

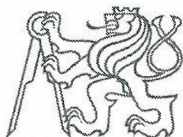


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA DOPRAVNÍ

PŘEMYSL TOMAN
REZONANČNÍ VÝFUK DVOUDOBÉHO MOTORU

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2015



K616.....Ústav dopravních prostředků

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Přemysl Toman

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

B 3710 – DOS – Dopravní systémy a technika

Název tématu (česky): **Rezonanční výfuk dvoudobého motoru**

Název tématu (anglicky): Two-stroke engine's expansion chamber

Zásady pro vypracování

Při zpracování bakalářské práce se řiďte osnovou uvedenou v následujících bodech:

- uveďte teorii vlivu výfukového systému na parametry dvoudobého motoru
- aplikujte teorii na konkrétní motor Jawa 50/21
- navrhnete výfukový systém pro zlepšení charakteristiky motoru
- ověřte prakticky účinnost návrhu na konkrétním motoru
- ověřte vliv úpravy výfuku na ostatní parametry, zejména emisi hluku

Rozsah grafických prací: dle pokynu vedoucího

Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury: JENNINGS, Gordon. Two-stroke tuner's handbook., ISBN 09-126-5641-7.

BELL, A a A BELL. Two-stroke performance tuning., ISBN 18-596-0619-9.

FIRST, Jiří. Zkoušení automobilů a motocyklů: Příručka pro konstruktéry. ISBN 978-80-254-1805-5

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jiří First

Datum zadání bakalářské práce:

15. října 2014


(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

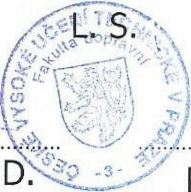
Datum odevzdání bakalářské práce:

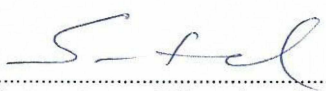
24. srpna 2015

a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia

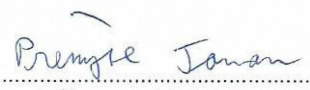
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia


doc. Ing. Petr Bouchner, Ph.D.
vedoucí
Ústavu dopravních prostředků


prof. Dr. Ing. Miroslav Svítek
děkan fakulty



Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.



Přemysl Toman
jméno a podpis studenta

V Praze dne 15. října 2014

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám závažný důvod proti užívání tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 20. srpna 2015

.....

Přemysl Toman

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu práce panu Ing. Jiřímu Firstovi za odborné vedení a konzultování bakalářské práce, dále bych chtěl poděkovat svému otci Daliboru Tomanovi za cenné rady, připomínky a pomoc s uskutečněním všech potřebných měření. Za pomoc s měřením hluku děkuji panu Ing. Josefu Míkovi a za cenné rady a připomínky během měření na válcové brzdě patří dík i panu Václavu Hrudkovi. Na závěr bych rád poděkoval svým rodičům a celé rodině za morální a materiální podporu během celé doby studia.

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá vlivem rezonančního výfukového systému na parametry dvoudobého motoru. V první části práce je uvedena teorie vlivu, zásady návrhu jednotlivých částí a výpočet tří variant výfuků. V části druhé je praktickým měřením ověřena účinnost návrhů. Detailněji je proměřena závislost výkonové a momentové charakteristiky na délce kolene výfuku, výletové trubičce a teplotě. Zkoumán je také vliv úprav na emisi hluku.

KLÍČOVÁ SLOVA

dvoudobý motor, rezonanční výfuk, průběh výkonu a točivého momentu, teplota, hluk

ABSTRACT

The Bachelor thesis is focused on a two-stroke engine's expansion chamber and its effect on power and torque curve. In the first part of thesis there is mentioned the expansion chamber's theory, the layout's principles of each part and the calculation of three versions. In the second part of thesis there is practically checked the efficiency of expansion chambers. The effect of header's length, stringer and temperature on the power and torque curve is measured in detail. The level of noise as regards each expansion chamber is studied as well.

KEYWORDS

two-stroke engine, expansion chamber, power and torque curve, temperature, noise

OBSAH

Seznam použitých zkratk a symbolů.....	6
1 Úvod.....	8
2 Vliv rezonančního výfuku.....	9
2.1 Princip fungování.....	10
2.2 Rezonanční délka.....	12
2.3 Výfukové koleno.....	14
2.3.1 Rozměry výfukového kolene.....	15
2.4 Difusor.....	16
2.4.1 Rozměry difusoru.....	16
2.5 Protikužel.....	18
2.5.1 Rozměry protikužele.....	19
2.6 Výletová trubička.....	20
2.6.1 Rozměry výletové trubičky.....	20
3 Popis vybraného motoru.....	22
3.1 Provedené úpravy.....	22
3.2 Využití motoru.....	24
3.3 Technické parametry motoru.....	25
4 Aplikace teorie vlivu rezonančního výfuku.....	26
4.1 Varianta 1: Terén.....	26
4.1.1 Výsledek.....	27
4.2 Varianta 2: Cesta.....	28
4.2.1 Výsledek.....	28
4.3 Varianta 3: Kompromis.....	29
4.3.1 Výsledek.....	30
4.4 Původní výfuk.....	30
4.5 Konečný návrh tvaru výfuků.....	31
4.6 Hotové výfuky.....	32
5 Praktické ověření návrhů.....	33
5.1 Postup měření.....	33
5.2 Varianta 1: Terén.....	34
5.3 Varianta 2: Cesta.....	35
5.4 Varianta 3: Kompromis.....	36
5.5 Původní používaný a sériový výfuk.....	37
5.6 Srovnání.....	38
5.7 Ověření dalších vlivů.....	39
5.8 Nejlepší varianta.....	41
5.9 Vyhodnocení.....	42
6 Hluk.....	45
6.1 Pravidla.....	46
6.2 Měření.....	46
6.3 Vyhodnocení.....	47
7 Závěr.....	48
Použité zdroje.....	50
Seznam příloh.....	51

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

B	[°]	vnitřní úhel protikužele
ČAMS		Českomoravská asociace motocyklového sportu
D	[°]	vnitřní úhel difusoru
D ₁	[mm]	vnitřní průměr výfukového kolene
D ₂ , D ₂₁ , D ₂₂	[mm]	vstupní průměr v pořadí druhé a dalších částí kužele difusoru
D ₃	[mm]	výstupní průměr difusoru (průměr středové části)
D ₄	[mm]	průměr výletové trubičky
DÚ		dolní úvrať
e _m	[-]	celková pružnost motoru
e _{Mt}	[-]	momentová pružnost
e _n	[-]	otáčková pružnost
E _o	[°]	úhel otevření výfukového kanálu
FIM		International Motorcycling Federation
HÚ		horní úvrať
K _{Ai}	[dB]	korekce váhovým filtrem A
L, L _r , L _{rez}	[mm], [in]	rezonanční délka
L _D , L _{D1} , L _{D2}	[mm]	délka difusoru (případně jeho částí)
L _e	[mm]	celková délka protikužele
L _H	[mm]	délka výfukového kolene od hrany pístu
L _{H'}	[mm]	délka výfukového kolene zkrácená o <i>l_{ve valci}</i>
L _p	[mm]	délka středové části
L _p	[dB]	hladina akustického tlaku
L _{p5000}	[dB]	hladina akustického tlaku při 5000 ot./min.
L _{p8000}	[dB]	hladina akustického tlaku při 8000 ot./min.
L _{pA}	[dB]	hladina akustického tlaku vážená filtrem A
L _{pi}	[dB]	hladina akustického tlaku v příslušném frekvenčním pásmu
L _S	[mm]	délka výletové trubičky
<i>l_{ve valci}</i>	[mm]	délka výfukového kanálu ve válci
M _t	[Nm]	točivý moment
M _{tmax}	[Nm]	maximální točivý moment
M _{t(P_{max})}	[Nm]	točivý moment při maximálním výkonu
N	[ot./min.]	otáčky motoru
n _{fp}		počet frekvenčních pásem

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

n		počet měření
$n(M_{tmax})$	[ot./min.]	otáčky motoru při maximálním točivém momentu
$n(P_{max})$	[ot./min.]	otáčky motoru při maximálním výkonu
p	[Pa]	akustický tlak
p_{5000}	[Pa]	akustický tlak při 5000 ot./min.
p_{8000}	[Pa]	akustický tlak při 8000 ot./min.
P	[kW]	výkon
p_0	[Pa]	referenční akustický tlak
P_{max}	[kW]	maximální výkon
s		směrodatná odchylka výběrového souboru
SÚS		Správa a údržba silnic
$t_{1-\alpha/2}$		kvantil Studentova rozdělení
TIG		Tungsten Inert Gas
TL_B	[mm]	délka protikužele
v		počet stupňů volnosti při použití Studentova rozdělení
V	[l]	objem výfuku
V_s	[m.s ⁻¹], [ft.s ⁻¹]	rychlost zvukových vln
\bar{x}		střední hodnota výběrového souboru
α		hladina významnosti
μ		střední hodnota základního souboru
μ_{em}	[-]	střední hodnota intervalu spolehlivosti celkové pružnosti motoru
μ_{Mtmax}	[Nm]	střední hodnota intervalu spolehlivosti max. točivého momentu
$\mu_{n(Mtmax)}$	[ot./min.]	střední hodnota intervalu spolehlivosti otáček motoru při M_{tmax}
$\mu_{n(Pmax)}$	[ot./min.]	střední hodnota intervalu spolehlivosti otáček motoru při P_{max}
μ_{Pmax}	[kw]	střední hodnota intervalu spolehlivosti maximálního výkonu

1 Úvod

Téměř každý dvoudobý motor dnešní doby je vybaven tzv. rezonančním (pulsacním) výfukem. U dvoudobého motoru, zejména pak u malých kubatur, má na vnější charakteristiku motoru vliv mnoho paramaterů a detailů. Největší potenciál k navýšení výkonu a točivého momentu se nachází ve válci, hlavě a následně právě ve výfukovém systému.

V této práci bude zkoumán vliv rezonančního výfukového systému na parametry dvoudobého motoru malého objemu – konkrétně motoru Jawy 50 typ 21. Tyto motory byly v minulosti dlouhou dobu sériově vyráběny ve více modifikacích a pro svou jednoduchost a dostupnost se v posledních letech stávají základem mnoha závodních motocyklů účastníků se závodů zvaných „Fichtlcopy“. Vybraný motor byl vůči sériovému výrazně upraven a v rámu motocyklu vycházejícího z původní konstrukce se aktivně účastní závodů.

Zkoumání vlivů bude prováděno s pomocí vlastních návrhů výfuků. Vytvoření dobrého a funkčního návrhu je velice složité a náročné. Vodítkem může být použití empiricky navržených metodik z předešlých výzkumů, ale ani pak není výsledek zcela jistý. Proto je lepší vypracovat více variant pro navýšení pravděpodobnosti pozitivních změn. Při navrhování musí být zohledněno mnoho okolností daných koncepcí stroje, motoru, tratí, ale i aktuálním počasím, či ročním obdobím.

Hlavními sledovanými parametry budou průběhy křivek točivého momentu a výkonu, pružnost motoru, teplota a hluk. Změny zkoumaných veličin budou měřeny na vlastních návrzích výfuků v porovnání s výfukem sériově dodávaným a výfukem aktuálně používaným.

