



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav konstruování a částí strojů

**Návrh poloautomatického tlumiče hluku
výfuku pro motocykl**

**Design of a Semi-automatic muffler
for a motorcycle**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2021

Radek JECH

Studijní program: B2342 TEORETICKÝ ZÁKLAD STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Studijní obor: 2301R000 Studijní program je bezoborový

Vedoucí práce: Ing. Jaroslav Kříčka, Ph.D.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem: „Návrh poloautomatického tlumiče hluku výfuku pro motocykl“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jaroslava Kříčky Ph.D. s použitím literatury uvedené v seznamu na konci této bakalářské práce.

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval všem, kdo mě při tvorbě této práce podpořili a poskytovali cenné rady a pohledy ohledně této problematiky.

Anotační list

- Jméno autora:** Radek Jech
- Název bakalářské práce:** Návrh poloautomatického tlumiče hluku výfuku pro motocykl
- Title:** Design of a semi-automatic muffler for motorcycle
- Akademický rok:** 2020/21
- Studijní program:** Teoretický základ strojního inženýrství
- Obor studia:** Bezoborový
- Ústav:** Ú 12113 Ústav konstruování a části strojů
- Vedoucí bakalářské práce:** Ing. Jaroslav Kříčka Ph.D
- Bibliografické údaje:** počet stran: 44
počet obrázků: 29
počet příloh: 10
- Klíčová slova:** tlumič, výfukový systém, motocykl
- Keywords:** muffler, exhaust system, motorcycle

Anotace:

Rešeršní část této práce se zabývá obecnou teorií výfukových soustav se zaměřením na tlumiče a tlumící mechanismy. Ze znalostí této problematiky, z dílčích výpočtů a konstruktérských zkušeností vychází model výfukového potrubí pro předlohový motocykl s důrazem na tlumič a jeho poloautomatické řešení hluku.

Abstract:

A research part of this thesis deals with a general theory of exhaust systems focused on mufflers and their mechanisms. Based on knowledge of this issue, particular calculations and designer's experiences, a model of an exhaust pipe with emphasis on muffler and his semi-automatic solution for a concept motorcycle is created.

Seznam použitých značek a symbolů

Značka	Jednotka	Název veličiny
T	[s]	perioda
F	[Hz]	frekvence
L_p	[dB]	hladina akustického tlaku
c	[m/s]	rychlost zvuku
D	[mm]	průměr pístu
d	[mm]	průměr výfukového kanálku
c_s	[m/s]	pístová rychlost
V_g	[m/s]	rychlost spalin
κ	[-]	Poissonova konstanta
T	[K]	termodynamická teplota
θ_t	[°]	natočení klikové hřídele
L	[mm]	délka výfukového potrubí

Obsah

Úvod.....	- 1 -
1 Teoretická část.....	- 2 -
1.1 Cíle práce.....	- 2 -
1.2 Výfukový systém spalovacího motoru	- 2 -
1.3 Obecná stavba výfuku	- 3 -
1.3.1 Sběrné potrubí	- 3 -
1.3.2 Spojovací potrubí	- 4 -
1.3.3 Lambda sonda	- 5 -
1.3.4 Katalyzátor	- 5 -
1.3.5 Tlumicí prvky a jejich typy	- 6 -
1.3.6 Koncovka	- 9 -
1.4 Typy výfuků u motocyklů	- 9 -
1.5 Materiály.....	- 11 -
1.5.1 Tlumič	- 12 -
1.5.2 Spojovací potrubí	- 12 -
1.5.3 Spojovací potrubí – kolena.....	- 13 -
1.6 Výroba	- 13 -
1.7 Akustika.....	- 13 -
1.7.1 Zvuk	- 14 -
1.7.2 Hluk.....	- 14 -
1.7.3 Amplituda.....	- 14 -
1.7.4 Perioda.....	- 14 -
1.7.5 Frekvence	- 14 -
1.7.6 Vlnová délka	- 14 -
1.7.7 Akustický tlak	- 14 -
1.7.8 Akustický výkon	- 14 -
1.7.9 Hladina akustického tlaku	- 15 -
1.7.10 Rychlost šíření zvuku v plynech	- 15 -
1.8 Současné řešení poloautomatických tlumičů.....	- 16 -
2 Praktická část.....	- 18 -
2.1 Předpoklady	- 18 -

2.2	Předlohový motocykl.....	- 18 -
2.3	Analytické a návrhové výpočty	- 19 -
2.3.1	Rychlost pístu.....	- 19 -
2.3.2	Rychlost spalin	- 19 -
2.3.3	Rychlost zvuku v plynech – spalinách	- 20 -
2.3.4	Délka výfukového potrubí.....	- 21 -
2.4	Konstrukce.....	- 23 -
2.4.1	Kolena	- 23 -
2.4.2	Spojovací potrubí	- 24 -
2.4.3	Tlumič	- 25 -
2.5	Postup výroby a konstrukce.....	- 28 -
	Závěr	- 30 -
	Použité zdroje.....	- 32 -
	Seznam obrázků	- 34 -
	Seznam grafů.....	- 35 -
	Seznam tabulek	- 36 -

Úvod

V poslední době je obecně znečišťování životního prostředí žhavým tématem. Mezi to se řadí i hlukové znečištění, které často nepřímo a nevědomky ovlivňuje zdraví obyvatel. Následky ale mohou být pozdějšího a o to vážnějšího charakteru. Nejde jen o problém lidského zdraví, ale i obecně o životní prostředí a živočichy kolem nás.

Nejčastěji bývá lidský organismus ovlivňován právě ze silniční dopravy, protože zejména ve velkých městech a jejich centrech dochází k největšímu vystavení nebezpečných hladin hluku. Poblíž velkých měst bývají taktéž letecké oblasti, které svou nadměrnou dopravou nijak nesnižují závažnost problematiky hlukového znečištění. Následky těchto životu nebezpečných hladin hluku bývají časem závažné. Jedná se především o psychické a fyzické obtěžování, následkem kterého dochází k rušivému spánku, který může vést až k negativním účinkům na kardiovaskulární a metabolický systém. Následky u dětí jsou samozřejmě závažnější, protože dochází k ovlivňování základních kognitivních funkcí jako pozornost, myšlení, řeč aj. Právě z těchto důvodů snižují národní instituce hlukové hladiny pro ochranu svých obyvatel. [1]

Ačkoli zastávají motocykly minoritní část dopravních prostředků, které hlukově znečišťují okolní prostředí, hlukové normy a restrikce se vztahují i na ně. Především se vzrůstající oblibou tohoto koníčku je zapotřebí limitovat zvukový projev těchto jednostopých vozidel. Často jejich majitelé nedodržují tato právem daná omezení a obtěžují svým hlučným motocyklem své okolí. Na druhou stranu je právě zvukový doprovod jedním z faktorů plnohodnotného prožitku z motocyklu a jízdy samotné.

A tímto by rád autor vznesl návrh poloautomatického tlumiče výfuku motocyklu, který by vyšel vstříc oběma stranám, jak pro ochranu prostředí před nadměrným hlukem, tak pro zážitek majitelů motocyklů. Předtím ale bude v této práci představena teorie výfuků, obsahující všechny části a jejich funkce se zaměřením na tlumiče, dále materiály a výroba těchto výfukových systémů.

1 Teoretická část

1.1 Cíle práce

V úvodním slovu byl představen pohled na omezující hluk, hlukové normy a jejich řešení v dopravních prostředcích. Autor je sám velký motocyklový nadšenec, a proto dlouze přemýšlel, jak získat plnohodnotný prožitek z jízdy, aniž by rušil své okolí nadměrným hlukem. Z toho vznikl konstrukční návrh poloautomatického tlumiče hluku do výfuku motocyklu. Ten je zkonstruován ve dvou polohách, ve kterých dosahuje hlučností rozdílných hodnot, zjednodušeně se jedná o dvě nastavení, na hlasitý režim a tlumený režim. Pro tento návrh je nejdříve zapotřebí si představit a pochopit současné řešení výfukových soustav s důrazem na tlumiče.

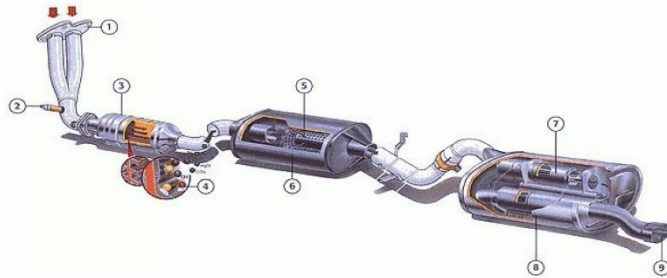
První část této práce je věnovaná teorii výfukových soustav s důrazem na tlumiče, používané materiály a nakonec výrobu motocyklových výfuků. Na základě této teorie bude představen 3D návrh výfukového potrubí s tlumičem obsahující jeden z možných mechanismů zajišťující dva režimy tlumení.

1.2 Výfukový systém spalovacího motoru

Smyslem výfukové soustavy jakékoli spalovací jednotky odvod škodlivých spalin ze spalovací komory do vzdálenějších míst takovým způsobem, aby uživatel nebyl vystaven nepohodlí nebo nebezpečí. Se zrychlujícím se vývojem spalovacích motorů a jeho využitím se začaly objevovat narůstající požadavky ohledně výfukového systému. Mimo jiné se zjistilo, že se správnou konstrukcí výfukových potrubí lze dosáhnout lepších výkonových a momentových vlastností motoru. S rostoucí motoristickou zálibou se stále zpřísňují hlukové i emisní normy. Proto je současné konstruování jakéhokoli výfuku náročný a zdoluhavý proces, při kterém tým konstruktérů musí vzít v potaz celé spalovací ústrojí, výsledný požadovaný výkon onoho vozidla, rázové impulsy od měnicích se otáček motoru, teplotní vliv, legislativní požadavky na hlučnost a emise, design atd.

1.3 Obecná stavba výfuku

Výfukový systém, obecně výfuk, se skládá z několika částí, z nichž každá mají svou nezanedbatelnou úlohu. Všechny tyto části prošly dlouholetým vývojem. Zároveň obory spojené s touto problematikou se neustále vyvíjí a dochází k novým zjištěním. Všechny tyto nové poznatky podpořily vývoj výfuků až do dnešní podoby podle nynějších požadavků. Typický výfukový systém se skládá z následujících základních částí: výfukové svody/sběrné



Obrázek 1 Výfukový systém osobního vozidla [2]

potrubí, lambda sonda, spojovací potrubí, katalyzátor (DPF-filtr pevných částic), tlumiče a koncovky. Všechny popsané části jsou viditelné na obrázku č. 1. [2]

1.3.1 Sběrné potrubí

Sběrné potrubí slouží k prvotnímu odvodu spalin ze spalovacího prostoru do dalších částí výfukového systému nejčastěji do katalyzátoru nebo do výfukového potrubí. Tyto svody jsou uchyceny přímo na hlavu motoru a spojují dva a více výfukových kanálů válců do jednoho potrubí. Jestliže je toto potrubí vyrobeno z více větví, je zapotřebí, aby tyto větve měly stejnou délku a aby neobsahovaly žádná ostrá kolena, ohyby či razantní změny v průřezích, kde jinak dochází k místním ztrátám. Sběrné potrubí se vyrábí dvěma způsoby: jako odlitek z šedé litiny nebo ohybem a svařováním nerezové žáruvzdorné oceli. Na obrázku č. 2 je zobrazeno sběrné potrubí z litiny.

Výroba svoru ve formě odlitku má několik výhod. Odlitky se využívají v sériové výrobě, jelikož se jedná o jednoduchý a levný proces. Šedá litina má dobré slévárenské vlastnosti a je odolná proti vibracím a oxidaci. Nicméně nevýhodou může být vyšší hmotnost a větší odvod tepla, protože je potřeba zahřát na provozní teplotu katalyzátor, který za nižších teplot neplní zcela svou úlohu ve výfukovém systému.



