



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

ZÁŽEHOVÝ SPALOVACÍ MOTOR PRO MALÉ AUTONOMNÍ PROSTŘEDKY

SPARK-IGNITION ENGINE FOR SMALL AUTONOMOUS DEVICES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Vojtěch Horák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. David Svída, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	Bc. Vojtěch Horák
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Automobilní a dopravní inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. David Svída, Ph.D.
Akademický rok:	2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Zážehový spalovací motor pro malé autonomní prostředky

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

I při narůstajícím počtu použití elektromotorů pro malé autonomní prostředky jsou jejich největší nevýhodou baterie. Hustota uložené energie ve formě uhlovodíkového paliva stále zůstává a dlouho zůstane nepřekonaná. Je tedy konstrukční výzvou navrhnout malý spalovací motor, při jehož konstrukci by se využily moderní konstrukční přístupy a materiály, který by zejména při dlouhodobém provozu konkuroval elektromotorům.

Cíle diplomové práce:

Koncepční návrh čtyřdobého spalovacího motoru a jeho uspořádání pro maximální zdvihový objem 10 ccm a výkonu do 1 kW. Porovnání navrženého spalovacího motoru s elektromotorem o stejném výkonu. Sestavit termodynamický model navrženého motoru s cílem navýšit plnicí účinnost a celkovou efektivitu spalovacího motoru.

Seznam doporučené literatury:

STONE, Richard. Introduction to internal combustion engines. 3rd edition. Warrendale, Pa.: Society of Automotive Engineers, 1999. 641 s. ISBN 0768004950.

HEISLER, Heinz. Advanced engine technology. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1995. 794 s. ISBN 1-56091-734-2.

KÖHLER, Eduard. Verbrennungsmotoren: Motormechanik, Berechnung und Auslegung des Hubkolbenmotors. 3. verb. Aufl. Braunschweig [u.a.]: Vieweg, 2002. 548 s. ISBN 3-528-23108-4.

SKOTSKY, Alexander. Automotive engines: control, estimation, statistical detection. Berlin: Springer Verlag, 2009. 215 s. ISBN 978-3-642-00163-5.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty



ABSTRAKT

Práce se zabývá návrhem maloobjemového čtyřdobého zážehového spalovacího motoru s maximálním zdvihovým objemem 10 ccm a výkonem 1 kW pro autonomní prostředky menších rozměrů. Vedle rozboru jednotlivých pohonů pro malé vzdušné prostředky je také kapitola zabývající se porovnáním spalovacího motoru a elektromotoru o podobném výkonu. Součástí práce je vytvoření termodynamického modelu v programu GT Power a jeho následné optimalizace pro zvýšení celkové efektivity motoru.

KLÍČOVÁ SLOVA

autonomní prostředek, spalovací motor, termodynamický model, optimalizace

ABSTRACT

The thesis deals with the design of a small-volume four-stroke internal combustion engine with a maximum displacement of 10 cc and a power of 1 kW for autonomous devices of smaller dimensions. In addition to the analysis of individual propulsions for small aircraft, there is also a chapter with the comparison of an internal combustion engine and an electric motor with similar power. Another part of the work is the creation of a thermodynamic model in the GT Power program and its subsequent optimization to increase the overall efficiency of the engine.

KEYWORDS

autonomous devices, combustion engine, thermodynamic model, optimization



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HORÁK, Vojtěch. *Zážehový spalovací motor pro malé autonomní prostředky* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124675>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce David Svída.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením ing. Davida Svídy, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 26. června 2020

.....

Vojtěch Horák



PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval svému vedoucímu diplomové práce panu ing. Davidu Svídovi, Ph.D. za jeho cenné rady, postřehy a vstřícný přístup při vypracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat za poskytnuté zařízení a zázemí pro měření na Ústavu automobilního a dopravního inženýrství. Nemalý dík patří mým blízkým a rodině za morální i materiální podporu v průběhu celého studia.



OBSAH

Úvod	7
1 Rešerše	8
1.1 Autonomní letouny	8
1.2 Pohon vzdušných prostředků	11
1.2.1 Elektrický pohon	11
1.2.2 Baterie.....	13
1.2.3 Pohon spalovacím motorem	14
1.2.4 Hybridní pohon.....	14
1.2.5 Tryskové (reaktivní) pohony	15
2 Rozbor spalovacích motorů	18
2.1 Motor s krouživým pohybem pístu	18
2.2 Motor s přímočarým pohybem pístu.....	20
2.2.1 Zážehové motory	20
2.2.2 Detonační motory	21
2.2.3 Dvoudobý motor.....	23
2.2.4 Čtyřdobý motor	24
3 Porovnání spalovacího motoru a elektromotoru	25
3.1 Výpočet hmotnosti pro jednu hodinu provozu	27
4 Termodynamický model spalovacího motoru.....	29
4.1 Zadání hlavních parametrů	30
4.1.1 Výpočet kompresního poměru.....	31
4.2 Válcová jednotka	32
4.2.1 Model přestupu tepla ve válci.....	32
4.2.2 Model hoření	35
4.3 Ventily	38
4.3.1 Určení zdvihové křivky ventilů	39
4.3.2 Určení průtokových součinitelů	42
4.4 Potrubí.....	49
4.5 Přívod paliva	49
4.6 Okrajové podmínky	50
4.7 Výsledky termodynamického modelu	51
5 Optimalizace	52
5.1 Způsoby optimalizace pro navýšení výkonu	52



5.2	Vlastní optimalizace modelu	54
5.2.1	Optimalizace časování	55
5.2.2	Optimalizace potrubí	59
Závěr	61
Použité informační zdroje.....		62
Seznam použitých zkratk a symbolů		66
Seznam obrázků a grafů		68
Seznam tabulek.....		70
Seznam příloh.....		71



ÚVOD

V současné době, kdy zažíváme velký průlom v oblasti mechatroniky a robotiky, se pojem autonomní stává fenoménem. Jelikož člověk není přímo potřebný k ovládání zařízení, využívá se těchto prostředků ve všech odvětvích průmyslu. Především z důvodu zvýšení bezpečnosti, zamezení chyby vlivem lidského faktoru nebo snížením nákladů na výrobu i provoz.

Na současném trhu existuje několik firem, které se zabývají rozvozem a dopravou. V dnešní době, kdy je pozemní infrastruktura přetížena, se nabízí myšlenka přepravy drobného sortimentu jako je pošta, jídlo nebo jiné menší balíčky vzdušnou cestou. K tomuto účelu již existují elektrické drony s akumulátory. Jejich hlavním omezením je ale malá únosná hmotnost a krátká doba provozu na jedno nabití. S tím souvisí i celkový malý akční rádius celého zařízení.

Diplomová práce se zabývá analýzou jednotlivých typů pohonů pro malé vzdušné prostředky a jejich reálné použití v dané problematice. Součástí je i porovnání elektrického pohonu a spalovacího motoru jakožto dvou hlavních adeptů pro pohon. Srovnání se týká agregátů ve stejné výkonové třídě a popisuje závislost celkové hmotnosti na požadované době provozu. Jako hlavní podklad pro tuto práci byl zakoupen maloobjemový čtyřdobý zážehový motor o výkonu 810 W. Převážná část praktické práce se zabývá výpočtem a měřením parametrů, které jsou nezbytné pro vytvoření termodynamického modelu v programu GT Power. V tomto prostředí následně probíhala optimalizace za účelem zvýšení celkové efektivity spalovacího motoru.



1 REŠERŠE

Autonomním prostředkem rozumíme zařízení, které ke svému provozu nepotřebuje řízení člověkem, ale orientuje se za pomoci počítačových systémů. Tyto systémy detekují okolí prostředku a určují jeho trasu. Pro detekci a orientaci v okolí využívá systémy jako radar, GPS, kamery a další.

Těchto prostředků se s nástupem čtvrté průmyslové revoluce využívá ve velké míře. Podle prostředí kde se pohybují, je můžeme rozdělit do základních kategorií.

- autonomní vozidla
- autonomní plavidla
- autonomní letouny

Současná autonomní vozidla se zaměřují na přepravu lidí a nákladů a tomu odpovídají i větší rozměry a nároky na vyšší výkon. Od roku 2014 se podle automobilové asociace SAE dělí stupně automatizace do 6 skupin.

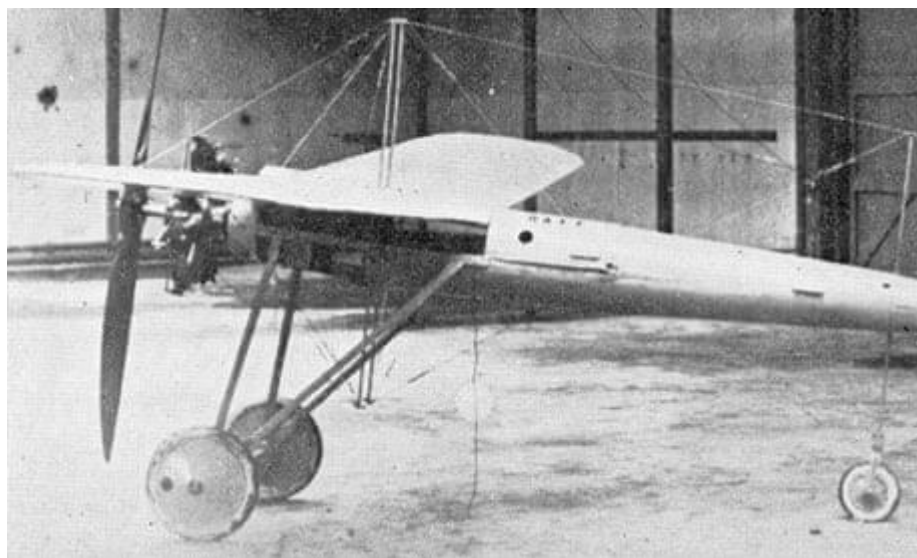
- *0 - bez automatizace.* Systémy pouze varují, ale neovládají prostředek (kontrola tlaku v pneumatikách, hladina oleje v motoru).
- *1 - asistence řidiče.* Automaticky mohou probíhat některé jednodušší funkce, řidič musí být schopen kdykoliv přebrat plnou kontrolu nad řízením (adaptivní tempomat).
- *2 - částečná automatizace.* Systém obstarává základní funkce (například zrychluje a brzdí). Řidič musí sledovat provoz, dohlížet a kontrolovat funkci systémů.
- *3 - podmíněná automatizace.* Za určitých podmínek se řidič nemusí věnovat řízení, musí být ale schopen řízení převzít v určitém časovém intervalu při vybídnutí systémů.
- *4 - vysoká automatizace.* S výjimkou vysoce nebezpečného prostředí (nebezpečné počasí) řidič nezasahuje do řízení.
- *5 - plná automatizace.* Řidič pouze zadá cíl cesty.

Jelikož se tato práce soustředí na autonomní prostředky o výkonu do 1 kW, nebudou předmětem práce autonomní vozidla a plavidla, která svými požadavky vysoce převyšují zadaný výkon. V práci se zaměřím na autonomní letouny, které se v současné době pyšní nemalé oblibě. [3]

1.1 AUTONOMNÍ LETOUNY

Bezpilotní letadlo (někdy UAV z anglického Unmanned Aerial Vehicle nebo také dron z anglického drone) je letadlo bez posádky. Takový letoun je řízen na dálku nebo je schopen létat samostatně za podpory dynamických autonomních systémů nebo předem naprogramovaných letových plánů. [4]

Bezpilotní letouny, které v současnosti slídí nad nepřátelským územím, mají delší historii, než si myslíme. První takový letoun byl zkonstruován v roce 1916 profesorem Archibaldem Lowem. Pro letoun použil spodní křídlo z dvouplošníku a vrtuli z jiného letounu, kterou poháněl motor o 35 HP. Letoun byl řízen pomocí dvou rádiově ovládaných jednotek, které zabezpečovaly pohyb nahoru, dolů respektive doleva, doprava. I když letoun byl vyroben převážně ze dřeva a byl špatně ovladatelný, lze ho považovat za předchůdce dnes již vyspělých a sofistikovaných zařízení. [5]



Obr. 1 První bezpilotní letoun Archibalda Lowa v roce 1916 [5]

Bezpilotní letouny se často používají tam, kde není vhodné nasazovat lidskou posádku. Ať už z bezpečnostních důvodů (bojové mise) nebo proto, že mají menší rozměry (průzkumné lety).

Přestože v současnosti začínají převládat víceúčelové a multifunkční letouny, rozdělují se do následujících kategorií:

- cíle a návnady - poskytují pozemní a vzdušné cíle simulující nepřátelská letadla a střely
- průzkumné - shromažďují a poskytují informace o bojišti
- bojové - zastávají funkci útoku při nebezpečných misích
- logistické - UAV speciálně navržené pro logistické účely
- výzkumné a vývojové - používané k dalšímu vývoji UAV technologií
- civilní a komerční - slouží pro zábavu hobby nadšenců případně pro profesionální práci fotografů a filmařů [4]

Letouny se dají dále podle konstrukce dělit do tří velkých skupin. Můžeme se setkat s klasickou konstrukcí dronů, které mají křídlo/a tak, jak známe u letadel a nebo různý počet vrtulí.

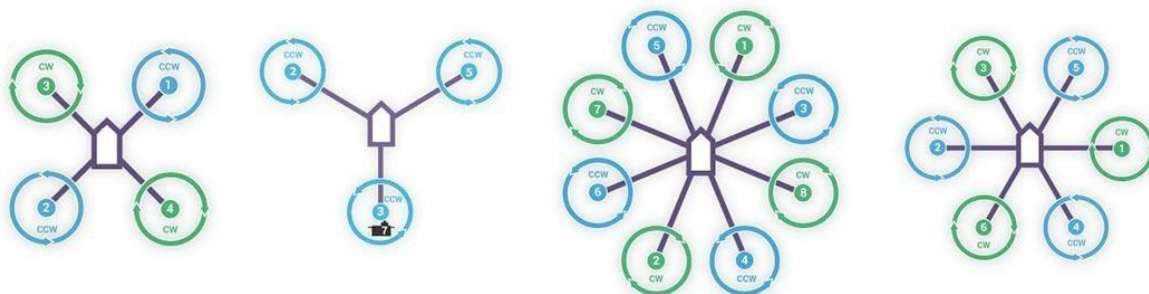
- letadla
- vrtulníky
- n-koptéry

Vrtulníky mají jeden, případně dva hlavní horizontálně umístěné rotory. K vyrovnání krouticího momentu, který vzniká od hlavního rotoru, je zapotřebí pomocný rotor. Ten bývá umístěn v zadní ocasní části a zároveň slouží i k ovládání vrtulníku. [6]



Obr. 2 Bezpilotní vrtulník americké armády MQ-8C Fire Scout [30]

V současnosti jsou nejvíce oblíbené n-koptéry (drony). Ty se dělí podle počtu rotorů na trikoptéry (tři rotory), kvadrokoptéry (čtyři rotory), hexakopty (šest rotorů) a oktakopty (osm rotorů). Rozložení rotorů můžeme vidět na obrázku, kde zeleně označené rotory zobrazují otáčení ve směru hodinových ručiček a modré rotory proti směru. [7]



Obr. 3 Rozdělení dronů podle počtu rotorů [8]



U dronů, které mají na jednom rameni dva protilehlé rotory, je značení trochu jiné. Říká se jim „Koaxial“ a můžeme se u nich setkat s písmeny X, Y, H které znázorňují tvar dronu a číslovkou označující počet vrtulí. Například dron označený Coaxial X8 má 8 vrtulí a trup ve tvaru písmene X.

Nyní se nabízí otázka. Kolik rotorů je vlastně pro dron nejlepší?

To velmi záleží na jeho použití. Jelikož dron nemá žádné kormidlo, které by udávalo směr letu jako u letadel, pohybuje se pouze na základě změny otáček jednotlivých vrtulí. O rozdělení počtu otáček na jednotlivé vrtule se stará řídicí jednotka dronu. Všeobecně je známo, že více vrtulí znamená lepší stabilitu, a proto se drony tohoto typu používají pro pořizování fotek a videí, kde je stabilita velmi důležitá a projeví se na kvalitě pořizovaného záznamu. Naopak při některých manévrech může být větší počet vrtulí na škodu a ubírat na mrštnosti celého letounu. Proto se pro závodní účely používají trikoptyéry a kvadrokoptyéry, které poskytují ideální kompromis mezi mrštností a stabilitou. [8]

1.2 POHON VZDUŠNÝCH PROSTŘEDKŮ

Pro vzdušné prostředky se používá několik druhů pohonu, které se odvíjejí podle potřeb a nároků na jednotlivé zařízení. V následující kapitole jsou popsány nejpoužívanější, ale i raritní pohony spolu s některými příklady.

1.2.1 ELEKTRICKÝ POHON

V současné době se jedná o nejrozšířenější typ pohonu pro vzdušné prostředky a čím dál více získává na oblibě u modelářů. Elektrický pohon totiž prakticky nevyžaduje žádnou údržbu nebo seřizování. Disponuje okamžitou provozuschopností, širokým rozsahem otáček a krouticího momentu. Při provozu neprodukuje zplodiny a má minimální hlučnost a vibrace. Pro pohon se používají dva typy stejnosměrných motorů - komutátorový (kartáčkový) a bezkartáčový (BLDC). [9]

Princip **kartáčkového motoru** je založen na periodickém střídavém přepínání polarity napájecího stejnosměrného proudu pomocí komutátoru po každém otočení rotoru o 180°. Rotor motoru je vytvořen nejčastěji třemi elektromagnety (eliminuje se možnost zaseknutí) navinutými okolo pólových nástavců. Rychlost otáčení závisí na velikosti vstupního napětí. Kartáčkové motory mají omezenou účinnost právě kvůli komutátoru, který omezuje maximální proud a napětí. Problémem také je, že se kartáčky obroušují, opalují a dochází k jiskření, a tedy mají nižší životnost než motory typu BLDC. Na druhou stranu jsou levnější.

Bezkartáčový BLDC motor se řadí také do kategorie stejnosměrných motorů, ačkoliv svojí konstrukcí připomíná střídavý 3-fázový synchronní motor. Z tohoto důvodu je BLDC někdy chybně označován za střídavý motor. Podobnost se střídavým motorem je způsobena tím, že na motor nelze připojit stejnosměrné napětí přímo ze zdroje, ale je zapotřebí provádět jeho spínání. Stator je většinou tvořen třemi (u menších motorů dvěma) budícími vinutími zapojenými do hvězdy. Stejnosměrné napětí se střídavě přivádí na dvě ze tří vinutí. Pozice natočení rotoru vůči statoru se měří Hallovým senzorem. Řídicí jednotka poté posílá proud do cívek elektromotoru tak, aby se rotor otáčel požadovaným směrem a rychlostí. Nezbytnou součástí BLDC motoru je také regulátor. [10]

Jako příklad elektrického pohonu je uveden profesionální dron DJI Mavic 2 Pro, který slouží pro pořizování vysokokvalitních videozáznamů. Tento dron váží 907 g, jeho maximální rychlost dosahuje 72 km/h a při ideálních letových podmínkách zvládne na jedno nabití půlhodinový let. Zásobu energie obstarává Li-Po letecká baterie o kapacitě 3850 mAh. Tento model patří ke špičce na trhu, proto není překvapením, že zvládá systémy jako autonomní let, detekci objektů nebo přenos signálu až na 8 km. [18]



Obr. 5 DJI Mavic 2 Pro [18]

Zástupcem závodních dronů je Reely Green Racer. Tento dron je malých rozměrů (do 15 cm) a váží 248 g. Od závodních dronů se očekává rychlost přes 150 km/h, a to se zrychlením z 0 na 100 km/h v řádech desetin sekund. To způsobuje, že je kladen důraz na nízkou hmotnost, a proto závodní modely mají malé baterie. U Reely Green Raceru se jedná o Li-Po baterii s kapacitou 530 mAh, na kterou vydrží letět pouze 5 minut. [19]



Obr. 4 Závodní dron Reely Green Racer [19]



1.2.2 BATERIE

Baterie jsou nedílnou součástí elektromotorů, pro které uchovávají energii. Jelikož právě uchování potřebné energie je zatím největší slabinou elektrických prostředků, bude bateriím a jejich druhům věnována vyšší pozornost. Baterií je v současnosti nepřeberné množství. Kapitola se zaměřuje na hlavních pět, které se nejčastěji používaly nebo používají pro RC modely a autonomní prostředky. Porovnání hlavních parametrů baterií viz Tab.1.