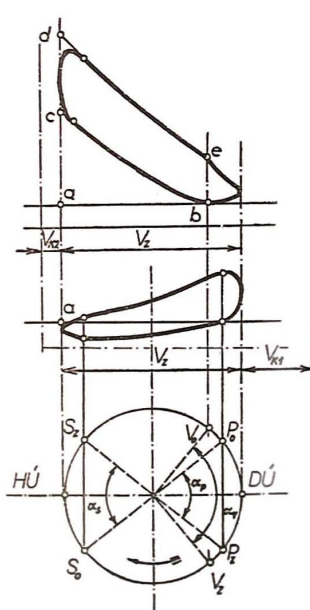
Dále je nutné ověřit, zdali úpravy nezabrání motocyklu v další aktivní účasti na závodech. Z tohoto důvodu bude provedena rešerše hlukových limitů v pravidlech závodů, kterých se motocykl účastní, či reálně mohl účastnit. Pokud takové limity existují, budou prakticky ověřeny měřením.

Hlavním cílem této práce je zjistit aktuální stav nastavení motoru na válcové brzdě brzdového stanoviště a porovnat jej se stavy, hodnotami a změnami, které přinesou navržené varianty a ověřit tak vybrané vlivy, jež byly doposud na závodech pouze subjektivně odhadovány.

2 VLIV REZONANČNÍHO VÝFUKU

Jedním z problémů dvoudobého motoru je částečná ztráta palivové směsi. Při chodu pístu z HÚ do DÚ je směs přepouštěna nad píst pomocí přepouštěcích kanálů. Následně je směs stlačována při chodu pístu z DÚ do HÚ. Problém je v tom, že samotné stlačení začne až po zakrytí výfukového kanálu pístem, ke kterému dojde až po nějaké době. Do té doby část směsi uniká výfukovým kanálem pryč z válce ven do výfuku. Takto dochází ke ztrátě pracně přepuštěné směsi, která následně chybí v kompresním prosotru při zápalu jiskrou svíčky. Směs pronikající do výfuku zvyšuje emisi škodlivin motoru a zároveň snižuje účinnost přeměny energie v palivu vlivem jeho plýtvání.

Účinnost dvoudobých motorů se pohybuje v intervalu do 30 %. Termodynamická závislost tlaku na objemu tzv. $p - V$ diagram je znázorněna na obr. č. 1. Na tomto obrázku znázorňuje plocha ohraničená křivkami v horní části grafu (poměry nad pístem v pracovním válci) užitečnou práci. Práci neúčinnou představuje plocha v prostřední části grafu – poměry v klikové skříni. [4]



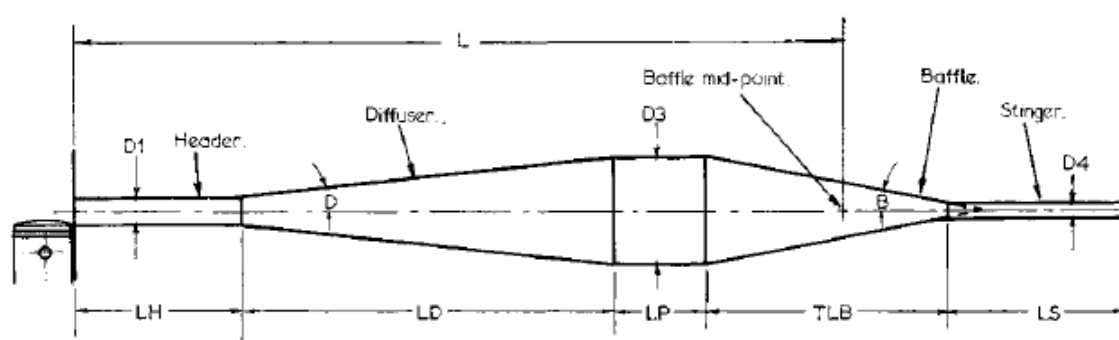
Obrázek 1: Pruběh tlaků ve válci
a v klikové skříni dvoudobého
zážehového motoru, $p-V$ diagram
[4]

U moderních dvoudobých motorů řeší problém účinnosti přeměny energie a emise škodlivin, kromě již zmíněného rezonančního výfuku, mnoho konstrukčních opatření. Mezi tyto

opatření řadíme vratné vyplachování (způsob víření směsi při vytlačování výfukových plynů), rotační šoupátko (disk s otvorem přesně řídicí plnění válce, viz obr. č. 14), samostatné mazání (změna mazacího poměru olej:benzín dle režimu práce motoru), řízení výfukového traktu (změna časování výfukového kanálu přívěrou), membrána v sání (zabránění zpětných rázů nasávané směsi), přeplňování a zvyšování kompresního poměru, či řízení stechiometrického poměru směsi dodatečným vstupem vzduchu. [4]

Rezonanční výfuk je do jisté míry každý navržený výfuk. Za rezonanční v pravém slova smyslu je považován takový výfuk, který cíleně využívá pulsací výfukových plynů v něm vznikajících ke zlepšení plnění válce v určitých rezonančních otáčkách. Zlepšením plnění válce se rozumí navrácení nespálené směsi, nacházející se ve výfuku z předchozí doby, tlakovou vlnou vzniklou ve výfuku zpět nad píst. Píst se v tom okamžiku pohybuje z DÚ do HÚ. Směs z výfuku se dostane nad píst. Pístní kroužky přejdou nad horní hranu výfukového kanálu a začne stlačování většího množství směsi a přeměny tak i většího množství energie, které se ve větším množství palivové směsi nachází. Tento efekt rezonančního výfuku má vliv i na průběh výkonu a točivého momentu v závislosti na otáčkách klikové hřídele.

Lepší představu a přiblížení takového výfuku nabízí obrázek č.2, na kterém lze vidět jednotlivé části a důležité délkové a úhlové rozměry.



Obrázek 2: Základní model rezonančního výfuku dvoudobého motoru [1]

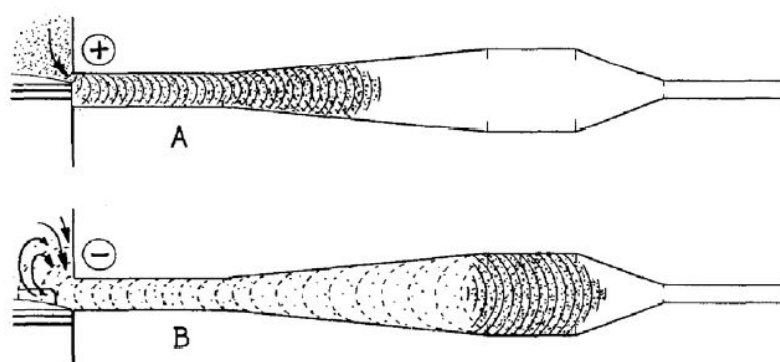
Výfuk se skládá z 5 základních částí – koleno (Header), difusor (Diffuser), středová část, protikužel (Baffle) a výletová trubička (Stringer).

2.1 PRINCIP FUNKOVÁNÍ

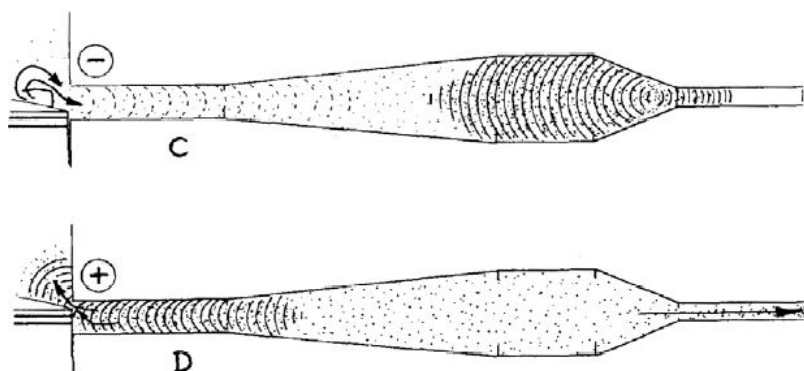
Pro základní pochopení toho, co se ve výfuku během chodu motoru odehrává, je důležité zmínit jaký typ vlnění a s jakými vlastnostmi se zde vyskytuje. Ve výfuku se šíří zvukové vlny. Toto vlnění je mechanické, tudíž je schopno se šířit pružným látkovým prostředím

(vzduchem) a přenášet energii. Efekt, kterého se využívá, nastává, když tlaková vlna dorazí na volný otevřený konec. Taková vlna je odražena zpět s opačným znaménkem. Pokud je vlna odražena na uzavřeném konci, je odražena se stejným znaménkem. [1]

Celý děj, který trvá 3 až 4 tisíciný sekundy, je znázorněn na obrázcích č. 3 a 4. V prvním okamžiku jde píst z HÚ do DÚ a horké plyny se rychle šíří do difusoru (tvoří kladnou tlakovou vlnu), kde se změní znaménko tlakové vlny na negativní. Tato vlna následně pomáhá skrze výfukový kanál "vytáhnout" směs z přepouštěcích kanálu a lépe tak formovat proudy přepuštěné směsi.



Obrázek 3: Pozitivní tlaková vlna tvořená výfukovými plyny (A) vystupující z prostoru válce proudí do difusoru kde dojde k odražení části vlny (B) s negativním znaménkem. [2]



Obrázek 4: V protikuželu dochází k odrazu vlny se stejným znaménkem (C) a ta následně pomáhá vrátit část směsi do válce (D). Ve výfuku klesá tlak skrze výfukovou trubičku. [2]

Mezitím výfukové plyny pokračují dále do výfuku až dorazí k protikuželi, kde se odrazí se stejným znaménkem (pozitivním). To už se píst pohybuje z DÚ do HÚ. Vlna odražena protikuželem míří zpět směrem k výfukovému kanálu a snaží se zatlačit část čerstvě nasáté a přepuštěné směsi, která prošla do výfuku, zpět nad píst než se výfukový kanál uzavře. [2]

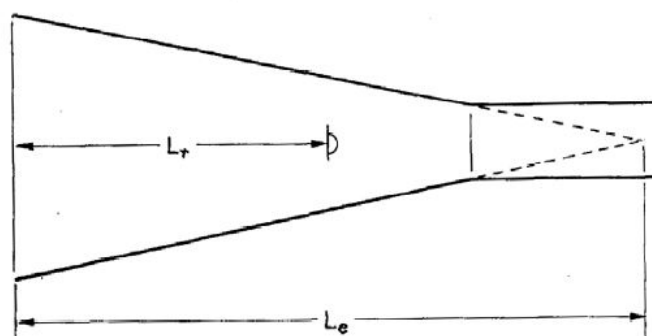
Problémy, které vznikají, přímo vyplývají z výše uvedeného cyklu, který se neustále opakuje. Negativní puls, který má pomoci s přepouštěním a formováním proudů může dorazit v naprosto nevhodný okamžik. Rovněž tak pozitivní vlna odražená v protikuželu může dorazit až po uzavření výfukového kanálu. Tyto dva problémy souvisí s geometrickými rozměry výfuku. Dalším problémem může být prudké ochlazení, či oteplení jednotlivých částí výfuku. Oteplení by mělo přímý vliv i na teplotu plynů uvnitř výfuku a tím i na jejich rychlost. [1]

Aby výfuk fungoval, co možná nejlépe, musí být navržen tak, aby nedocházelo k výše zmíněným problémům. Co se teplotních šoků týče, může být povrch výfuku následně upraven aby si držel konstantní teplotu a odolával tak lépe vnějším vlivům (vodě, sněhu atp.). Konstantní teplota však má vliv na pořadí stejné fungování výfuku, ale na úkor možných maximálních hodnot výkonu a točivého momentu.