Obrázek 2 Litinové sběrné potrubí [25]

Druhý postup výroby sběrného potrubí je vhodné zohýbání a svařování nerezové žáruvzdorné ocelové trubky. Tento typ je vhodný pro malosériovou či zakázkovou výrobu. Konkrétně se využívá pro takzvané stavby (*custom*) motocyklů, na kterých jsou svody vnímány i jako designový prvek.

Pro své specifické vlastnosti se tento typ potrubí dnes využívá i ve všedních vozidlech. Značné výhody těchto svodů se vyznačují především v nízké hmotnosti a malém odvodu tepla. Dále se tyto trubky konstruují do ideálního tvaru a délky pro nejkvalitnější odvod spalin a pulsů z motoru. Více větví se pak spojuje do jednotných trubek, které musí být opět navrženy tak, aby bylo zaručeno proudění výfukové vlny ven z motoru a nevracely se tyto vlny zpět k ostatním válcům.

1.3.2 Spojovací potrubí

Spojovací potrubí, jak je z jeho názvu patrné, spojuje jednotlivé části celého výfukového systému: sběrné potrubí, katalyzátor, tlumiče a další. Pro toto potrubí je důležité dodržet správně vypočtený průměr, který neovlivní požadované vlastnosti spalovací jednotky. Pokud by byl průměr větší, než je dovolené, může dojít k redukci momentu při nižších otáčkách. Naopak při menším průměru může dojít k redukci výkonu ve vyšších otáčkách. Po správnou funkčnost nejen tohoto potrubí je zapotřebí respektovat vnitřní



Obrázek 3 Ocelové sběrné potrubí [7]

podmínky, kterými jsou teplotní výkyvy, rázové vlny a chemická odolnost proti spalinám. Zároveň je potřeba dodržet požadované mechanické vlastnosti. Dále se konstruktéři musí potýkat se správným a vhodným vedením tohoto potrubí od prostoru motoru do míst neohrožujících posádku onoho vozidla. Nejen tvar a průměr spojovacího potrubí, ale i volba materiálu a podmínky využití musí být navrženy v souladu s prvotními návrhy. Příklad spojovacího potrubí je zobrazen na obrázku č. 3.

1.3.3 Lambda sonda

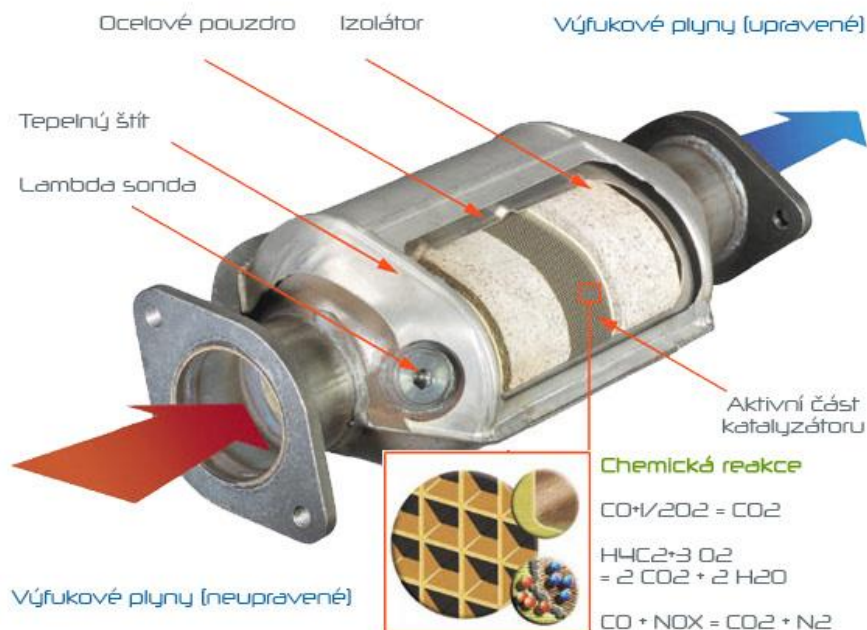
Tato sonda umístěná před katalyzátorem snímá obsah zbytkového kyslíku ve výfukových plynech a posílá signál do regulačního členu vstřikovací jednotky. Tento zpětnovazební signál zaručuje ideální směšovací poměr a tím i dokonalejší spalování a funkčnost katalyzátoru. Jestliže tato sonda vrací hodnotu na příklad 800-900 mV vůči předepsané hodnotě 500mV $\Rightarrow \lambda=1$, je obsah zbytkového kyslíku ve spalinách nízký. V tu chvíli mluvíme o bohaté směsi a řídicí jednotka detekuje $\lambda < 1$, na tento podnět reaguje kratším otevřením vstřikovacích ventilů. Pokud řídicí jednotka zjistí hodnotu $\lambda > 1$, směs je tzv. chudá a napětí sondy se pohybuje kolem 300-100 mV, jednotka nechává vstřikovací ventily otevřené déle do doby, než je směs tzv. stechiometrická a součinitel přebytku vzduchu λ bude roven 1. [3]

1.3.4 Katalyzátor

V posledních létech je téma snižování emisí jedno z nejžhavějších. Při narůstající poptávce po automobilech a osobní dopravě vůbec dochází k nadměrnému úniku zdraví škodlivých oxidů dusíku (NO_x), prachových částic (PM_x), oxidu uhelnatého (CO) a mnoha dalších. Ačkoli myšlenka katalytického konvertoru neboli katalyzátoru pochází již z první poloviny minulého století, patent pro spalovací motory byl vydán až v 50. letech minulého století a sériové zařazení bylo prvně nařízeno až v 70. letech na americkém automobilovém trhu. V té době se jednalo o tzv. dvoucestný katalyzátor, který měl za úkol sloučit kyslík s oxidem uhelnatým a nespálenými uhlovodíky a vyprodukovat oxid uhličitý (CO_2) a vodu (H_2O). [4]

Hlavním úkolem katalyzátoru je právě přeměna uhlovodíků, oxidu uhelnatého a oxidů dusíku, které vznikají při spalování fosilních paliv, na méně škodlivé látky jako vodní páru, oxid uhličitý a dusík. Podmínkou pro použití katalyzátoru je bezolovnatý benzín, protože jeho olovnatá složka ničí účinky vzácných kovů obsažené v katalyzátoru. Řez katalyzátorem je zobrazen na obrázku č. 4.

Pro automobilní dopravu má činná část katalyzátoru vysoce pórovitou strukturu, která se podobá včelímu plástu a poskytuje tak co největší povrch. Tato pórovitá struktura je vyrobena z keramického nebo ocelového monolitu. Na této tzv. reakční části katalyzátoru se nachází směs platiny a rhodia, které při vyšších teplotách kolem 300-600 °C reagují s nežádoucími látkami. Probíhají zde chemické reakce jako redukce a oxidace. V první části působí platino-rhodiové činidlo, které štěpí NO_x na N_2 a O_2 . Ve druhé platino-paládiové části se slučují O_2 , HC a CO a vzniká tím oxid uhličitý a voda. [3] [4].



Obrázek 4 Řez a popis katalyzátoru včetně lambdy sondy [5]

1.3.5 Tlumící prvky a jejich typy

Jednou z úloh výfukové soustavy je taktéž tlumení hluku, který vznikne při nepravidelném proudění výfukových plynů ze spalovací komory. Tento hluk by neměl překročit dovolené úrovně stanovené určitými institucemi. Hladina hluku měřící se v decibelech bude pro další seznámení se s touto problematikou mírou hlučnosti. Podle nařízení vlády ČR č. 272/2011 Sb. o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací pro venkovní hluk kolem obytných domů se míra hluku může pohybovat mezi 40 a 70 dB v závislosti na dni či noci včetně korekcí. Dále jsou pro příklad uvedené některé míry hlučnosti: pro silniční dopravu je to 60 dB, pro železniční dopravu 65 dB. Níže na obrázku č. 5 jsou pro srovnání znázorněny vnější mezní hladiny hluku u dopravních prostředků. [6]

Návrh samotného tlumiče je taktéž komplexní záležitostí. Je potřeba zohledňovat mnoho aspektů. Nesmí se přesáhnout hlukové normy, musí se zamezit zpětným rázům a tlakům ve výfuku, které by snižovaly výkon motoru samotného a dále dodržet ostatní designová a zvuková hlediska.

motorové kolo	70 dB (A)
moped, malý motocykl do 50 cm ³	72 dB (A)
malý motocykl	75 dB (A)
motocykl do 80 cm ³ do 175 cm ³ nad 175 cm ³	75 dB (A) 77 dB (A) 80 dB (A)
osobní automobil se zážehovým nebo vznětovým motorem	74 dB (A)
se vznětovým motorem s přímým vstřikováním	75 dB (A)
autobus, nákladní automobil do 3,5 t se vznětovým motorem s přímým vstřikováním	76 dB (A) 77 dB (A)
nákladní automobil do 75 kW	77 dB (A)
autobus, nákladní automobil do 150 kW nad 150 kW	78 dB (A) 80 dB (A)

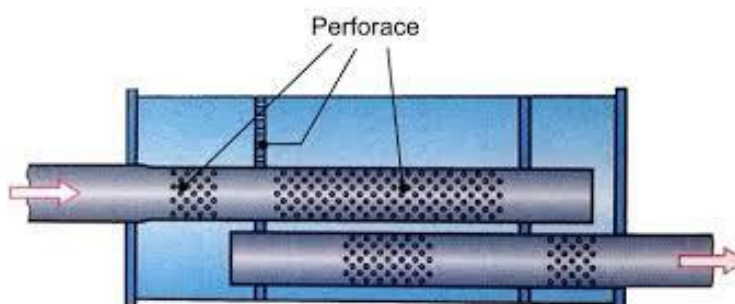
Tabulka 1 Vnější mezní hluk motorových vozidel [3]

Existují dva základní způsoby tlumení, a sice reflexí a absorpcí. Každý typ tlumiče zastává nějaký způsob tlumení a tyto typy jsou popsány níže. [3]

1.3.5.1 Reflexní tlumení

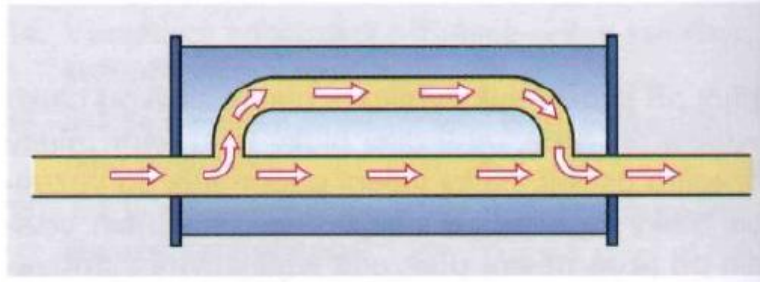
Tento typ tlumení je zaručen kladením překážek do cesty zvukovým vlnám. Tyto vlny se díky překážkám odrážejí a vracejí, tím dochází k tzv. interferenci vln neboli částečnému vyrušení oněch vln. Typické zobrazení reflexního tlumiče je viditelné na obrázku č. 5.

Konstrukce reflexního tlumiče zastupující první způsob reflexního tlumení, obsahuje více komor různých velikostí spojené na obou stranách perforovanými trubkami. Tyto trubky mohou být rozdílných délek. Všechny tyto vlastnosti zaručují odrazení zvukových vln a výsledné tlumení. Tento typ tlumiče je vhodný pro střední a nižší frekvence.



