automobilový akumulátor Bosch S4 004, s kapacitou 60 Ah, dvojicí indukčních cívek, každá s napětím 6 V, dvojicí zapalovacích svíček SUPER L14YC značky Brisk, nízkonapěťovou a vysokonapěťovou kabeláží. Součástí je samozřejmě samotné zapalování, kde bylo původní kontaktní kladívkové zapalování vyřazeno a tento prostor upraven pro elektronické zapalování Jawa-ČZ-Trabant ignition vyráběné společností IMF Soft. Elektrická soustava byla doplněna o další prvky jako elektrický startér značky Valeo, typ D6G32 s výkonem 1,3 kW a s devíti zuby, alternátor s usměrňovacím blokem Ecia CD 01, s $U_z = 24$ V a kapacitou kondenzátoru 2,2 μ F, či spínací skříňku, která má 3 polohy – I. obvod vypnutý, II. obvod zapnutý, III. zapnutý obvod startéru. Ozubené kolo elektrického startéru je připevněno na hřídel převodu za vrtuli (z předního pohledu), na druhou stranu hřídele je připevněn převod (klínovým řemenem) na alternátor.



Obrázek 3: Přestavěný letecký motor. Zdroj: Autori.

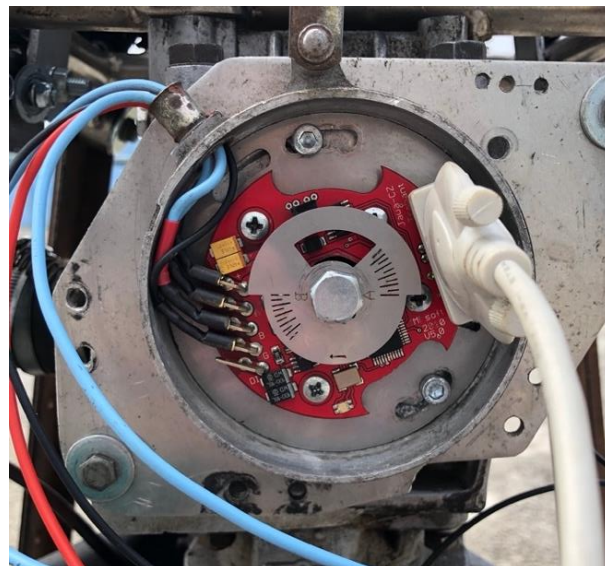
Do původního krytu zapalování je nutné vyřezat otvor pro kabel linky RS232. Pokud by nebylo zapalování zakryté, tak při vyšším osvětlení v místnosti nebo venku dochází k nepřesnému snímání IR snímače.

Zapalovací soustavu je nutné zapojit dle schéma výrobce. V našem případě jsem dodatečně uzemnil blok motoru k zápornému pólu akumulátoru, zapalovací svíčky jsou tedy uzemněny na akumulátor a zapalování je uzemněno přes blok motoru. Spínací skříňka je zapojena sériově před cívky, startér i alternátor jsou zapojeny v samostatném okruhu (nezávisle na okruhu zapalování) a uzemněny na blok motoru. Při sepnutí spínače startéru je veden elektrický proud od kladného pólu akumulátoru na svorku hlavního a pomocného (přes spínací skříňku) vinutí zasouvacího elektromagnetu. Alternátor je připojen na kladný pól akumulátoru a přes žárovku ve spínací skřínce je veden budící proud na kotvu alternátoru.

Zapalování Jawa-CZ-Trabant ignition je elektronické zapalování tvořené integrovanými obvody a vybavené IR snímačem, stínítkem, konektory na napájení a buzení cívek, ale také výstupem/vstupem pro kabel sériové linky RS232.

Na nově nainstalovaném zapalování je nutné nastavit základní předstih zážehu pomocí plechového stínítka (viz obrázek 4). Libovolný válec se uvede do HÚ a stínítko se pootočí od referenčního bodu (0°) o takovou hodnotu, jakou si zvolíme pro předstih zážehu. V našem případě jsme zvolili předstih zážehu 37°. K tomu slouží stupnice na stínítku, která je rozdělena ryskami po 5°. Stínítko slouží pro oba válce, každému přísluší plocha 180°, je tedy účelné nastavovat předstih na straně stínítka pro 1. válec a současně mít v HÚ 1. válec.

Jak jsem psal výše, elektronické zapalování obsahuje port VGA. Po propojení kabelem sériové linky RS232 a počítačem s obslužným softwarem Ignition Control V7.1, jsme schopni zapalování ovládat a aktivně sledovat online data motoru.