Lithium-železo-fosfátový akumulátor (LiFePO_4), někdy také označovaný „LFP“ nebo „LiFe“, je druh akumulátoru, který používá jako katodového materiálu LiFePO_4 . Tento materiál objevil v roce 1996 John Goodenough. Na trhu vzbudil zájem zejména kvůli nízké ceně, vynikající tepelné stabilitě, dostupnosti železa a dobrému elektrochemickému výkonu. Mezi hlavní výhody patří bezpečnost (odolnost proti tepelným únikům) a schopnost dodávat vysoký proud při špičkových odběrech. K havárii dochází teprve při extrémním přehřátí ($500\text{ }^\circ\text{C}$ a výše). [11][45]

Nikl-kadmiový akumulátor (NiCd) patří mezi starší typy baterií a na trhu je již několik desítek let. Výhodou akumulátoru je odolnost vůči nízkým teplotám a proti hlubokému vybití (nevadí mu skladování ve vybitém stavu). Mezi nevýhody patří škodlivý dopad na životní prostředí kvůli jedovatosti kadmia a paměťový efekt. Ten způsobuje pokles napětí, pokud je baterie nabíjena již při částečném vybití a způsobuje pokles kapacity baterie. Proto se u tohoto typu doporučuje nenabíjet baterie, dokud není zcela vybita. [13]

Nikl-metal hydridový akumulátor (NiMH) se pyšnil největší oblibě minulou dekádu, ale i v současnosti je využíván pro velké množství RC modelů. Oproti NiCd má dvakrát vyšší kapacitu a je šetrný k životnímu prostředí. Je vhodný pro rychlonabíjení a není zatížen paměťovým efektem. Oproti tomu je vyžadováno formátování baterie, které spočívá v pomalém nabíjení nízkým proudem před použitím baterie (nové nebo po dlouhé pauze). Baterie se poměrně rychle samovybívá a není vhodná do nízkých teplot (pod $5\text{ }^\circ\text{C}$), kdy se začíná "blokovat". Jedná se o efektivní akumulátor za příznivou cenu. [14]

Lithium-iontový akumulátor (Li-Ion) je v současnosti nejvyužívanější akumulátor, a to především ve spotřební elektronice. Baterii je možné vyrobit v libovolném tvaru, disponuje vysokou hustotou energie vzhledem k objemu, nemá paměťový efekt a není ji potřeba formátovat. Téměř žádné samovybívání (do 5 %). Nevýhodou je stárnutí baterie, tedy ztráta kapacity, a to bez ohledu na frekvenci používání. Baterii při nesprávném zacházení (zkratování, přebíjení) hrozí vznícení a exploze. Je také náchylná na úplné vybití, kdy se může stát, že při překročení spodní hranice vybití (pod 2,8 V) dojde k nenávratnému poškození. Z bezpečnostních důvodů je baterie proti přebití a úplnému vybití opatřena ochrannými čipy. Pro prodloužení životnosti se doporučuje udržovat nabití mezi 20 až 80 % a záložní baterie skladovat v chladu ideálně při nabití na 40 %. Vhodné skladování a zacházení může prodloužit životnost baterie až na dvojnásobek. [15]

Lithium-polymerový akumulátor (LiPo) je vlastnostmi velmi podobný LiIon ovými bateriím. Rozdíl je v tom, že lithium se zde vyskytuje v kovovém stavu. Baterie jsou vhodné pro rychlonabíjení a jsou schopné dodávat špičkově vysoký proud (až 50-ti násobek kapacity) bez poškození článku. Oproti LiIon ovým bateriím je až o polovinu lehčí při zachování stejné kapacity. Vzhledem k nadměrnému uložení energie v malém prostoru hrozí při nesprávném zacházení nebezpečí (interní ochrana). Tento akumulátor patří k absolutní špičce, snažíme-li

se získat maximální výkon modelu. S tím souvisí i vysoká cena, proto se používá zejména tam, kde záleží na hmotnosti. [12][16]

Tab. 1 Porovnání hlavních parametrů baterií

parametr	jednotky	LiFePO ₄	NiCd	NiMH	Li-Ion	LiPo
Energetická hustota	[Wh/kg]	90 - 110	40 - 60	60 - 100	140	160
Energetická objemová hustota	[Wh/L]	220	50 - 150	140 - 200	250	350
Samovybíjení	[%]	2	10	30	5	5
Životnost	[cykly]	2500	1000	1000	1200	1000
Jmenovité napětí článku	[V]	3,3	1,2	1,2	3,8	3,7
Maximální napětí	[V]	3,6	1,35	1,35	4,1	4,2
Minimální napětí	[V]	2,8	0,85	0,85	3,0	3,0
Paměťový efekt	[-]	NE	ANO	NE	NE	NE

1.2.3 POHON SPALOVACÍM MOTOREM

Druhým nejrozšířenějším pohonem pro RC modely je spalovací motor. Jeho největší výhodou je, že palivo disponuje vysokou energetickou hustotou, a proto dokáže motor produkovat vysoký výkon po dlouhou dobu. Nevýhodou spalovacích motorů je vyšší hlučnost, produkce vibrací a zplodin a potřebná údržba. Spalovací motory se používají zejména pro pozemní RC modely jako auta, motokáry, plavidla. Vzdušné zastoupení mají zejména u prostředků s jedním rotorem, jako jsou vrtulníky a některé jiné druhy letounů. Pro použití u dronu s více rotory jsou nevhodné, protože spalovací motor má oproti elektromotoru delší prodlevu při požadavku na změnu otáček, respektive výkonu. Myšleno při koncepci 1 motor = 1 rotor. Jelikož se tato práce zaměřuje na návrh a optimalizaci spalovacího motoru, bude se tímto pohonem podrobně zabývat následující kapitola.

1.2.4 HYBRIDNÍ POHON

Tento pohon kombinuje dva nejrozšířenější typy, a to elektrický a spalovací motor. Elektrický pohon má řadu výhod, které jsou již popsány výše. Nicméně i nejvýkonnější drony za desetitisíce korun nejsou většinou schopny delšího než 30-ti minutového pobytu ve vzduchu. V současnosti jsou na trhu firmy, které se zabývají myšlenkou rozvozu pošty, jídla a podobného sortimentu vzdušnou cestou za pomoci dronů. V tomto ohledu nachází hybridní pohon své uplatnění, protože kombinuje vysokou energetickou hustotu spalovacího motoru a snadné řízení s rychlou odezvou elektromotoru. Jako příklad uvádím německou společnost Year, která se na hybridní drony zaměřuje a má v této oblasti i několik patentů.

Jejich model kvadrokoptéry váží 4,9 kg, dosahuje maximální rychlosti 100 km/h a i s pětakilovým závažím zvládne hodinový let. Při úsporném letu zvládne překonat vzdálenost 55 km na jednu nádrž. Na dron je možno přimontovat nastavitelné dvoudílné křídlo, které slouží pro lety na dlouhou vzdálenost a prodlužuje ji až o 30 %. O pohon se starají čtyři dvoudobé spalovací motory (4 x 1000 W) a čtyři elektromotory (4 x 600 W). Celkový výkon tedy činí 6,4 kW. Dron obsahuje jednu Li-po baterii o kapacitě 1250 mAh, která je nabíjena pomocí spalovacích motorů. Tato baterie je využívána pro jejich nastartování, ale také slouží jako bezpečnostní prvek, kdy při výpadku spalovacího motoru dodává energii pro elektromotory a zabezpečuje bezpečné přistání. [17]



Obr. 6 Hybridní kvadroptéra Yeair [17]

1.2.5 TRYSKOVÉ (REAKTIVNÍ) POHONY

Jedná se o motory, které pracují na principu akce a reakce. Síla, kterou motor vyvíjí, se nazývá tah a je úměrná rychlosti a množství média, které motor opouští.

Proudový motor se používá u větších modelů letadel a stíhaček, kdy je již potřeba silnější a výkonnější pohon. Vzduch vstupuje v přední části motoru a je dále nasáván radiálním nebo axiálním kompresorem. Kompresor vzduch stlačuje, a tím roste jeho teplota. Ohřátý vzduch putuje do spalovací komory, kde se vstříkne palivo. Při zažehnutí se uvolní velké množství energie a horké plyny roztáčí turbínu, která je přes hřídel spojena s kompresorem v přední části. Za turbínou se nachází výstupní tryska, ve které se tlaková a tepelná energie plynu mění na kinetickou a vzniká tah motoru. [22]



Obr. 7 Proudový motor P100 – RX [21]

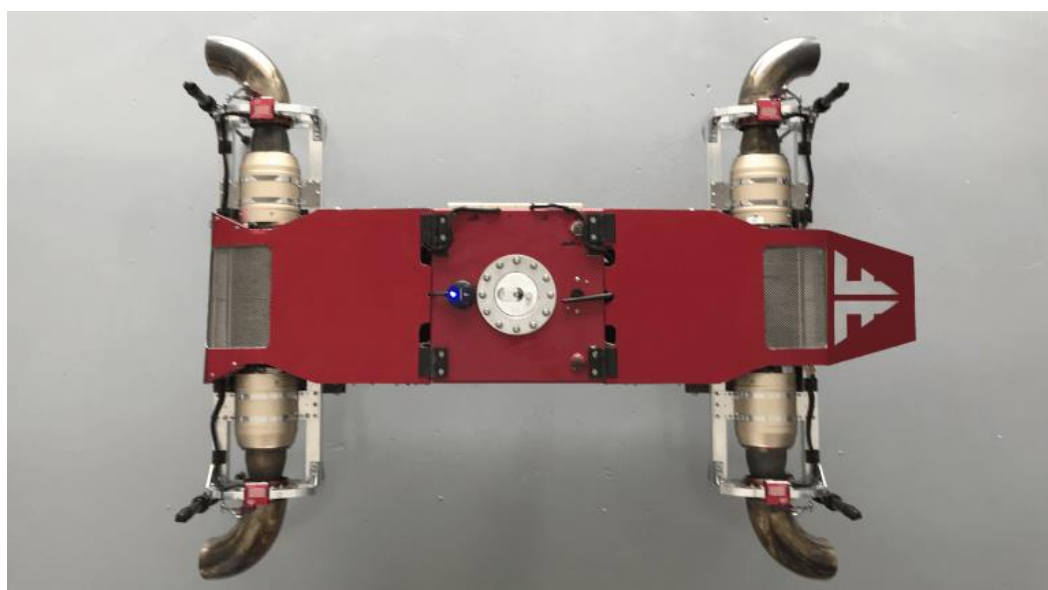
Tento motor vyvíjí německá společnost JetCat, která se specializuje na proudové motory a příslušenství pro RC modely. Motor váží 1080 g, je dlouhý 241 mm a produkuje tah 100 N. Motor je sestaven z odolných materiálů, které musí zvládat vysoké teploty a otáčky až

150 000 min⁻¹. Od toho se odvíjí i cena, která začíná na 2000 eurech. Tento motor je například doporučen pro RC letadlo Dolphin Jet, které váží 10,9 kg a má rozpětí křídel téměř dva metry. Jedná se o velmi kvalitní a propracovaný RC model, který je určený pro zdatné piloty.[20][21]



Obr. 8 RC letadlo Dolphin Jet [20]

Se zajímavým uplatněním tryskových motorů se zabývá americká firma FusionFligh. Ta vyvinula "kvadroptéru" JetQuad, která je poháněna čtyřmi proudovými motory, které produkují výkon 200 koňských sil. Jedná se o první koncepci tohoto typu, kdy proudové motory zajišťují horizontální i vertikální let a současně i úplné ovládání letounu.

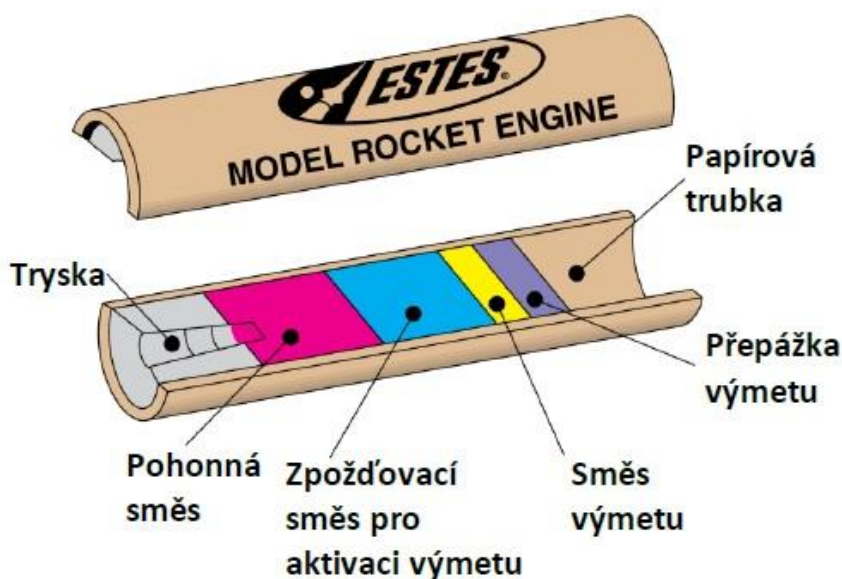


Obr. 9 AB5 JetQuad [23]

Proudové motory produkují velký výkon vzhledem k hmotnosti. V tomhle ohledu se jim elektrické motory nemohou rovnat, navíc zde použitá nafta má asi 40krát vyšší energetickou hustotu než Li-Po baterie. Celková hmotnost letounu je 40 kg, z toho je 18 kg palivo. Poměrně velké množství paliva je nutné kvůli jeho spotřebě, která v tomto případě při maximálním zatížení činí $1,1 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$. JetQuad může nést maximální náklad o hmotnosti 18 kg s doletem 15 minut. To se může zdát málo, avšak při rychlosti přes 400 km/h dokáže uletět i vzdálenost přes 80 km. [23]

Raketový pohon, jak už z názvu vyplývá, se používá pro modely raket. Motor je na jedno použití a vzhledově připomíná rachejtli. Skládá se z několika částí.

- Papírová trubka - Slouží jako tělo motoru, ve kterém jsou uloženy jednotlivé směsi.
- Tryska motoru - Je vyrobena z tepelně odolného materiálu kvůli vysokým teplotám plynů, které vychází z motoru.
- Pohonná směs - Je spotřebována při hoření a vytváří tah motoru.
- Zpoždovací směs - Vytváří časovou prodlevu mezi dohořením pohonné směsi a výmetem. Zároveň produkuje velké množství kouře pro vizuální kontrolu letu rakety.
- Směs výmetu - Aktivuje návratové zařízení (padák).
- Přepážka výmetu - Utěsňuje směsi a celý motor. [24]



Obr. 8 Schéma raketového pohonu [24]

Po podrobném nastudování pohonů pro vzdušné modely jsem se rozhodl zaměřit na hybridní pohon. V kombinaci spalovacího a elektrického motoru shledávám největší potenciál. Jedná se o ideální kompromis mezi hmotností, dobou provozuschopnosti, cenou, užitným výkonem a ekologičností. Proto se ve zbytku práce budu zabývat návrhem maloobjemového spalovacího motoru pro tyto účely.

2 ROZBOR SPALOVACÍCH MOTORŮ

Spalovací motor je tepelný stroj, který spalováním vhodného média získává tepelnou energii a převádí ji na mechanickou práci. U reaktivních motorů vytváří plyny přímo tah motoru, zatímco u pístových spalovacích motorů vytváří potenciální energii (tlak). Obecně lze spalovací motory rozdělit podle použitého média na motory s vnitřním a vnějším spalováním.

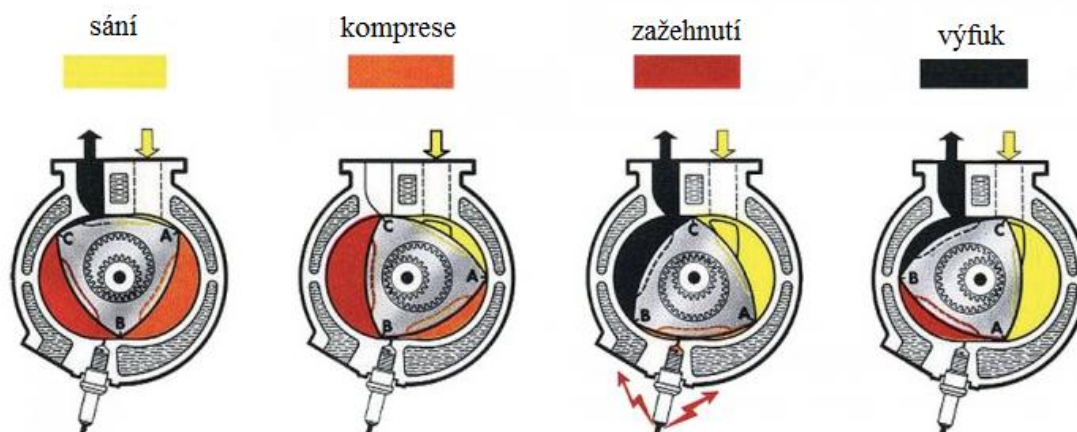
- vnitřní spalování - pracovní látkou jsou přímo produkty spalování (např. pístové spalovací motory a spalovací turbíny).
- vnější spalování - médium jako vodní pára, vzduch a jiné plyny slouží pro přenos energie (např. parní stroj, Stirlingův motor nebo parní turbína).

Pro pohon RC modelů a autonomních prostředků se využívají motory s vnitřním spalováním, a to především pístové spalovací motory, které mají několik základních rozdělení. Nejprve je uvedeno rozdělení podle pohybu pístu. [26]

2.1 MOTOR S KROUŽIVÝM POHYBEM PÍSTU

Již od samého počátku vývoje spalovacího motoru se objevovaly motory s kývavým, rotačním nebo krouživým pohybem pístu. Ze všech možných patentů se do sériové výroby dostal pouze Wankelův motor. Ten byl vynalezen a zkonstruován F.H. Wankelem a v roce 1964 byl poprvé sériově vyráběn ve voze NSU Spider.

Motor je tvořen trojúhelníkovým pístem, který je pomocí vnitřního ozubení v poměru 1:3 excentricky uložen na výstupní hřídeli. Skříň je zkrácená epitrochoida a je pístem rozdělena na 3 spalovací prostory. V každém ze tří objemů se během jedné otáčky uskuteční spalovací oběh odpovídající čtyřdobému motoru. Z toho plyne, že za jednu otáčku pístu se vykonají tři oběhy. Vzhledem k již zmíněnému převodovému poměru mezi výstupní hřídelí a pístem, se hřídel otáčí třikrát rychleji. Názorné zobrazení činnosti motoru je na obrázku níže. [27]



Obr. 9 Pracovní cyklus Wankelova motoru [31]

Wankelův motor si získal rychle svoji oblibu a téměř každá automobilka v tehdejší době zakoupila licenční práva na jeho výrobu. Oproti motorům s přímočarým pohybem pístu má totiž několik zjevných výhod. Bohužel jeho nevýhody, které nemusí být na první pohled patrné, se projevily později. Proto v současné době motor není sériově vyráběn, a tak posledním modelem zůstává Mazda RX-8, jejíž výroba byla ukončena v roce 2012.

Výhody:

- klidný chod, který je dán tím, že motor lze velmi dobře dynamicky vyvážit
- menší počet součástí, nejsou potřeba ventily, vačky, ojnice a jiné
- menší rozměry, lepší a jednodušší zástavba
- nízká hmotnost, s tím souvisí vysoký ukazatel výkonové hmotnosti [$\text{kg}\cdot\text{kW}^{-1}$]

Nevýhody:

- problémy s utěsněním spalovacího prostoru - nízká životnost lišt
- velké kluzné rychlosti radiálních lišt ovlivňují maximální otáčky hřídele motoru (7000 min^{-1})
- nevhodný tvar spalovacího prostoru - velký měrný povrch způsobuje odvod tepla, a tím pokles tepelné účinnosti.
- malý kompresní poměr - v důsledku nevhodného tvaru spalovacího prostoru, který také způsobuje, že hoření probíhá dlouho a motor je náchylný na detonační hoření
- vyšší měrná spotřeba - jako důsledek nízké tepelné účinnosti a malého kompresního poměru
- vyšší spotřeba oleje - kvůli nutnosti mazání těsnících lišt
- vyšší emise - v důsledku spalování oleje a nedokonalého hoření směsi [27]

Wankelův motor je v současnosti používán velmi výjimečně. Přesto se najdou firmy, které je pro modeláře a nadšence vyrábí. Jedním z nich je motor NR 20EP. Pohonná jednotka váží necelých 1,5 kg a s objemem 20 cm^3 produkuje při $10\,000 \text{ ot}/\text{min}^{-1}$ výkon 2,2 kW. Motor používá jako palivo ethanol a slouží pro pohon letadel a vrtulníků. [28]



Obr. 10 Wankelův motor NR 20EP [28]

2.2 MOTOR S PŘÍMOČARÝM POHYBEM PÍSTU

Jedná se o motory, které našly své největší uplatnění v dopravních a mechanizačních prostředcích všech druhů. Pro převod přímočarého vratného pohybu na otáčivý využívají zkráceného klikového mechanismu. Tyto motory lze rozdělit do několika skupin podle různých kritérií. Podle způsobu zapálení směsi rozlišujeme zážehové a detonační motory.

2.2.1 ZÁŽEHOVÉ MOTORY

Jedná se o spalovací motor, ve kterém je směs paliva se vzduchem ve válci zapálena (zažehnuta) pomocí jiskry. Kompresní poměr se pohybuje v rozmezí 8:1 až 12:1. Maximální točivý moment a výkon se obecně pohybují ve vyšších otáčkách než u vznětových motorů. Příprava směsi může probíhat před vstupem do válce, a nebo přímým vstřikem paliva do válce. Teoretický oběh zážehového motoru vychází z Ottova tepelného cyklu. V současnosti se maloobjemové zážehové motory pro modelářské účely rozdělují podle typu svíčky do dvou skupin. [26]

ZÁŽEHOVÉ MOTORY S JISKŘIVOU SVÍČKOU

Jedná se o klasickou koncepci, jak jsme zvyklí u automobilů. Motor má elektronické zapalování, které vydává elektrický impulz ve stanovený moment. Tento impulz zažehne jiskru, která zapálí stlačenou směs ve válci. Přesný moment zapálení je určen elektronikou zapalování, která zjišťuje aktuální polohu pístu (natočení klikové hřídele) podle elektromagnetického snímače umístěného na hřídeli. Motor může mít malé elektronické zapalování nebo magneto, což je součástka, která vyrábí elektřinu k dalšímu zážehu. Kvůli větším rozměrům svíčky a hmotnosti zapalování obecně platí, že motory s jiskřivou svíčkou jsou vyráběny ve vyšších kubaturách cca od 10 cm³. Značnou výhodou těchto motorů jsou menší provozní náklady. Při stejném objemu mají nižší spotřebu než motor se žhavicí svíčkou. Navíc palivo pro žhavicí motory je speciální a až pětkrát dražší než klasický benzín. [33]



Obr. 11 Jiskřivá svíčka pro zážehové motory [32]

ZÁŽEHOVÉ MOTORY SE ŽHAVICÍ SVÍČKOU

Tento typ motoru nemá klasické zapalování, ale palivo se vznítí od rozžhavené svíčky. Žhavicí svíčka obsahuje žhavicí vlákno, které je vyrobeno z tepelně odolného kovu iridia nebo platiny. Svíčka je před nastartováním nažhavena externí baterií. Po nastartování je udržována nažhavená hořením směsi ve válci (využívá tepelné setrvačnosti vlákna). Při chodu motoru se stlačená směs vznítí v důsledku rozžhaveného vlákna. Při delším chodu na volnoběh může vlákno vychladnout, a proto se používá přižhacování, které se spouští automaticky nebo ručně na vysílači. Pro tento typ motorů je nutno použít speciální palivo. Jedná se o směs metyalkoholu (80 %) a oleje (20 %). Poměr se může lišit podle typu motoru, stejně jako procento přidaného nitrometanu, který zvyšuje spolehlivost chodu motoru, ale bohužel je korozivní a motory se musí při delší přestávce konzervovat. Nevýhodou paliva je vyšší cena, jedovatost a kvůli obsaženému oleji i „špinavost“. Tento typ motoru se používá pro menší kubatury, a to již od 1 cm³. Obecně platí, že při stejném objemu produkují vyšší výkon a mají nižší hmotnost než motory s jiskřivou svíčkou. [33]



Obr. 12 Žhavicí svíčka pro zážehové motory [33]

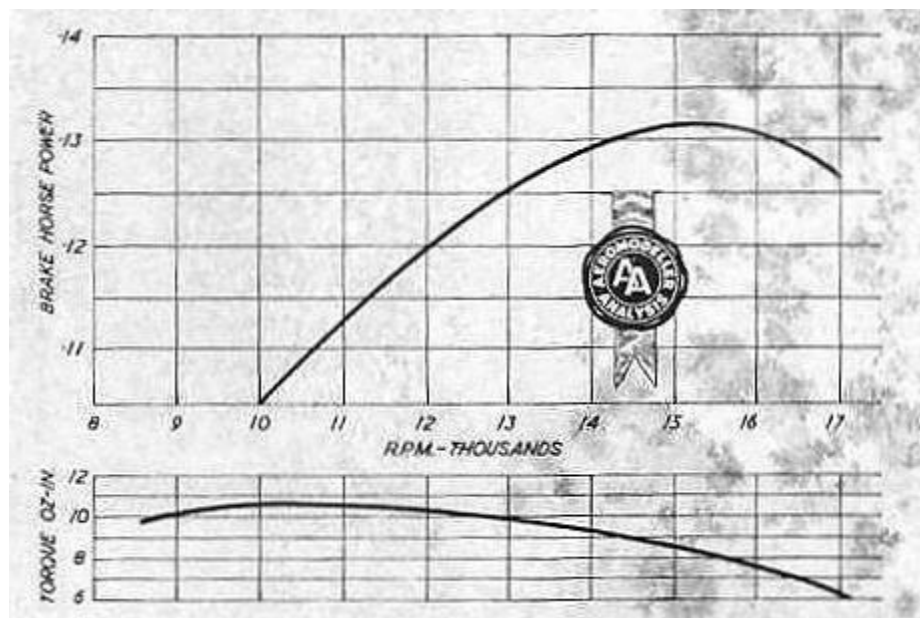
2.2.2 DETONAČNÍ MOTORY

Tento typ motoru využívá samovznícení směsi při vysokém kompresním poměru. Na první pohled může připomínat klasické vznětové motory. Rozdíl je v tom, že palivo je do válce dopraveno současně se vzduchem ve formě směsi. Jako palivo nelze použít klasickou motorovou naftu kvůli její vysoké vzníticí teplotě, ale používá se směs dietyleru, petroleje nebo motorové nafty a ricinového oleje. Doporučuje se poměr jednotlivých složek 1:1:1. Pro snadnější startování malých kubatur se zvětšuje podíl dietyleru až na 40 %. Tento typ motoru je dvoudobý a má velmi jednoduchou konstrukci, a proto se vyráběl i pro velmi malé kubatury (od 0,5 cm³). U motoru lze měnit kompresní poměr pomocí kompresní kličky, která ovládá protipíst, a tím mění objem ve válci. Při startování je nutno zvolit vhodný kompresní poměr i množství paliva, a proto rozběh motoru může být pro nezkušeného modeláře oříšek. V současnosti jsou tyto maloobjemové a nízkovýkonové motory nahrazovány elektromotory. [35] [44]