Obrázek 5 Reflexní tlumič [7]

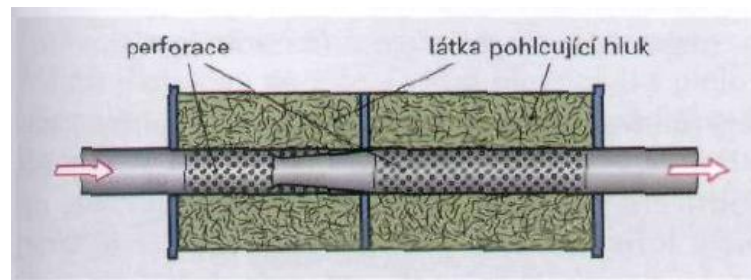
Rezonanční tlumič je druhým typem reflexního tlumení, který využívá rozdílných průměrů a délek větví trubek v tlumiči. Tento typ tlumiče pracuje na bázi rezonance. Zvukové vlny musí v odbočovací větví urazit delší dráhu v rozdílném průměru a při návratu do hlavní rezonanční větve dochází k vzájemnému narušení, interferenci, jak je patrné na obrázku č. 6.



Obrázek 6 Rezonanční tlumič [3]

1.3.5.2 Absorpční tlumení

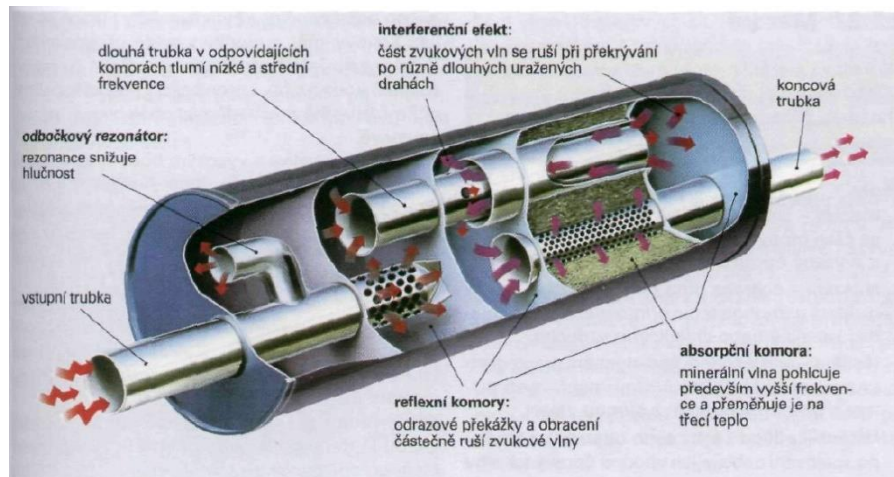
Zvukové vlny ztrácejí svojí energii, jak procházejí porézním médiem, které se nachází mezi perforací a vnější částí tlumiče. Energie hluku je prakticky tímto přeměněna od tření na teplo. Proto je tento typ tlumiče navržen na větší teploty. Zmíněné medium, které pohlcuje zvukovou energii, je nejčastěji z minerálních vat či skelných vláken. Zvukové vlny proudí od motoru a pronikají v tomto tlumiči skrz perforovanou trubku umístěnou přes dvě či více komor do absorpčního materiálu, který pohlcuje vlny vyšší frekvence, jak je zobrazeno na obrázku č. 7. Z popisu a z obrázku je taktéž patrné, že u tohoto typu tlumiče prochází výfukové spaliny bez sebevětších odporů.



Obrázek 7 Absorpční tlumič [3]

1.3.5.3 Kombinované tlumení

Vzhledem k rozdílným oblastem použití obou typů tlumičů, reflexní pro nízké a absorpční pro vysoké frekvence, se pro ideální tlumení použijí nejčastěji oba typy najednou. Tento typ se nazývá kombinovaný reflexně – absorpční tlumič. Tento tlumič se skládá ze všech částí dříve zmíněných, jak je vidět na obrázku č. 8.



Obrázek 8 Kombinovaný tlumič [3]

1.3.6 Koncovka

Koncovka se nachází na úplném konci výfukové soustavy. Zajišťuje finální a bezpečný odvod výfukových spalin od kabiny vozidla. I když se tato poslední část soustavy zdá být pouze jako designový prvek, stále zaleží na tvaru, průměru a délce, které ovlivňují hlučnost a případné protitlaky ve výfuku.

1.4 Typy výfuků u motocyklů

I když tato bakalářská práce vychází z obecné teorie výfukových soustav, její hlavní praktická část se zaměřuje na úpravu tlumiče samotného motocyklu. Tudiž je tato kapitola věnována rozdělení a použití obecných prvků výfukové soustavy na tato jednostopá vozidla.

Výfukové potrubí můžeme zprvu rozdělit dle typu motocyklu a jeho využití. Ke každému typu sériově vyráběného motocyklu byl speciálně vyvinut jeho výfuk se všemi potřebnými prvky dle aktuální legislativy. Na rozdíl od automobilů, kde je viditelná ve většině případů pouze koncovka výfuku, plní u motocyklů celá délka samotného potrubí úlohu i designového prvku. Jak už bylo zmiňováno dříve, vývojem všech typů motorek prochází i vývoj jejich výfuků. K cestovnímu či sportovnímu motocyklu nebude tudiž vhodný typ výfuku z tzv. cruiseru či endura. U motocyklových nadšenců je zvuk motoru jedním z podstatných aspektů plnohodnotného zážitků z jízdy, tudiž se tato vlastnost při vývoji výfuku nesmí zanedbat.

Další možné rozdělení pochází od jednoho z nejznámějších výrobců motocyklových výfukových soustav Akrapovič. Ten rozděluje své motocyklové výfuky na dva typy: tzv. prvovýroba a zakázková *aftermarket* výroba. První zmíněný typ je vyvíjen přímo s partnery dle jejich specifických potřeb a pro jejich sériově vyráběné kusy. Na druhé straně si zakázkové výrobky může zakoupit každý běžný zákazník pro svůj stroj. Při vývoji každého výfuku se soustředí na čtyři důležité parametry, kterými jsou výkon, hmotnost, design a zvuk. U každé kategorie motocyklů je pokaždé jiný parametr její prioritou. [8] Typický vzhled i s logem je zobrazen na obrázku č. 9.



Obrázek 9 Akrapovič výfuk [9]

Tradiční složení výfukových soustav se také liší od místa prodeje dle tamějších legislativních norem. Na příklad evropský trh podléhá emisním normám tzv. European emission standards – EURO, které stanovují limitní hodnoty škodlivých látek ve výfukových spalinách a také hlukové normy pro členské státy EU. Proto je výfuková soustava používaná na evropském trhu složená rozdílně od té na americkém kontinentě.

Další faktor, který omezuje použití kompletního výfukového vybavení, je motocykl samotný. Jeho limitující velikost a hmotnost neumožňuje takové vybavení jako mají automobily.

První z obecných prvků výfukových soustav pro motocykly bývá nejčastěji přímo výfukové potrubí spojené přírubami k výfukovým kanálům válců. Dle typu motocyklu neboli dle designu a počtu válců se mohou vycházející výfuková potrubí spojit do jedné trubky směřující do dalších částí výfukové soustavy, která se nazývá kolektor. Jelikož se stále zpřísňují emisní a hlukové normy, byl zaveden do výfukové soustavy motocyklu katalyzátor. Na základě nejnovější normy (EURO 5A-B, 2020-2024) se objeví i diagnostika OBD II, která je spojena s řídicí jednotkou emisních systémů. U motocyklových výfuků nesmí dnes chybět ani lambda sonda, jejíž funkce byla popsána výše. Dalším prvkem musí být samozřejmě tlumič, který bývá absorpční či vícekomorový reflexně-absorpční. Kvůli úspoře místa bývá právě tlumič a katalyzátor umístěn za sebou ve společném potrubí pod dalšími ochrannými plechy. Na konci výfukového systému se nachází koncovka výfuku, která dodává finální zvukový a vzhledový projev celkového motocyklu.[10] Všechny výše popsané části výfuku jsou zobrazeny níže na obrázku č. 10.



Obrázek 10 Motocyklový výfuk [11]

1.5 Materiály

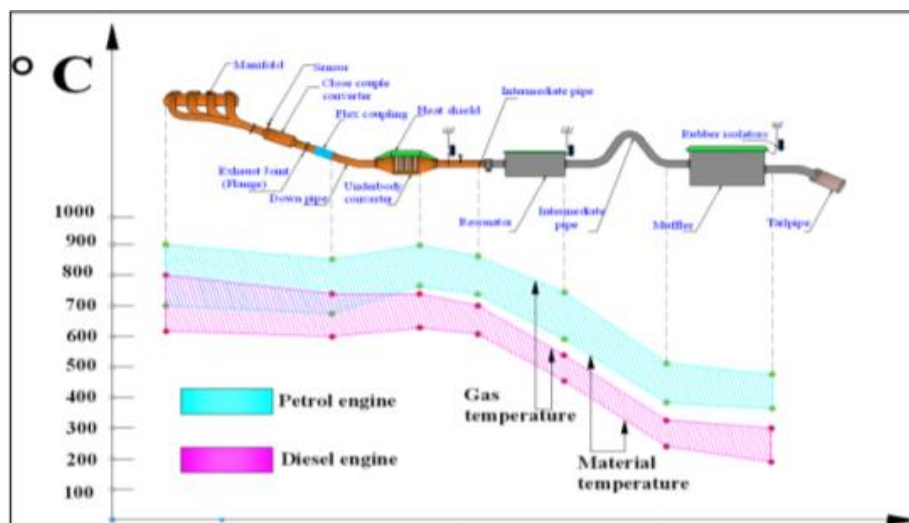
Výběr správného materiálu pro celý výfukový systém hraje klíčovou roli nejen kvůli zpřísnujícím se požadavkům na emisní a hlukové normy. Materiál musí odolávat nepříznivým podmínkám, které působí uvnitř výfukového systému tak i zvenčí. Korektní výběr materiálu závisí na odolnosti vůči vysokoteplotní oxidaci, termomechanickým vibracím, korozi od vnějších látek (na příklad sůl) a vnitřní korozi. Mimo jiné je potřeba, aby materiál dobře snášel vibrace od motoru. V neposlední řadě je nutné zohlednit vnější tepelné a jízdní podmínky na příklad vibrace způsobené jízdou na komunikacích.

Nejpoužívanějším materiálem k výrobě výfukových systému je dnes slitina železa a uhlíku zastupující ocele a litiny. Dále se jedná samozřejmě o různé formy ocele jako nerezová ocel, nízkouhlíková ocel či žáruvzdorná ocel. Samozřejmě nesmíme zapomenout na vzrůstající potřebu snižování hmotnosti a spotřeby paliva, zvyšování výkonu a pevnosti. Přídavnými aditivami neboli legurami se dají zaručit lepší vlastnosti, jedná se o látky: Uhlík (C), Křemík (Si), Mangan (Mn), Molybden (Mo), Chrom (Cr), Nikl (Ni), Titan (Ti), aj. Na příklad s větším množstvím uhlíku roste tvrdost, ale klesá houževnatost. Křemík naopak zvyšuje houževnatost a odolnost proti korozi. Mangan taktéž zvyšuje houževnatost a k tomu svařitelnost. Tvrdost a kalitelnost zvyšuje také molybden, který navíc odolává korozi. Chrom a nikl zvyšují odolnost proti korozi.

Mimo oceli se používají také slitiny hliníku, titanu či kompozity z uhlíkových vláken. Slitiny hliníku jsou obecně lehčí než ocel a levnější než slitiny titanu či karbon. Využití ale mají jen z vnější části výfuku kvůli svým horším vlastnostem vůči oceli. Titan a jeho slitiny mají přes svou enormní cenu skvělý poměr pevnost-hmotnost. Tyto kvality přesahují už jen

karbonová vlákna. Titanové slitiny odolávají i korozi a mohou být použity na jakýkoli díl výfukové soustavy. Vlákna uhlíku mají největší hodnotu na trhu a dosahují nejlepšího poměru pevnost-hmotnost. Tato křehká vlákna, která mají svou jedinečnou a nepřehlédnutelnou strukturu, mohou ale podléhat vibracím. Samotné použití uhlíkových vláken ve výfukovém systému je opět omezující a lze je použít pouze na vnější straně, nejčastěji jako odlehčující či designový prvek. Kvůli výše zmíněným vlastnostem bývají uhlíková vlákna kombinovaná s ostatními materiály.