Každá část má vliv v určité části pohybu pístu ve válci, neboli pohybu zvukových vln ve výfuku. Kritéria pro návrh a detailní vliv jednotlivých částí zejména na točivý moment a výkon bude rozebrán v následujících podkapitolách.

2.2 REZONANČNÍ DÉLKA

Rezonanční délka je první hodnota, kterou je potřeba stanovit. Důležité je i určit odkud kam se měří – viz. obr. č. 2 a 5 hodnota L (L_r). Pro přesné stanovení rezonanční délky je nutné určit rychlost, jakou se zvukové vlny uvnitř výfuku pohybují a právě v této hodnotě se skrývá velká neznámá.



Obrázek 5: Určení rezonanční délky, $L_r = \frac{1}{2} L_e$ [2]

Výfukové plyny během pohybu uvnitř výfuku svou teplotu skokově mění a navíc přichází do styku s vnějším prostředím přes stěnu výfuku dle různorodosti terénů, ve kterých se motocykl pohybuje – rozbahněná trať, kaluže, brod, jízda na sněhu.

Teploty, kterých běžně výfukové plyny po opuštění válce dosahují, se pohybují okolo 650°C.

Následně jsou vlivem expanze uvnitř výfuku ve středové části ochlazeny na teplotu cca 260°C a tudíž dále pokračují nižší rychlostí. Přesné určení teploty v každém místě výfuku je náročný termodynamický výpočet a pro počáteční zkoušky se volí strategie empiricky získané konstanty na základě mnoha a mnoha měření výfuků, o kterých víme, že jsou v praxi použitelné a z nějakého důvodu jsou to povedené návrhy. [2]

Na základě výzkumu, jenž provedl Gordon Jennings viz. [2], je pro počáteční návrhy doporučena rychlost zvukových vln 518,16 m.s⁻¹ (1700 ft.s⁻¹), nebo dle výzkumu Grahama Bella [1] 510,54 m.s⁻¹ (1675 ft.s⁻¹).

Obecně pak můžeme psát vzorec [2]:

$$L_{rez} = \frac{E_o \cdot V_s}{N}$$

- Kde
- L_{rez} = rezonanční délka [in]
 - V_s = rychlost zvukových vln [ft.s⁻¹]
 - E_o = úhel otevření výfukového kanálu [°]
 - N = otáčky motoru [ot./min.] (při kterých má pracovat nejlépe)

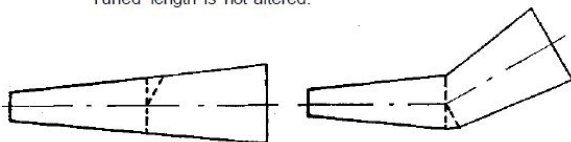
Nebo upravený vzorec dle [1] pro metrické jednotky:

$$L_{rez} = \frac{E_o \cdot 42545}{N} [mm]$$

Kde konstanta 42545 odpovídá výpočtu s rychlostí zvukových vln 1675 ft.s⁻¹.

Correct.

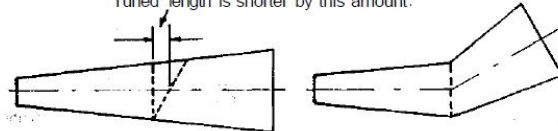
Tuned length is not altered.



Obrázek 6: Správné řešení ohybu kužele - zachování rezonanční délky [1]

Incorrect.

Tuned length is shorter by this amount.

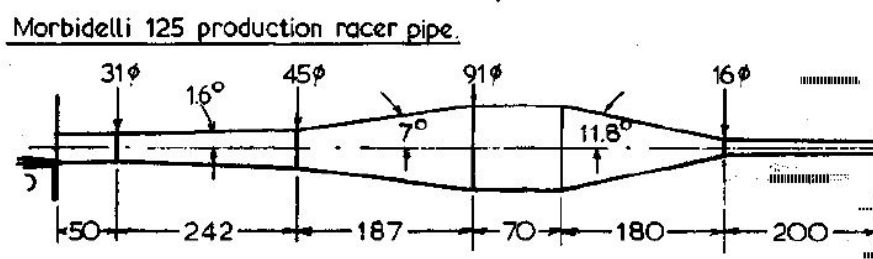


Obrázek 7: Nesprávné řešení ohybu kužele - zkrácení rezonanční délky [1]

Na rezonanční délku je dobré nezapomínat ani při tvarování celého výfuku pro potřeby daného motocyklu. Každý ohyb musí být proveden tak, aby nedošlo ke zkrácení, či prodloužení L_{rez} (viz. obr. č. 6 a 7) a výfuk tak opravdu odpovídal výpočtu.

2.3 VÝFUKOVÉ KOLENO

První částí rezonančního výfuku je výfukové koleno. K výpočtu délky a průměru této části se nejčastěji přistupuje na základě empirických zkušeností. Tato část může být tvořena válcovou trubkou, kuželem, nebo kombinací obou variant viz obrázek č. 8. [1]



Obrázek 8: Ukázka možného tvaru výfukového kolene reálného výfuku [1]

Koleno tvaru kužele má své výhody i nevýhody. Hlavní nevýhodou je obtížnost konstrukce, jelikož právě tato část je ohýbána do charakteristického tvaru kolene. Výhodou kuželového tvaru je zajištění ladnějšího přechodu mezi výfukovým kanálem ve válci a kolenem výfuku. Dále při stejné délce je navýšen objem, který zvětšuje rozsah použitelného výkonu. Poslední a nejvýraznější výhodou je šetrnější expanze a následné méně skokové ochlazení výfukových plynů.

Výhodou této části oproti ostatním je snadná možnost konstrukce umožňující proměnlivou délku kolene. V praxi se dá tato varianta provést např. zasouváním kolene do prostoru difusoru, nebo pevným nástavcem tvaru trubky s vnitřním průměrem rovnajícím se vnějšímu průměru kolene vycházejícího z difusoru, do kterého lze koleno zasunout. Prosté zasouvání kolene do difusoru slouží spíše ke zkouškám, jak velký vliv délka má – dochází totiž k narušování prostoru difusoru a zkracování či prodlužování rezonanční délky.



Obrázek 9: Správná konstrukce (A) vs. špatné napojení výfukového kolene na difusor (B) [2]

Pro výsledný návrh je důležité dodržet zásady, které jsou dané metodikou výpočtu. V tomto konkrétním případě dle [1] a [2] nesmí koleno zasahovat do prostoru difusoru. Dále je nutné

dbát na přesnost a ladnost přechodů mezi kolenem a difusorem (viz obrázek č. 9), aby se zamezilo vzniku turbulentního proudění.

2.3.1 ROZMĚRY VÝFUKOVÉHO KOLENE

Základem výpočtu je určení tzv. násobícího faktoru, který závisí na požadované charakteristice a způsobu konstrukce. Průměr výfukového kolene D_1 je přímo úměrný průměru výfukového kanálu. Základním pravidlem dle [2] je, že průměr by měl být 1,1 až 1,15 násobek průměru výfukového kanálu. Násobící faktor je roven 6 až 8 pro dosažení maximálního výkonu. Pro širší výkonovou křivku na úkor maximálních hodnot je možné volit až 11ti násobek průměru výfukového kanálu. [2]

Přístup dle [1] je velice podobný. Základem je určení průměru výfukového kanálu. Průměr je vynásoben násobícím faktorem (viz. tabulka č. 1), čímž získáme požadovaný průměr D_1 . Rozdíly ve vstupních průměrech jsou do jisté míry kompenzovány mírně rozdílnými násobícími faktory, ale v základu jsou oba přístupy téměř shodné. Dále pak lze vidět, že důraz na maximální hodnoty výkonové křivky (kratším kolenem) je ve shodě s užitím pro cestovní závody a důraz na širší výkonové křivky je ve shodě pro závody typu Motocross a Enduro.

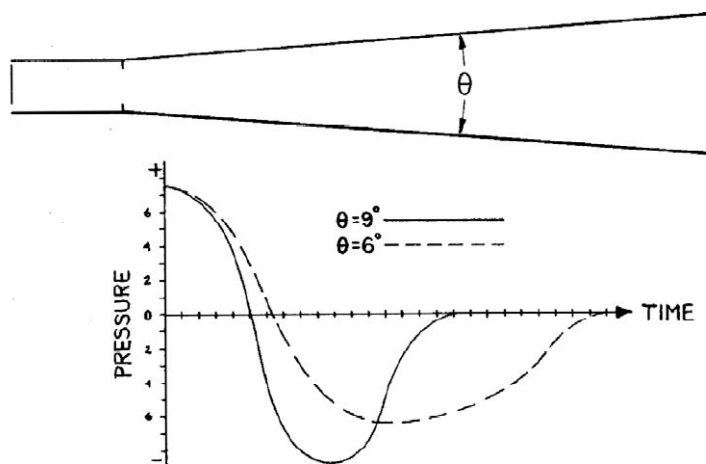
Objem [cm ³]	Cestovní závody		Motocross a Enduro	
	Jednostupňový dif.	Vícetupňový dif.	Jednostupňový dif.	Vícetupňový dif.
50 -80	8,5 - 9,5	8 - 9	10 - 11	8,5 - 9,5
100 -125	7,8 - 8,5	6,5 - 7,5	7,8 - 8,5	6,5 - 7,5
175 - 250	7,3 - 8,3	6,5 - 7,5	9 - 10	8,2 -9,2
350 - 500			8,5 - 9,5	7,5 - 8,5

Tabulka 1: Hodnoty násobícího faktoru [1]

Z tabulky č. 1 vyplývá, že pro víceetupňové difusory ve většině případů vychází kratší délky výfukových kolen. Na závěr je nutno dodat, že tato hodnota se měří od hrany pístu ve válci (viz obrázek č. 2), což v praxi znamená, že už v ní je obsažena délka výfukového kanálu ve válci. S tímto je potřeba v praxi při výrobě počítat a výslednou délku kolene o tuto hodnotu zkrátit.

2.4 DIFUSOR

Další částí rezonančního výfuku je Difusor, který svým úhlem určuje trvání a intenzitu v něm odražené vlny. Menší úhly vytvářejí vlny delšího trvání s nižší intenzitou, což způsobuje rovnější a širší výkonovou křivku na úkor maximálních hodnot. Větší úhly difusoru působí přesně opačně, jak je znázorněno na obrázku č. 10. [1]



Obrázek 10: Vliv strmosti úhlu difusoru na chování motoru [2]

Z této závislosti a trendu, který byl zmíněn už u vlivu výfukového kolene vyplývá, že menší úhly budou vhodnější pro motocrossové a endurové závody a strmější větší úhly pro závody cestovní. Podobně jako výfukové koleno lze i difusor sestavit z jednoho, či více na sebe navazujících kuželů.