Obrázek 4: Elektronické zapalování Jawa-ČZ-Trabant. Zdroj: Autori

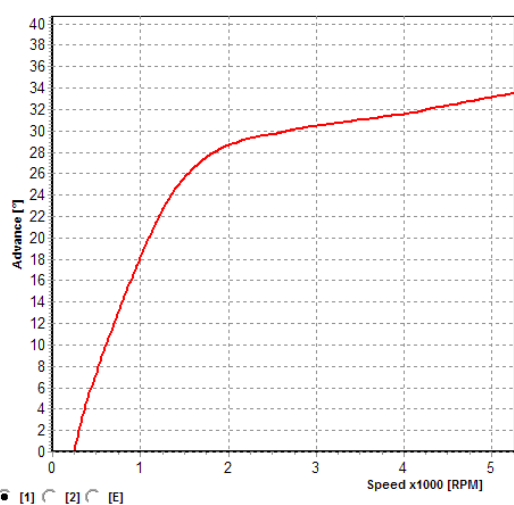
4.1. Modelace křivky předstihu zážehu a měření výkonu motoru

V programu Ignition Control V7.1, v záložce křivky předstihu si jsme schopni zobrazit křivku předstihu, jenž je nahraná v paměti

elektronického zapalování. Tuto křivku si následně můžeme libovolně (v mezích funkčnosti) modelovat. Modifikovaná křivka se v paměti zapalování automaticky nemění, je nutné ji nahrát a nahradit křivku původní.

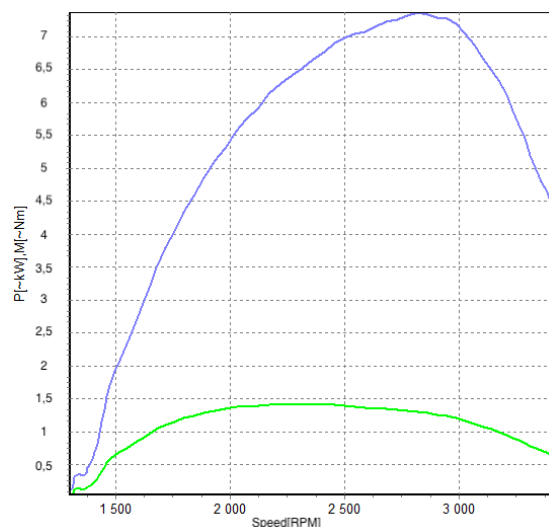
Po modelaci křivky lze měřit výkon motoru. K tomu slouží funkce akcelerační brzdy, která provádí pětisekundový záznam otáček motoru s následným výpočtem derivace (zrychlení) otáček, která úměrně odpovídá krouticímu momentu motoru. Před použitím je nutné zadat omezení otáček motoru, v našem případě to je 6000 ot.min⁻¹. Samotný výpočet začíná při volnoběžných otáčkách a následně krátce přidáme plný plyn.

Má základní křivka (obrázek 5) předzápalu byla stažena z internetového fóra, které se zabývá úpravou křivek pro motory Trabant, kde byla po zkušenostech čtenářů vyhodnocena jako velmi efektivní, tedy výkon motoru dosahoval vyšších hodnot, a naopak spotřeba klesla oproti křivce dodávané výrobcem zapalování IMF Soft.



Obrázek 5: Základní křivka předstihu zážehu. Zdroj: Autori.

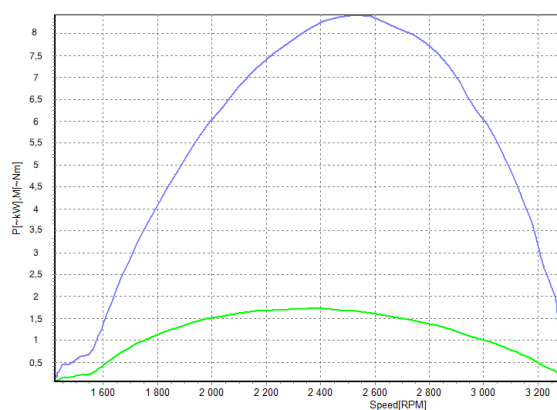
Hodnoty naměřené z funkce akcelerační brzdy jsou viditelné na obrázku 6. Maximální výkon 7,5 kW byl dosažen v otáčkách 2800 ot.min⁻¹. Start byl proveden bez sytiče. Hodnota naměřeného výkonu ve srovnání s udávanými parametry výrobce motoru je samozřejmě nižší, kvůli nasazené vrtuli na motoru.



Obrázek 6: Akcelerační brzda základní křivky předstihu zážehu. Zdroj: Autori.

Zásadní změna u 1. modifikované křivky předstihu zážehu spočívá ve zvýšeném předstihu zážehu při volnoběžných otáčkách. Za touto modifikací si slibuji kratší interval startování (viz kapitola 4). Předpověď byla splněna – startování trvalo o poznání kratší dobu (bez sytiče).

Modifikovaná křivka se osvědčila nejen po stránce rychlosti startu motoru, ale také z pohledu výkonnosti (obrázek 7). Maximální výkon se navýšil o 1 kW na rovných 8,5 kW při 2540 ot.min⁻¹. Dosáhnutí vyššího výkonu při nižších otáčkách motoru přisuzuji většímu předzápalu při shodných otáčkách. U 1. modifikované křivky předstihu zážehu dosahuje maximální předzápal hodnoty 33° už od 1850 ot.min⁻¹, zatímco u základní křivky předstihu zážehu při totožných otáčkách dosahuje pouze 28° pootočení klikové hřídele.