Pro představu tepelného namáhání výfukového systému spalovacích motorů je níže vložen obrázek č. 11 s tabulkou v závislosti teploty na každou část výfuku. Je zde zobrazen jak vznětový, tak zážehový motor. Především jde ale o konkretizaci nejvíce tepelně namáhané součásti a důvod výběru konkrétního materiálu. [12]



Obrázek 11 Tepelné namáhání výfukových systémů spalovacích motorů [12]

Níže je zaměřeno na materiály používané pro součásti motocyklových výfuků.

1.5.1 Tlumič

Materiál na výrobu tlumiče musí zajistit dobrou pevnost a odolnost proti korozi. Pro absorpční materiál se nejčastěji používá skelné vlákno a jeho další podoby. Pro celkové tlumiče se používají oceli třídy 17 korozivzdorné a žárupevné s převládajícím chromem nebo jinými prvky. Na příklad se jedná o ekvivalentní typy ocelí: X2CrTi12, X6CrMoNb1-1, X2CrCuTi18 a další.

1.5.2 Spojovací potrubí

Toto potrubí spojuje ostatní části výfukového systému a musí zajistit hladký průběh proudu spalin. Materiál pro toto potrubí musí být odolný proti teplotním rozdílům, protože každý konec může být ovlivňován výraznými teplotními gradienty. Dále musí být houževnatý, odolný vůči korozi a dobře svařitelný. Těmto vlastnostem odpovídají ocele také třídy 17 na příklad ČSN 17 040, ČSN 17 240 a ekvivalentní X2CrTi12 nebo X8CrNi25-21.

1.5.3 Spojovací potrubí – kolena

Toto potrubí je přímo spojeno s výfukovými kanálky přes příruby. Materiál pro toto potrubí musí zaručit dobrou tuhost, pevnost a svařitelnost. Je možné použít ocele třídy 17 jako v předchozích částech na příklad ČSN 17 240.

1.6 Výroba

Tým konstruktérů se řídí potřebami a tužbami zákazníků. Projektují buď jen část výfuku a zbývající součásti se implementují na sériové tělo výfuku, nebo navrhnu celý výfukový systém. Kompletní popis výroby výfuku kopíruje vývoj celého výfukového systému včetně perforací, koncovky atd.

Jakmile jsou připraveny 3D návrhy výfukového systému, simulace proudění a další potřebné výkresy, přesune se výroba do dílenských prostor, kde se nachází přesné automatizované CNC stroje, řezačky, ohýbačky, frézy a další.

Součástí výkresů musí být samozřejmě i navržený materiál. Nejčastěji se bude jednat o nerezovou ocel, slitiny titanu či karbon. Jako polotovary se použijí ocelové nerezové trubky, které budou zkráceny na požadovanou délku na tzv. řezáčkách laserových či plazmových. Dále jsou již nařezané trubky ohýbány na ohýbacích a zakružovacích strojích do požadovaných úhlů. Tyto ohýbací stroje používají tzv. „vnitřní trn“, který zaručí kulový profil i v místě ohybu. Za předpokladu, že se výfuk skládá z více zohýbaných částí, přesunou se tyto části k automatu na obvodové svařování, kde jsou díky robotice s velkou přesností k sobě svařovány. Vnitřek tlumiče se skládá z komor s přepážkami, z perforovaných trubek a je vyplněn tlumícím materiálem. Perforované trubky se vyrábí na speciálních strojích určených pro perforaci. Modernější provedení tohoto stroje dokáže až 6000 děr pod minutu. Každá vyrobená a koupená součást do tlumiče je pak dále poskládána, vložena a upevněna (svařována) dovnitř těla výfuku. Naposled může být výfuk povrchově zpracován (tryskání) a osazen elektronikou, jako různé tlumící ventily. K dalším povrchovým úpravám patří například chromování, které dodává i výsledný vzhledový dojem.[13]

Dříve zmíněná firma Akrapovič dnes už předstihla svoji konkurenci při vlastním zpracování titanu. Jelikož titan a jeho slitiny lze těžko vytvarovat, otevřela tato firma vlastní technologické slévárenské prostory na titan. Dosáhla tím rychlejší a přesnější produkce než frézováním. Mimo jiné tato firma využívá speciální technologii *hydroforming* neboli vodní lis. Vodní tlak, který dosahuje 200 až 300 MPa dle tloušťky trubky, vytvaruje podle železné formy výslednou trubku na požadovaný průměr či další rozměry.[8]

1.7 Akustika

Obecně se vznikem, šířením a vnímáním zvuku zabývá vědní obor akustika. Vzhledem k tomu, že se bakalářská práce zaměřuje na zvuk, hluk a podobné veličiny, je na místě, aby tyto pojmy byly stručně vysvětleny. Jedná se o následující vybrané pojmy a veličiny:

zvuk, hluk, amplituda, perioda, frekvence, vlnová délka, akustický tlak, výkon a hladina akustického tlaku.

1.7.1 Zvuk

Zvuk je mechanické vlnění šířící se pružným prostředím. Jeho frekvenční rozsah je vymezen rozsahem lidského ucha o frekvenci od 16 do 20 000 Hz. Vlnění pod 16 Hz se nazývá infrazvuk a vlnění o frekvenci větší jak 20 kHz se nazývá ultrazvuk.

1.7.2 Hluk

Jedna z definic pro hluk je, že se jedná o jakýkoli zvuk obtěžujícího a rušivého charakteru. V horších podmínkách může mít i škodlivé účinky až zdravotní následky. Dále zmiňuje hluk ve svých normách a legislativách právo jako limitní hygienické hladiny pro různá prostředí.

1.7.3 Amplituda

Amplituda značí se A [m] je absolutní hodnota maximální výchylky kmitajícího bodu či soustavy od rovnovážné hodnoty.

1.7.4 Perioda

Jedna z definic zní, že perioda je doba potřebná k tomu, aby se systém dostal do výchozího bodu. Jinak se jedná obecně o dobu trvání jednoho periodického opakování.

$$T = \frac{1}{f} \text{ [s]}$$

f značí frekvenci.

1.7.5 Frekvence

Z předchozího vztahu je patrné, že frekvence je obrácenou hodnotou periody a vyjadřuje počet cyklů jakéhokoli periodického děje za určitou dobu, f [Hz].

1.7.6 Vlnová délka

Vlnová délka označuje vzdálenost dvou nejbližších bodů vlnění, které kmitají ve fázi. Značíme ji λ [m].

1.7.7 Akustický tlak

Akustický tlak je skalární veličina popisující změny tlaku oproti rovnovážnému, na příklad atmosférickému tlaku, v hmotném prostředí. Jsou tak definována místa s vyšším tlakem, kde se nachází hustší prostředí, a místa s nižším tlakem ve zředěném prostředí. Je označován malým písmenem p s jednotkou Pascal – Pa.

1.7.8 Akustický výkon

Tento výkon P [W] popisuje celkovou akustickou energii od zdroje nebo se dá využít kontrolní plocha, kterou prochází.

1.7.9 Hladina akustického tlaku

Zavedením tzv. hladiny používané nejenom u akustického tlaku, se akustické veličiny zobrazí v logaritmickém měřítku, protože tak pracuje i lidské ucho kvůli velkým rozdílům v intenzitě zvuku. Slabé signály jsou zachyceny a od těch silných je ucho chráněno. Akustický tlak udává poměr mezi referenční a měřenou hodnotou a je závislý na vzdálenosti od zdroje.

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} [dB]$$

$p [Pa]$ okamžitý akustický tlak

$p [Pa]$ referenční akustický tlak

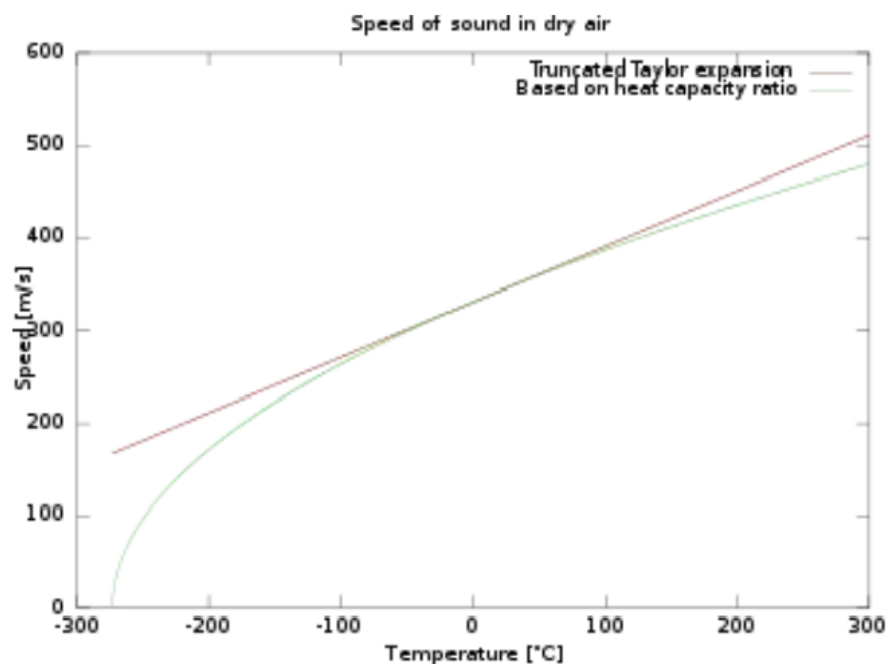
Dále lze zmínit hladinu akustického výkonu a také rychlost šíření zvuku, které závisí na prostředí a jeho vlastnostech a na teplotě. Naopak nezávisí na tlaku vzduchu, frekvenci a intenzitě zvuku.

1.7.10 Rychlost šíření zvuku v plynech

Tato rychlost závisí na teplotě a typu plynu. Ze vzorce pro rychlost v ideálním plynu vychází rychlost zvuku v suchém vzduchu, který je popsán níže. Index t značí teplotu ve stupních Celsia a dále je tento vzorec použitelný v rozmezí teplot od -100 do $+100$ °C.

$$c = (331,57 + 0,607 * t) ; [ms^{-1}]$$

Například u hladiny moře při teplotě vzduchu 15 °C je rychlost zvuku 340 m/s.[14]
[15]



Obrázek 12 Závislost rychlosti zvuku na teplotě [16]

1.8 Současné řešení poloautomatických tlumičů

Problematikou hlučnosti výfukového systému se v poslední době zabývá stále více inovativních firem. Na trhu dnes existuje mnoho typů automatických a poloautomatických tlumičů hluku jak pro automobily, tak pro motocykly. Tyto tlumiče plní samozřejmě svou tlumící funkci, a navíc zvládnou tlumit hluk ve více polohách, čímž zajišťují diverzifikaci hladin zvuku. Oba typy tlumičů mají uvnitř vlastní mechanismus tlumení. Nejčastěji se jedná o klapku, která při úplném zavření sníží zvuk na minimum, a naopak při úplném otevření proudí zvukové vlny bez překážek ven za přítomnosti hlasitého doprovodu. Příklad takové klapky je viditelný na obrázku č. 13. Plně zautomatizované tlumiče reagují neustále na otáčky motoru a zpětnovazebním signálem se upravuje natočení této klapky pro ideální zvukový projev. Poloautomatické tlumiče jsou ovládány čistě na subjektivním pocitu uživatele elektronickým ovladačem umístěným v jeho blízkosti. Princip této klapky zůstává stejný.