2.4.1 ROZMĚRY DIFUSORU

Základním předpokladem, ze kterého se dále vychází, je určení koncového průměru D_3 (viz. obrázek č. 2). Průměr D_3 se vypočte jako 2,5 násobek D_1 – to v praxi odpovídá 6,25 krát větší ploše průřezu na konci difusoru než je plocha průřezu na vstupu. [2]

$$\frac{D_1^2}{D_3^2} = 6,25 \rightarrow D_3 = \sqrt{D_1^2 \cdot 6,25} = D_1 \cdot 2,5$$

Pokud je na motocyklu dostatek místa, nabízí se možnosti pro experimentování a to zvětšením průměru D_3 na 2,7 – 2,9 násobek D_1 . Tento krok sníží maximální sílu motoru, ale zároveň umožní dosažení ladnějších průběhů v nižších otáčkách. V opačných případech, kdy už na motocyklu není místa nazbyt, lze jít až na hodnotu 2,2. [1]

Jak již bylo zmíněno, difusor může být i vícestupňový. Vstupní průměr v pořadí druhého kužele tvořícího difusor bude označován D_2 , případně D_{21} , D_{22} atd. pro dvou a více stupňové difusory – pokud se jedná o jednostupňový, pak $D_2 = D_3$.

Dalším krokem při výpočtu tvaru difusoru je jeho vnitřní úhel D (viz obr. č. 2). Tyto úhly se volí na základě empirických hodnot dlouholetých výzkumů, například následovně dle [1]:

Objem [cm ³]	Cestovní závody			Motocross a Enduro	
	Počet stupňů difusoru				
	1	2	3	1	2
50 - 80	6,5 - 7	4,5 a 7	4; 6 a 8	3 – 3,5	3 a 5
100 - 125	6,5 – 7,5	4,5 a 7,5	4,5; 7 a 9	4 – 4,8	3,3 a 6
175	6,5 – 7,5	4,5 a 7	4,5; 7 a 10	3,5 – 4,5	3,5 a 6
250	7 – 7,5	4,5 a 7	4,5; 7 a 10	4 – 4,5	4 a 7
350 - 500				4 – 5	3,5 a 6

Tabulka 2: Doporučené vnitřní úhly difusoru ve stupních [1]

Pro porovnání lze uvést doporučené hodnoty dle [2], kde se uvádí maximální hodnoty hodnoty úhlu D 4 až 4,5° (5°) pro výfuky určené k cestovním závodům, pro motory do objemu válců 250 ccm pak 3,5° až 4° a hodnoty 3° až 3,5° pro velký motocross, kde mají motory už svým objemem tak velký výkon, že je lepší se soustředit na průběh točivého momentu, výkonu a kultivovanost chodu na úkor maximálních (často špičkových) hodnot. Ostrá špička točivého momentu a výkonu se v terénu mnohdy nedá využít, jelikož se motor nedostane (odporem trati) do požadovaných otáček.

Při znalosti úhlu D a obou krajních průměrů lze zjistit i délka celého difusoru L_D [1]:

$$L_D = \left(\frac{D_3 - D_2}{2} \right) \cdot \cot D$$

Kde L_D = délka difusoru [mm] (nebo jeho části je-li použit vícestupňový)

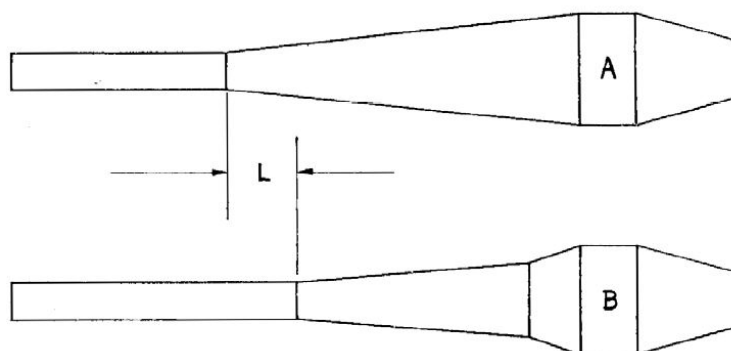
D_2 = vstupní průměr difusoru [mm]

D_3 = výstupní průměr difusoru [mm]

D = vnitřní úhel difusoru [°]

Efekt, který s sebou přináší vícestupňový difusor je znázorněn na obrázku č. 11. Vícestupňové difusory mají kratší délku, tudíž vzniká dodatečná délka, kterou lze vzít v úvahu při výpočtu, pokud máme přesnou představu o tom, jaký průběh hledáme.

Použití dvou a více stupňových difusorů však vnáší do výpočtu další neznámou. Pro zjednodušení budou uvedeny hodnoty při použití dvoustupňových difusorů. Dle [1] je ideální počáteční délka prvního kužele v rozmezí 200 až 240 mm pro motokrosové a enduro závody a 140 až 160 mm pro závody cestovní. V případě, že takto navržený výfuk postrádá M_t a P špičku – lze ji docílit zkrácením první části difusoru. V opačném případě, kdy je P a M_t příliš špičkovitý, lze pro rozšíření P a M_t křivky prodloužit první část difusoru. [1]

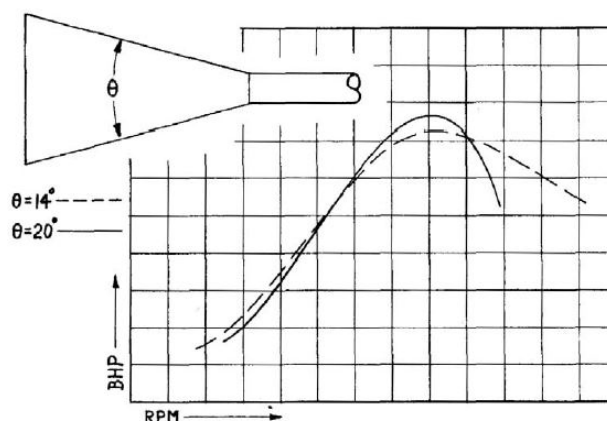


Obrázek 11: Srovnání jedno a vícestupňového difusoru [2]

Zvolením varianty A viz obr. č. 11 může být použito kratšího kolene výfuku – hledání maximálních hodnot točivého momentu a výkonu. Varianta B zapříčiní znatelnější pokles maximálních hodnot P a M_t , který je kompenzován znatelným navýšením točivého momentu v nízkých otáčkách. [2]

2.5 PROTIKUŽEL

Funkce protikuželu, jako poslední kuželové části výfuku, je velice podobná funkci difusoru. Cílem je svým tvarem odrazit takovou vlnu, která zajistí ve správný časový okamžik zatlačení směsi proniklé do výfuku zpět nad píst do válce. Celý tento děj se navíc musí odehrávat v přiměřeném rozsahu otáček. Dosažení požadovaného účinku přímo ovlivňuje volba úhlu B (viz. obrázek č. 2). Vlivy tohoto úhlu jsou znázorněny na obrázku č. 12 - menší úhel způsobuje roztažení výkonové křivky na úkor maximální hodnoty, ale motor je po překonání maxima možno dále přetáčet. Z čehož vyplývá, že protikužel má největší vliv na chování motoru až za vrcholem výkonové křivky. [2]



Obrázek 12: Vliv úhlu protikuželu na chování motoru [2]

2.5.1 ROZMĚRY PROTIKUŽELE

Jak již z výše uvedené textu vyplývá, nejzásadnějším kritériem návrhu je volba úhlu B . Pro tento úhel opět existují doporučené hodnoty dle [1].

Objem [cm ³]	Cestovní závody [°]	Motocross a Enduro [°]
50 -80	10,5 – 12	8,5 – 9,5
100	10,5 – 12	9 – 10
125	9,5 – 12	8,5 – 10
175	10 – 12	8 – 10
250	10 – 12	7,5 – 10
350 - 500		9 – 11

Tabulka 3: Hodnoty úhlu protikužele [1]

Dle [2] je vodítkem pro určení úhlu B fakt, že by měl být dvojnásobný vůči úhlu difusoru, aby nedocházelo k nesouladu v chování difusoru a protikužele. Zároveň by B neměl být větší než 10° a menší než 7° .

Po zvolení úhlu přichází na řadu dopočet celkové délky L_e (viz obrázek č. 5) [1]:

$$L_e = \frac{D_3}{2} \cdot \cot B$$

Kde L_e = celková délka protikužele [mm]
 D_3 = výstupní průměr difusoru [mm]
 B = vnitřní úhel protikužele [°]

V tomto okamžiku musí přijít na řadu dopočet délky L_p středové části výfuku, jejíž úkolem je vyplnění prostoru mezi difusorem a protikuželem tak, aby celková délka od hrany pístu pro bod uvnitř protikužele (viz. obr. 2 a 5), odpovídala délce rezonanční L_{rez} [1]:

$$L_p = L_{rez} - \left(L_H + L_D + \frac{L_e}{2} \right)$$

Kde

- L_p = délka středové části [mm]
- L_{rez} = rezonanční délka [mm]
- L_e = celková délka protikužele [mm]
- L_D = délka difusoru [mm]
- L_H = délka výfukového kolene [mm]

Výslednou pravou délku difusoru stanovíme dle vzorce [1]:

$$TL_B = \left(\frac{D_3 - D_4}{2} \right) \cdot \cot B$$

Kde

- TL_B = délka protikužele [mm]
- D_4 = průměr výletové trubičky [mm] (viz. níže)
- D_3 = výstupní průměr difusoru [mm] (zároveň průměr středové části)
- B = vnitřní úhel protikužele [°]

2.6 VÝLETOVÁ TRUBIČKA

Jedná se o poslední část rezonančního výfuku o průměru D_4 ústící do tlumiče a vystupující z protikužele. Průměr D_4 je o poznání menší než D_3 , což zabraňuje přímému průniku výfukových plynů ven do ovzduší. Tímto zakončením protikužele je navíc dosaženo vzniku odrazu vlny.

2.6.1 ROZMĚRY VÝLETOVÉ TRUBIČKY

Pro určení rozměrů výletové trubičky existují pouze doporučené rozmezí hodnot. Proto je velice problematické dosáhnout ideálního tvaru hned prvním vyrobeným kusem. Vodítkem pro ladění této části dle [1] je tabulka doporučených délek a průměru dle kubatury motoru.

Dle [2] by měl průměr ležet v intervalu 0,58 až 0,62 násobku průměru výfukového kolene – 12ti násobek tohoto průměru je pak hodnotou délky výletové trubičky L_s .

Objem	Délka	Vnitřní průměr D_4
[cm³]	[mm]	[mm]
50 -80	205 – 230	17 – 19
100	230 – 250	19 – 21
125	265 – 290	22 – 24
175	270 – 295	25 – 27
250	280 – 305	26 – 28
350 - 500	285 – 310	27 – 29

Tabulka 4: Rozměry výletové trubičky [1]

Při prvotním návrhu je dobré se vyhnout příliš dlouhé trubičce o malém D_4 . Právě malý průměr a přílišná délka mohou zapříčinit přehřívání motoru. [1]

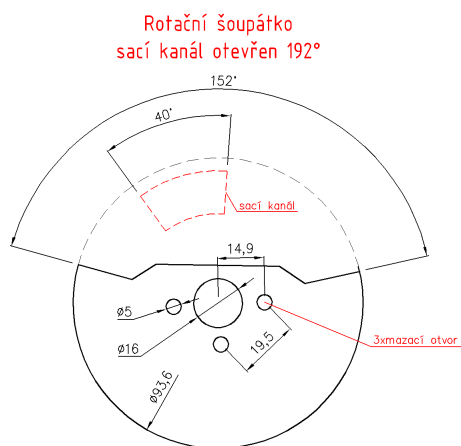
3 POPIS VYBRANÉHO MOTORU

Pro aplikaci teorie vlivu rezonančního výfuku byl zvolen motor motocyklu Jawa 50 typ 21. Tento motocykl byl vyráběn v průběhu 60. a 70. let minulého století. Hlavní důvod pro výběr právě tohoto modelu je samotný cíl užívání a následně fakt, že se jedná o jeden z posledních vývojových typů, který přináší výhody pro další úpravy – větší ložiska, silnější kartery atd.