Obr. 13 Detonační motor MVVS-1D [29]

Na Obr. 13 je detonační motor vyrobený MVVS Brno v roce 1958. Motor má vrtání válce 10,7 mm a zdvih 11 mm. Celkový zdvihový objem je tedy $0,99 \text{ cm}^3$. Maximální výkon 98 W produkuje při $15\,400 \text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$ a maximální točivý moment $0,076 \text{ Nm}$ při $10\,500 \text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$. Jednalo se opravdu o velmi malý motor, který vážil pouze 76 g. Na Obr. 14 je záznam z měření otáčkové charakteristiky. [29]

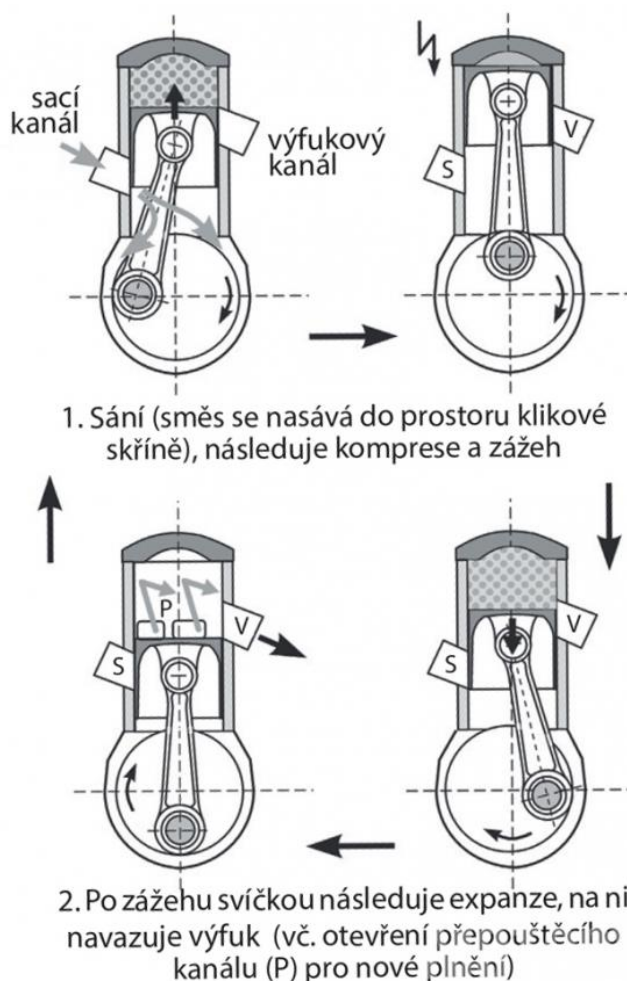


Obr. 14 Otáčková charakteristika detonačního motoru MVVS-1D [29]

Veškeré pístové motory s přímočarým pohybem pístu můžeme dále rozdělit podle taktnosti na dvoudobé a čtyřdobé.

2.2.3 DVOUDOBÝ MOTOR

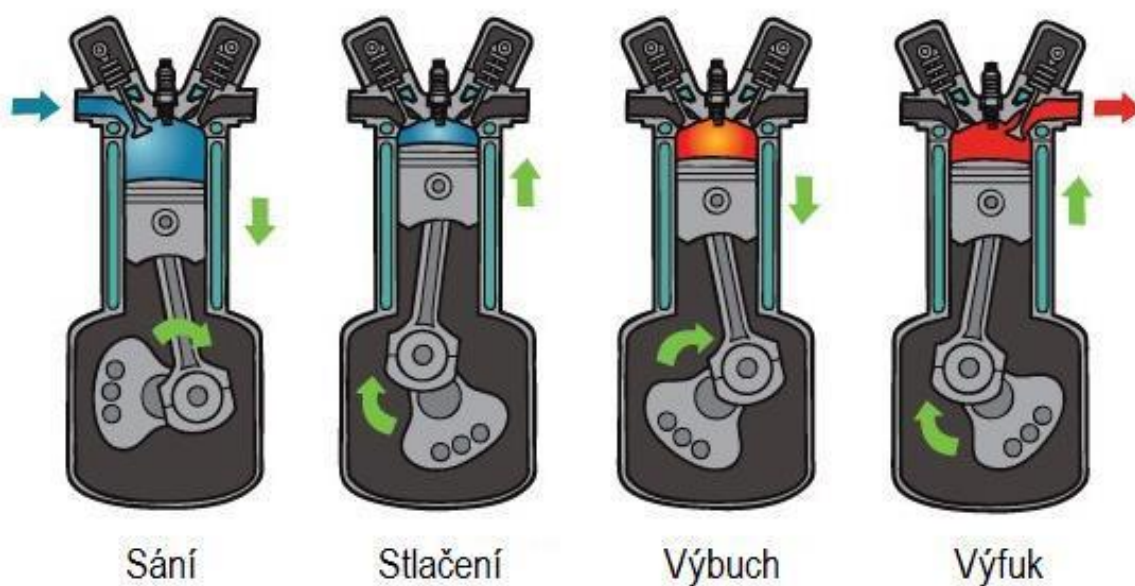
Je pístový spalovací motor, u kterého proběhne pracovní cyklus za jednu otáčku hřídele. Dvoudobý motor nemá ventily, ale píst při svém pohybu otevírá a zavírá kanály (sací, přepouštěcí, výfukový). Mazání motoru je zajištěno pomocí oleje, který je obsažen v palivu. Klasické tlakové mazání nelze použít, protože na pracovním cyklu se podílí i dolní plocha pístu a skříň motoru. Výhodou dvoudobých motorů je jednodušší a lehčí konstrukce, rychlá reakce na plyn a možnost vysokých otáček. Dvoudobý motor by teoreticky měl mít dvakrát vyšší výkon než čtyřdobý (má dvojnásobný počet pracovních cyklů na jednu otáčku), reálně to ale kvůli nižší účinnosti neplatí. Velmi důležitou částí dvoudobých motorů je návrh výfukového potrubí a rezonátoru, který za pomoci tlakových vln napomáhá výměně a plnění směsi ve válci. Tento návrh má pozitivní vliv pouze na určitou navrhovanou oblast otáček. Pro její rozšíření se používá proměnné sání pomocí šoupátka nebo jazýčkového ventilu. Mezi nevýhody patří hlučnost, nižší účinnost, vyšší spotřeba paliva a oleje a s tím související vyšší množství emisí. [26][36]



Obr. 15 Funkce dvoudobého motoru [34]

2.2.4 ČTYŘDOBÝ MOTOR

Je pístový spalovací motor, jehož pracovní cyklus proběhne za dvě otáčky hřídele. Výměnu náplně ve válci zajišťují ventily ovládané vačkovou hřídelí. Motor dosahuje vyšší účinnosti, a to až 40 % u vznětových přeplňovaných jednotek. S vyšší účinností také souvisí nižší produkce emisí, na které se v současnosti klade velký důraz. Motor má přívětivější průběh a dá se lépe ladit (například pomocí proměnného časování a zdvihu ventilů). Nevýhodou je složitější konstrukce a více pohyblivých součástí, které omezují maximální otáčky motoru (ventilové pružiny do 12 000 ot·min⁻¹). [26][36]



Obr. 16 Funkce čtyřdobého motoru [36]

3 POROVNÁNÍ SPALOVACÍHO MOTORU A ELEKTROMOTORU

Pro tuto diplomovou práci byl zakoupen maloobjemový čtyřdobý motor OS MAX FS A-62V. V této kapitole je porovnán spalovací motor s elektromotorem ve stejné výkonové řadě a hlavním kritériem je 1 hodina provozu.

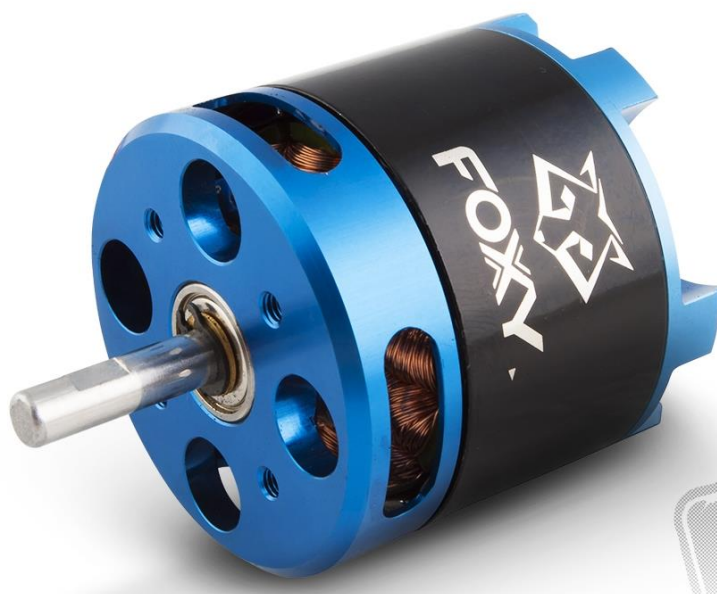


Obr. 17 OS MAX FS A-62V [1]

Maximální výkon (při 11 000 ot/min)	$P_{S_{\max}} = 810 \text{ W}$
Vrtání	$D = 25 \text{ mm}$
Zdvih	$L = 20,6 \text{ mm}$
Zdvihový objem	$V_Z = 10,11 \text{ cm}^3$
Počet válců	$n = 1$
Taktnost	$\tau = 0,5$
Hmotnost motoru	$m_s = 442 \text{ g}$
Hmotnost tlumiče	$m_{tl} = 44 \text{ g}$

[1]

Jako ekvivalentní elektromotor byl zvolen motor FOXY.



Obr. 18 Elektromotor FOXY G2 C4120-750 [37]

Maximální výkon (180 s)	$P'_{El\max} = 1480 \text{ W}$
Napájení LiXX článků	4–8
Otáčky na Volt	$n_{El} = 750 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}$
Vnitřní odpor	$R_{El} = 20 \text{ m}\Omega$
Proud naprázdno (při 10 V)	$I_{Elp} = 2,5 \text{ A}$
Proud při max. účinnosti (nad 80 %)	$I_{El80} = 7 - 35 \text{ A}$
Maximální špičkový proud (180 s)	$I_{El\max} = 67 \text{ A}$
Průměr elektromotoru	$D_{El} = 49,5 \text{ mm}$
Délka elektromotoru	$L_{El} = 49 \text{ mm}$
Hmotnost	$m_{El} = 292 \text{ g}$

Maximální výkon elektromotoru je vyšší než u spalovacího motoru. Jedná se však pouze o špičkový výkon, který je elektromotor schopen dodávat maximálně po dobu 180 sekund. Při tomto výkonu motor odebírá 67A, pro delší provoz je doporučený maximální proud 35A. [37]

Jak již bylo uvedeno v Tab.1, baterie mají určitý rozsah napětí podle stavu nabití. Například Li-Po baterie, která je v této aplikaci nejpoužívanější, má rozsah 3,0 v až 4,2 V. Výpočet výkonu elektromotoru je poté následující:



Výpočet maximálního výkonu

$$P_{El\max} = U_{\max} \cdot I_{El80} = 6 \cdot 4,2V \cdot 35A = 882 W \quad (1)$$

Výpočet minimálního výkonu

$$P_{El\min} = U_{\min} \cdot I_{El80} = 6 \cdot 3,0V \cdot 35A = 630 W \quad (2)$$

Výpočet jmenovitého výkonu

$$P_{Elj} = U_j \cdot I_{El80} = 6 \cdot 3,7V \cdot 35A = 777 W \quad (3)$$

Kde U je napětí baterie, a vyjadřuje stav nabití. Číslovka 6 určuje počet článků baterie. V tomto případě byla zvolena 6-ti článková baterie. Z těchto výpočtů je patrné jak stav nabití ovlivňuje výkon motoru, a že výkon postupně v čase klesá. Pro další výpočty je uvažováno jmenovité napětí, respektive jmenovitý výkon.

Podle požadovaného napětí byla zvolena Li-Po baterie s těmito parametry

Napětí baterie	$U_b = 22,2 V$
Kapacita baterie	$C_b = 5000 mAh$
Energie baterie	$E_b = 111 Wh$
Hmotnost baterie	$m_b = 834 g$
Objem baterie	$V_b = 354 cm^3$

3.1 VÝPOČET HMOTNOSTI PRO JEDNU HODINU PROVOZU

SPALOVACÍ MOTOR

Přesnou hodnotu měrné efektivní spotřeby výrobce pro tento motor neuvádí. Na základě znalostí a informací o podobných motorech jsem zvolil předběžnou měrnou efektivní spotřebu $340 g \cdot kW^{-1} \cdot h^{-1}$.

Výpočet hodinové spotřeby paliva

$$M_{ph} = m_{pe} \cdot P_{S\max} = 340 g \cdot kW^{-1} \cdot h^{-1} \cdot 0,81 kW = 275,4 g \cdot h^{-1} \quad (4)$$

Výpočet celkové hmotnosti agregátu a paliva na hodinu provozu

$$m_{S1h} = m_S + m_{tl} + M_{ph} = 442g + 44g + 275,4g = 761,4 g \quad (5)$$

ELEKTROMOTOR

Hmotnost regulátoru

$$m_r = 63g$$

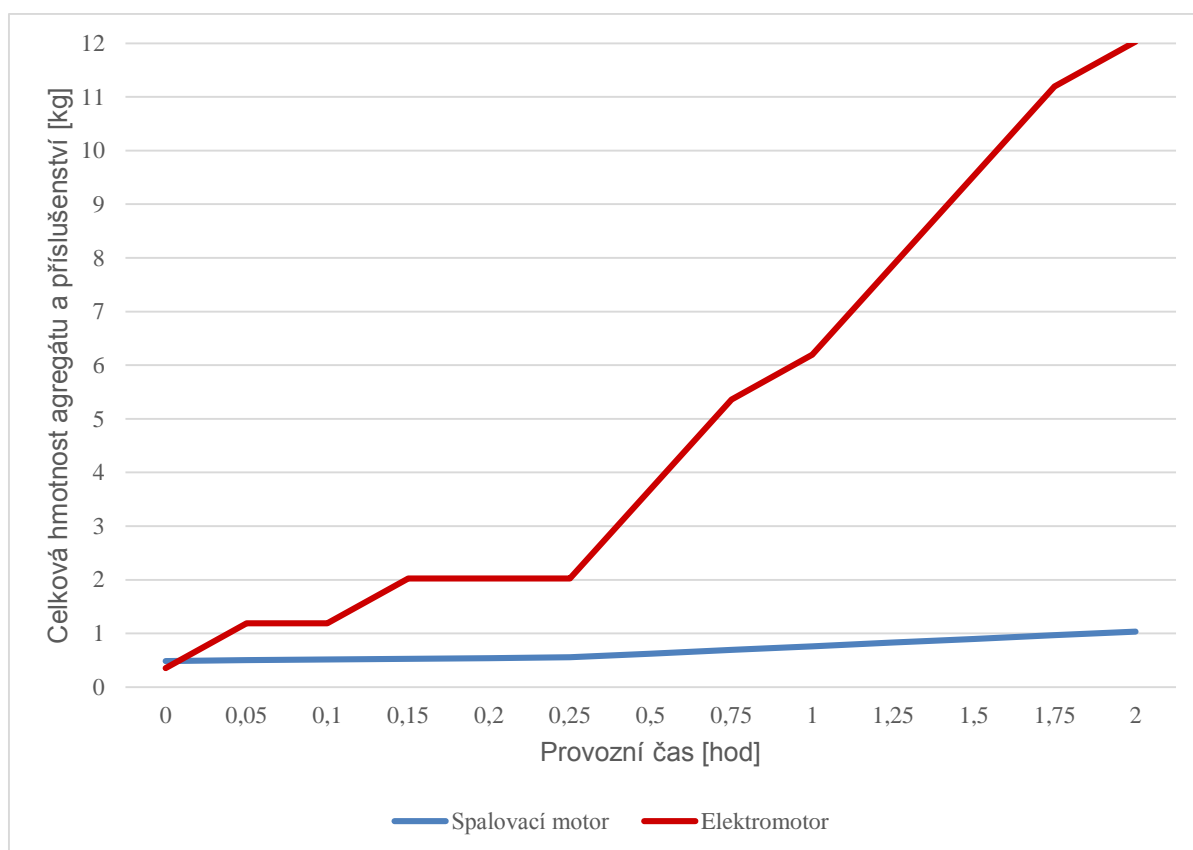
Výpočet počtu baterií pro hodinu provozu

$$n_b = \frac{t \cdot I_{EI80}}{C_b} = \frac{1h \cdot 35A}{5000mAh} = 7 \quad (6)$$

Výpočet celkové hmotnosti elektropohonu pro hodinu provozu

$$m_{EI1h} = m_{EI} + m_r + 7m_b = 292g + 63g + 7 \cdot 834g = 6193g \quad (7)$$

Z výpočtu je vidět, že spalovací motor i s palivem je při hodinovém provozu až 8 krát lehčí než elektromotor s baterií. Celková závislost hmotnosti na době provozu je patrná z grafu, kde modře je vyznačen spalovací motor a červeně elektromotor.



Obr. 19 Závislost hmotnosti na provozní době

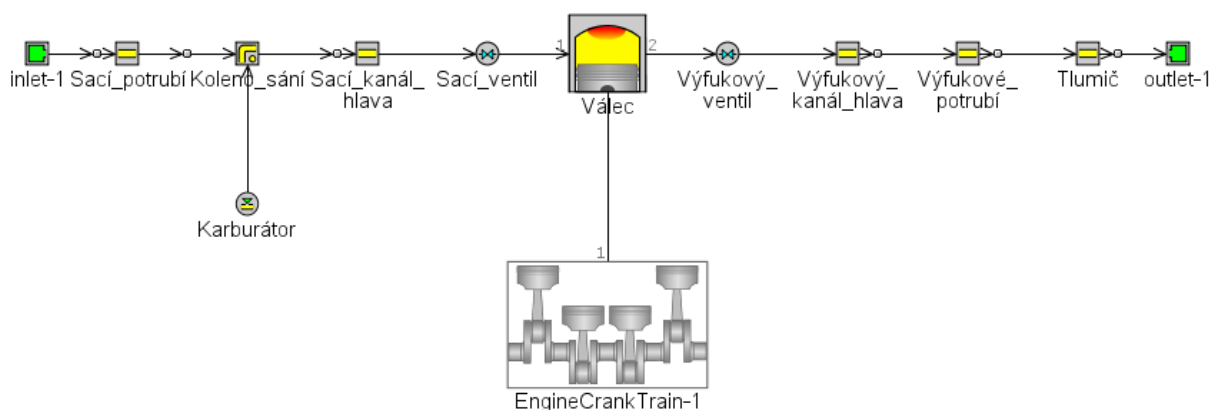
Z grafu je patrné, že rozdíl hmotnosti je s rostoucím požadavkem na čas rapidní. Spalovací motor má navíc tu vlastnost, že při provozu jeho celková hmotnost klesá z důvodu spotřebování paliva. Tento graf se však zabývá pouze počáteční hmotností před samotným vzletem.

4 TERMODYNAMICKÝ MODEL SPALOVACÍHO MOTORU

Pro simulaci termodynamického modelu byl použit program GT Power. Jedná se o simulační zařízení, které používají i hlavní výrobci vozidel. K tomu, aby se model blížil co nejvíce reálným výsledkům je třeba do programu zadat velké množství vstupních dat a modelů, jejichž zjištění může být někdy značný problém. Z tohoto důvodu jsme s vedoucím práce maloobjemový motor OS MAX FS A-62V zakoupili a bude nám sloužit jako hlavní prostředek k naměření vstupních hodnot.



Obr. 20 Zakoupený motor OS MAX FS A-62V



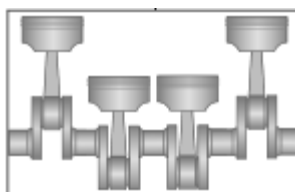
Obr. 21 Termodynamický model v GT Power

Po rozebrání motoru jsem naměřil základní rozměrové hodnoty pro termodynamický model, viz Tab.2.

Tab. 2 Základní naměřené hodnoty pro GT Power

Parametr	Jednotka	Hodnota
Průměr sedla ventilu sacího ventilu	[mm]	9,55
Průměr sedla ventilu výfukového ventilu	[mm]	9,55
Vrtání válce	[mm]	25
Zdvih	[mm]	20,6
Délka ojnice (mezi oky)	[mm]	31

4.1 ZADÁNÍ HLAVNÍCH PARAMETRŮ

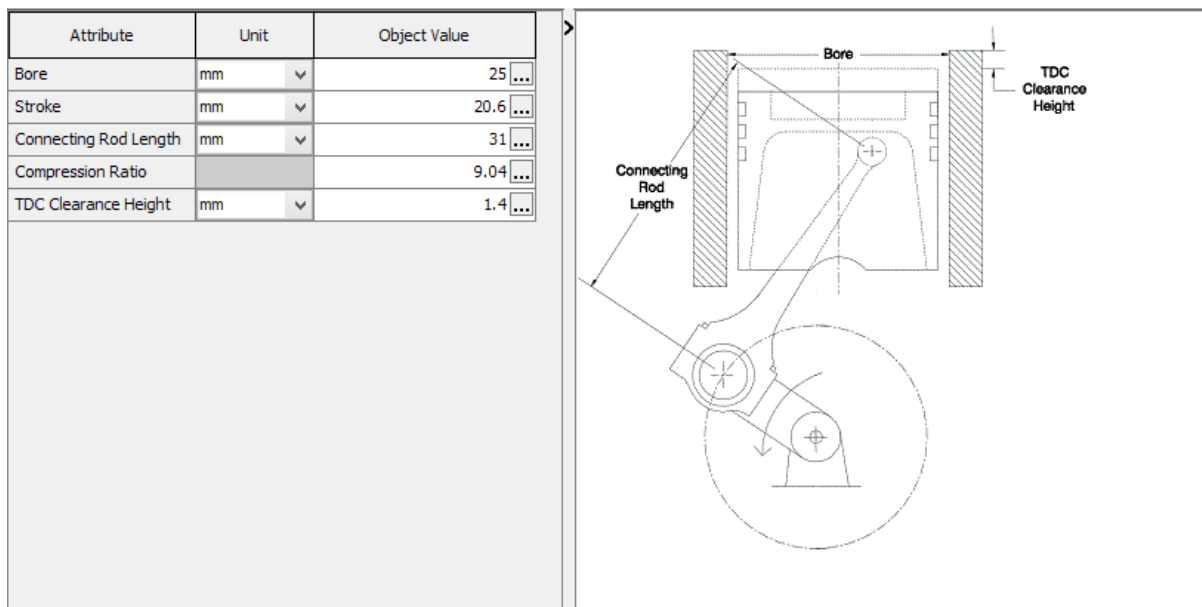


Obr. 22 Ikona Engine Crank Train

Jedná se o první prvek při založení nového projektu. Zde se vybírá taktnost motoru, počet válců, pořadí zapalování, pracovní otáčky a podobně. V tomto případě jsem místo konstantních otáček zadal parametr [RPM], aby bylo možno výpočet provádět pro širší spektrum otáček.