Obrázek 13 Elektronicky ovládaná tlumící klapka [17]

Pro příklad komerčního poloautomatického tlumiče do motocyklového výfuku je firma *Dr.Jekill and Mr.Hyde*, která vyvinula vlastní tlumící mechanismus na bázi klapky. Řídící jednotka této klapky obsahuje 3 režimy, při kterých je tato klapka v různých polohách. Jak bylo popsáno výše, v hlasitém módu je plně otevřena, naopak v tichém režimu je plně uzavřena. Navíc se může nacházet i v polootevřené poloze, při které vychází neutrálně hlasitý doprovod. Každý tento režim je ovládán jedním či více stisknutím spínače při jakékoli rychlosti či otáčkách. Pro ideální využití funkce zmíněného poloautomatického tlumiče konstruuje tato firma vlastní celé výfukové soustavy pro více typů motocyklů. Na její typický výfuk i s touto klapkou se lze podívat na obrázku č. 14 a 15. (Bohužel na obrázku č. 15 v přední části tohoto výfuku není zobrazen katalytický konvertor).



Obrázek 14 Tlumicí klapka s třemi režimy Dr.Jekill and Mr.Hyde [18]



Obrázek 15 Výfukové potrubí Dr.Jekill and Mr.Hyde [18]

Software, který ovládá zvukový projev tohoto výfuku, lze modifikovat dle restrikcí a norem v místě prodeje a užívání. To zajišťuje legální využití této soustavy i v místech s přísnějšími normami. Mimo hlukové předpisy jsou tyto výfukové systémy i v souladu na příklad s EURO emisními normami. I přes tyto konstrukční omezující faktory vyvíjí firma *Dr.Jekill and Mr.Hyde* výfukové systémy, které nesnižují výkonost motocyklu i při plně uzavřené klapce. [18]

2 Praktická část

V praktické části této práce bude představen autorův vlastní návrh poloautomatického tlumiče včetně potrubí představující celý výfukový systém. Tento projekt byl zkonstruován v inovativním programu Autodesk Inventor 2021. V příložených souborech jsou výkresy celého potrubí, tlumiče a dalších nezbytných součástí výfuku.

2.1 Předpoklady

Jak bylo popsáno v teoretické části bakalářské práce, je návrh s analytickými výpočty celého výfukového potrubí komplikovaný a zdouhavý proces, který je ovlivněn mnoha aspekty. Autor předkládá projekt, který má návaznost na určitou pohonnou jednotku konkrétního motocyklu. Nicméně není obsahem této práce uvažovat celkové požadované výkonnostní či emisní hodnoty.

Jedná se o předlohu, na kterou se autor pokusí implementovat celé výfukové potrubí s důrazem na cíl této práce, na poloautomatický tlumič. Dle následujícího modelu jsou vymezeny a udány různé údaje a rozměry potřebné ke konstrukci tlumiče a ostatních součástí.

2.2 Předlohový motocykl

Jako předloha byl použit motocykl typu Suzuki Intruder VL125, který je zobrazen na obrázku č. 16. Tento motocykl spadá do kategorie cruiser/chopper. Jedná se o motocykl se slabší pohonnou jednotkou, čtyřdobým vzduchem chlazeným dvouválcovým motorem o objemu 124 cm³ a 9,7 kW při 13300 ot./min. Výška sedla tohoto motocyklu se rovná 685 mm a rozvor činí 1 520 mm.[19]



Obrázek 16 Suzuki Intruder VL125 [19]

2.3 Analytické a návrhové výpočty

K dalším základním rozměrům se využijí následující vztahy pro určení ideální délky výfukového potrubí. Nejdříve je za potřebí znát rychlost pístu a výfukových spalin v potrubí, dále rychlost zvuku ve spalinách, a nakonec se bude vycházet z návratu zvukové vlny potrubím.

2.3.1 Rychlost pístu

K výsledné rychlosti je potřeba znát především rychlost klikové hřídele a následující veličiny a vztahy.

D = průměr pístu [mm]

d = průměr výfukového kanálku [mm]

S = zdvih [mm]

c_s = pístová rychlost [m/s]

V_g = rychlost spalin [m/s]

n = rychlost klikové hřídele [ot/min]

Parametry předložového motoru:

$D = 44$ mm

$d = 22$ mm

$S = 40,9$ mm

$n = 8000$ ot/min

Pro výpočet pístové rychlosti se použije následující rovnice odvozená ze zákona zachování hmoty, kdy objem spalin ve válci musí odejít výfukovým prostorem.[20]

$$c_s = \frac{S \cdot n}{30\,000} [1]$$

$$c_s = \frac{40,9 \cdot 8000}{30\,000} = 10,9 \text{ m/s}$$

Výsledná pístová rychlost činí 10,9 m/s.

2.3.2 Rychlost spalin

Tyto rovnice pro výpočet závislostí rychlosti pístu a rychlosti spalin jsou hrubší odvození, jelikož se neuvažuje proměnný zdvih ventilů. Následná rovnice tedy vychází z předchozího stavu a udává rychlost spalin odcházející skrz výfukový kanál:[20]

$$V_g = \frac{s \cdot n}{30\,000} * \left(\frac{D}{d}\right)^2 [2]$$

$$V_g = 10,9 * \left(\frac{44}{22}\right)^2 = 43,6 \text{ m/s}$$

Výsledná rychlost spalin je 43,6 m/s.

2.3.3 Rychlost zvuku v plynech – spalinách

Pro výpočet rychlosti zvuku ve spalinách budeme vycházet z rovnice [3] pro rychlost zvuku v plynech a stavové rovnice. Teplota vcházejících spalin do výfukových prostor bývá průměrně kolem 800 °C a teplota vycházejících spalin kolem 150 °C. Po zkušenostech je ideální aproximace této teploty pro následující vzorce kolem 400 °C, kdy se zohledňuje také vodní pára v těchto spalinách.[20]

$$c = \sqrt{\kappa \frac{p_0}{\rho_0}} [3]$$

κ = Poissonova konstanta (pro vzduch $\approx 1,4$)

P_0 = tlak plynu [Pa, N/mm²]

ρ = hustota vzduchu [kg/m³]

c = rychlost zvuku [m/s]

Při obecných podmínkách bude rychlost zvuku následující:

$\kappa = \approx 1,4$

$P_0 = 101\,000 \text{ Pa}$

$\rho = 1,29 \text{ kg/m}^3$ (pro 0°C)

$$c = \sqrt{1,4 * \frac{101000}{1,29}} = 331,07 \text{ m/s}$$

Po úpravách rovnice [3] a stavové rovnice získáme výsledný tvar pro výpočet rychlosti zvuku ve spalinách, a to v poměru rychlostí zvuku při teplotách T_1 a T_2 , rovno odmocnině poměrů těchto teplot termodynamických.

$$\frac{c_2}{c_1} = \sqrt{\frac{T_2}{T_1}} [4]$$

Pro podmínky zmíněné výše bude tedy výsledná rychlost zvuku ve spalinách následující:

$$c_1 = 330,07 \text{ m/s}$$

$$T_1 = 0 \text{ } ^\circ\text{C} (273,15 \text{ K})$$

$$T_2 = 400 \text{ } ^\circ\text{C} (673,15 \text{ K})$$

$$\frac{c_2}{c_1} = \sqrt{\frac{T_2}{T_1}} \Rightarrow c_2 = 330,07 * \sqrt{\frac{673,15}{273,15}} = 518,16 \text{ m/s}$$

Z těchto rychlostí je patrné, že rychlost zvuku při vyšších teplotách je mnohem vyšší než při průměrných.

2.3.4 Délka výfukového potrubí

Jako poslední krok před finálním návrhem délky potrubí je zapotřebí si představit teorii rezonančního přeplňování, která nám objasní zpětné tlakové vlny a využití jejího vzorce, který bude klíčový pro zjištění výsledné projektované délky potrubí. Ve výfukové fázi spalovacího motoru dochází k pohybu pístu do horní úvratě a otevření výfukového ventilu. S těmito pohyby dochází k uvolnění tlakové vlny do výfukového kanálku kvůli velké tlakové diferencii. Tato kladná tlaková vlna se dále pohybuje skrz výfukový systém, kde přibližně za polovinu dochází k vyrovnání tlaků od válce a okolí. Dále dochází k odrazení tlakové vlny, ale v tomto zpětném případě se jedná o zápornou vlnu neboli podtlak. Tato vlna míří zpátky k výfukovému kanálku a v dobře načasovaném případě k otevírajícím se sacím ventilům. Při správném určení délky a průřezu potrubí přicházející podtlaková vlna usnadní výplach a dále plnění válce.

Na základě této teorie je nezbytné určit čas, za který se tlaková vlna dostane od výfukového ventilu na konec výfukového potrubí a zpětná podtlaková vlna opět zpět od konce potrubí k výfukovému ventilu.

Výsledná rovnice bude vypadat následovně. Konečný čas potřebný pro tlakovou vlnu, která cestuje skrz potrubí a zpět, bude roven podílu vzdálenosti, kterou urazí tato vlna na konec potrubí a zpět do počátku, a rychlosti zvuku v tomto prostředí za průměrných pracovních teplotních podmínek. [5] V tento časový interval se musí taktéž správně natočit kliková hřídel. Z toho důvodu se výsledný čas musí rovnat natočení klikové hřídele v poměru k jejím otáčkám. [6][20][21]

$$t = \frac{2 * L}{1000 * c_2} [5]$$

$$t = \frac{\theta_t * 60}{360 * n} [6]$$

θ_t = natočení klikové hřídele [°]

L = délka výfukového potrubí [mm]

n = otáčky motoru [ot/min]

c_2 = rychlost zvuku ve spalínách [m/s]

t = čas pro tlakovou vlnu na konec a zpět [s]

Následuje výsledná rovnice pro výpočet navrhované délky potrubí. [7] Pro natočení klikové hřídele se využijí hodnoty v rozmezí 120 – 150° a dále pro otáčky motoru, které jsou velice proměnlivé a u této pohonné jednotky i vyšší, se budou brát v rozmezí 6000 – 13000 ot/min.

$$\theta_t = 120^\circ$$

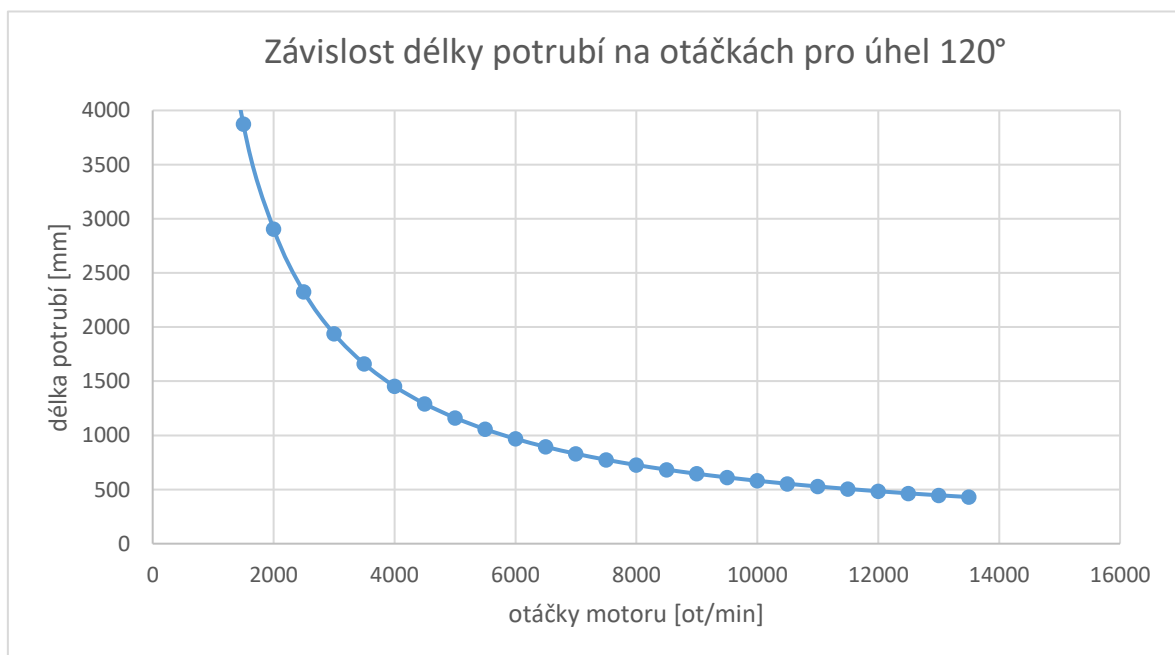
$$n = 6000 \text{ [ot/min]}$$

$$c_2 = 581,16 \text{ m/s}$$

$$L = \frac{\theta_t * c_2}{0,012 * n} [7]$$

$$L = \frac{120 * 581,16}{0,012 * 6000} = 968,6 \text{ mm}$$

Pro zvolený úhel 120° se nachází níže Graf č. 1: Závislost délky potrubí na otáčkách motoru, který vychází z rovnice [7]. Je patrné, že výsledná velikost potrubí bude závislá pouze na otáčkách motoru při zanedbání diferencí teplot a vhodně zvolenému natočení klikové hřídele.