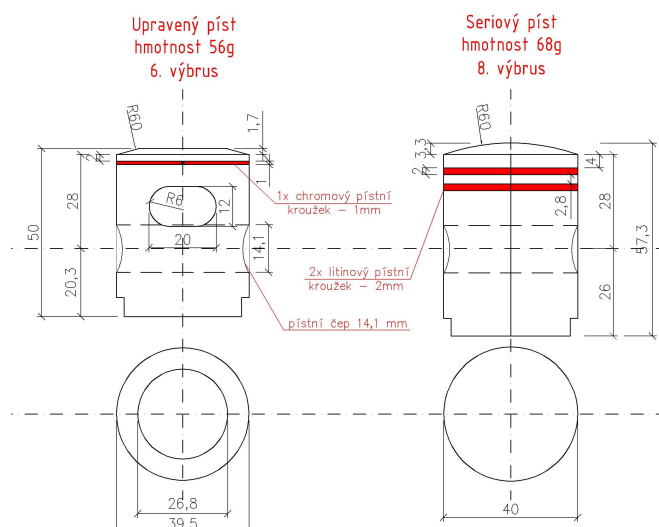
3.1 PROVEDENÉ ÚPRAVY

Vybraný motor není zcela sériovou konstrukcí a vůči originálu prodělal mnoho změn. Úpravy se dotkly všech zásadních částí. Byla upravena převodová skříň pro lepší průběh pilového diagramu – vyrovnání propadů otáček motoru při přeřazení. Sériová převodovka má velký propad mezi druhým a třetím převodovým stupněm a proto v upravené verzi je druhý stupeň přiblížen třetímu a i první k druhému. Pro stabilní chod motoru, z dlouhodobého hlediska, v otáčkách nad 10 ot./min. je namontováno bezkontaktní zapalování značky VAPE. Upravena byla také i spojka, která nyní obsahuje větší počet lamel a tudíž disponuje větší třecí plochou pro přenos většího točivého momentu a v neposlední řadě byla úplně změněna hlava válce, která má nyní jiný spalovací prostor (tvar i objem) a jiné žebrování pro lepší odvod tepla, což zabraňuje přehřívání motoru.

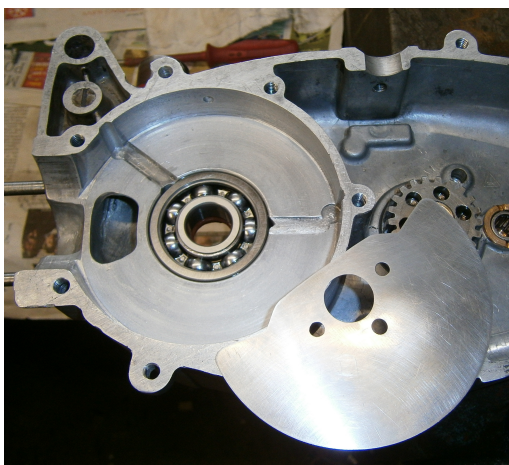
Nejzásadnější změnou provedenou na motoru je změna systému sání z původního řízení rozvodu směsí pístem na systém sání rotačním šoupátkem viz. obr. č. 14 až 16. Rotační šoupátko je upevněno na klikové hřídeli (pomocí kolíku) uvnitř klikové skříňe a ke stěně karteru je tlačeno systémem pružinek.



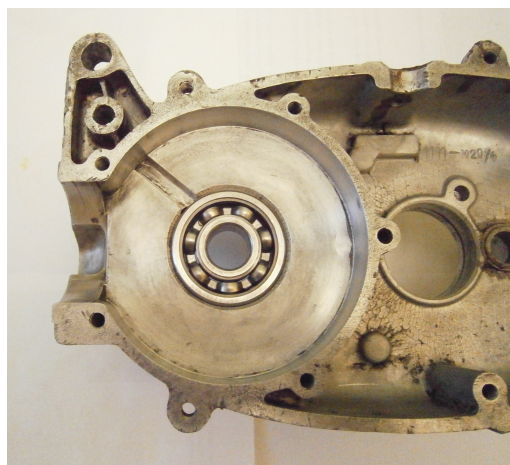
Obrázek 14: Systém sání vybraného motoru, schéma rotačního šoupátka



Obrázek 13: Píst upraveného a sériového motoru

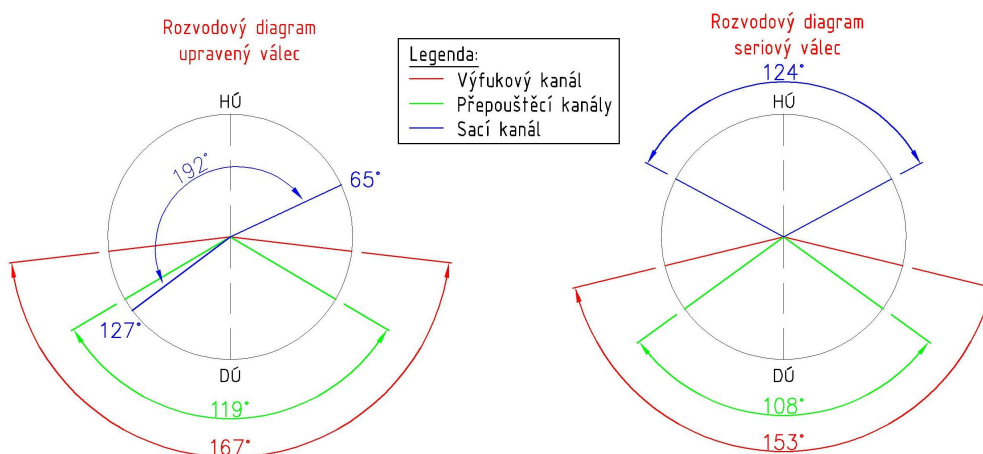


Obrázek 16: Upravený pravý karter motoru doplněn o nový sací kanál a rotační šoupátko z oceli



Obrázek 15: Sériový pravý karter motoru, sací kanál se v sérii nachází ve válci

Na obrázku č. 13 lze vidět upravený píst, který má oproti sériovému méně pístních kroužků jiných rozměrů a z jiného materiálu, podstatná je i menší hmotnost. Dalším rozdílem je jiná délka pístu. Toto zkrácení je možné, jelikož v upraveném motoru může dojít k současnému otevření výfukového a sacího kanálu – jak je znázorněné na obr. č. 17. Při rozvodu řízeném rotačním šoupátkem jej lze zkrátit až na hodnotu 50 mm (započten je 1,5 mm na překrytí) – při pístu kratším než 50 mm by došlo k současnému otevření výfukového a sacího kanálu při poloze pístu v HÚ (píst by svou spodní hranou otevřel výfukový kanál).



Obrázek 17: Rozvodový diagram sériového a upraveného válce

Z rozvodového diagramu je nejdůležitější hodnota úhlu otevření výfukového kanálu, která přímo vstupuje do výpočtu rezonančního výfuku – přesněji do výpočtu rezonanční délky L_{rez} . Ostatní výše uvedené úpravy nejsou seznamem všech provedených změn. Jedná se o výčet

nejdůležitějších prvků, které usnadňují a umožňují chod motoru ve vyšších otáčkách než byl původně navržen – tzn. namísto otáček maximálně okolo 7000 ot./min. na této hodnotě motor začíná a překračuje i hodnotu 10 000 ot./min. Tento údaj rovněž vstupuje do výpočtu L_{rez} , při volbě otáček N , ve kterých má motor pracovat nejlépe.

3.2 VYUŽITÍ MOTORU

Definování formy používání motoru je dalším nezbytným krokem při výpočtu výfuku. Důraz na maximální P a M_t , či kultivovanost chodu a šíře těchto křivek nepřímo vstupuje do výpočtu při rozhodování mezi návrhovým prvkem vhodným pro cestovní, nebo motokrosově a enduro závody.

Motor bude primárně využíván pro závody v terénu na akcích zvaných „Fichtlcopy“. Téměř každý podnik má svá pravidla. Motor se bude účastnit nejčastěji v kategorii Speciál (možné odlišné názvy dle jednotlivých podniků), kde pořadatel možné úpravy definuje v pravidlech, které musí být dodržovány. Z hlediska výfuku je na některých podnicích požadována tlumící koncovka, zároveň nesmí výfuk obsahovat žádné ostré výčnělky, či hrany a neměl by přesahovat za zadní kolo.

Nejčastěji motor v minulosti závodil na těchto typech tratí: polní a lesní cesty, louka, les, tankový polygon a motokrosová trať (v jednom případě i přímo v areálu SÚS). Nejčastější systém závodu byl vytrvalostní vícehodinový závod (3 až 5 hodin), systém rozjížděk na určitý počet kol a systém tří rozjížděk 2x10 min + 2 kola. Časté byly také kombinované tratě, kde část trati vedla lesem, nebo byla vytvořena na poli a část po asfaltových cestách. Vyjíměčně se motor účastnil i typicky cestovních závodů, které se odehrávaly na asfaltových cestách, či zámecké dlažbě – tyto závody se jezdily na určitý počet kol, nebo na nejkratší čas na definované trase. Motor bude i nadále nasazován na stejných typech závodů – většina podniků se každoročně opakuje.

3.3 TECHNICKÉ PARAMETRY MOTORU

Pro kompletní informaci a dotvoření obrazu o motoru jsou v tabulce č. 5 shrnuty a uvedeny další základní parametry motoru motocyklu Jawa 50 typ 21 v porovnání s parametry vybraného upraveného motoru.

	Sériový motor	Upravený motor
Chlazení	vzduchem	vzduchem
Teor. kompres. poměr	9,2:1	11,5:1
Rozvod sání	pístem	rotačním šoupátkem
Vrtání/zdvih	38/44 [mm]	38/44 [mm]
Karburátor	Jikov 2917 PSb	Amal 21
Zapalování	setrvačnickový magnet PAL	bezkontaktní, elektronické VAPE
Předstih zážehu	1,6 – 1,9 mm	1,7 mm
Počet přep. kanálů	2	8 (2 přes píst + 6 ve válci)
Spojka	dvoulamelová v olejové lázni	čtyřlamelová v olejové lázni
Primární převod	válečkový řetěz ČZ 3/8"x3/8" – 44 čl.	čelní ozubení s vloženým kolem
Průměr výfuk. kanálu	25 mm	29 mm
Časování výfuk. kanálu	153°	167°
Časování sacího kanálu	124°	192°
Časování přep. kanálů	108°	119°

Tabulka 5: Parametry sériového a vybraného upraveného motoru

4 APLIKACE TEORIE VLIVU REZONANČNÍHO VÝFUKU

V této kapitole budou krok po kroku spočteny všechny potřebné rozměry zvolených variant výfuků tak, aby je následně bylo možné vyrobit. Jak již bylo zmíněno, motor se nachází v upraveném stavu s existujícím výfukovým systémem, který bude nově navrhnout dle metodiky uvedené v literatuře [1] a [2], vyroben a následně prakticky odzkoušen a porovnán s výfukem dosud provozovaným a také s úplně původním, čili seriovým, na válcové brzdě.