V tomto kroku se také zadávají hlavní naměřené rozměry, viz Obr. 23.



Obr. 23 Tabulka pro zadání hlavních rozměrů

Parametr *TDC Clearance Height* vyjadřuje vzdálenost mezi dosedací plochou hlavy válce a pístem nacházejícím se v horní úvrati. Tato vzdálenost je 1,4 mm a to včetně těsnění o tloušťce 0,18 mm.

4.1.1 VÝPOČET KOMPRESNÍHO POMĚRU

Kompresní poměr je velmi důležitý vstupní parametr, který zásadně ovlivňuje výkon motoru. Vyjadřuje poměr geometrických objemů. Jeho hodnota se vypočítá z následujícího vztahu.

$$\varepsilon = \frac{V_Z + V_K}{V_K} \quad (8)$$

kde:

ε	[-]	Kompresní poměr
V_Z	[mm ³]	Zdvihový objem válce
V_K	[mm ³]	Kompresní objem
V_P	[mm ³]	Objem spalovacího prostoru v hlavě

Zdvihový objem se určí jednoduše z vrtání a zdvihu na základě známého vztahu.

$$V_Z = \frac{\pi D^2}{4} \cdot Z = \frac{\pi \cdot 25^2 \text{ mm}}{4} \cdot 20,6 \text{ mm} = 10112 \text{ mm}^3 \quad (9)$$

Kompresní objem se již zjišťuje obtížněji, protože spalovací prostor v hlavě má komplikovaný tvar. K jeho určení byla použita lihová směs a tím získaná hodnota 0,57 ml. K tomuto objemu je ještě potřeba přičíst škodný prostor ve válci, který je dán již dříve změřenou hodnotou TDC. Celkový kompresní objem je pak daný následujícím vztahem.

$$V_K = \frac{\pi D^2}{4} \cdot TDC + V_P = \frac{\pi \cdot 25^2 \text{ mm}}{4} \cdot 1,4 \text{ mm} + 570 \text{ mm}^3 = 1257 \text{ mm}^3 \quad (10)$$

Po dosazení do původní rovnice (8) získáme hodnotu pro kompresní poměr.

$$\varepsilon = \frac{V_Z + V_K}{V_K} = \frac{10112 \text{ mm}^3 + 1257 \text{ mm}^3}{1257 \text{ mm}^3} = 9,04 \quad (11)$$

4.2 VÁLCOVÁ JEDNOTKA



Obr. 24 Ikona válce

Po vyplnění základních rozměrů GT Power požaduje i daleko složitější parametry, jako je model přestupu tepla ve válci nebo průběh hoření směsi. Tyto parametry je velmi těžké naměřit a s ohledem na rozměry motoru a dostupné prostředky téměř nemožné. Z tohoto důvodu jsou již v programu některé přednastavené modely, které vycházejí z reálného měření a statistického zpracování dat.

4.2.1 MODEL PŘESTUPU TEPLA VE VÁLCI

Pro přestup tepla jsem použil *WoschniGT* model. Tento model vychází z klasického *Woschni* modelu, který je jednodušší a na kterém se ukáže princip.

Část tepla, které vzniká při hoření směsi ve válci, se předává stěnám válce konvekcí neboli přestupem. Toto teplo je následně kondukcí neboli vedením přenášeno do chladnějších částí motoru, odkud je další konvekcí teplo odváděno chladícím médiem do okolí motoru a vozidla. Při tomto výpočtu nebudu uvažovat vliv sálání, které u zážehových motorů tvoří 3 až 5 % přestupu tepla. U vznětových motorů to může být až 15 % a bylo by již nutno pro přesný výpočet tuto skutečnost zahrnout.



Množství tepla, které je předáno přestupem (konvekcí) stěnám válce je dáno Newtonovým zákonem. (12)

$$Q = \alpha S(T_{\infty} - T_w) \quad (12)$$

kde:

Q	[W]	Teplo
α	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]	Součinitel přestupu tepla
S	[m ²]	Plocha válce
T_{∞}	[K]	Teplota směsi ve válci
T_w	[K]	Teplota stěny válce

Teplota směsi ve válci se v závislosti na čase mění. Na začátku komprese je teplota směsi nižší, a tedy dochází k ohřátí plynu od stěn válce. To na jednu stranu znamená energetické ztráty a snížení účinnosti, ale zároveň přispívá k ochlazování spalovacího prostoru. Při expanzi a výfuku je teplota směsi vyšší a dochází k ohřátí stěn.

Součinitel přestupu tepla α závisí na několika parametrech, a to především na stavu směsi ve válci (teplotě, tlaku, rychlosti proudění). V 60. letech 20. století byl na základě prací Pflauma a Woschniho stanoven vztah pro určení součinitele přestupu tepla α . (13) Tento součinitel byl stanoven na základě podobnostních čísel a vycházel z popisu přestupu tepla v trubce s turbulentním prouděním. [25][40]

Obecný empirický vztah pro určení součinitele přestupu tepla α dle Woschniho:

$$\alpha = C \cdot d^{m-1} \cdot p^m \cdot T^{0,75-1,62m} \cdot w^m \quad (13)$$

kde:

α	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]	Součinitel přestupu tepla
C	[-]	Konstanta
d	[m]	Charakteristický rozměr (vrtání válce)
p	[Pa]	Tlak ve válci
T	[K]	Teplota ve válci
w	[m·s ⁻¹]	Střední rychlost proudění
m	[-]	Exponent stanovený experimentálně



Určení střední rychlosti proudění w dle Voschniho:

$$w = C_1 \cdot c_s + C_2 \cdot V_Z \cdot \frac{T_s}{p_s \cdot V_s} \cdot (p - p_0) \quad (14)$$

kde:

C_1, C_2	[-]	Konstanty
c_s	[m·s ⁻¹]	Střední pístová rychlost
V_Z	[m ³]	Zdvihový objem
T_s	[K]	Teplota ve válci na začátku komprese
V_s	[m ³]	Objem směsi ve válci na začátku komprese
p_s	[Pa]	Tlak ve válci na začátku komprese
p	[Pa]	Tlak ve válci při hoření
p_0	[Pa]	Tlak ve válci bez hoření (při nuceném protočení)

Po dosažení získáme konečný tvar pro určení součinitele přestupu. Konstanta m byla zjištěna systematickými experimenty. Ostatní konstanty C závisí na aktuálním pracovním cyklu válce.

$$m = 0,8 \quad C = 0,01297829376$$

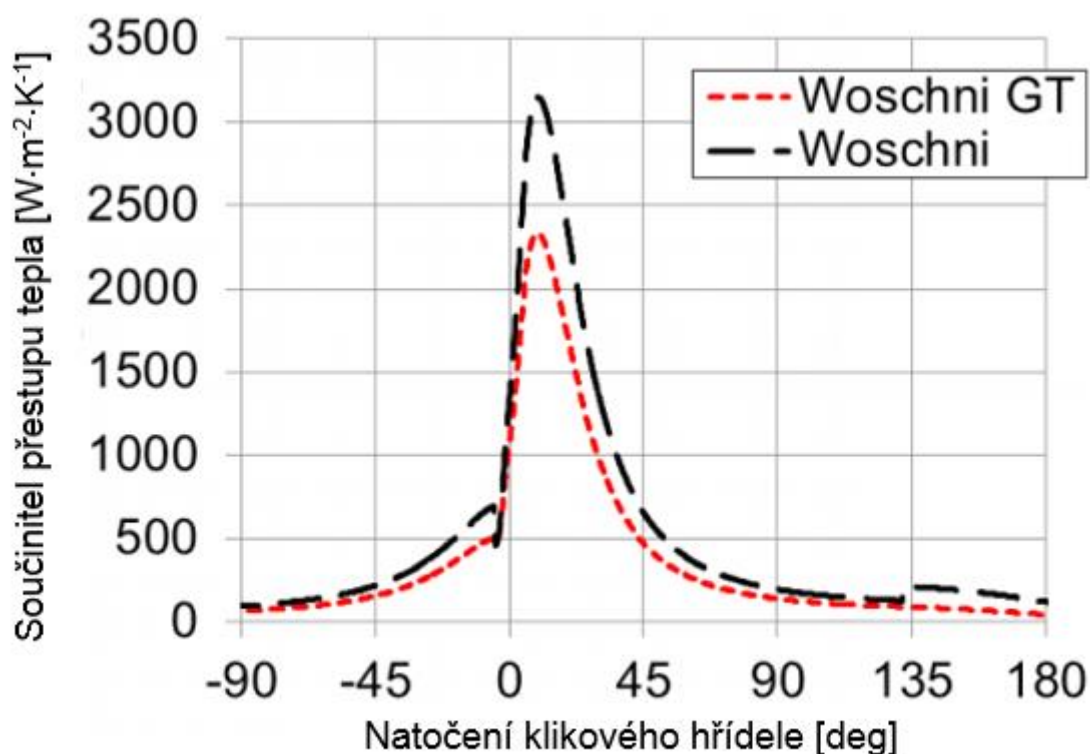
$$C_1 = 6,18 \quad C_2 = 0 \quad \text{Při výměně náplně ve válci}$$

$$C_1 = 2,28 \quad C_2 = 0 \quad \text{Při kompresi}$$

$$C_1 = 2,28 \quad C_2 = 3,24 \cdot 10^{-3} \quad \text{Při expansi}$$

$$\alpha = C \cdot d^{-0,2} \cdot p^{0,8} \cdot T^{-0,55} \cdot \left[C_1 \cdot c_s + C_2 \cdot \frac{V_Z \cdot T}{p \cdot V} \cdot (p - p_0) \right]^{0,8} \quad (15)$$

Pro výpočet v GT Poweru byl použit výpočtový model Voschni GT, který vychází z klasického Voschniho modelu. Nejdůležitější rozdíl spočívá v úpravě koeficientů přenosu tepla a to zejména v době, kdy jsou ventily otevřené. Podrobné porovnání obou modelů je na Obr. 25. [25][40][41]



Obr. 25 Porovnání modelů přestupu tepla [41]

Důležitou částí pro správné fungování modelu je vyplnění teplot jednotlivých částí a to hlavy, pístu a válce. Tyto teploty nebylo možné kvůli dostupným prostředkům a rozměrům motoru naměřit přímo na zakoupeném modelu. S tímto problémem počítá i program GT Power a proto existuje konstanta *Overall Convection Multiplier*. Tato konstanta doplňuje potřebné informace o odvodu tepla, které nebylo možné naměřit, a byla pomocí simulace celého motoru zvolena na hodnotu 1,75. Simulace se prováděla až v závěru, kdy byly do modelu zadány všechny naměřené a známé parametry. Celý proces spočíval v navolení konstanty tak, aby výsledné hodnoty odpovídaly parametrům výrobce, tedy maximální výkon 810 W. Na Obr. 26 jsou uvedeny typické teploty, které vychází z odborné literatury. [40]

Attribute	Unit	Object Value
Head Temperature	K	550 ...
Piston Temperature	K	590 ...
Cylinder Temperature	K	450 ...

Obr. 26 Tabulka pro zadání teplot

4.2.2 MODEL HOŘENÍ

Hořením paliva a vzduchu ve spalovacím prostoru vzniká teplo, které se přeměňuje na mechanickou práci. Množství vzniklého tepla závisí na výhřevnosti paliva a na jeho množství, které se spotřebuje za určitý čas. To lze popsat rovnicí (16). [25]

$$dQ_B = H_u dm_B \quad (16)$$

kde:

Q_B	[J]	Vzniklé teplo
H_u	[J·kg ⁻¹]	Výhřevnost paliva
m_B	[kg]	Množství paliva

Výkon motoru však není určen pouze množstvím vzniklého tepla, ale také průběhem hoření směsi. Značný vliv má způsob tvoření směsi, typ paliva ale také teplota a tlak ve válci. Výchozí rovnici pro určení modelu hoření poloempiricky odvodil Vibe. [25]

Bezrozměrný tvar rovnice je:

$$x = 1 - e^{-a \cdot y^{m+1}} \quad (17)$$

Pro kterou dále platí:

$$x = \frac{m_B(\varphi)}{m_B} \quad (18)$$

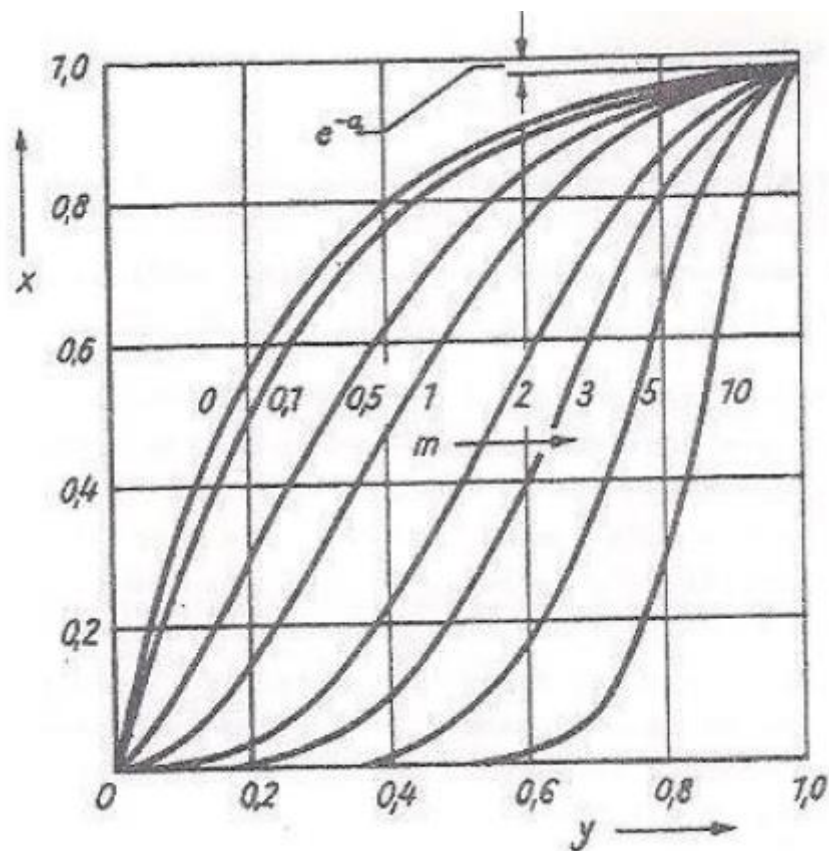
$$y = \frac{t(\varphi)}{t_H} \quad (19)$$

m	[-]	Parametr charakteristiky hoření
a	[-]	Podíl nespáleného paliva ve válci
$m_B(\varphi)$	[kg]	Hmotnost již shořelého paliva
m_B	[kg]	Celková hmotnost shořelého paliva
$t(\varphi)$	[s]	Čas, za který část paliva shořelo
t_H	[s]	Celkový čas hoření

Podíl nespáleného paliva ve válci a je dále definován jako:

$$a = -\ln(1 - \eta_{CH}) \quad (20)$$

Kde η_{CH} je chemická účinnost. Na počátku hoření je tedy $y = 0$ a $x = 0$. Na konci hoření pro $y = 1$ je podíl spáleného paliva z celkového přivedeného množství určen vztahem $x = 1 - e^{-a}$ jak je vidno na Obr. 27, přičemž chemická účinnost η_{CH} odpovídá právě poslední hodnotě x na konci hoření. [25]

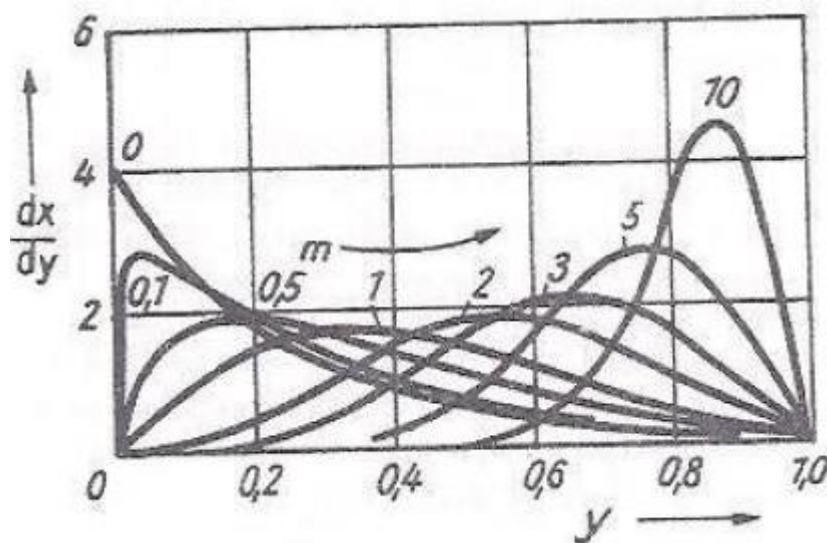


Obr. 27 Bezrozměrná funkce prohořívání paliva ve válci podle Vibeho pro různé „m“ [25]

Zdroj: PIŠTĚK, V., ŠTĚTINA, J.. *Výpočetní metody ve stavbě spalovacích motorů: Určeno pro posl. fak. strojní. Vyd. 1. Brno: VUT, 1991, 129 s. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-0368-3. Str. 98*

Jak je z Obr. 27 patrné, parametr m výrazně ovlivňuje průběh hoření. Celkový vývin tepla vyjadřuje Obr. 28, který v daném okamžiku charakterizuje intenzitu hoření. Závislost získáme derivací rovnice (17) podle y . [25]

$$\frac{dx}{dy} = a(m+1)y^m \cdot e^{-ay^{m+1}} \quad (21)$$



Obr. 28 Průběh hoření podle Vibeho pro různé exponenty "m" [25]

Zdroj: PIŠTĚK, V., ŠTĚTINA, J.. *Výpočetní metody ve stavbě spalovacích motorů: Určeno pro posl. fak. strojní. Vyd. 1. Brno: VUT, 1991, 129 s. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-0368-3. Str. 98*

Jak již bylo řečeno, hlavní podíl na průběhu hoření mají parametry a a m . Tyto hodnoty byly experimentálně zjištěny a závisí na druhu paliva. Podrobnější výpis těch nejpoužívanějších udává tabulka Tab.3.

Tab. 3 Hodnoty parametrů pro různá paliva

Palivo	m	a
Benzín	2	10
Nafta	0,5	6,9
Metan	2,2	5
Metanol	2	10

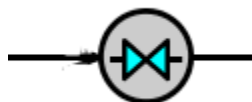
4.3 VENTILY

U motoru FS A-62V je použitý rozvod OHV. Vačková hřídel je poháněna přímo od klikové hřídele přes šnekové ozubení. Vačka ovládá zvedací tyče a přes vahadla je síla přenášena na ventily.



Obr. 29 Vačková hřídel [43]

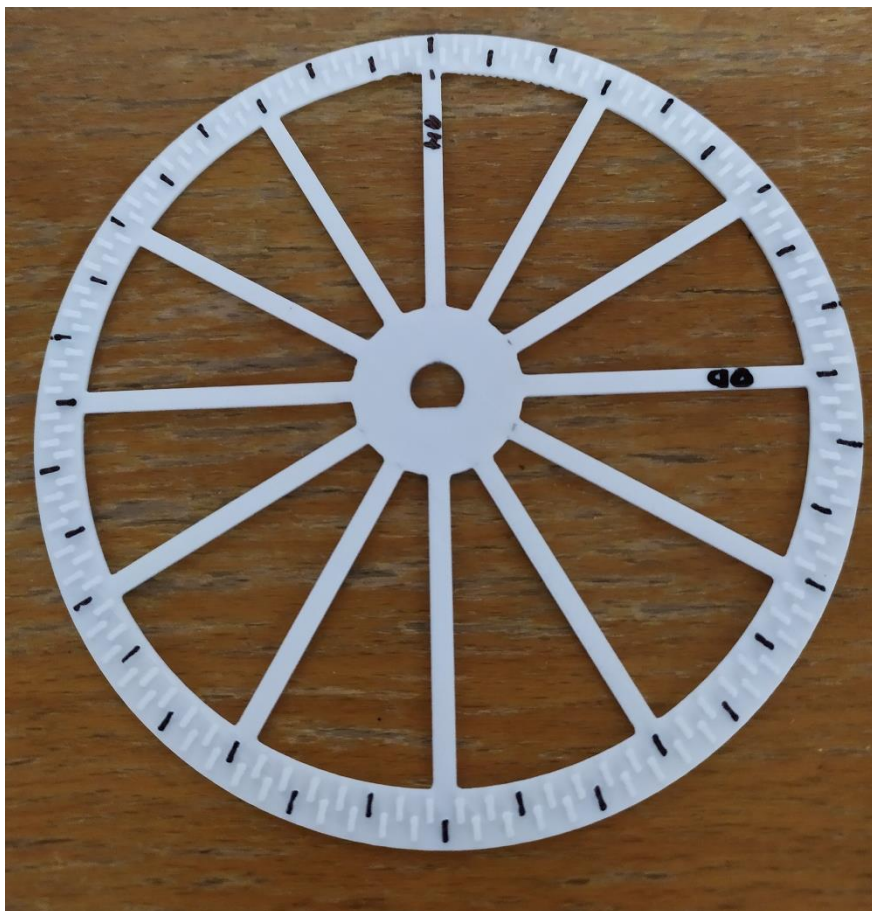
Program GT Power nepracuje přímo s vačkou a tudíž mu ani nezáleží na typu rozvodu. Veškerá data jako zdvihové křivky a součinitele průtoku se zadávají přímo u jednotlivých ventilů.