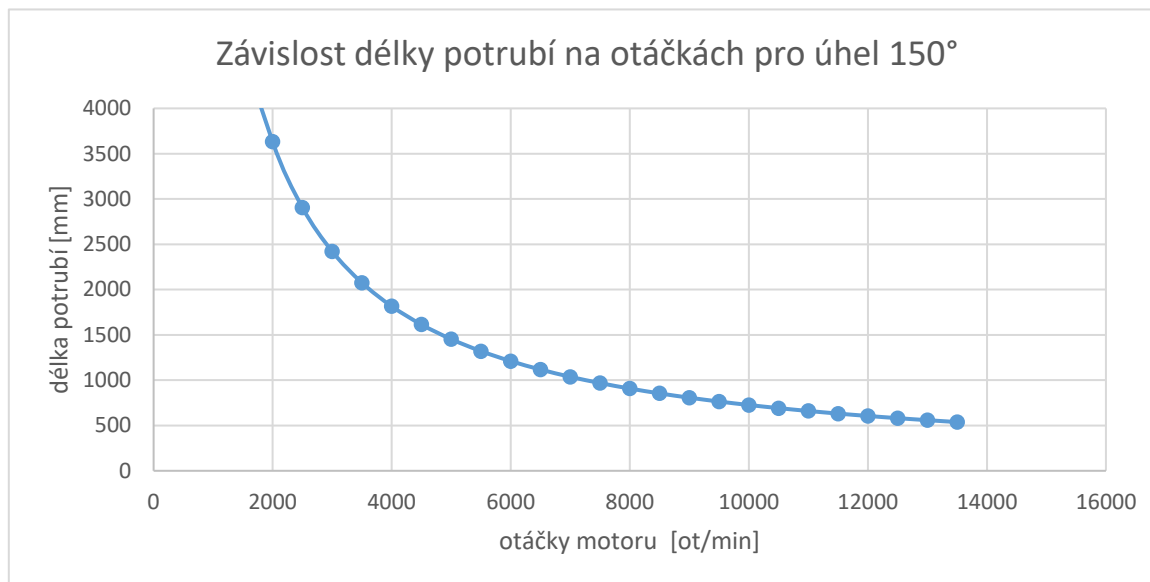
Graf 1: Závislost délky potrubí pro úhel 120°

$$\theta_t = 150^\circ$$

$$n = 6000 \text{ [ot/min]}$$

$$c_2 = 581,16 \text{ m/s}$$

$$L = \frac{150 * 581,16}{0,012 * 6000} = 1240,75 \text{ mm}$$



Graf 2: Závislost délky potrubí pro úhel 150°

Z výsledných výpočtů a grafů je patrné, že když se zvyšují otáčky, klesá potřebná délka výfukového potrubí. Výsledný výpočet taktéž ovlivňuje vhodné natočení klikové hřídele. Pro konečné rozměry navrhovaného potrubí se použijí průměrné hodnoty délky potrubí pro nejběžnější otáčky pro tento typ motocyklu, a sice kolem 7000 – 8000 min⁻¹, a dále se přihlídně k rozměrům výfuku, který tento motocykl má z výroby. Z konečných rozvah bude účinná rezonanční délka výfuku kolem 960 mm a celková délka výfuku bude činit okolo 1025 mm.

2.4 Konstrukce

Následně budou představeny dílčí části výfukové soustavy navržené dle předchozích výpočtů a návrhů. Tento model se skládá ze 3 hlavních částí: z kolen, spojovacích potrubí a tlumiče jako hlavní konstrukční část.

2.4.1 Kolena

První částí jsou tzv. kolena výfuku, která jsou upevněna k válci motoru na výfukové kanálky. Tento spoj je proveden speciální přírubou zobrazenou na obrázku č. 19, která je tovární výroby. Pro autorův návrh zůstane tato příruba stejná.



Obrázek 17 Příruba výfuku [22]

Dále dle zvoleného předlohového motocyklu musí samozřejmě zůstat stejné rozměry vedoucí od motoru až k tlumičům. Tyto svody jsou ideálně navrženy a vedou kolem ostatních částí motocyklu. Ve vhodném místě dochází k propojení obou potrubí. Níže na obrázku č. 20 jsou zobrazena tato navržená výfuková kolena.



Obrázek 18 Kolena navrhovaného výfuku

2.4.2 Spojovací potrubí

Pro primární průměr potrubí kolen byl zvolen průměr dle běžně dostupných trubek pro tyto účely: 40 mm s vnějším a 37 mm s vnitřním průměrem. Tyto rozměry je potřeba zredukovat na menší průměry. Spojovací potrubí a další potrubí v tlumiči bude o průměru 28 mm. Tyto spoje lze provést redukčními trubkovými spojkami, které jsou dále zajištěny objímkami, viz obrázek č. 21, nebo precizním svařením redukčních trubek. Případné svary se provedou v místech, kde bude dále vnější plášť tlumiče, aby byla svarová housenka schována.



Obrázek 19 Redukční trubka s objímkami [23]

2.4.3 Tlumič

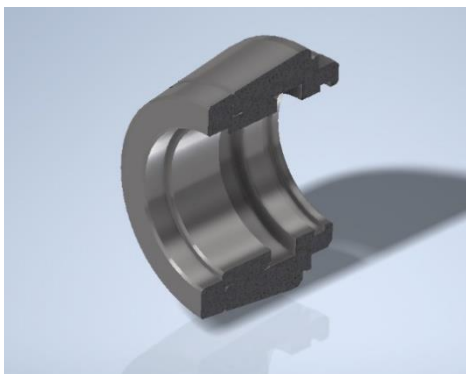
Spojovací potrubí dále pokračuje a spojuje komponenty samotného tlumiče. Tyto části jsou perforovaná trubka, redukční a vodící spojka, otočná trubka, dále výstupní potrubí z tlumiče, a nakonec absorpční materiál. Tento tlumič bude rozdělen do tří komor. V první komoře bude docházet k absorpčnímu tlumení, ve druhé komoře bude docházet k onomu pohybu zakřivené trubky, a nakonec poslední komora.

2.4.3.1 Perforované potrubí

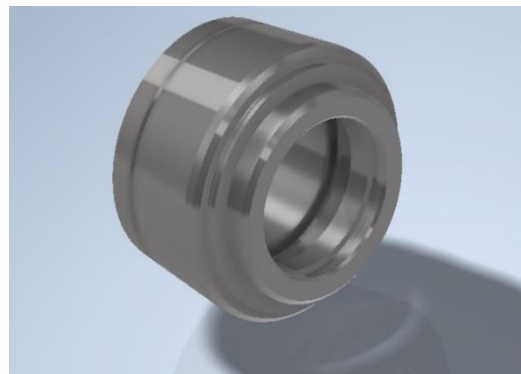
Další součást výfukové soustavy je perforovaná trubka o průměru 32 mm s dírami 3 mm a roztečí 6 mm. Tato trubka je dlouhá 140 mm a je obklopena absorpčním materiálem. Od počátku této části začíná tlumič samotný. Kolem toho potrubí se nachází velká vrstva absorpčního materiálu, který pohlcuje nechtěné vysoké frekvence.

2.4.3.2 Redukční a vodící spojka

Tato spojka navazuje na předchozí perforovanou trubku, kterou obklopuje. Druhý konec umožňuje vsunutí další části potrubí o průměru 28 mm. Uvnitř této spojky se nachází po obvodu vodící drážka, do které je vsazena otáčející se trubka, která zajišťuje obvodové otáčení. Tato drážka je broušena do hodnoty drsnosti Ra 1,6 pro hladký pohyb. Tato drážka je utěsněna dvojicí o-kroužků, jeden se nachází v obdélníkové drážce a druhý v trojúhelníkové. Mazivo typu měděného mazacího spreje od firmy Berner zajišťuje volný pohyb i při vyšších teplotách. (vybráno v katalogu Berner)



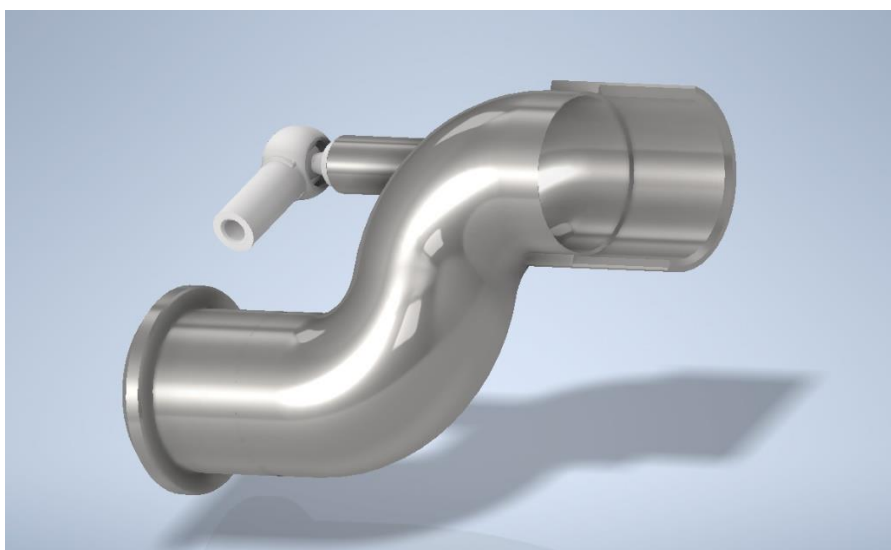
Obrázek 20 Řez vodící spojkou



Obrázek 21 Vodící a redukční spojka

2.4.3.3 Odbočovací trubka

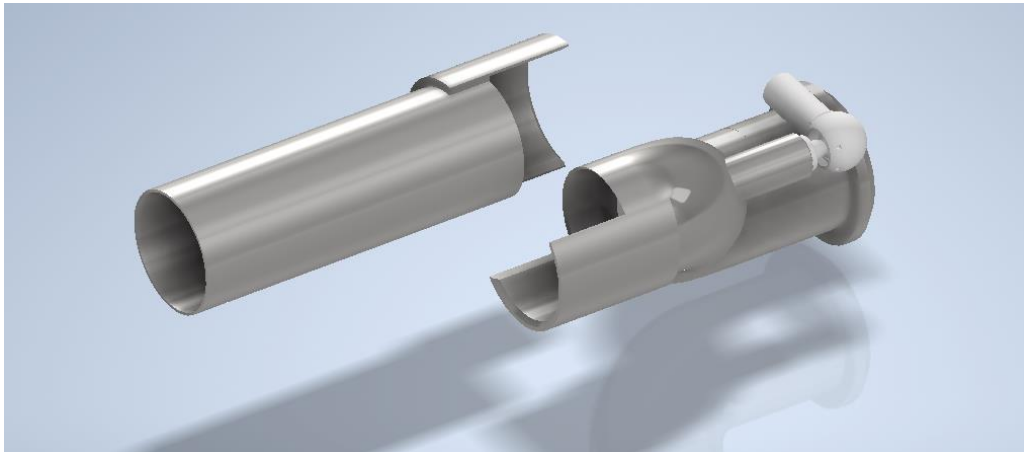
Tato trubka bude vykonávat hlavní pohyb v mechanismu tlumení. Je přivařena k předchozí vodící trubce, která se nachází ve vodící drážce spojky. Druhý konec této trubky bude v případě netlumení přímo navazovat na výstupní trubku, a v případě tlumení bude směřovat konec této trubky do stěny mezi 2. a 3. komorou zajišťující princip tlumení absorpcí. Do drážky spojky je vodící trubka vsazena a zajištěna závitovou maticí M36x1. Dále je k této trubce přes úhlový kloub se závitem přiděláno táhlo, které dle uživatele motocyklu pootočí trubkou do hlasité polohy a pomocí tlačné pružiny se vrátí tato trubka do výchozí polohy. Celkový pohyb se nachází v rozmezí cca 40°. Celý tento mechanismus může být ovládán mechanicky na bázi lanka k noze řidiče, který svým stlačením jako u zadní brzdy pootočí trubkou a zajistí hlasitý projev svého stroje. Naopak při odlehčení pomocí pružiny se tato trubka vrací zpět do původní polohy. Dále je možné tento princip vylepšit díky elektrifikaci a systémovému řízení, jako je dnes využíváno v komerčních klapkách. Ke správnému dosednutí otočné trubky k výstupní byl navržen kšilt o větším průměru a se zkosenými hranami zajišťující díky nepatrným vůlím přímé dosednutí na pokračující trubku.