Výfuk bude navržen ve 3 variantách odpovídajících 3 jízdním režimům. Dostanou pracovní názvy: "Terén" pro využití v terénních závodech s důrazem na průběh točivého momentu a výkonu, dále "Cesta" pro využití v závodech převážně silničního charakteru s důrazem na maximální výkon a poslední návrh "Kompromis" bude zkušební, který by mohl následně sloužit jako universální varianta propojující vlastnosti obou předchozích návrhů na tratích kombinujících terénní a cestovní prvky.

Vstupním prvkem stejným pro všechny varianty je délka výfukového kanálu ve válci 35 mm, průměr výfukového kanálu a úhel otevření $E_o = 167^\circ$.

4.1 VARIANTA 1: TERÉN

Tento výfuk bude spočten dle metodiky odpovídající [1].

Určení rezonanční délky pro zvolené otáčky 9000 ot.min⁻¹:

$$L_{rez} = \frac{E_o \cdot V_s}{N} = \frac{167 \cdot 42545}{9000} = 789,466 \text{ mm}$$

Následuje výpočet délky kolene výfuku se zvolenou hodnotou 10 násobícího faktoru dle tab. č. 1 a následné zkrácení o délku kanálu ve válci (L_H'):

$$L_H = D_1 \cdot \text{násobící faktor} = 29 \cdot 10 = 290 \text{ mm}$$

$$L_H' = L_H - l_{ve\text{ válci}} = 290 - 35 = 255 \text{ mm}$$

Difuzor bude navržen dvoustupňový s délkou první části $L_{D1} = 200$ mm a naúhlováním postupně 3° a 5° dle tab.č. 2, koncový průměr D_2 první a D_3 druhé části bude:

$$D_2 = \frac{2 \cdot L_{D1}}{\cot(3^\circ)} + D_1 = \frac{2 \cdot 200}{\cot(3^\circ)} + 29 = 49,964 \text{ mm}$$

$$D_3 = 2,5 \cdot D_1 = 2,5 \cdot 29 = 72,5 \text{ mm}$$

Délku druhé části difusoru L_{D2} a celkovou délku L_D určíme takto:

$$L_{D2} = \frac{D_3 - D_2}{2} \cdot \cot(5^\circ) = \frac{72,5 - 49,964}{2} \cdot \cot(5^\circ) = 128,791 \text{ mm}$$

$$L_D = L_{D1} + L_{D2} = 200 + 128,791 = 328,791 \text{ mm}$$

Délka výletové trubičky byla zvolena $L_s = 220$ mm dle tab. č. 4 a průměr $D_4 = 16$ mm s ohledem na dostupnost a výrobu – hodnota leží těsně pod hranicí viz. tab č. 4 a téměř v intervalu dle [2]: $D_4 \in \langle 0,58 \cdot D1 ; 0,62 \cdot D1 \rangle \rightarrow D_4 \in \langle 16,82 ; 17,98 \rangle \text{ mm}$

Dále spočteme délku celého protikužele při zvolení úhlu protikužele $B = 9^\circ$ dle tab.č. 3:

$$L_e = \frac{D_3}{2} \cdot \cot(B) = \frac{72,5}{2} \cdot \cot(9^\circ) = 228,875 \text{ mm}$$

Délku protikužele TL_B určíme takto:

$$TL_B = \left(\frac{D_3 - D_4}{2} \right) \cdot \cot B = \left(\frac{72,5 - 16}{2} \right) \cdot \cot(9^\circ) = 178,365 \text{ mm}$$

Teď už jen zbývá dopočíst délku středové části:

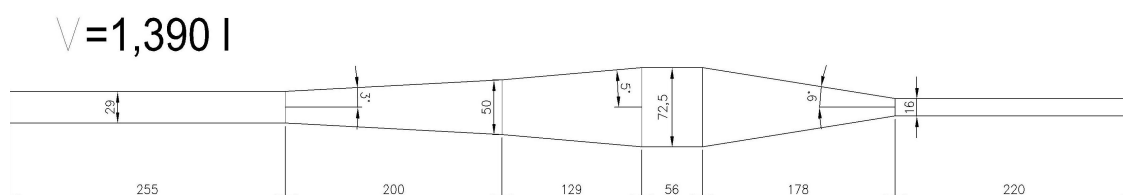
$$L_p = L_{rez} - \left(L_H + L_D + \frac{L_e}{2} \right) = 789,466 - \left(290 + 328,791 + \frac{228,875}{2} \right) = 56,217 \text{ mm}$$

4.1.1 VÝSLEDEK

Varianta č. 1, výfuk pojmenovaný „Terén“, má tyto konečné rozměry:

	L_H'	L_{D1}	L_{D2}	L_p	TL_B	L_s
Délka	255,000	200,000	128,791	56,217	178,365	220,000
Průměr	29,000	49,964	72,500	72,500	16,000	16,000

Tabulka 6: Rozměry výfuku Terén v [mm]



Obrázek 18: Schéma výfuku Terén

Celkový objem výfuku je 1,39 l a délka 1 038 mm.

4.2 VARAINTA 2: CESTA

V pořadí druhý výfuk bude rovněž spočten dle metodiky odpovídající [1]. Postup odpovídá výpočtu rozměrů první varianty, proto už jen zkráceně:

$$L_{rez} = \frac{E_o \cdot V_s}{N} = \frac{167 \cdot 42545}{10000} = 710,502 \text{ mm}$$

$$L_H = D_1 \cdot \text{násobící faktor} = 29 \cdot 9,5 = 275,5 \text{ mm}$$

$$L_H' = L_H - l_{vevalci} = 275,5 - 35 = 240,5 \text{ mm}$$

$$D_2 = \frac{2 \cdot L_{D1}}{\cot(4,5^\circ)} + D_1 = \frac{2 \cdot 160}{\cot(4,5^\circ)} + 29 = 54,177 \text{ mm}$$

$$D_3 = 2,75 \cdot D_1 = 2,75 \cdot 29 = 79,75 \text{ mm} \approx 80 \text{ mm}$$

$$L_{D2} = \frac{D_3 - D_2}{2} \cdot \cot(7^\circ) = \frac{80 - 54,177}{2} \cdot \cot(7^\circ) = 105,155 \text{ mm}$$

$$L_D = L_{D1} + L_{D2} = 160 + 105,155 = 265,155 \text{ mm}$$

$$L_e = \frac{D_3}{2} \cdot \cot(B) = \frac{80}{2} \cdot \cot(10,5^\circ) = 215,820 \text{ mm}$$

$$TL_B = \left(\frac{D_3 - D_4}{2}\right) \cdot \cot B = \left(\frac{80 - 16}{2}\right) \cdot \cot(10,5^\circ) = 172,656 \text{ mm}$$

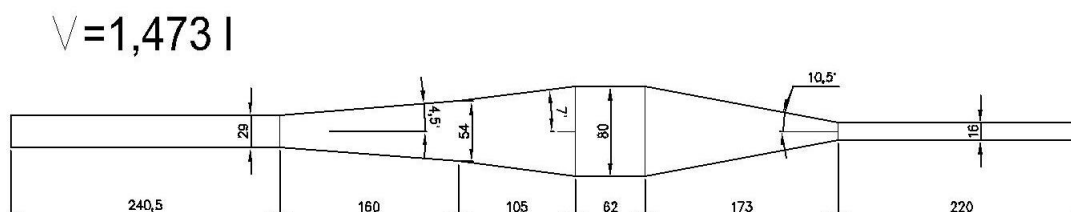
$$L_p = L_{rez} - \left(L_H + L_D + \frac{L_e}{2}\right) = 710,502 - \left(275,5 + 265,155 + \frac{215,820}{2}\right) = 61,937 \text{ mm}$$

4.2.1 VÝSLEDEK

Metodika výpočtu je shodná s variantou č.1. Rozdílný je přístup k výpočtu průměru D_3 , který byl určen jako 2,75 násobek průměru D_1 (viz. kapitola podkapitola Difusor). Varianta č. 2, výfuk pojmenovaný „Cesta“, má tyto konečné rozměry:

	L_H'	L_{D1}	L_{D2}	L_p	TL_B	L_s
Délka	240,500	160,000	105,155	61,937	172,656	220,000
Průměr	29,000	54,177	80,000	80,000	16,000	16,000

Tabulka 7: Rozměry výfuku Cesta v [mm]



Obrázek 19: Schéma výfuku Cesta

Celkový objem výfuku je 1,473 l a délka 960,5 mm.

4.3 VARIANTA 3: KOMPROMIS

Třetí a poslední výfuk bude navržen dle metodiky odpovídající [2].

Prvním krokem je rovněž zjištění rezonanční délky:

$$L_{rez} = \frac{E_o \cdot V_s}{N} = \frac{167 \cdot 1700}{10000} = 28,390 \text{ in} = 721,106 \text{ mm}$$

V tomto kroku budou stanoveny všechny vnitřní průměry výfuku – průměry D_1 a D_4 jsou totožné s předchozími variantami, zbývá určit průměr D_3 jednostupňového difusoru (zároveň i průměr středové části):

$$D_3 = 2,5 \cdot D_1 = 2,5 \cdot 29 = 72,5 \text{ mm}$$

Po zvolení úhlu difusoru $4,5^\circ$ a protikužele $9,4^\circ$ (dle kritérií viz. str. 19) lze dopočítat délkové rozměry:

$$L_H = D_1 \cdot \text{násobící faktor} = 29 \cdot 10 = 290 \text{ mm}$$

$$L_H' = L_H - l_{\text{vevalci}} = 290 - 35 = 255 \text{ mm}$$

$$L_D = \frac{D_3 - D_1}{2} \cdot \cot(4,5^\circ) = \frac{72,5 - 29}{2} \cdot \cot(4,5^\circ) = 276,360 \text{ mm}$$

$$L_e = \frac{D_3}{2} \cdot \cot(B) = \frac{72,5}{2} \cdot \cot(9,4^\circ) = 218,969 \text{ mm}$$

$$TL_B = \left(\frac{D_3 - D_4}{2} \right) \cdot \cot B = \left(\frac{72,5 - 16}{2} \right) \cdot \cot(9,4^\circ) = 170,358 \text{ mm}$$

$$L_p = L_{rez} - \left(L_H + L_D + \frac{L_e}{2} \right) = 721,106 - \left(290 + 276,360 + \frac{218,969}{2} \right) = 45,262 \text{ mm}$$

Největší rozdíl spočívá v určení délky výletové trubičky, která dle [2], při použití stejného průměru jako u předchozích variant, odpovídá:

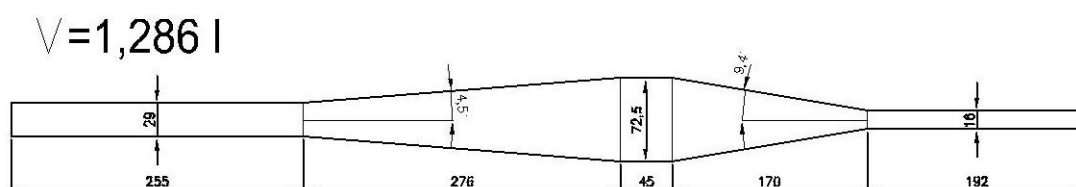
$$L_s = 12 \cdot D_4 = 12 \cdot 16 = 192 \text{ mm}$$

4.3.1 VÝSLEDEK

Varianta č. 3 s názvem „Kompromis“ má tyto konečné rozměry:

	L_H'	L_D	L_p	TL_B	L_s
Délka	255,000	276,360	45,262	170,358	192,000
Průměr	29,000	72,500	72,500	16,000	16,000

Tabulka 8: Rozměry výfuku Kompromis v [mm]

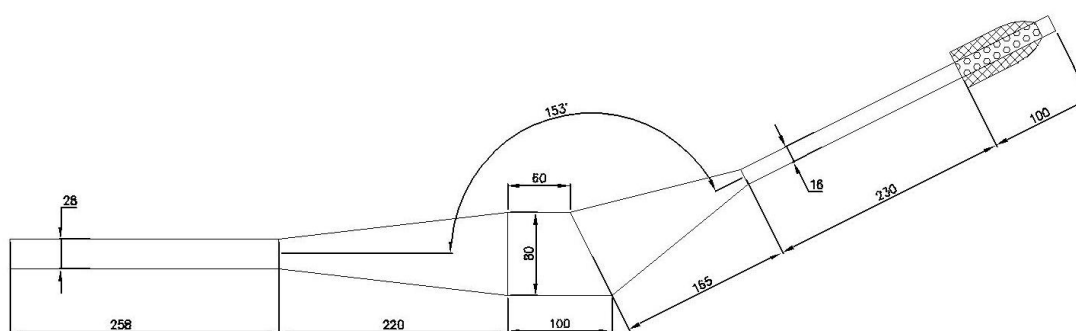


Obrázek 20: Schéma výfuku Kompromis

Celkový objem výfuku je 1,286 l a délka 938 mm.

4.4 PŮVODNÍ VÝFUK

Na motocyklu je v současné době používán výfuk těchto rozměrů:



Obrázek 21: Schéma původního používaného výfuku

Ze schématu je patrné, že původní výfuk je zlomen ve středové části tak, aby svíral úhel 153° - dále je patrné že lomu je dosaženo pouze zkrácením horního rozměru středové části, což je v rozporu s obr. č. 6. Tento tvar byl v minulosti zvolen proto, aby nedocházelo k deformacím výfuku při propružení zadní kyvné vidlice. Tomuto tvaru je přizpůsoben i držák

výfuku, který může svou polohu měnit pouze rotací okolo osy šroubu, kterým je přichycen k rámu motocyklu, jak je znázorněno na obrázku č. 22 zachycujícím současný stav celého motocyklu.



Obrázek 22: Uchycení výfuku na motocyklu

4.5 KONEČNÝ NÁVRH TVARU VÝFUKŮ

Jak je zřejmé z obr. č. 22 musí být tvar navržených výfuků upraven tak, aby jej bylo možné připevnit k rámu motocyklu, ve kterém bude motor absolvovat většinu závodů. Při úpravě musí být dodržena zásada uvedena na obr. č. 6 a úhel roven 153° .

Všechny 3 výfuky budou zlomeny ve středové části s ohledem na následnou výrobu – ohýbání a hlavně svařování (vyvarování se téměř nulovým rozměrům ve vrcholcích komolých kuželů, ze kterých se bude lom skládat). Schéma finálních tvarů viz. Příloha č. 1.

Pro následnou výrobu je možno využít shodných prvků všech variant. Postačí výroba dvou výfukových kolen, jelikož varianta Terén a Kompromis obsahuje shodnou délku této části, průměr mají všechny varianty shodný 29 mm. Dále bude každý výfuk vybaven speciálním úchytem pro možné výměny výletové trubičky. Každému výfuku bude vyrobena výletová trubička dlouhá 260 mm. Pomocí těchto 3 výletových trubiček (upravených pro 3 různé délky) bude možné prakticky odzkoušet vliv délky této část na průběh P a M_t – parametru, který je i v praxi dle [1] a [2] doporučeno stylem „cut and try“, neboli řízni (zkrat) a zkus.

Reálný výfuk se bude po výrobě skládat ze 3 částí. Samostatně bude vyrobeno koleno výfuku a výletová trubička, celé tělo (difusor, středová část a protikužel) bude kompaktní svařenec. Výletová trubička a koleno bude přichyceno ocelovou sponou.

4.6 HOTOVÉ VÝFUKY

Během výroby byly nejdříve jednotlivé části vypáleny z plechu laserem, následně stočeny a svařeny metodou TIG. Stav po obdržení hotových polotovarů výfuku je zdokumentován na obr. č. 23 a 24 – výrobu zajistil Ing. Miroslav Stejskal.



Obrázek 23: Výfuková kolena, výletové trubičky a mezikusy k jejich upevnění



Obrázek 24: Ukázka provizorně poskládaného výfuku, varianta Cesta

Aby bylo možné používat motocykly i během závodů, bylo ještě nutné přivařit plechy pro přišroubování k úchytu výfuku, sponu k připevnění výfukového kolene k difusoru, na kterém je přivařen nástavec pro zasunutí kolene a přivařit nástavec na protikužel pro připevnění výletových trubiček pomocí tří šroubků viz obr. č. 25.



Obrázek 25: Hotové výfuky

5 PRAKTICKÉ OVĚŘENÍ NÁVRHŮ

V této kapitole bude zjišťován průběh P a M_t dynamickou zkouškou pomocí válcové brzdy. Motor bude při každém měření zahřát na provozní teplotu. Před začátkem každého měření bude současně sledována teplota výfukového kolene, hlavy a válce. Sledování těchto teplot je nezbytné pro zajištění opakovatelnosti měření.

Výkon motoru bude zjišťován při neustáleném jízdním režimu – prudké zrychlení z volnoběžných otáček do maximálních použitím plynové rukojeti. V průběhu měření budou snímány otáčky klikového hřídele otáčkoměrem, který převádí elektromagnetický signál v zapalovacím kabelu. [3]

5.1 POSTUP MĚŘENÍ

Všechna měření probíhala se stejným tlumičem hluku a při stejných teplotách. Výsledkem žádného z měření není přesná hodnota výkonu, či točivého momentu, ale pouze průběh těchto křivek v závislosti na otáčkách klikového hřídele. Cílem bylo proměření charakteristik pro každý navržený výfuk, výfuk původní a sériový. Tato měření budou vzájemně porovnána pro prokázání účinnosti, či neúčinnosti navržených variant.

V průběhu měření je motocykl upnut pásy k měřicí stoličce a zadní kolo s hladkým pláštěm je pevně přitlačeno k rotačnímu válci brzdy (obr. č. 26). Měření teplot probíhalo pomocí dvou teploměrů, jak je znázorněno na obr. č. 27. Brzdové stanoviště se nacházelo v dílně, kde bylo zajištěno odsávání nebezpečných výfukových zplodin zařízením s odsávací trubicí velkého průměru umístěnou těsně za konec výfuku.



Obrázek 26: Brzdové stanoviště



Obrázek 27: Měření teploty

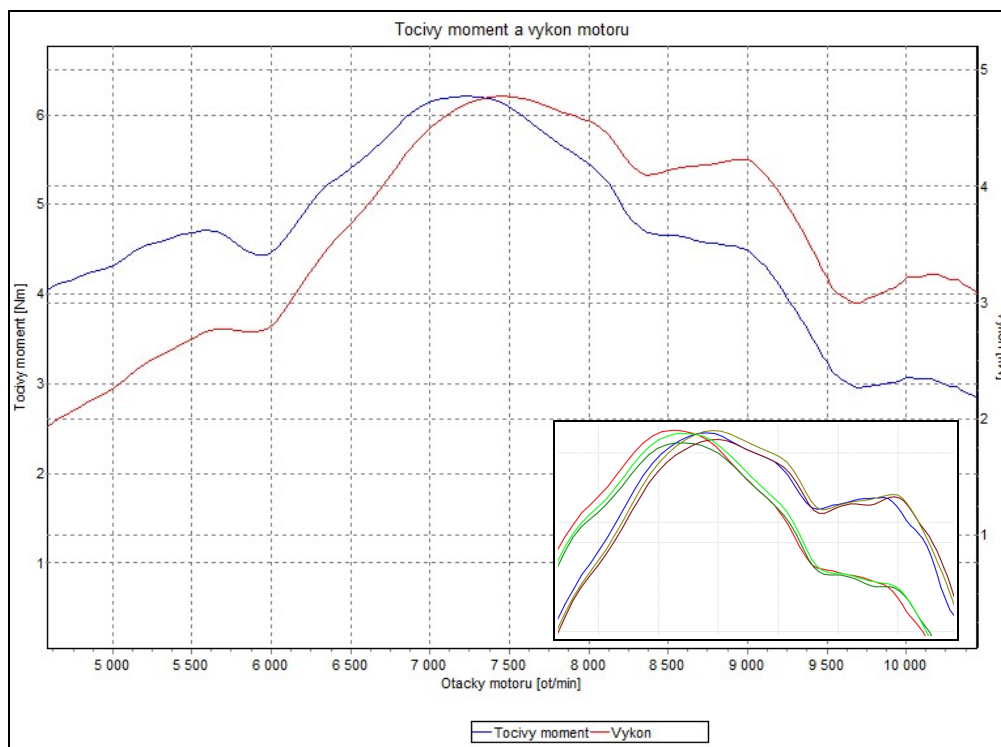
Chlazení motoru probíhalo vždy až po skončení každého měření z důvodu zkrácení doby do začátku dalšího. Toto zchlazování motoru zajišťoval ventilátor umístěn při pravém boku motoru. Záznamy z měření budou vyhodnoceny programem MotoCOM Test.