Obr. 30 Ikona ventilu

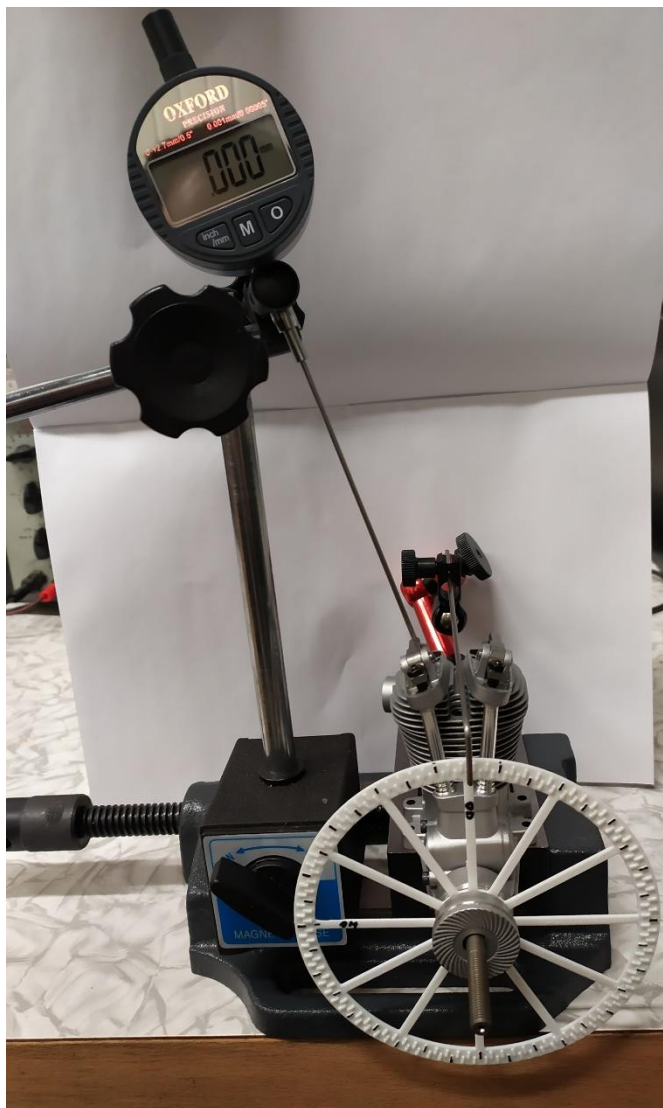
4.3.1 URČENÍ ZDVIHOVÉ KŘIVKY VENTILŮ

Měření jsem prováděl ve školních laboratořích. Nejprve jsem vytiskl na 3D tiskárně kolo s výstupky ve dvou řadách po 2 stupních. Pomocí fixy jsem si pro lepší orientaci zvýraznil horní úvrať a výstupky po 10 stupních. Na klikové hřídeli je zploštěná část, která slouží k nasunutí a zafixování vrtule. V tomto případě posloužila jako zarážka proti protočení vytištěného kola.



Obr. 31 Vytištěné kolo

Poté jsem sestavil měřící aparaturu. K odměřování zdvihu jsem použil digitální mikrometr s přesností 0,001 mm. Jelikož hrot mikrometru má velký průměr, byla použita zdvihací tyč (viz detailní pohled na Obr. 33).

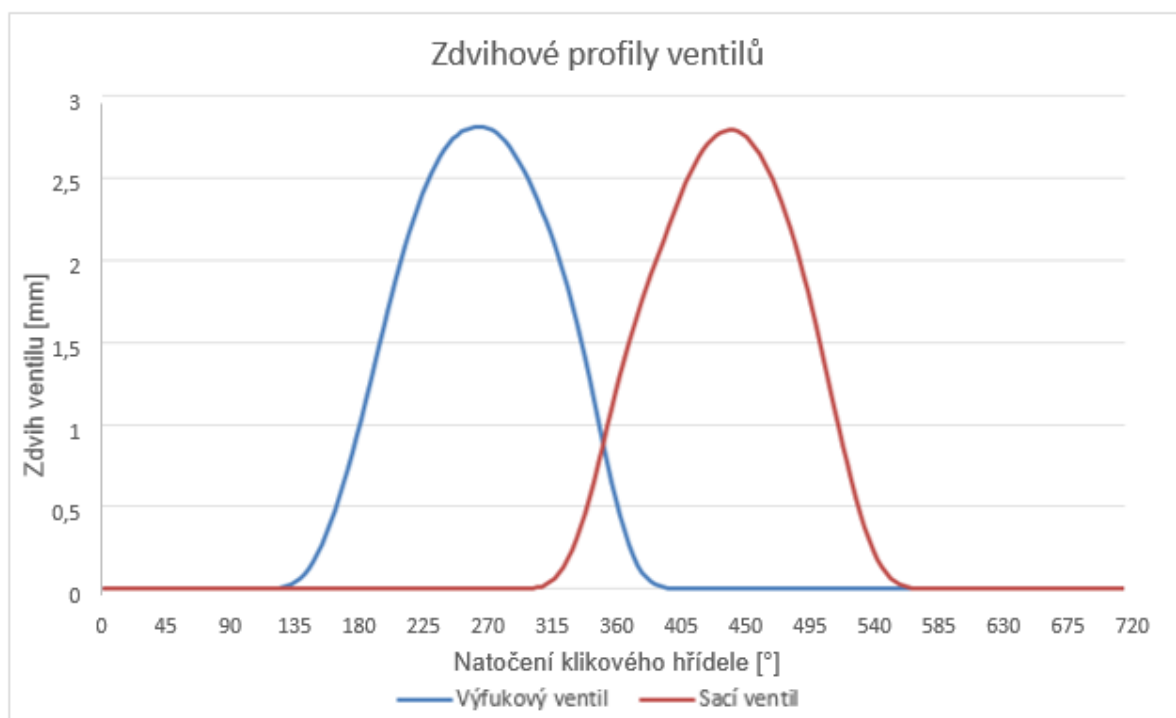


Obr. 32 Měřící aparatura pro určení zdvihové křivky

Na Obr. 32 je měření průběhu zdvihu výfukového ventilu. Obdobně měření probíhalo i pro sací ventil. Kolem jsem otáčel po 2 stupních (jednom výstupku) a zapisoval jsem hodnoty zdvihu, ze kterých jsem sestavil graf (viz Obr. 34).



Obr. 33 Detailní pohled umístění tyče



Obr. 34 Zdvihové profily ventilů

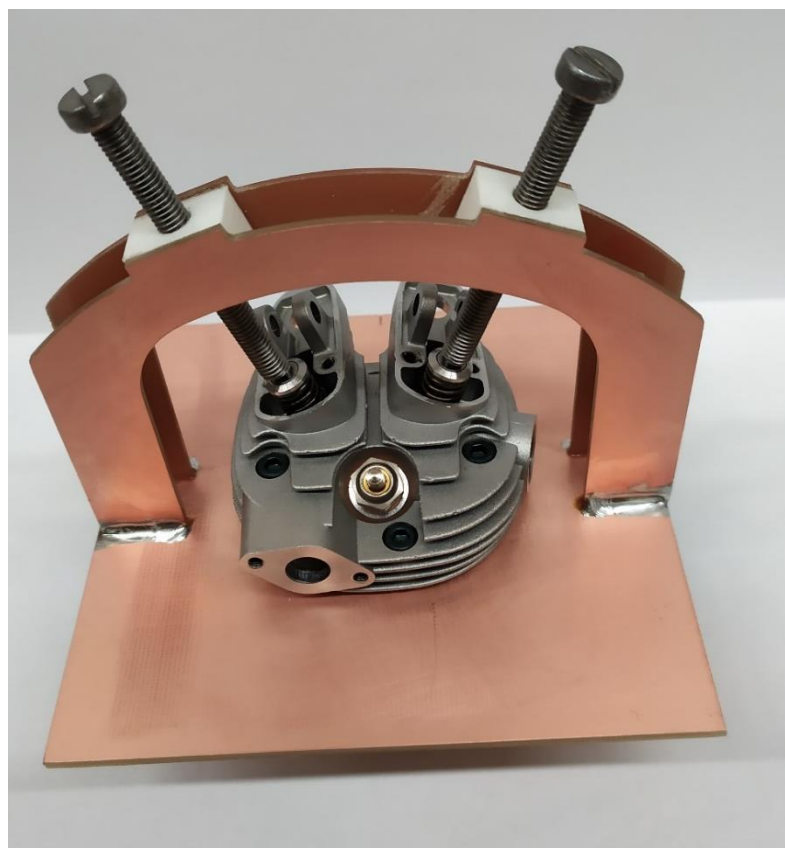
Tyto data byly vloženy do programu GT Power. Přesné hodnoty otevření a zavření ventilů jsou uvedeny v Tab.4.

Tab. 4 Parametry ventilových křivek

Parametr	Jednotka	Hodnota
Zdvih ventilů	[mm]	2,8
Otevření výfukového ventilu	[deg]	96 za HÚ
Otevření sacího ventilu	[deg]	44 před HÚ
Zavření výfukového ventilu	[deg]	32 za HÚ
Zavření sacího ventilu	[deg]	68 za DÚ
Překrytí ventilů	[deg]	76

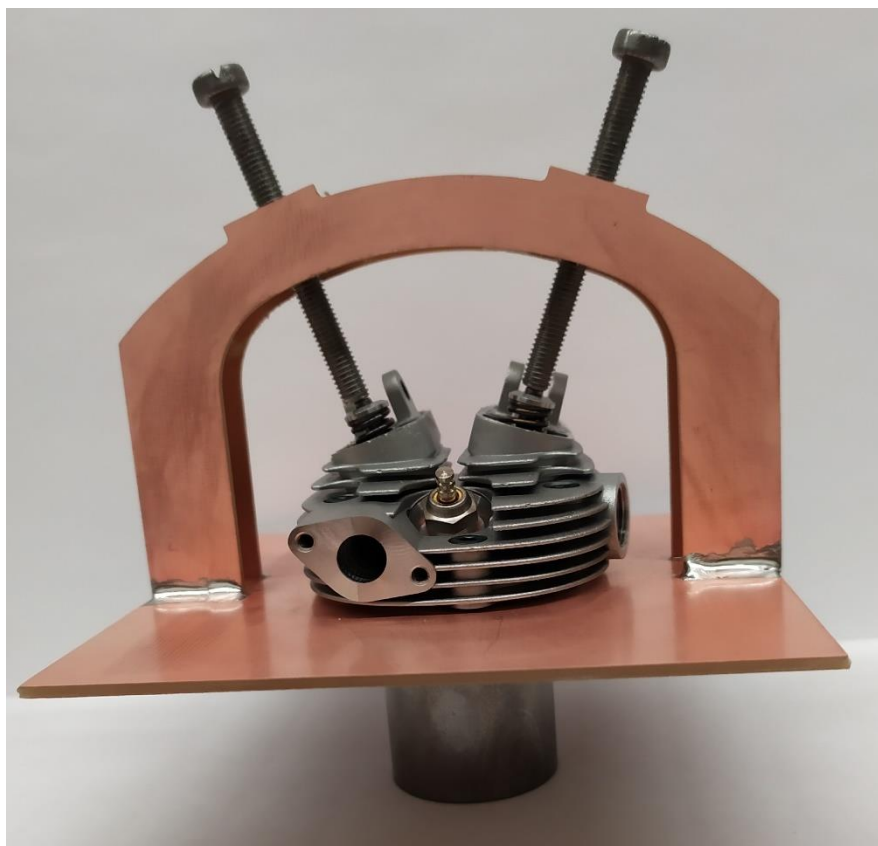
4.3.2 URČENÍ PRŮTOKOVÝCH SOUČINITELŮ

Dalším bodem bylo určení průtoků sacího a výfukového kanálu v hlavě motoru. Toto měření jsem prováděl ve školní laboratoři automobilového ústavu na profukovací stanici SuperFlow SF-260. Tato stolice je obecně určena pro větší hlavy motorů. Z tohoto důvodu bylo nutno vyrobit přípravek, který zajišťoval utěsnění a otevírání ventilů.



Obr. 35 Přípravek na profukovací stanici

Nejprve jsem na 3D tiskárně vytiskl plastové krychličky, do kterých se vložila matice pro přesnější vedení šroubu. Hlavním polotovarem pro přípravek byla deska, která se používá pro výrobu plošných spojů a je z jedné strany poměděná. To umožnilo spájení jednotlivých částí. Krychličky z 3D tiskárny jsou přilepené vteřinovým lepidlem.



Obr. 36 Přípravek na profukovací stanici - pohled zepředu

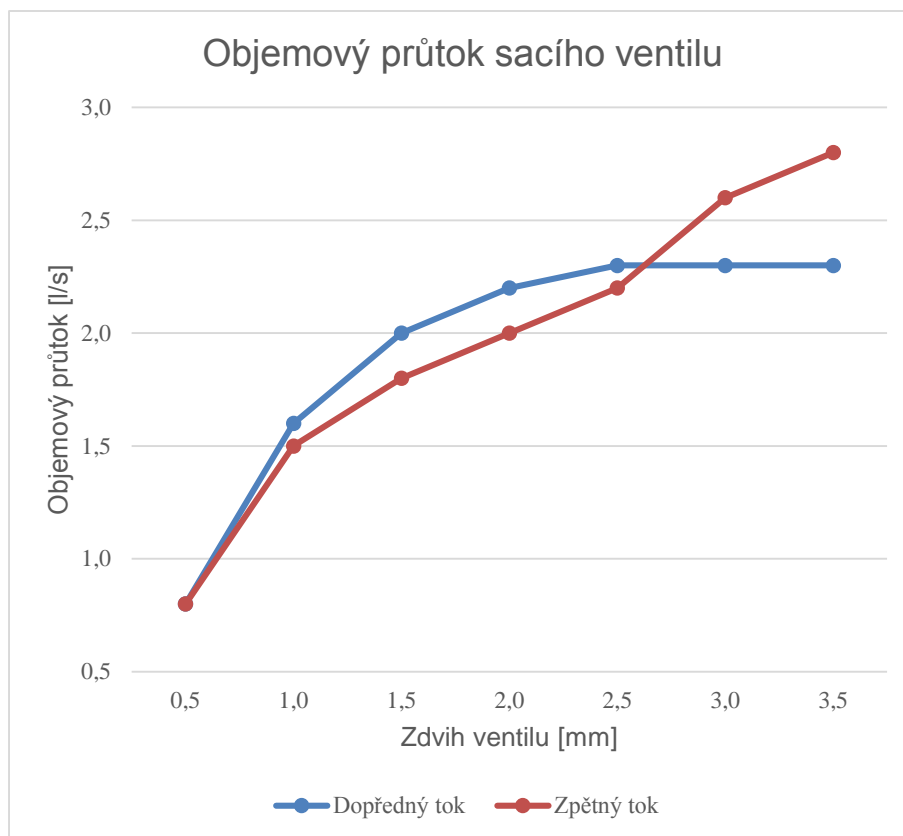
Do desky byla vyvrtána díra, do které se umístila vložka válce s těsněním, aby proudění vzduchu odpovídalo co nejvíce skutečnosti. Celá hlava byla poté přitáhnuta čtyřmi šrouby a maticemi.

Na Obr. 37 je již přípravek připevněn na profukovací stanici. Pro lepší utěsnění byla použita lepicí páska a přichycení pomocí svorek, které na obrázku nejsou kvůli lepší názornosti.

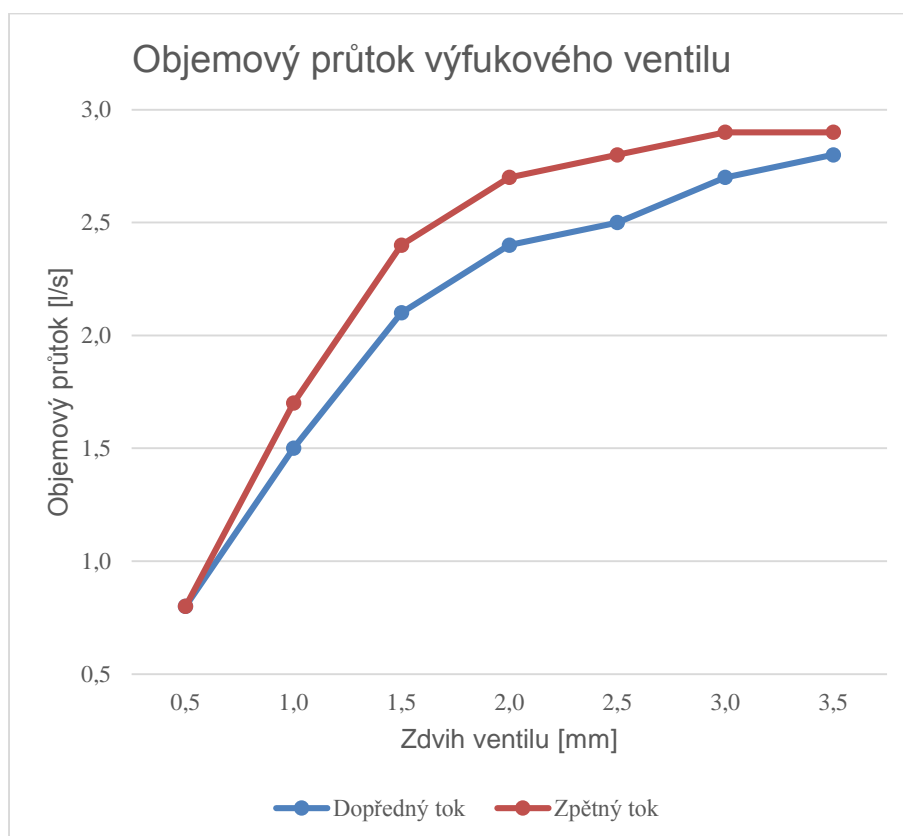


Obr. 37 Přípravek na profukovací stanici

Prováděl jsem celkem 4 měření. Dopředný a zpětný tok pro každý ventil. Měření probíhalo při tlakovém spádu 50 mbar. Začínal jsem od uzavřeného ventilu a pomocí šroubu jsem ventil otvíral s krokem 0,5 mm a to až do zdvihu 3,5 mm. Po ustálení hodnot jsem si zaznamenal průtok a teplotu vzduchu. Výsledné hodnoty průtoků jsou znázorněny v následujících grafech.



Obr. 38 Objemový průtok sacího ventilu



Obr. 39 Objemový průtok výfukového ventilu

Z grafů je patrná závislost objemového průtoku na zdvihu ventilu. Pro potřeby GT Poweru je nutno průtok přepočítat na bezrozměrný koeficient CF a zdvih na poměr L/D. Kde L je zdvih ventilu a D průměr kanálu v sedle ventilu. K určení vztahů pro výpočet CF koeficientů jsem použil manuály GT Power viz zdroj [46].

$$CF = \frac{\dot{m}_{skut}}{\dot{m}_{teor}} = \frac{V \cdot \rho}{\rho \cdot A \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}}} = \frac{V}{A \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}}} \quad (22)$$

kde:

\dot{m}_{skut}	[kg·s ⁻¹]	Skutečný hmotnostní průtok
\dot{m}_{teor}	[kg·s ⁻¹]	Teoretický hmotnostní průtok
V	[m ³ ·s ⁻¹]	Naměřený objemový průtok
ρ	[kg·m ⁻³]	Hustota vzduchu
A	[m ²]	Průtočná plocha ventilu
Δp	[Pa]	Tlakový spád

Průtočná plocha ventilu se vypočítá jako průřez v sedle ventilu podle vztahu:

$$A = \frac{\pi \cdot d_v^2}{4} \quad (23)$$

Kde d_v [m] je průměr v sedle ventilu.

Na následujícím příkladu je znázorněn postup určení CF koeficientu u sacího ventilu pro dopředný tok (sání) pro zdvih 2 mm. Tomuto zdvihu odpovídá objemový průtok 2,2 l/s a teplota 32,8 °C. Teplota je důležitá k určení skutečné hustoty vzduchu, se kterou se dále pracuje ve výpočtu.

Tab. 5 Závislost hustoty vzduchu na teplotě

Teplota [°C]	31	31,1	31,2	31,3	31,4	31,5	31,6	31,7	31,8	31,9
Hustota [kg·m⁻³]	1,1634	1,1631	1,1627	1,1623	1,162	1,1616	1,1612	1,1609	1,1605	1,1601
Teplota [°C]	32	32,1	32,2	32,3	32,4	32,5	32,6	32,7	32,8	32,9
Hustota [kg·m⁻³]	1,1598	1,1594	1,1591	1,1587	1,1583	1,158	1,1576	1,1573	1,1569	1,1565
Teplota [°C]	33	33,1	33,2	33,3	33,4	33,5	33,6	33,7	33,8	33,9
Hustota [kg·m⁻³]	1,1562	1,1558	1,1555	1,1551	1,1548	1,1544	1,154	1,1537	1,1533	1,153

Tabulka závislosti hustoty vzduchu na teplotě byla zhotovena ze zdroje [39]. Jelikož tento zdroj uvádí teploty s krokem 1 °C, tak jsem hodnoty interpoloval a tím jsem získal hodnoty s menším krokem, které přispívají k přesnějším výpočtům.

Výpočet průtočné plochy ventilů

$$A = \frac{\pi \cdot d_v^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0.00955^2 m}{4} = 7,163 \cdot 10^{-5} m^2 \quad (24)$$

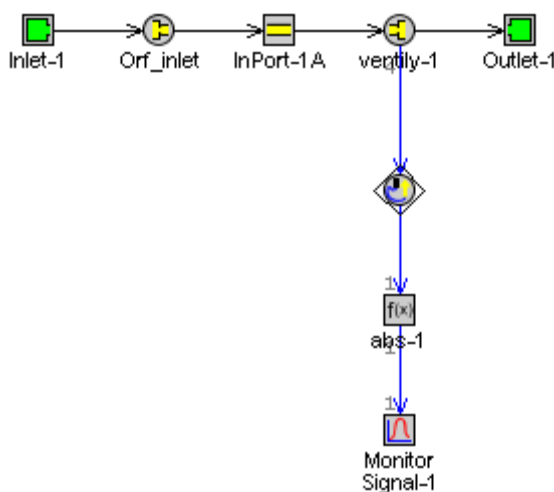
Po dosazení do vzorce pro výpočet CF koeficientu byl získán následující vztah. Teplota vzduchu při měření byla 32,8 °C, což podle Tab. 5 odpovídá hustotě 1,1569 kg·m⁻³. Jak již bylo řečeno, měření probíhalo při tlakovém spádu 50 mbar, což se rovná 5000 Pa.

$$CF = \frac{V}{A \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}}} = \frac{0,0022 m^3 \cdot s^{-1}}{7,163 \cdot 10^{-5} m^2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 5000 Pa}{1,1569 kg \cdot m^{-3}}}} = 0,330 \quad (25)$$

Určení L/D poměru

$$\frac{L}{D} = \frac{2 mm}{9,55 mm} = 0,209 \quad (26)$$

Tímto způsobem by se obdobě určily koeficienty pro všechny hodnoty zdvihu u sacího i výfukového ventilu. Dalším přístupem pro určení CF koeficientu je využití samotného GT Power. V programu jsem vytvořil 1D model hlavy, jehož charakteristika odpovídá reálné hlavě. Především vzorec je určený zejména pro analytické výpočty a například neuvažuje stlačitelnost vzduchu. Schéma 1D modelu hlavy je na Obr. 40.