Obrázek 7: Akcelerační brzda 1. modifikované křivky předstihu zážehu. Zdroj: Autori.

Při druhé modifikaci jsem předstih zážehu u minimálních otáček zvedl o 2° oproti 1. modifikaci na 14°. Předpokládám, že se mnohem více zkrátí interval startování. Maximální předstih zážehu – 37° je dosažen už při 1800 ot.min⁻¹.

Měření výkonu motoru přes funkci brzdy jsem prováděl opakovaně, ale při všech pokusech došlo při 1900-2000 ot.min⁻¹ k náhlým detonacím, a tedy zákonitě i k poklesu výkonu. Toto

chování připisují k velkému předzápalu při daných otáčkách. Maximální výkon převyšoval 4,25 kW při 2750 ot.min⁻¹. Oproti základní křivce předstihu je při 2750 ot.min⁻¹ předzápal větší o 7°. Taková vysoká hodnota předzápalu daných otáčkách motoru působí detonačně, a tedy maximální výkon motoru je radikálně snížen. Interval startování byl na stejné úrovni jako při předzápalu 10° (volnoběh).

Třetí modifikací křivky předstihu zážehu chci ověřit trend z předchozí modifikace. Předstih zážehu při minimálních otáčkách jsem navýšil na 18° a předpokládám, že interval startování se zvětší. Maximální předzápal je, jako v minulém měření, na stejné úrovni – 37°, ale je dosažen už při 1200 ot.min⁻¹. Očekávám další snížení výkonu.

Predikce se potvrdila, a tedy s následným zvyšováním předzápalu klesá výkon motoru. Maximální výkon motoru je necelých 4 kW při 2560 ot.min⁻¹ a následně dochází k propadu výkonu. Tak jako v předchozím případě to připisují značně většímu předzápalu, než je pro dané otáčky optimální. Interval startování se zvýšil, tudíž není tato modelace křivky předzápalu optimální pro testovaný motor.

5. Závěr

Zapalovací soustava má velký vliv na správný a bezpečný chod motoru. Je ovlivňován řadou faktorů, jako je elektrická vodivost směsi ve válci, rychlostí hoření, nebo počtem zapalovacích svíček v komoře. Rychlost hoření je závislá na přebytku vzduchu, počtu otáček motoru nebo tepelné vodivosti válce.

Pro správný chod motoru v celém spektru otáček je neméně důležitý předstih zážehu. Zajišťuje zapálení směsi před HÚ v závislosti na několika aspektech, zejména však otáčkách a zatížení motoru. Při správném seřízení je docíleno nejvyššího výkonu, nejnižší spotřeby a emisí výfukových plynů. Při starších soustavách byl ovládán mechanicky – otáčkovým a podtlakovým regulátorem. V dnešní době je mechanismus nahrazen snímači a předzápal řízen impulzy řídicí jednotky.

Po měření výkonu a intervalu startování na čtyřech různých křivkách předstihu zážehu je možné s jistotou označit nejvýkonnější z nich. Jedná se o 1. modifikovanou křivku předzápalu, jejíž nejnižší předzápal činí 10° a maximální 33° už v 1850 ot.min⁻¹. Vybraná křivka dosahuje nejvyššího výkonu 8,5 kW při 2540 ot.min⁻¹. Při dalším zvyšování předstihu, tedy snižování otáček při maximálním předzápalu dochází ke shoření směsi ještě před dosažením pístu HÚ, tlaková špička přichází před optimálním rozložením klikové hřídele, snižuje se výkon motoru a v krajním případě může píst působit proti chodu motoru. U základní křivky je předstih zážehu (při stejných otáčkách motoru) nižší, nevyužíváme celý tepelný potenciál obsažený v palivu. A i z pohledu rychlosti startování se tato křivka ukázala být nevhodnější.

Podakovanie

Článok je publikovaný ako jeden z výstupov projektu Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky KEGA 048ŽU-4/2020 s názvom "Zvyšovanie kľúčových kompetencií v oblasti technológie údržby lietadiel prostredníctvom transferu progresívnych metód do vzdelávacieho procesu".

Reference

- [1] KRÍŽ, J. 2008. Pohonná jednotka. 1. vyd. Žilina: EDIS, 2008. 285 s. ISBN 978-80-8070-872-6.
- [2] MAKSAJ, A. V. a POLASKIJ, H. I. Teorie leteckých pístových motorů. Praha: Naše vojsko. 283 s.
- [3] BENÁČEK, R. 2017. Vliv předstihu zážehu na konečné složení spalin: diplomová práce. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2017. 55 s.
- [4] ADAMEC, J. a KOCÁB, J. 2008. Letadlové motory. Praha: Nakladatelství Corona, 2008. 176 s. ISBN 978-80-86116-54-9.

Marek Vorlíček – narozený dne 10. 6. 1999 v Ostravě absolvoval v roce 2018 Gymnázium Hladnov v Ostravě. Následně v roce 2018 nastoupil ke studiu na Žilinské univerzitě v Žiline, obor profesionálny pilot.