Obrázek 22 Odbočovací trubka s vodící trubkou

2.4.3.4 Výstupní trubka

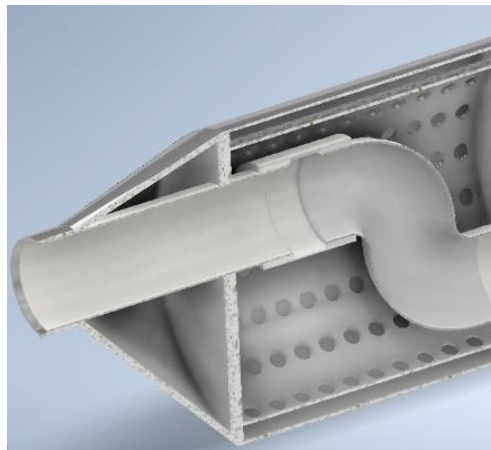
Výstupní trubka jako poslední aktivní část tlumiče je vsazena do stěny mezi 2. a 3. komorou zajišťující konečný odvod spalin z výfukového potrubí. Trubka má průměr 28 mm a na začátku má zrcadlově, jako u předchozí odbočovací trubky, jakýsi kšilt, který zajišťuje dosednutí otočné trubky a umožňuje plynulý a přímý odvod spalin a zvukových vln.



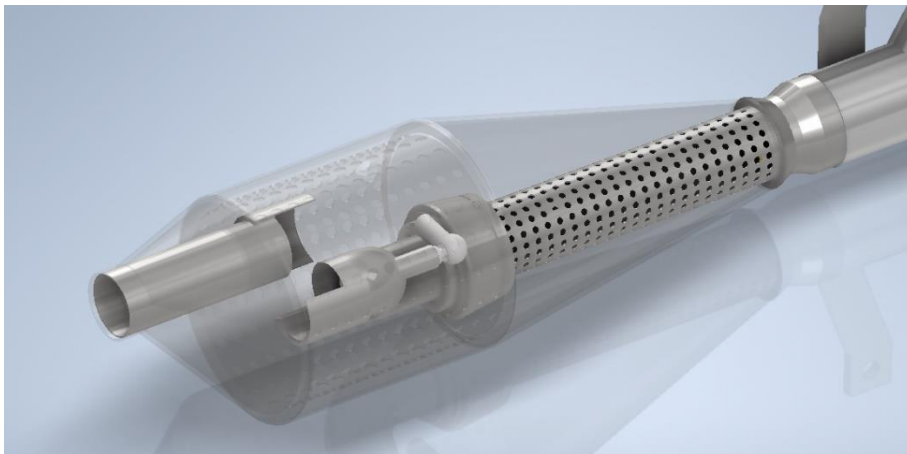
Obrázek 23 Odbočovací trubka a výstupní trubkou

2.4.3.5 Řez tlumičem

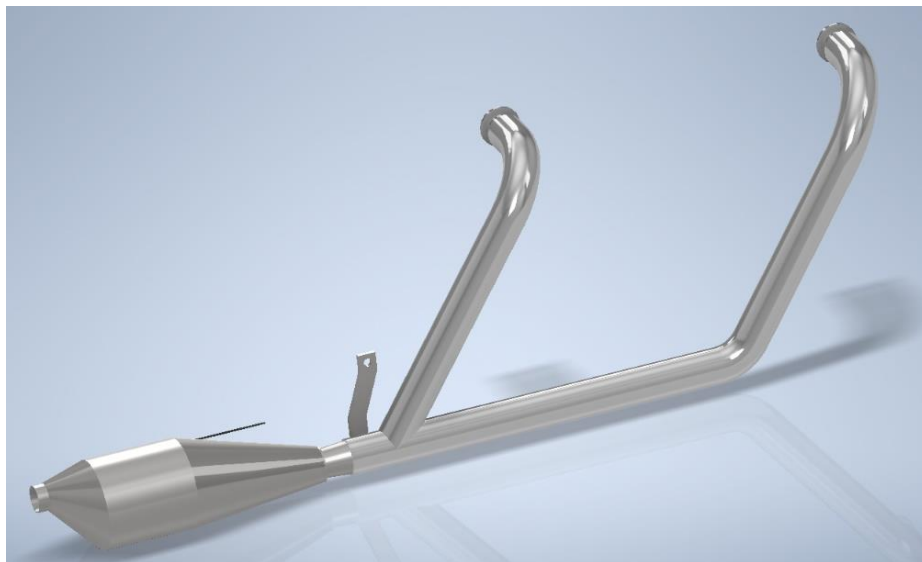
Na obrázku č. 26 je zobrazen řez konečným návrhem mechanismu tlumiče, kde je patrné ve 2. komoře další perforace. Kolem ní a vnějším pláštěm tlumiče se nachází navíc absorpční materiál, který zvyšuje účinnost tlumení při tichém režimu. Dále na obrázku č. 27 je navržena jedna z možností pohybu tohoto mechanismu, a sice pomocí úhlového kloubu se závitem M5 ozn. DIN 71802 a ocelového lanka s bovdenem. Zajištění do zpětného tichého chodu zajistí buď tlačná pružina umístěna kolem lanka dle zvoleného motocyklu, nebo v tlumiči u výchozí díry onoho ocelového lanka. Další možností je tažná pružina umístěná uvnitř tlumiče.



Obrázek 24 Řez tlumičem, hlasitý režim



Obrázek 25 Tlumič, tichý režim



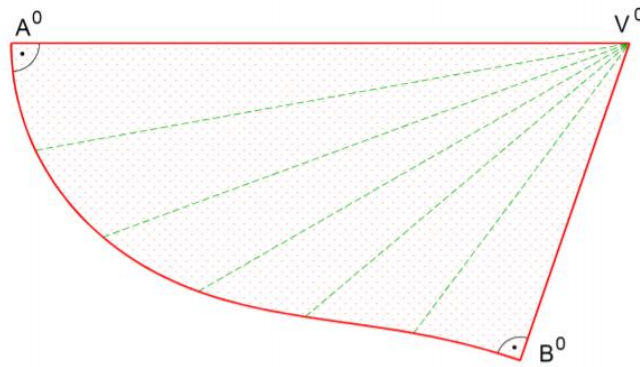
Obrázek 26 Výsledný navržený model výfukové soustavy

2.5 Postup výroby a konstrukce

Po celkovém návrhu a sestrojení 3D modelu je zapotřebí popsat průběh konstrukce celého výfukového systému a taktéž u vybraných součástí postup výroby.

Prvně se zohýbají polotovary trubek na kolena výfuku do správných natočení a úhlů. Dále se nasadí příruby pro spojení a zajištění výfuku k válcům, a ty se zajistí spojkou svařenou k výfuku, která dosedá poté do výfukových kanálků válců. Při svařování zadního kolena k hlavní části trubky výfuku musí dojít ke správnému vyříznutí profilu na dosednutí trubky a zajištění rovinnosti dosedacích ploch k výfukovým kanálkům. Dále se vsadí a po obvodě přivaří redukční spojka k výfukové trubce.

Dále je potřeba správně vyrobít první část výfukového tlumiče z plechu. Profil tohoto obalu je tzv. kosý komolý kužel. Pro správné rozvinutí pláště je zapotřebí znalostí z konstruktivní geometrie. Pak je možné korektní vystříhnutí z plechu, zavnutí a následné svaření. Pro představu je na obr. č. 29 rozvinutí kosého kužele.



Obrázek 27 Plášť kosého kužele

Jakmile je vyroben plášť první komory tlumiče, vsadí se k předchozí redukční spojce a znovu se po obvodě přivaří. Ihned poté se vkládá první perforovaná trubka, která dosedá s předepsanou vůlí do otvoru pláště tlumiče a je přitlačena na předchozí redukční spojku. První komora tlumiče se vyplní kolem perforované trubky absorpčním materiálem.

Následující prvek je vodící spojka, která zajistí předchozí součásti proti posunutí, zabezpečí průběh spalín a potřebný odbočovací mechanismus. Spojka se vloží už v celkovém stavu, je zajištěná stavěcím šroubem společně s další částí, kterou je vodící trubka. U té se nesmí zapomenout na promazání pohyblivých částí a vložení těsnících okroužků. Všechny tyto komponenty jsou zajištěny první mezistěnou, která je přivařena po obvodě k plášti první komory.

Dalším krokem bude přivaření odbočovací trubky k vodící trubce a tím začne vznikat druhá komora. Následuje obvodové svaření větší perforované trubky k první mezistěně. Poslední část druhé komory je plášť. Tentokrát se jedná pouze o plášť válce, tudíž rozvinutí a vystřížení není tak komplikované jako u plášťů 1. a 3. komory. Nyní stačí pouze vyplnit tuto komoru mezi perforací a vnější stěnou opět absorpčním materiálem.

Poslední ale komplexnější krok bude vložení výstupní trubky do druhé mezistěny a pláště 3. komory, a společně přiložit k zbytku výfuku a opět obvodově přivařit.

Je nezbytné seřídít otočný mechanismus a pomocí úhlového kloubu s lankem nastavit správně výchozí polohu.

Závěr

Praktickým cílem bakalářské práce byl návrh tlumícího mechanismu výfukové soustavy motocyklu. Tento návrh vyplynul z kompromisu mezi ochranou prostředí před nepříjemným hlukem a plnohodnotným zážitkem z motocyklu samotného, především z jeho jízdního a zvukového projevu. Ač existují na trhu tlumící mechanismy na bázi klapky, které už jsou dnes komerčně využívané, chtěl autor vymyslet a navrhnout vlastní inovativní princip poloautomatického tlumení.