Obr. 40 Schéma 1D modelu hlavy v GT Poweru



Do modelu jsem zadal základní hodnoty, jako jsou průměr sedla, délky kanálů a nasávané médium. Ostatní hodnoty jako teplota, CF koeficienty pro přední a zpětný tok a objemový průtok jsem zadal jako parametry, aby se daly měnit v závislosti na zdvihu ventilu. Podle zdvihu jsem rozdělil výpočet na 7 částí (Case) a pro každou zapsal naměřenou teplotu a objemový průtok, viz Obr 41. Rozdíl tlaků na vstupu a výstupu odpovídá tlakovému spádu tedy 50 mbar.

Description	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6	Case 7
Check Box to Turn Case On	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Unique Text for Plot Legen...	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5
Pressure (Absolute)	1000 ...	1000 ...	1000 ...	1000 ...	1000 ...	1000 ...	1000 ...
Temperature	31 ...	31.2 ...	31.3 ...	31.3 ...	31.3 ...	31.3 ...	31.4 ...
Pressure (Absolute)	1050 ...	1050 ...	1050 ...	1050 ...	1050 ...	1050 ...	1050 ...
Temperature	31 ...	31.2 ...	31.3 ...	31.3 ...	31.3 ...	31.3 ...	31.4 ...
Forward Discharge Coefficient	0.5 ...	0.5 ...	0.5 ...	0.5 ...	0.5 ...	0.5 ...	0.5 ...
Reverse Discharge Coefficient	0.5 ...	0.5 ...	0.5 ...	0.5 ...	0.5 ...	0.5 ...	0.5 ...
	0.8 ...	1.5 ...	1.8 ...	2 ...	2.2 ...	2.3 ...	2.5 ...

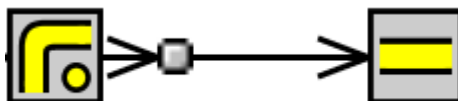
Obr. 41 Vložené parametry pro výpočet CF koeficientu

Poté jsem provedl optimalizaci CF koeficientů. Ta spočívá v určení koeficientů tak, aby byl splněn zadaný objemový tok při dané teplotě a rozdílu tlaků. Tuto optimalizaci jsem použil celkem čtyřikrát, pro dopředný a zpětný tok obou ventilů. Získané koeficienty jsou uvedeny v Tab.6. Pro další výpočet v hlavním termodynamickém modelu jsem použil právě tyto hodnoty.

Tab. 6 Hodnoty CF koeficientů

Poměr L/D	Sací ventil		Výfukový ventil	
	Dopředný tok	Zpětný tok	Dopředný tok	Zpětný tok
0,052	0,1163	0,1214	0,1213	0,1167
0,105	0,2331	0,2277	0,2275	0,2486
0,157	0,2915	0,2734	0,3188	0,3513
0,209	0,3207	0,3038	0,3645	0,3951
0,262	0,3351	0,3344	0,3798	0,4095
0,314	0,3350	0,3496	0,4103	0,4241
0,366	0,3349	0,3801	0,4256	0,4238

4.4 POTRUBÍ



Obr. 42 Ikony potrubí

Pro zobrazení potrubí a kanálu jsem použil prvek *PipeRound*. Hlavními vstupními parametry jsou průměry potrubí na obou koncích a jeho délka. V případě potřeby se dá zadat i úhel a rádius natočení (viz levá Ikona na Obr. 42). Dále se zadává médium v potrubí a teplota stěny. Tuto hodnotu je obtížné změřit (například v kanálu hlavy), proto jsem při volbě teploty vycházel z odborné literatury a doporučení vedoucího práce. [40]

4.5 PŘÍVOD PALIVA



Obr. 43 Ikona pro přívod paliva

Tento maloobjemový motor využívá pro tvorbu směsi dvoujehlový otočný karburátor. Ten je tvořen soudkem, který je kolmo na osu provrtán. Natáčením soudku v těle karburátoru dochází k regulaci množství vzduchu. Dodávku paliva zajišťuje palivová jehla. V tomto případě jsou použity dvě jehly, a tím je zajištěn velký rozsah výkonu. Dvě jehly zajišťují lepší odezvu na požadavek paliva a plynulejší chod motoru při volnoběhu. První jehla je nastavena pro volnoběh a nízké otáčky, zatímco druhá pro vysoké otáčky. Soudek se v těle zároveň s natáčením i horizontálně posunuje, a tím uzavírá jehlu v trysce. [42]



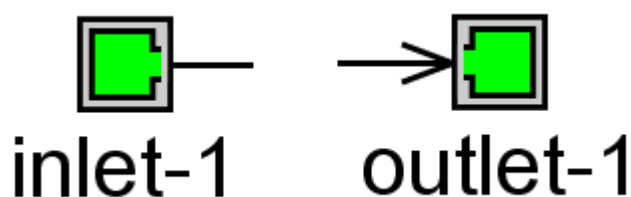
Obr. 44 Dvoujehlový karburátor [38]

V GT Poweru se nastavuje bohatost směsi, druh a teplota paliva. Teplotu jsem volil podle okolí 22 °C. Směšovací poměr většinou odpovídá lambdě rovné jedna. Pro maximální výkon je vhodná lehce bohatší směs. Z tohoto důvodu jsem zvolil směšovací poměr 0,92.

Attribute	Unit	Object Value
Injector Location (Pipes only)		0.5 ...
Fuel Ratio Specification		Lambda ▾
Fuel Ratio		0.92 ...
Injected Fluid Temperature	C ▾	22 ...
Fluid Object		indolene-combust ...
Vaporized Fluid Fraction		0.3 ...

Obr. 45 Nastavení dodávky paliva

4.6 OKRAJOVÉ PODMÍNKY



Obr. 46 Ikony pro okrajové podmínky

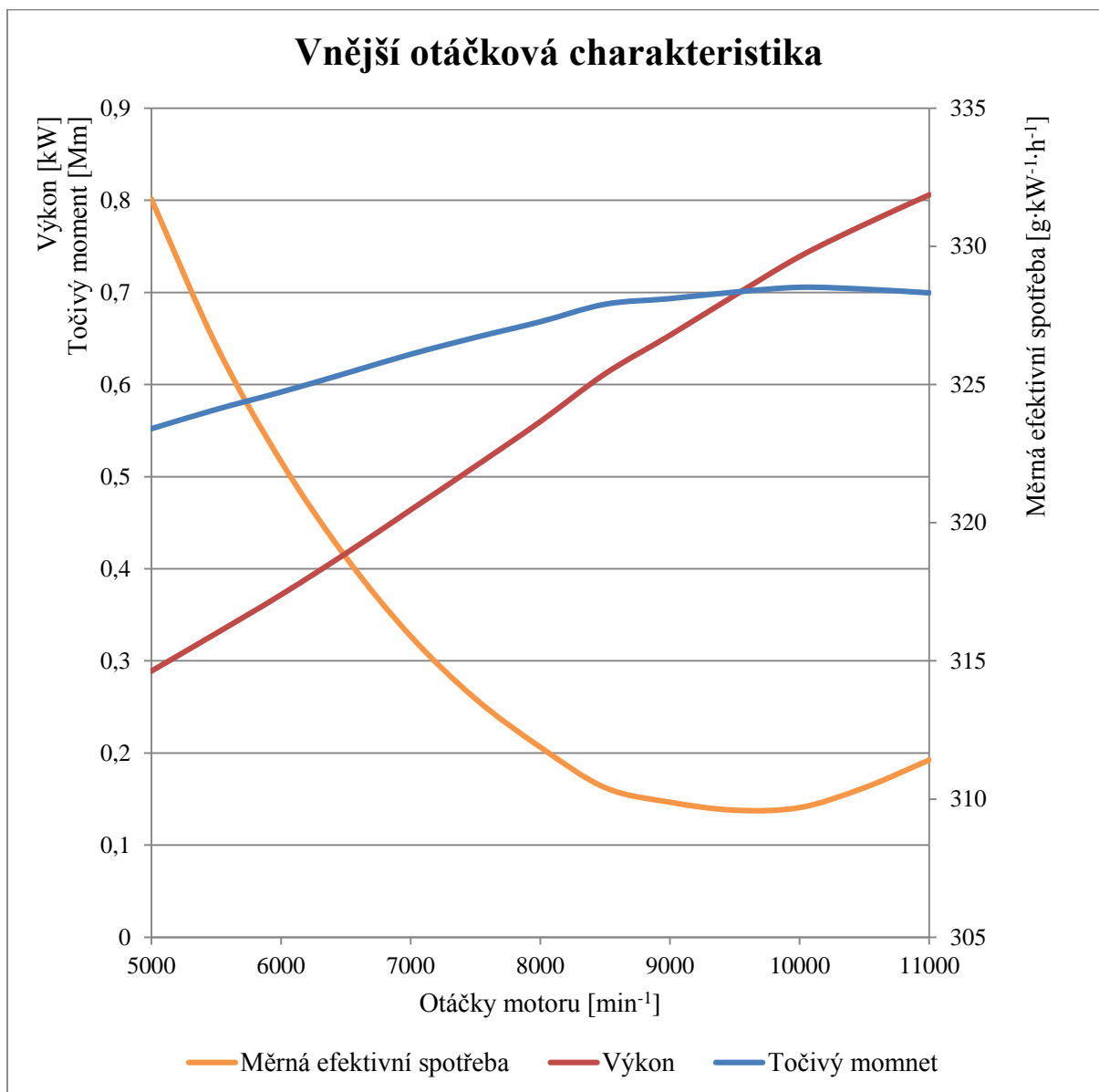
K výpočtu termodynamického modelu je nutno zadat okrajové podmínky. Inlet značí okrajové podmínky na vstupu do motoru, zatímco outlet na jeho výstupu. GT Power vyžaduje zadat typ média, tlak a jeho teplotu. Pro výpočet jsem uvažoval na vstupu standartní podmínky okolí a to teplotu 22 °C a tlak 1 bar. Na výstupu je teplota stejná ale tlak 1,05 barů. Toto navýšení simuluje odpor spalin při průchodu tlumičem a výfuku.

Attribute	Unit	Object Value
Pressure (Absolute)	bar ▾	1 ...
Temperature	C ▾	22 ...
Composition		air ...

Obr. 47 Hodnoty pro vstupní okrajové podmínky

4.7 VÝSLEDKY TERMODYNAMICKÉHO MODELU

Jak již bylo řečeno na začátku, při zadávání pracovních otáček jsem zadal parametr [RPM], který mi umožnil provést výpočet pro široké spektrum otáček. Jelikož se jedná o motor, který je navržený pro práci ve vysokých otáčkách, prováděl jsem výpočet od $5000 \text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$. Pro určení vnější otáčkové charakteristiky jsem použil celkem 13 výpočtů (Case) s krokem $500 \text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$. Podrobnější výsledky jsou v Příloze 1.



Obr. 48 Vnější otáčková charakteristika

Z grafu je patrné, že průběh výkonu má téměř lineární trend. Maximální hodnota je 806 W. Udávaná hodnota výrobcem činí 810 W. Z toho lze usoudit, že termodynamický model odpovídá reálnému a je tudíž připraven pro optimalizaci.

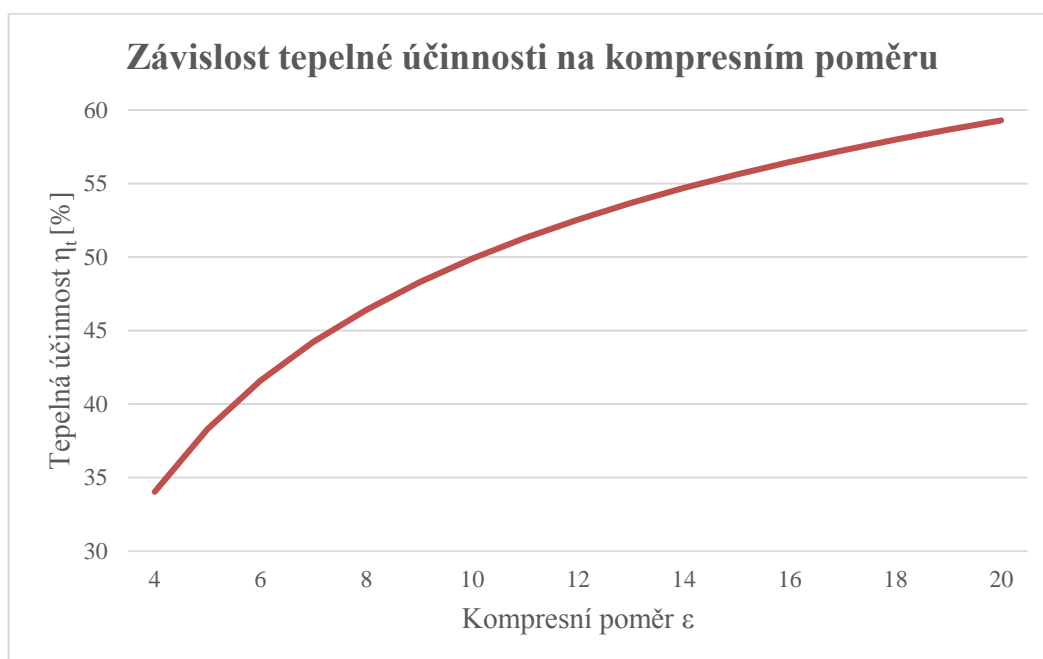
5 OPTIMALIZACE

Již od samého vzniku spalovacích motorů se konstruktéři zabývají optimalizací, která by vedla k navýšení výkonu. Toho lze dosáhnout několika způsoby.

5.1 ZPŮSOBY OPTIMALIZACE PRO NAVÝŠENÍ VÝKONU

Kompresní poměr

Nejjednodušší možností je zvýšení kompresního poměru. Vyšší kompresní poměr znamená vyšší tepelnou účinnost. Ta je velmi důležitá a v zásadě vyjadřuje, jak efektivně dochází k přeměně tepelné energie na mechanickou a výrazně ovlivňuje celkovou účinnost motoru. Závislost tepelné účinnosti na kompresním poměru je znázorněna na Obr. 49.



Obr. 49 Závislost tepelné účinnosti na kompresním poměru

Zvyšování kompresního poměru s sebou nese i některá omezení. V důsledku vyšších tlaků ve spalovacím prostoru dochází k většímu namáhání celého klikového ústrojí. S tím souvisí i zvýšení mechanických ztrát, respektive pokles mechanické účinnosti. Dalším omezením je detonační hoření. To vzniká lokálním samovznícením směsi, která nebyla zapálena čelem plamene vniklého jiskrou svíčky, ale v důsledku vyšší lokální teploty ve spalovacím prostoru došlo k jejímu samovznícení. Při tomto hoření dochází k prudkému nárůstu tlaku a teploty, což může vést až k trvalému poškození motoru. Na vznik detonačního hoření mají vliv především kompresní poměr, oktanové číslo paliva, velikost předstihu, tvar spalovacího prostoru a jeho schopnost se ochlazovat, umístění svíčky, zatížení motoru a teplota nasávaného vzduchu. Podmínky vzniku detonačního hoření se zjišťují experimentálně. U automobilu k tomu slouží tzv. senzor klepání. Obecně se pro zážehové motory nedoporučuje kompresní poměr vyšší než 12:1.



Časování ventilů

Další možností navýšení výkonu, které se často využívá, je úprava časování a zdvihu ventilů. Jedná se o změnu otevření a zavření ventilů, případně změnu průběhu celé ventilové křivky. Snahou je zvýšit plnicí účinnost a zlepšit výměnu náplně ve válci. Optimalizace časování je poměrně náročná především proto, že pro různé spektrum otáček je vhodné různé načasování. Výsledné časování je poté tedy kompromisem, případně se zaměřuje na nejpoužívanější oblast otáčkové charakteristiky. U některých automobilových motorů se využívá tzv. proměnného (variabilního) časování, které se mění v závislosti na otáčkách. U maloobjemových modelářských motorů je tento způsob nepoužitelný, proto změna časování v praxi znamená výměnu vačkové hřídele.

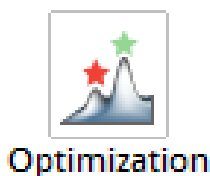
Úprava potrubí

Dalším způsobem zvýšení výkonu je optimalizace sacího a výfukového potrubí. Obecně lze říci, že větší průměr je lepší. Na sací straně se snížením vstupního odporu zvýší plnicí účinnost, zatímco na výfukové klesá odpor proudění a dochází i k lepší výměně náplně ve válci. Maximální průměr potrubí je často omezen rozměry hlavy a válce. Délky samotného potrubí mají značný vliv na konečný výkon. Bohužel stejně jako pro časování pro ně platí, že určitá délka je vhodná pro určitý rozsah otáček. Rozdíl ideální délky pro nízké a vysoké otáčky může být i 5násobný. U některých automobilových motorů se používá tzv. proměnná délka potrubí, která zajišťuje pokrytí širšího rozsahu motoru. U ostatních motorů je délka potrubí kompromisem mezi maximálním výkonem a celkovým průběhem výkonu respektive krouticího momentu.

5.2 VLASTNÍ OPTIMALIZACE MODELU

Vlastní optimalizace je pro lepší názornost a orientaci rozdělena na více částí. To lépe zachycuje progres a také je názornější, které změny a v jaké míře ovlivnily výslednou charakteristiku.

Nejprve jsem zvýšil kompresní poměr z dosavadních 1:9 na 1:10,5. Toho jsem dosáhl zmenšením kompresního objemu, konkrétně snížením výšky TDC. Ta jak již bylo dříve vysvětleno (viz strana 31 Obr. 23), vyjadřuje vzdálenost mezi dosedací plochou hlavy válce a pístem nacházejícím se v horní úvrati. Tato vzdálenost byla původně 1,4 mm, snížením o 0,4 mm se zvýšil kompresní poměr na 1:10,5. K výpočtu byly použity rovnice (10) a (11) na straně 32. V praxi by se této změny dosáhlo zbrúšením dosedací plochy skříně respektive válce o 0,4 mm.



Obr. 50 Ikona optimalizace

V první záložce se volí závislý parametr, v tomto případě výkon. Dále se volí tzv. *target*, který určuje, kdy bude optimalizace ukončena. Lze zvolit minimum, maximum nebo přesnou hodnotu. V další záložce se již volí parametry, které se budou optimalizovat, viz Obr. 51.

	Attribute	Unit	1	2
	Parameter to be Varied		delka
<input type="radio"/>	Parameter Range			
<input checked="" type="radio"/>	Lower Value of the Range		5.0
	Upper Value of the Range		150.0
	Resolution (% of Range)		5.0

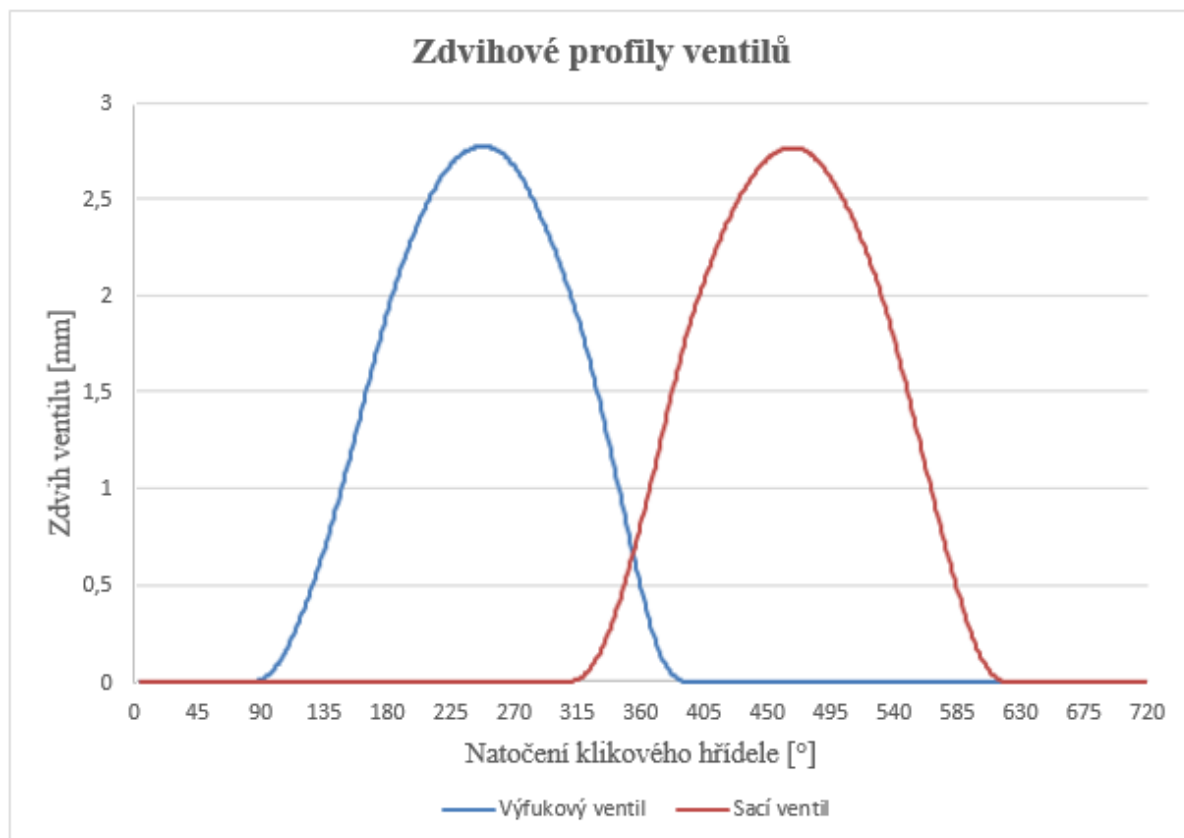
Obr. 51 Tabulka pro zadání optimalizovaných parametrů

V tomto případě se optimalizuje délka sacího potrubí. Zadává se rozsah a počet kroků pomocí procentuálního rozdělení. GT Power poté pomocí půlení intervalu hledá ideální délku, která odpovídá požadavku v *targetu*.

Jako první jsem dělal optimalizaci na množství paliva. Výsledkem je mírně bohatá směs $\lambda = 0,975$.

5.2.1 OPTIMALIZACE ČASOVÁNÍ

V této fázi jsem optimalizoval začátek otevření ventilů a celkový průběh zdvihové křivky. Výsledná zdvihová křivka obou ventilů je na Obr. 52.



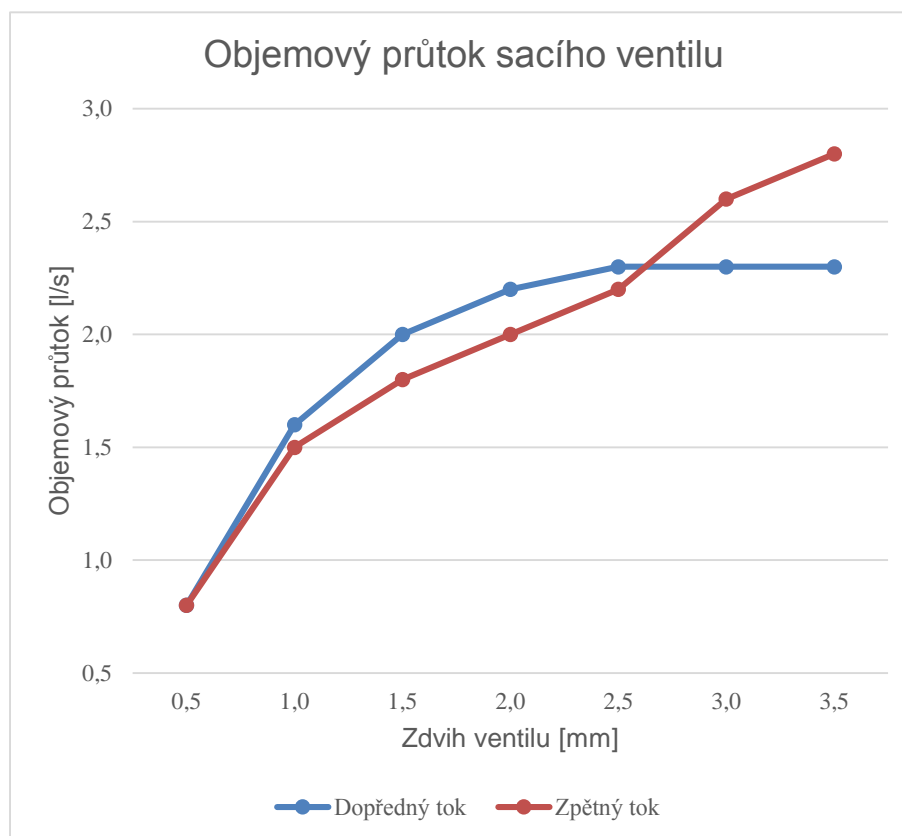
Obr. 52 Optimalizované zdvihové křivky ventilů

Přesné hodnoty otevření a zavření ventilů jsou v Tab. 7. K porovnání jsou uvedeny i hodnoty před optimalizací.

Tab. 7 Parametry optimalizovaných ventilových křivek

Parametr	Jednotka	Původní hodnoty	Optimalizované hodnoty
Zdvih ventilů	[mm]	2,8	2,8
Otevření výfukového ventilu	[deg]	96 za HÚ	103 za HÚ
Otevření sacího ventilu	[deg]	44 před HÚ	43 před HÚ
Zavření výfukového ventilu	[deg]	32 za HÚ	17 za HÚ
Zavření sacího ventilu	[deg]	68 za DÚ	60 za DÚ
Překrytí ventilů	[deg]	76	60

Při zjišťování objemového průtoku sacího ventilu bylo měření prováděno až do zdvihu 3,5 mm, přestože zdvih, který umožňuje vačková hřídel je 2,8 mm. Tímto měřením nad rámeček samotného zdvihu vačky se zjišťovala přínosnost pro lepší plnění válce v případě většího zdvihu ventilu. Závislost objemového průtoku pro sací ventil je znázorněna na Obr. 53.



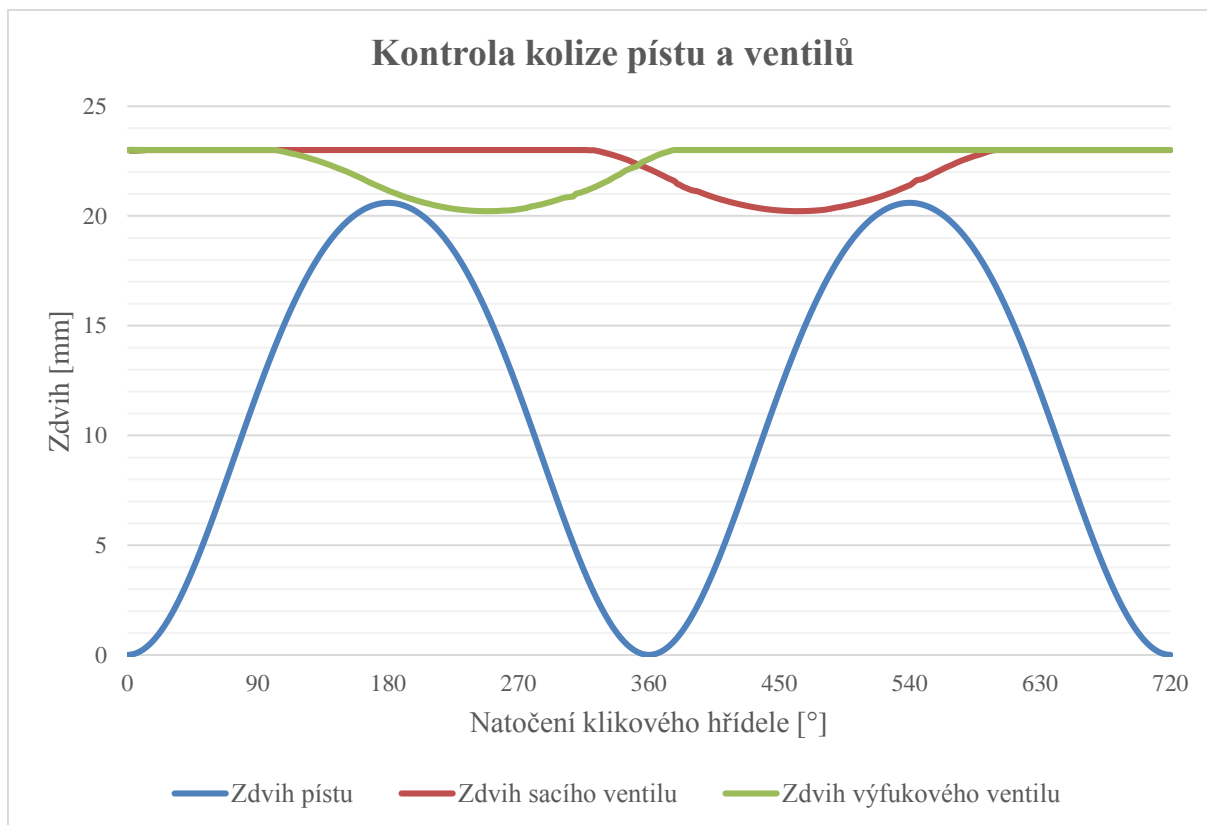
Obr. 53 Objemový průtok sacího ventilu

Z obrázku je patrné, že zdvih nad rámeček současných 2,8 mm nepřináší lepší plnění. Naopak zvětšení zdvihu by mohlo vést ke kolizi ventilu a pístu. Z tohoto důvodu jsem ponechal stejný zdvih.

Jelikož v této optimalizaci probíhalo zvětšení kompresního poměru (v důsledku snížení výšky TDC) a změna časování ventilů, provedl jsem kontrolu na kolizi pístu s ventily. Výchozí pozice umístění ventilů (vzdálenost mezi pístem v dolní úvrati a zavřeným ventilem v hlavě) byla stanovena podle rovnice (27) na hodnotu 23 mm.

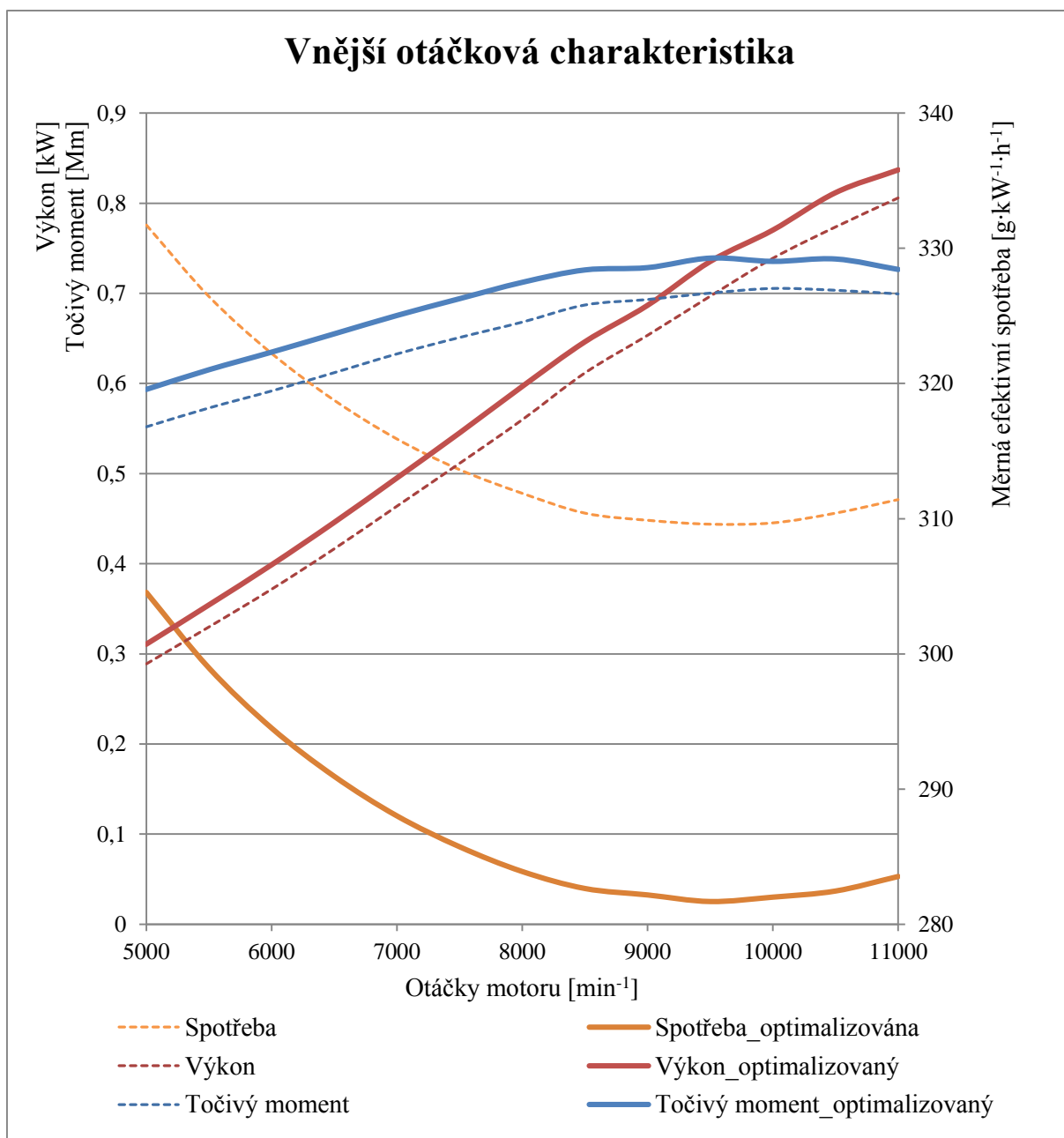
$$h_0 = Z + TDC + h_v = 20,6 \text{ mm} + 1 \text{ mm} + 1,4 \text{ mm} = 23 \text{ mm} \quad (27)$$

h_0	[mm]	Vzdálenost mezi pístem v DÚ a zavřeným ventilem v hlavě
Z	[mm]	Zdvih
TDC	[mm]	Vzdálenost mezi pístem v HÚ a dosedací plochou hlavy
h_v	[mm]	Vzdálenost mezi hranou dosedací plochy hlavy a uzavřeným ventilem



Obr. 54 Kontrola kolize pístu a ventilů

Z grafu je patrné, že ke kolizi nedojde. Po těchto úpravách a optimalizacích jsem zkonstruoval novou otáčkovou charakteristiku (viz Obr. 55), která znázorňuje současný progres.

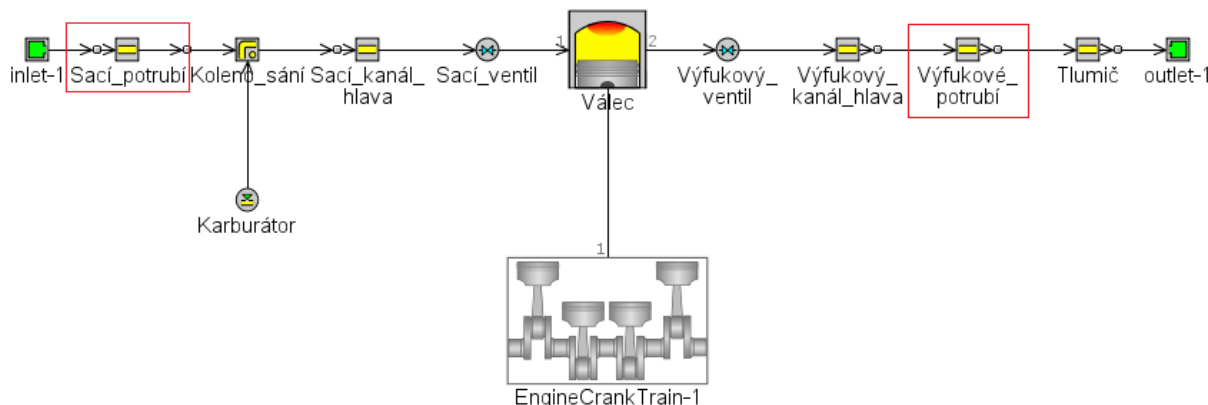


Obr. 55 Vnější otáčková charakteristika po první optimalizaci

Současná maximální hodnota výkonu je 837 W. Oproti původním 806 W došlo k navýšení o 32 W. Růst zaznamenal i točivý moment, který vzrostl o 0,04 Nm na 0,74 Nm. Podstatné zlepšení je vidět v poklesu měrné efektivní spotřeby, která v oblasti nejvyššího točivého momentu poklesla o 28 g·kW⁻¹·h⁻¹ na současných 282 g·kW⁻¹·h⁻¹. Podrobnější výsledky jsou v Příloze 2.

5.2.2 OPTIMALIZACE POTRUBÍ

Jako další v pořadí jsem prováděl optimalizaci sacího a výfukového potrubí. Jedná se o části, které jsou zvýrazněné na Obr. 56.



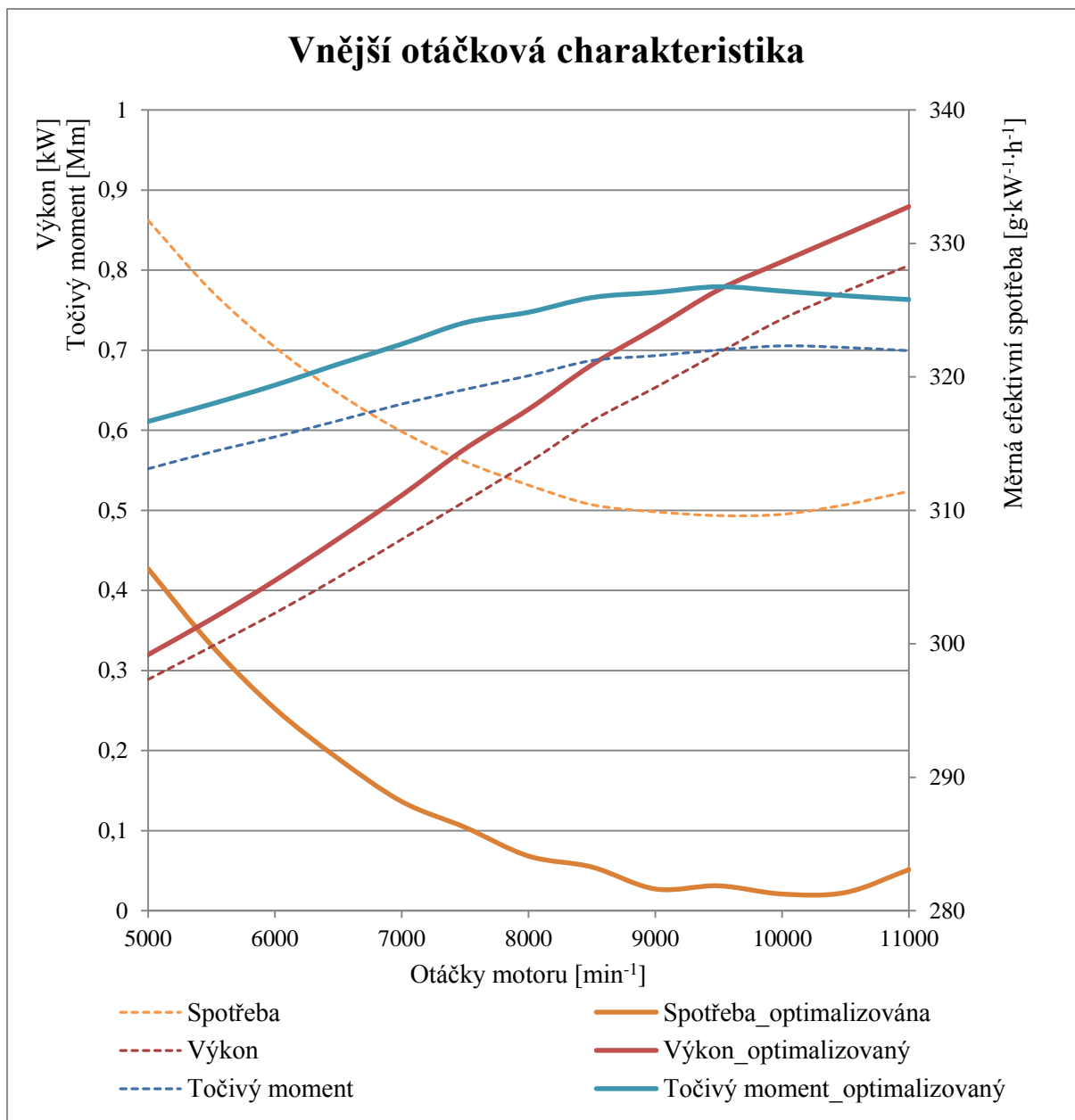
Obr. 56 Schéma termodynamického modelu pro optimalizaci potrubí

Na sací straně se jedná o potrubí před samotným karburátorem. Na výfukové straně je to potrubí spojující hlavu a tlumič. V obou případech se jedná o jednoduché potrubí a tedy jeho zkrácení nebo prodloužení nebude konstrukčně náročné. Z tohoto důvodu jsem se také rozhodl neupravovat kanály v hlavě motoru. Samotná hlava i spalovací prostor je již dobře navržený a průměry sedel pro ventily jsou vzhledem k prostoru maximální. Dalším důvodem je, že při změně rozměrů kanálů hlavy by došlo ke změně objemových průtoků a CF koeficientů, které byly naměřeny dříve. To by způsobilo, že porovnání následných optimalizací s původním návrhem by nebylo zcela objektivní.

Po provedené optimalizaci mi vyšla délka sacího potrubí 44 mm a výfukového 120 mm. S těmito hodnotami jsem sestrojil další vnější otáčkovou charakteristiku, viz Obr. 57 (podrobnější výsledky simulace v Příloze 3). Součástí charakteristiky je porovnání původního modelu a modelu po optimalizacích. Číselné porovnání je v tabulce níže.

Tab. 8 Číselné srovnání původního a optimalizovaného modelu

Parametr	Původní model		Optimalizovaný model		Procentuální zlepšení
	Hodnota	Otáčky [min^{-1}]	Hodnota	Otáčky [min^{-1}]	
Výkon [W]	806	11 000	879	11 000	9
Točivý moment [Nm]	0,705	10 000	0,779	10 000	10
Měrná efektivní spotřeba [$\text{g}\cdot\text{kW}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$]	310	10 000	281	10 000	9



Obr. 57 Srovnání vnějších otáčkových charakteristik

Z obrázku je patrné zlepšení výkonu a točivého momentu v celém rozsahu otáček. Za povšimnutí stojí i výrazné zlepšení měrné efektivní spotřeby.



ZÁVĚR

Rešeršní část práce pojednává o současných autonomních prostředcích a zaměřuje se zejména na jejich pohony. Porovnává jejich výhody a nevýhody a představuje konkrétní modely, které v současnosti existují. Součástí práce je porovnání spalovacího motoru a elektromotoru o stejném výkonu, jakožto dvou hlavních adeptů pro pohon autonomních prostředků. Z výpočtu je patrné, že elektromotor potřebuje na delší provozní dobu velké množství baterií a to se negativně podepisuje na celkové hmotnosti agregátu. Z tohoto důvodu byl jako hlavní pohon zvolen spalovací motor.

Jako hlavní předlohu pro tuto práci byl zakoupen maloobjemový zážehový motor OS MAX FS A-62V o zdvihovém objemu 10 cm^3 a výkonu 810 W při maximálních otáčkách ($11\,000 \text{ min}^{-1}$). Podstatná část praktické části se zabývá naměřením a získáním vstupních hodnot pro tvorbu termodynamického modelu v programu GT Power. Práce popisuje podrobný postup od měření základních rozměrů až po složitější parametry, například určení zdvihové křivky ventilů nebo měření objemových průtoků sacích a výfukových kanálů hlavy na profukovací stanici.

Výsledný model dosahuje maximálního výkonu 806 W při maximálních otáčkách. Lze tedy říci, že odpovídá reálnému modelu a je připraven pro optimalizaci. Samotná optimalizace byla rozdělena do dvou částí. To klade menší náročnost na výpočetní techniku a čas, ale zejména lépe zachycuje samotný progres a znázorňuje přínosnost jednotlivých úprav a změn. V první optimalizaci se zvýšil kompresní poměr z 1:9 na 1:10,5, upravila se dávka paliva a změnilo se časování ventilů. Díky těmto úpravám výkon při maximálních otáčkách vzrostl na 837 W a měrná efektivní spotřeba v oblasti maximálního momentu poklesla z $310 \text{ g}\cdot\text{kW}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ na současných $282 \text{ g}\cdot\text{kW}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$. Druhá optimalizace se zabývala délkou sacího a výfukového potrubí. V obou případech došlo k jejímu prodloužení. Tato úprava vedla k dalšímu navýšení výkonu v oblasti maximálních otáček na konečných 879 W a navýšení točivého momentu na $0,779 \text{ Nm}$. V oblasti maximálního momentu došlo i k drobnému poklesu měrné efektivní spotřeby.

Z optimalizací je patrné, že první úprava přispěla k významnému zlepšení měrné efektivní spotřeby, zatímco druhá spíše k navýšení výkonu a točivého momentu. V konečném srovnání s původní verzí obě optimalizace přinesly zlepšení výkonu a měrné efektivní spotřeby o 9 % a zvýšení točivého momentu o 10 %. Podobné zlepšení lze pozorovat v celém rozsahu otáček.

Na současné poznatky práce by se dalo navázat technologickou a ekonomickou částí, která by zkoumala finanční dopad na provedené změny. Přestože samotná práce tyto části nezahrnuje, při úpravách byla konstrukční náročnost úprav zohledněna. Z tohoto pohledu lze říci, že změny jsou pro výrobu reálné a tedy i práce je pro praxi přínosná. Závěrem lze konstatovat, že všechny zadané cíle diplomové práce byly splněny.



POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] PELIKAN, Daniel. OS MAX FS A-62V *Pelikandaniel* [online]. Pardubice [cit. 2020-03-02]. Dostupné z: <https://www.pelikandaniel.com/?sec=product&id=81746>
- [2] ABBASZADEHMOSAYEBI, G. a Lionel GANIPPA. Characterising Wiebe Equation for Heat Release Analysis based on Combustion Burn Factor (C.sub.i). *Fuel* [online]. Elsevier B.V, 2014, 119, 301 [cit. 2020-03-23]. ISSN 0016-2361.
- [3] Autonomní vozidlo. in: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-11-11]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Autonomn%C3%AD_vozidlo
- [4] The secret history of drones. in: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-11-11]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Bezpilotn%C3%AD_letadlo
- [5] SALE, Jonathan. The secret history of drones. *The Guardian* [online]. 10 Feb 2013 [cit. 2019-11-12]. Dostupné z: <https://www.theguardian.com/world/shortcuts/2013/feb/10/secret-history-of-drones-1916>
- [6] Vrtulník. in: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-11-11]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Vrtuln%C3%ADk>
- [7] Co je to dron a jaké může mít využití? *DRONI* [online]. 10.8.2016 [cit. 2019-11-13]. Dostupné z: <https://www.droni.cz/co-je-to-dron/>
- [8] Kvadroptéra nebo octoptéra? *DRONI* [online]. 10.8.2016 [cit. 2019-11-13]. Dostupné z: <https://www.droni.cz/kvadroptera-octoptera-dron/>
- [9] Elektrický pohon. in: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-11-14]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrick%C3%BD_pohon
- [10] NOVÁK, Jan. Motory pro drony. *Drone Web* [online]. červen 21, 2019 [cit. 2019-11-14]. Dostupné z: <http://www.droneweb.cz/konstrukce/item/310-drony-motory>
- [11] Lithium-železo-fosfátový akumulátor. in: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-11-16]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Lithium-%C5%BEelezo-fosf%C3%A1tov%C3%BD_akumul%C3%A1tor
- [12] Jak správně vybrat baterie do RC modelů. *RCprofi* [online]. [cit. 2019-11-16]. Dostupné z: <https://www.rcprofi.cz/poradna/jak-vybrat-baterie-do-rc-modelu>
- [13] Nikl-kadmiový akumulátor. in: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-11-18]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Nikl-kadmiov%C3%BD_akumul%C3%A1tor



- [14] Nikl-metal hydridový akumulátor. in: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-11-18]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Nikl-metal_hydridov%C3%BD_akumul%C3%A1tor
- [15] Lithium-iontový akumulátor. in: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-11-18]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Lithium-iontov%C3%BD_akumul%C3%A1tor
- [16] Přehledné informace o typech akumulátorů. *Astra* [online]. 28.11.2018 [cit. 2019-11-18]. Dostupné z: <https://www.astramodel.cz/cz/blog/prehledne-informace-o-typech-akumulatoru.html>
- [17] *Yeair* [online]. 2015 [cit. 2020-11-22]. Dostupné z: <https://yeair.de/overview/>
- [18] DJI Mavic 2 Pro. *Alza* [online]. [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <https://www.alza.cz/dji-mavic-pro-2-d5271090.htm>
- [19] Závodní dron Reely Green Racer. *Conrad* [online]. [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <https://www.conrad.cz/zavodni-dron-reely-green-racer-rtf-fpv-race.k1719347>
- [20] Dolphin jet. *Modelarína* [online]. [cit. 2019-11-24]. Dostupné z: <http://www.modelarina.cz/rc-letadlo-dolphin-jet-000-mm-tr-pro-812kg-turbinu-cervenobila-p-47522.html>
- [21] P100-RX. *Jetcat* [online]. [cit. 2019-11-24]. Dostupné z: https://www.jetcat.de/en/productdetails/produkte/jetcat/produkte/hobby/Engines/p100_rx
- [22] Proudový motor. in: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-11-24]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Proudov%C3%BD_motor
- [23] *JetQuad* [online]. [cit. 2019-11-25]. Dostupné z: <https://fusionflight.com/jetquad/>
- [24] Konstrukce raketových motorů. *Astramodel* [online]. 27.12.2017 [cit. 2019-11-25]. Dostupné z: <https://www.astramodel.cz/cz/blog/prehled-raketovych-motoru.html>
- [25] PÍŠTĚK, Václav a Josef ŠTĚTINA. *Výpočetní metody ve stavbě spalovacích motorů*. Brno: VUT v Brně, 1991, 129 s. ISBN 80-214-0368-3.
- [26] HROMÁDKO, Jan, Jiří HROMÁDKO, Vladimír HÖNING a Petr MILER. *Spalovací motory: komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol*. Praha: Grada, 2011. ISBN 978-80-247-3475-0.
- [27] HROMÁDKO, Jan. *Speciální spalovací motory a alternativní pohony: komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol*. Praha: Grada, 2012. ISBN 978-80-247-4455-1.
- [28] Wankel engine. *Barnard Microsystems* [online]. [cit. 2019-11-26]. Dostupné z: <https://barnardmicrosystems.com/UAV/engines/wankel.html>



- [29] MVVS-1D. *Scepterflight* [online]. March 1963 [cit. 2019-12-08]. Dostupné z: <http://sceptreflight.com/Model%20Engine%20Tests/MVVS-1D.html>
- [30] Fire Scout. in: *Wikipedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, Nov 2016 [cit. 2019-11-11]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:MQ-8C_Fire_Scout_flying_over_Webster_Field_Annex.jpg
- [31] Vauxhall-Rotary engine project. in: *Vauxpedianet* [online]. [cit. 2019-11-26]. Dostupné z: <http://vauxpedianet.uk2sitebuilder.com/vauxhall---rotary-engine-project>
- [32] OS MAX svíčka. in: *Topmodel* [online]. 2006- [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: https://www.topmodelcz.cz/index.php?&desktop=eshop&set_menu_eshop_id=1887
- [33] Letecké modelářské spalovací motory. *Rc-zoom* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://www.rc-zoom.cz/letecke-modelarske-spalovaci-motory-uvod/>
- [34] Teorie motoru 2 díl: čtyřtakt vs dvoutakt. in: *Motocykl-online* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <http://www.motocykl-online.cz/galerie/22816-teorie-motoru-2-dil-cyrtakt-vs-dvoutakt/16249>
- [35] Detonační motory. *Old engine model* [online]. [cit. 2019-12-08]. Dostupné z: <http://www.old-engine-model.com/cz/k268.detonacni-motory/>
- [36] HAROLD, G. 2 Stroke Engine vs. 4 Stroke Engine. in: *Diffzi* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://diffzi.com/2-stroke-engine-vs-4-stroke-engine/>
- [37] FOXY G2 střídavý motor. *Pelikandaniel* [online]. [cit. 2019-12-09]. Dostupné z: <https://www.pelikandaniel.com/?sec=product&id=72873>
- [38] O.S Carburetor 40K 46AXII. in: *Towerhobbies* [online]. [cit. 2020-04-09]. Dostupné z: <https://www.towerhobbies.com/cgi-bin/wti0001p?I=OSMG2535>
- [39] Hustota suchého vzduchu. *Tzbinfo* [online]. [cit. 2020-02-27]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/70-hustota-sucheho-vzduchu>
- [40] BEROUN, Stanislav. *Tepelné zatížení dílů v pístových spalovacích motorech* [online]. Liberec [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/149326/PZPtepzatizPSM.pdf?sequence=17&isAllowed=y>. Studijní texty. Technická univerzita v Liberci.
- [41] ŽÁK, Zdeněk, Miroslav EMRICH, Michal TAKÁTS a Jan MACEK. in-cylinder heat transfer modeling. *De gruyter* [online]. 2016, , 10 [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: <http://archive.sciendo.com/MECDC/mecdc.2016.14.issue-3/mecdc-2016-0009/mecdc-2016-0009.pdf>
- [42] Karburátor: Jak to funguje? *RC klub Šumperk* [online]. 2008 [cit. 2020-03-23]. Dostupné z: <https://rc-klub-sumperk.webnode.cz/products/karburatory-jak-to-funguje/>
- [43] Vačková hřídel FS120S3. in: *Modelcentrum* [online]. [cit. 2020-03-25]. Dostupné z: <https://www.modelcentrum.cz/produkt/Vackova-hridel-FS120S3-i143881>



- [44] Detonační motor MK17. in: *Rcmania* [online]. 29.4.2013 [cit. 2019-11-18]. Dostupné z: <http://www.rcmania.cz/viewtopic.php?f=8&t=57794>
- [45] LiFe. *Astra* [online]. 27.9.2015 [cit. 2019-11-16]. Dostupné z: <https://www.astramodel.cz/cz/slovník/life.html>
- [46] GT-Suite: Flow Theory Manual. *Gtisoft* [online]. Westmont USA, 2015, 2015 [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: [Www.gtisoft.com](http://www.gtisoft.com)

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

a	[-]	Podíl nespáleného paliva ve válci
A	[m ²]	Průtočná plocha ventilu
α	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]	Součinitel přestupu tepla
C, C_1, C_2	[-]	Konstanty
C_b	[mAh]	Kapacita baterie
CF	[-]	Koeficient průtoku
c_s	[m·s ⁻¹]	Střední pístová rychlost
D	[mm]	Vrtání válce
d	[m]	Charakteristický rozměr (vrtání válce)
D_{El}	[mm]	Průměr elektromotoru
d_v	[m]	Průměr v sedle ventilu
E_b	[Wh]	Energie baterie
ε	[-]	Kompresní poměr
h_0	[mm]	Vzdálenost mezi pístem v DÚ a zavřeným ventilem v hlavě
H_u	[J·kg ⁻¹]	Výhřevnost paliva
h_v	[mm]	Vzdálenost mezi hranou dosedací plochy hlavy a uzavřeným ventilem
I_{El80}	[A]	Proud při maximální účinnosti (nad 80 %)
I_{Elmax}	[A]	Maximální špičkový proud
I_{Elp}	[A]	Proud naprázdno (při 10 V)
L	[mm]	Zdvih
L_{El}	[mm]	Délka elektromotoru
m	[-]	Exponent stanovený experimentálně
m_b	[g]	Hmotnost baterie
m_B	[kg]	Množství paliva
$m_B(\varphi)$	[kg]	Hmotnost již shořelého paliva
m_{El}	[g]	Hmotnost elektromotoru
m_{El1h}	[g]	Hmotnost elektropohonu pro 1 hodinu provozu
m_{pe}	[g·kW ⁻¹ ·h ⁻¹]	Měrná efektivní spotřeba
M_{ph}	[g·h ⁻¹]	Hodinová spotřeba paliva
m_r	[g]	Hmotnost regulátoru
m_S	[g]	Hmotnost spalovacího motoru
m_{S1h}	[g]	Hmotnost agregátu a paliva na 1 hodinu provozu
\dot{m}_{skut}	[kg·s ⁻¹]	Skutečný hmotnostní průtok
\dot{m}_{teor}	[kg·s ⁻¹]	Teoretický hmotnostní průtok
m_{tl}	[g]	Hmotnost tlumiče
n	[-]	Počet válců
n_b	[-]	Počet baterií
n_{El}	[min ⁻¹ ·V ⁻¹]	Otáčky na 1 Volt
η_{CH}	[-]	Chemická účinnost
p	[Pa]	Tlak ve válci
p_0	[Pa]	Tlak ve válci bez hoření (při nuceném protočení)
P_{Elj}	[W]	Jmenovitý výkon elektromotoru
P_{Elmax}	[W]	Maximální výkon elektromotoru

P_{Elmax}	[W]	Maximální výkon elektromotoru (po dobu 180 s)
P_{Elmin}	[W]	Minimální výkon elektromotoru
p_s	[Pa]	Tlak ve válci na začátku komprese
P_{Smax}	[W]	Maximální výkon spalovacího motoru
Δp	[Pa]	Tlakový spád
Q	[W]	Teplo
Q_B	[J]	Teplo
ρ	[kg·m ⁻³]	Hustota vzduchu
R_{El}	[mΩ]	Vnitřní odpor elektromotoru
S	[m ²]	Plocha válce
t	[h]	Čas
T	[K]	Teplota ve válci
$t(\varphi)$	[s]	Čas, za který část paliva shořelo
T_∞	[K]	Teplota směsi ve válci
t_H	[s]	Celkový čas hoření
T_s	[K]	Teplota ve válci na začátku komprese
T_w	[K]	Teplota stěny válce
τ	[-]	Taktnost motoru
U_b	[V]	Napětí baterie
U_j	[V]	Jmenovité napětí
U_{max}	[V]	Maximální napětí
U_{min}	[V]	Minimální napětí
V	[m ³ ·s ⁻¹]	Naměřený objemový průtok
V_b	[cm ³]	Objem baterie
V_K	[mm ³]	Kompresní objem
V_P	[mm ³]	Objem spalovacího prostoru v hlavě
V_s	[m ³]	Objem ve válci na začátku komprese
V_Z	[cm ³]	Zdvihový objem
w	[m·s ⁻¹]	Střední rychlost proudění

BLDC	Bezkartáčový elektromotor
DÚ	Dolní úvrat'
HP	Z anglického <i>horse power</i> – výkon udáván v koních
HÚ	Horní úvrat'
max.	maximální
min.	minimální
Obr.	Obrázek
RC	Z anglického <i>radio controlled</i> – dálkové ovládání rádiovým signálem
RPM	Z anglického <i>revolutions per minute</i> – otáčky za minutu
Tab.	Tabulka
TDC	Vzdálenost mezi dosedací plochou hlavy válce a pístem v horní úvratí
tzv.	tak zvaný

SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1 První bezpilotní letoun Archibalda Lova v roce 1916 [5].....	9
Obr. 2 Bepilotní vrtulník americké armády MQ-8C Fire Scout [30]	10
Obr. 3 Rozdělení dronů podle počtu rotorů [8]	10
Obr. 4 Závodní dron Reely Green Racer [19]	12
Obr. 5 DJI Mavic 2 Pro [18].....	12
Obr. 6 Hybridní kvadroptéra Yeair [17].....	15
Obr. 7 Proudový motor P100 – RX [21]	15
Obr. 8 Schéma raketového pohonu [24].....	17
Obr. 9 Pracovní cyklus Wankelova motoru [31].....	18
Obr. 10 Wankelův motor NR 20EP [28]	19
Obr. 11 Jiskřivá svíčka pro zážehové motory [32].....	20
Obr. 12 Žhavicí svíčka pro zážehové motory [33]	21
Obr. 13 Detonační motor MVVS-1D [29].....	22
Obr. 14 Otáčková charakteristika detonačního motoru MVVS-1D [29].....	22
Obr. 15 Funkce dvoudobého motoru [34]	23
Obr. 16 Funkce čtyřdobého motoru [36].....	24
Obr. 17 OS MAX FS A-62V [1]	25
Obr. 18 Elektromotor FOXY G2 C4120-750 [37]	26
Obr. 19 Závislost hmotnosti na provozní době	28
Obr. 20 Zakoupený motor OS MAX FS A-62V	29
Obr. 21 Termodynamický model v GT Power	30
Obr. 22 Ikona Engine Crank Train	30
Obr. 23 Tabulka pro zadání hlavních rozměrů	31
Obr. 24 Ikona válce	32
Obr. 25 Porovnání modelů přestupu tepla [41]	35
Obr. 26 Tabulka pro zadání teplot	35
Obr. 27 Bezrozměrná funkce prohořívání paliva ve válci podle Vibeho pro různé „m“ [25]..	37
Obr. 28 Průběh hoření podle Vibeho pro různé exponenty "m" [25].....	38
Obr. 29 Vačková hřídel [43].....	38
Obr. 30 Ikona ventilu.....	39
Obr. 31 Vytištěné kolo	39
Obr. 32 Měřicí aparatura pro určení zdvihové křivky	40
Obr. 33 Detailní pohled umístění tyče.....	41
Obr. 34 Zdvihové profily ventilů.....	41
Obr. 35 Přípravek na profukovací stanici	42
Obr. 36 Přípravek na profukovací stanici - pohled zepředu	43
Obr. 37 Přípravek na profukovací stanici	44
Obr. 38 Objemový průtok sacího ventilu	45
Obr. 39 Objemový průtok výfukového ventilu	45
Obr. 40 Schéma 1D modelu hlavy v GT Poweru	47
Obr. 41 Vložené parametry pro výpočet CF koeficientu.....	48
Obr. 42 Ikony potrubí	49
Obr. 43 Ikona pro přívod paliva	49
Obr. 44 Dvoujehlový karburátor [38].....	49
Obr. 45 Nastavení dodávky paliva	50



Obr. 46 Ikony pro okrajové podmínky	50
Obr. 47 Hodnoty pro vstupní okrajové podmínky	50
Obr. 48 Vnější otáčková charakteristika	51
Obr. 49 Závislost tepelné účinnosti na kompresním poměru	52
Obr. 50 Ikona optimalizace	54
Obr. 51 Tabulka pro zadání optimalizovaných parametrů	54
Obr. 52 Optimalizované zdvihové křivky ventilů	55
Obr. 53 Objemový průtok sacího ventilu	56
Obr. 54 Kontrola kolize pístu a ventilů	57
Obr. 55 Vnější otáčková charakteristika po první optimalizaci	58
Obr. 56 Schéma termodynamického modelu pro optimalizaci potrubí	59
Obr. 57 Srovnání vnějších otáčkových charakteristik	60



SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Porovnání hlavních parametrů baterií	14
Tab. 2 Základní naměřené hodnoty pro GT Power	30
Tab. 3 Hodnoty parametrů pro různá paliva.....	38
Tab. 4 Parametry ventilových křivek	42
Tab. 5 Závislost hustoty vzduchu na teplotě	46
Tab. 6 Hodnoty CF koeficientů	48
Tab. 7 Parametry optimalizovaných ventilových křivek.....	55
Tab. 8 Číselné srovnání původního a optimalizovaného modelu.....	59



SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Podrobnější výsledky termodynamického modelu bez optimalizace pro celé otáčkové spektrum.
- Příloha 2 Podrobnější výsledky termodynamického modelu po první optimalizaci pro celé otáčkové spektrum.
- Příloha 3 Podrobnější výsledky termodynamického modelu po druhé optimalizaci pro celé otáčkové spektrum.

Příloha 1

Engine Speed (cycle average) [RPM]	5000	5500	6000	6500	7000	7500	8000	8500	9000	9500	10000	10500	11000
Brake Torque [N-m]	0.552	0.573	0.592	0.612	0.633	0.651	0.668	0.687	0.693	0.700	0.706	0.704	0.699
Brake Power [kW]	0.289	0.330	0.372	0.417	0.464	0.511	0.560	0.612	0.653	0.697	0.739	0.774	0.806
BSFC - Brake Specific Fuel Consumption, Cyl [g/kW-h]	332	326	322	319	316	314	312	310	310	310	310	310	311
IMEP720 - Net Indicated Mean Effective Pressure [bar]	7.79	8.09	8.36	8.64	8.94	9.20	9.45	9.73	9.84	9.96	10.1	10.1	10.1
BMEP - Brake Mean Effective Pressure [bar]	6.86	7.12	7.35	7.61	7.86	8.09	8.30	8.54	8.62	8.70	8.77	8.74	8.69
PMEP - Pumping Mean Effective Pressure [bar]	-0.141	-0.161	-0.183	-0.205	-0.229	-0.253	-0.277	-0.301	-0.325	-0.350	-0.373	-0.400	-0.424
FMEP - Friction Mean Effective Pressure [bar]	0.931	0.966	1.00	1.04	1.08	1.11	1.15	1.19	1.22	1.26	1.30	1.33	1.36
Volumetric Efficiency, Air [fraction]	0.716	0.731	0.745	0.763	0.781	0.798	0.815	0.834	0.840	0.848	0.854	0.854	0.851
Air Flow Rate [kg/h]	1.28	1.44	1.60	1.77	1.95	2.14	2.33	2.53	2.70	2.88	3.05	3.20	3.35
Air-Fuel Ratio (Inducted Air/Total Fuel)	13.3	13.3	13.3	13.3	13.3	13.3	13.3	13.3	13.3	13.3	13.3	13.3	13.3

Příloha 2

Engine Speed (cycle average) [RPM]	5000	5500	6000	6500	7000	7500	8000	8500	9000	9500	10000	10500	11000
Brake Torque [N-m]	0.593	0.615	0.635	0.655	0.676	0.694	0.712	0.726	0.729	0.739	0.736	0.738	0.727
Brake Power [kW]	0.311	0.354	0.399	0.446	0.495	0.545	0.597	0.646	0.687	0.735	0.770	0.812	0.837
BSFC - Brake Specific Fuel Consumption, Cyl [g/kW-h]	305	299	295	291	288	286	284	283	282	282	282	282	284
IMEP720 - Net Indicated Mean Effective Pressure [bar]	8.34	8.65	8.93	9.21	9.51	9.77	10.0	10.2	10.3	10.5	10.5	10.5	10.4
BMEP - Brake Mean Effective Pressure [bar]	7.38	7.65	7.89	8.14	8.39	8.63	8.85	9.02	9.05	9.19	9.14	9.17	9.03
PMEP - Pumping Mean Effective Pressure [bar]	-0.140	-0.159	-0.180	-0.203	-0.226	-0.250	-0.274	-0.298	-0.323	-0.348	-0.372	-0.399	-0.423
FMEP - Friction Mean Effective Pressure [bar]	0.965	1.00	1.04	1.07	1.11	1.15	1.19	1.22	1.26	1.29	1.33	1.36	1.39
Volumetric Efficiency, Air [fraction]	0.749	0.762	0.775	0.790	0.806	0.822	0.838	0.850	0.852	0.862	0.859	0.864	0.853
Air Flow Rate [kg/h]	1.34	1.50	1.66	1.83	2.02	2.20	2.39	2.58	2.74	2.93	3.07	3.24	3.35
Air-Fuel Ratio (Inducted Air/Total Fuel)	14.1	14.1	14.1	14.1	14.1	14.1	14.1	14.1	14.1	14.1	14.1	14.1	14.1

Příloha 3

Engine Speed (cycle average) [RPM]	5000	5500	6000	6500	7000	7500	8000	8500	9000	9500	10000	10500	11000
Brake Torque [N-m]	0.611	0.633	0.656	0.683	0.708	0.734	0.747	0.766	0.772	0.779	0.774	0.768	0.763
Brake Power [kW]	0.320	0.364	0.412	0.465	0.519	0.577	0.626	0.682	0.728	0.775	0.810	0.845	0.879
BSFC - Brake Specific Fuel Consumption, Cyl [g/kW-h]	306	300	295	291	288	286	284	283	282	282	281	281	283
IMEP720 - Net Indicated Mean Effective Pressure [bar]	8.56	8.87	9.20	9.56	9.91	10.3	10.5	10.8	10.9	11.0	11.0	10.9	10.9
BMEP - Brake Mean Effective Pressure [bar]	7.59	7.86	8.16	8.48	8.79	9.13	9.29	9.52	9.60	9.69	9.62	9.55	9.49
PMEP - Pumping Mean Effective Pressure [bar]	-0.163	-0.189	-0.214	-0.238	-0.262	-0.286	-0.308	-0.328	-0.343	-0.361	-0.379	-0.400	-0.427
FMEP - Friction Mean Effective Pressure [bar]	0.970	1.01	1.04	1.08	1.12	1.16	1.20	1.23	1.27	1.30	1.34	1.37	1.40
Volumetric Efficiency, Air [fraction]	0.773	0.786	0.802	0.824	0.845	0.871	0.880	0.899	0.901	0.910	0.902	0.895	0.895
Air Flow Rate [kg/h]	1.38	1.54	1.72	1.91	2.11	2.33	2.51	2.73	2.90	3.09	3.22	3.36	3.52
Air-Fuel Ratio (Inducted Air/Total Fuel)	14.1	14.1	14.1	14.1	14.1	14.1	14.1	14.1	14.1	14.1	14.1	14.1	14.1