Před samotným návrhem výfukového systému včetně tlumiče byla představena obecná teorie výfukových soustav se zaměřením na tlumící prvky a dále se práce soustředila na motocyklové výfuky, materiály a výrobu. K samotnému návrhu bylo taktéž zapotřebí si představit a definovat akustiku, její veličiny a rezonanční přeplňování. Pro zajištění pomocných rozměrů pro návrh onoho výfuku se použil předlohový motocykl značky Suzuki Intruder o obsahu 125 cm³, podle kterého se navrhlo výsledné spojovací potrubí od motoru a dle parametrů pohonné jednotky byly spočítány ideální rozměry výfukového rezonančního potrubí. Tyto výpočty vycházely z rychlosti pístu, rychlosti spalín ve výfuku, a nakonec ideální délku výfukového potrubí na základě rezonančního přeplňování. Výsledky těchto výpočtů byly zobrazeny dle natočení klikové hřídele v grafech, kde je patrné, že s narůstajícími otáčky motoru, klesá potřebná rezonanční délka výfukového potrubí. Se zohledněním všech výsledků a taktéž samotné délky továrního výfuku předlohového motocyklu, se autor rozhodl pro délku čítající 960 mm rezonanční délky. Celková navrhovaná délka výfuku se rovná 1025 mm.

Autor se věnoval principu odbočovacího potrubí, které je jednou z možností, jak dosáhnout dvojího režimu, hlasitého a tlumeného. V případě, kdy nedochází k tlumení, navazuje toto odbočovací potrubí přímo na výstupní trubku tlumiče a nedochází k žádnému principu tlumení, který byl představen v teoretické části. Naopak při tlumení míří výstup této trubky do stěny druhé komory, kde následně dochází k tlumení rezonancí. Tato komora je navíc obklopena další perforací a absorpčním materiálem, který zvyšuje účinnost tlumení.

Konečný návrh zkonstruovaný v CAD programu podává finální 3D představu o celkové výfukové soustavě motocyklu včetně tlumiče a jeho mechanismu tlumení. Všechny důležité prvky tlumiče a mechanismu samotného jsou zobrazeny ve výkresové dokumentaci. Tato práce nespécifikuje konkrétní možnosti a varianty řízení tohoto mechanismu, ale využívá principu prosté mechaniky, aneb jednoduchého řešení přes ocelové lanko a tlačnou pružinu zajišťující zpětný chod. Dále by byla možnost tento model elektrifikovat a pomocí tzv. smartboxu a řízení ovládat pouze pomocí tlačítka. Tato varianta by byla snadnější a také bezpečnější pro uživatele motocyklu.

Jelikož se jedná pouze o návrh, vyvolává tento model další možné otázky ohledně funkčnosti, účinnosti a obecného zlepšení ovládání. Model by musel projít celkovou CFD simulací pro zjištění a zobrazení proudících spalín, vln a také různých ztrát, které jsou z modelu patrné. Dále by se mohla vyřešit otázka vlastního pohybu odbočovacího potrubí,

na příklad použitím ložiska. Z výrobního a technologického hlediska vycházel autor z vlastních znalostí a zkušeností, aby mohly být všechny součásti vyrobeny a použity pro finální návrh výfuku. Přesto mohou některé části podléhat extrémním podmínkám ve výfukovém prostoru a životnost těchto částí může být tudíž omezená.

Pro komerční využití by musel tento prototyp projít zátěžovými testy a zkušební technologickou výrobou, po kterých by byly zjevné nedostatky onoho tlumiče a celkového výfuku.

Použité zdroje

- [1] ŠUTA, Miroslav. *Účinky výfukových plynů z automobilů na lidské zdraví*. [Online]. ZO ČSOP Veronica, 2010. [Cit. 20. 5. 2021] Dostupné z: <https://www.veronica.cz/ucinky-vyfukovych-plynu-z-automobilu-na-lidske-zdravi>.
- [2] BEDNÁŘ, Marek. Jak funguje výfuk? A kde se bere či ztrácí zvuk vašeho auta? In: *Autoforum.cz* [Online]. 6. 8. 2015 [Cit: 20. 5. 2021] Dostupné z: <https://www.autoforum.cz/technika/jak-funguje-vyfuk-a-kde-se-bere-ci-ztraci-zvuk-vaseho-auta/>.
- [3] GSCHIEDLE, Rolf. *Příručka pro automechanika*. Praha: Sobotáles, 2001. ISBN 80-85920-76-X.
- [4] SAJDL, Jan. Jak funguje automobilový katalyzátor? *Enviweb*. [Online]. 10. 12. 2011 [Cit: 25. 5. 2021] Dostupné z: <http://www.enviweb.cz/89130>.
- [5] DPF. *Funkce katalyzátoru*. [Online]. 2021 [Cit: 20. 5. 2021] Dostupné z: <https://www.dpf-ftg.cz/funkce-katalyzatoru>.
- [6] Nařízení vlády č. 272/2011 Sb. ze dne 24. 8. 2011, o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací.
- [7] ŠTĚPÁNEK, Martin. *Význam a vlastnosti výfukového systému spalovacího motoru*. [Online]. Plzeň, 2016. [Cit: 25. 5 2021] Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta strojní. Vedoucí práce Doc. Ing. Ladislav NĚMEC, CSc. Dostupné z: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/25260/1/BP_Stepanek.pdf.
- [8] PODUŠKA, Petr. Jak se vyrábí výfuky: návštěva u Igora Akrapoviče. *Motorkáři.cz* [Online]. 11. 10. 2017. [Cit: 23. 5. 2021] Dostupné z: <https://www.motorkari.cz/clanky/clanky-reportaze/jak-se-vyrabi-vyfuky-navsteva-u-igora-akrapovice-37725.html?kid=42089>.
- [9] Akrapovič. *Akrapovic motorcycle exhaust system*. [Online]. [Cit: 20. 5. 2021] Dostupné z: <http://www.akrapovic.com/en/moto/road>.
- [10] VALÁŠEK, Dominik. Nechte už konečně motorky a jejich emise na pokoji. *Garáž.cz* [Online]. 13. 10. 2020. [Cit: 25. 5 2021] Dostupné z: <https://www.garaz.cz/clanek/nechte-uz-konecne-motorky-a-jejich-emise-na-pokoji-21004900>.
- [11] Billetta Imports. *Billetta Imports product*. [Online]. [Cit: 22. 5. 2021] Dostupné z: <https://www.billettaimports.com/product/spark-bmw-full-titanium-exhaust-system/>.
- [12] RAJADURAI, S.; AFNAS, M.; ANANTH, S.; SURENDHAR, S. Materials for Automotive Exhaust System. *International Journal of Recent Development in Engineering and Technology* [Online]. Chennai: IJRDET, 2014. ISSN 2347-6435. [Cit: 22. 5. 2021] Dostupné z: <https://docplayer.net/24958046-Materials-for-automotive-exhaust-system.html>.
- [13] Remus. *Výroba a vývoj výfukových systémů REMUS*. [Online]. [Cit: 25. 5. 2021] Dostupné z: <https://www.remus-vyfuky.cz/Remus-vyroba-a-vyvoj>.
- [14] BAJER, Jíří. *Mechanika 3*. Olomouc: chlup.net Olomouc, 2012. ISBN 978-80-903958-5-5.

- [15] LEPIĽ, Oldřich. *Fyzika pro gymnázia: Mechanické kmitání a vlnění*. Praha: Prometheus, 2007. ISBN 978-80-7196-387-5.
- [16] YEH, Anthony. Does cold weather enhance or dampen the Doppler effect? In: *Quora.com*. [Online]. [Cit: 19. 5. 2021] Dostupné z: <https://www.quora.com/Does-cold-weather-enhance-or-dampen-the-Doppler-effect?fbclid=IwAR3hrJDKWtxjBxCsUIqjirb08dcbK2rxMc0bS0oH82dEO8MkApGB6NWXS3s>.
- [17] Vivid Racing. *Exhaust control valve*. [Online]. [Cit: 20. 5. 2021] Dostupné z: <https://www.vividracing.com/apexi-exhaust-control-valve-ecv-pipe-type-80mm-p-151470925.html>.
- [18] *Dr. Jekyll and Mr. Hyde, The Exhaust*. [Online]. [Cit: 15. 5. 2021] Dostupné z: <https://jekyllandhyde.com/en>.
- [19] Motokatalog. *Motorkáři.cz. Suzuki VL 125 Intruder* [Online]. [Cit: 16. 5. 2021] Dostupné z: <https://www.motokari.cz/motokatalog/suzuki/suzuki-vl-125-intruder.html>.
- [20] HEISLER, Heinz. *Advanced engine technology*. Velká Británie: Arnold, 1995. 1560917342.
- [21] PRÁŠEK, Martin. *Optimalizace výfukového potrubí zážehového motoru* [online]. Brno, 2010 [Cit: 25. 5. 2021]. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce David Svída. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/10114>.
- [22] *High performance parts*. [Online]. [Cit: 25. 5. 2021] Dostupné z: <https://www.highperformanceparts.cz/>.
- [23] Katalog. *Auto-doplňky.com: Spojovací výfuková trubka* [Online]. [Cit: 29. 5. 2021] Dostupné z: <https://www.auto-doplňky.com/spojovaci-vyfukova-trubka-54-55-mm-s-objimkama-265-119-p3197>.
- [24] DPF-CAT Systems. *Výfuky – pletence – svody – montážní materiál* [Online]. 2021. [Cit: 20. 5. 2021.] Dostupné z: <https://www.dpf-cat.cz/vyfuky-pletence-svody-montazni-material>.
- [25] Race shop. *Litinové výfukové svody* [Online]. [Cit: 20. 5. 2021.] Dostupné z: <https://race-shop.cz/e36/45138-litinove-vyfukove-svody-pro-bmw-e36-r6-turbo.html>.
- [26] Firstová, Z. *Nová citační norma ČSN ISO 690:2011 – Bibliografické citace*. [Online]. 2020. [Cit: 1. 8. 2021.] Dostupné z: <https://sites.google.com/site/novaiso690/>.

Seznam obrázků

Obrázek 1 Výfukový systém osobního vozidla [2].....	- 3 -
Obrázek 2 Litinové sběrné potrubí [25]	- 4 -
Obrázek 3 Ocelové sběrné potrubí [7]	- 4 -
Obrázek 4 Řez a popis katalyzátoru včetně lambdy sondy [5]	- 6 -
Obrázek 5 Reflexní tlumič [7].....	- 7 -
Obrázek 6 Rezonanční tlumič [3]	- 8 -
Obrázek 7 Absorpční tlumič [3].....	- 8 -
Obrázek 8 Kombinovaný tlumič [3]	- 9 -
Obrázek 9 Akrapovič výfuk [9]	- 10 -
Obrázek 10 Motocyklový výfuk [11].....	- 11 -
Obrázek 11 Tepelné namáhání výfukových systémů spalovacích motorů [12] ...	- 12 -
Obrázek 12 Závislost rychlosti zvuku na teplotě [16]	- 15 -
Obrázek 13 Elektronicky ovládaná tlumicí klapka [17]	- 16 -
Obrázek 14 Tlumicí klapka s třemi režimy Dr.Jekill and Mr.Hyde [18].....	- 17 -
Obrázek 15 Výfukové potrubí Dr.Jekill and Mr.Hyde [18].....	- 17 -
Obrázek 16 Suzuki Intruder VL125 [19]	- 18 -
Obrázek 19 Příruba výfuku [22]	- 24 -
Obrázek 20 Kolena navrhovaného výfuku.....	- 24 -
Obrázek 21 Redukční trubka s objímkami [23]	- 25 -
Obrázek 22 Řez vodící spojkou	- 25 -
Obrázek 23 Vodící a redukční spojka	- 25 -
Obrázek 24 Odbočovací trubka s vodící trubkou.....	- 26 -
Obrázek 25 Odbočovací trubka a výstupní trubkou.....	- 27 -
Obrázek 26 Řez tlumičem, hlasitý režim	- 27 -
Obrázek 27 Tlumič, tichý režim	- 28 -
Obrázek 28 Výsledný navržený model výfukové soustavy	- 28 -
Obrázek 29 Plášť kosého kužele	- 29 -

Seznam grafů

Graf 1: Závislost délky potrubí pro úhel 120°	- 22 -
Graf 2: Závislost délky potrubí pro úhel 150°	- 23 -

Seznam tabulek

Tabulka 1 Vnější mezní hluk motorových vozidel [3]..... - 7 -