5.2 VARIANTA 1: TERÉN

První měřenou varinátou byl výfuk „Terén“. Z grafu průběhu P a M_t lze určit celková pružnost motoru s tímto konkrétním výfukem. Byly provedeny celkem 3 měření:

Teplota [°C]	Koleno	Hlava	Válec
1. měření	197	100	66
2. měření	204	96	70
3. měření	202	102	70

Tabulka 9: Teploty před začátkem každého z měření, Terén



Obrázek 28: Průběh P a M_t výfuku Terén odpovídající třetímu měření, detail v pravém dolním rohu ukazuje opakovatelnost měření (viz. tab. č. 9)

Momentová pružnost:

$$e_{M_t} = \frac{M_{t_{max}}}{M_t(P_{max})}$$

$$e_{M_t} = \frac{6,21}{6,14} = 1,011$$

Otáčková pružnost:

$$e_n = \frac{n(P_{max})}{n(M_{t_{max}})}$$

$$e_n = \frac{7447}{7230} = 1,030$$

Celková pružnost:

$$e_m = e_{M_t} \cdot e_n$$

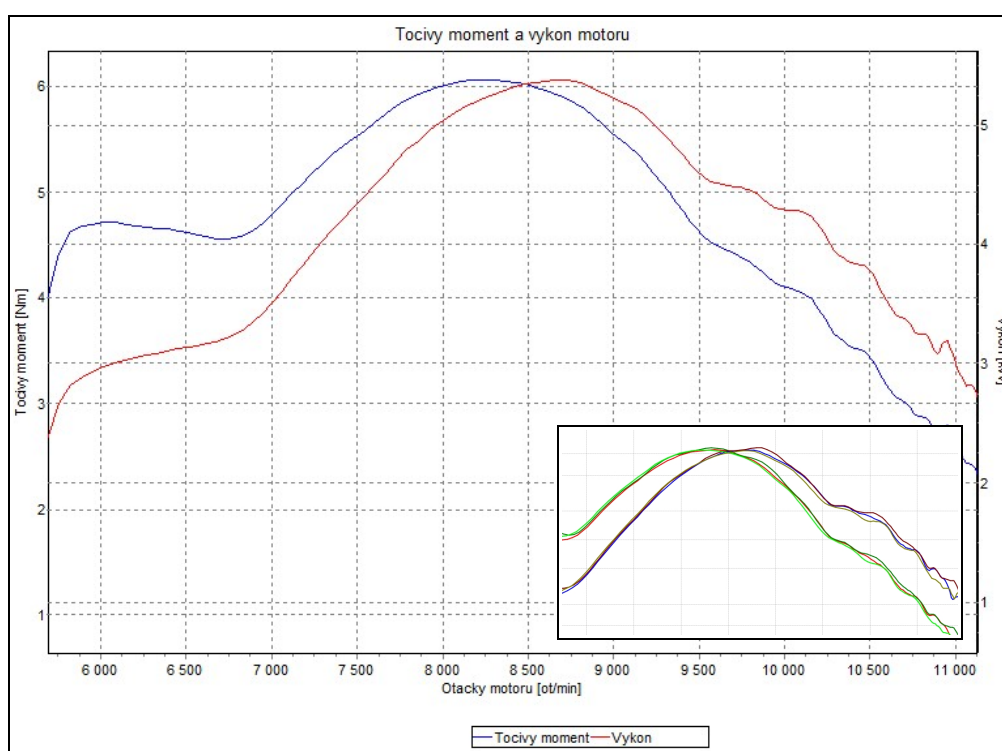
$$e_m = 1,011 \cdot 1,030 = 1,041$$

5.3 VARIANTA 2: CESTA

Druhou měřenou variantou byl výfuk „Cesta“. Z grafu průběhu P a M_t lze určit celková pružnost motoru s tímto konkrétním výfukem. Opět byly provedeny 3 měření:

Teplota [°C]	Koleno	Hlava	Válec
1. měření	199	95	65
2. měření	197	100	67
3. měření	200	95	65

Tabulka 10: Teploty před začátkem každého z měření, Cesta



Obrázek 29: Průběh P a M_t výfuku Cesta odpovídající prvnímu měření, detail v pravém dolním rohu ukazuje opakovatelnost měření (viz. tab. č. 10)

Momentová pružnost:

$$e_{M_t} = \frac{M_{t_{max}}}{M_t(P_{max})}$$

$$e_{M_t} = \frac{6,06}{5,89} = 1,029$$

Otáčková pružnost:

$$e_n = \frac{n(P_{max})}{n(M_{t_{max}})}$$

$$e_n = \frac{8719}{8239} = 1,058$$

Celková pružnost:

$$e_m = e_{M_t} \cdot e_n$$

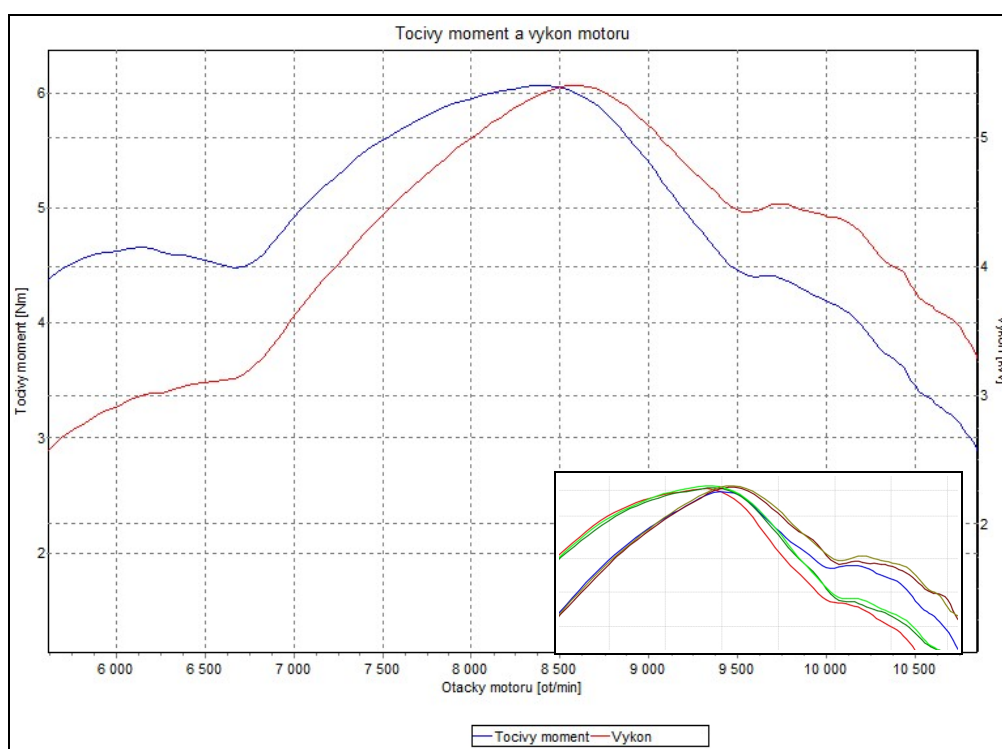
$$e_m = 1,029 \cdot 1,058 = 1,089$$

5.4 VARIANTA 3: KOMPROMIS

Třetím měřeným výfukem byl „Kompromis“. U tohoto výfuku byla použita shodná výletová trubička jako u přechozích dvou – 220 mm. Z grafu průběhu P a M_t lze určit celková pružnost motoru s tímto konkrétním výfukem. Ze 3 měření vyplunuly tyto závislosti:

Teplota [°C]	Koleno	Hlava	Válec
1. měření	202	98	70
2. měření	197	103	69
3. měření	200	100	70

Tabulka 11: Teploty před začátkem každého z měření, Kompromis



Obrázek 30: Průběh P a M_t výfuku Kompromis odpovídající třetímu měření, detail v pravém dolním rohu ukazuje opakovatelnost měření (viz. tab. č. 11)

Momentová pružnost:

$$e_{M_t} = \frac{M_{t_{max}}}{M_t(P_{max})}$$

$$e_{M_t} = \frac{6,06}{5,99} = 1,012$$

Otáčková pružnost:

$$e_n = \frac{n(P_{max})}{n(M_{t_{max}})}$$

$$e_n = \frac{8599}{8418} = 1,022$$

Celková pružnost:

$$e_m = e_{M_t} \cdot e_n$$

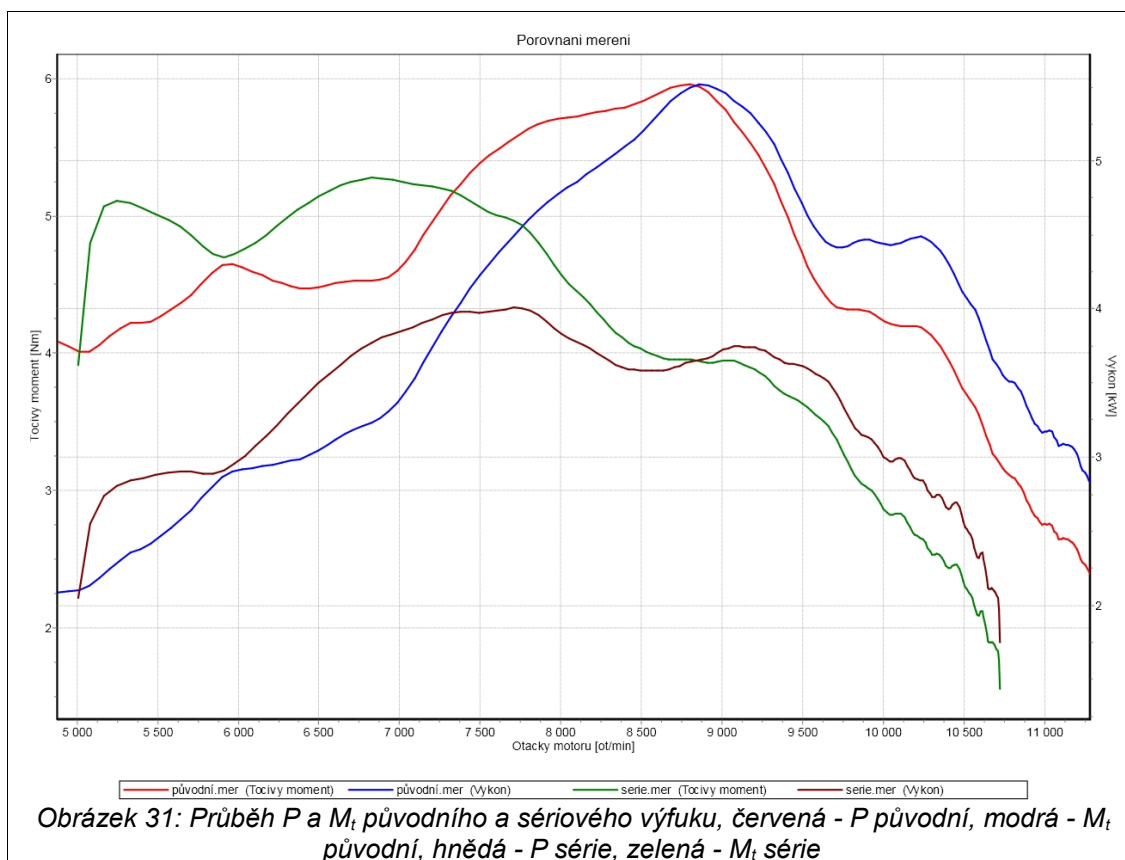
$$e_m = 1,012 \cdot 1,022 = 1,034$$

5.5 PŮVODNÍ POUŽÍVANÝ A SÉRIOVÝ VÝFUK

Aby bylo možné na závěr všechny výfuky porovnat, je potřeba uvést i charakteristiky výfuku, který byl do současnosti používán a také výfuku úplně sériového dodávaného k originálnímu neupravenému motoru. K porovnání jsou uvedeny tato měření:

Teplota [°C]	Koleno	Hlava	Válec
původní výf.	200	110	70
sériový výf.	200	90	65

Tabulka 12: Teploty před začátkem měření, původní a sériový výfuk



Momentová pružnost:

$$e_{M_t} = \frac{M_{t_{max}}}{M_t(P_{max})}$$

$$e_{M_t \text{ původní}} = \frac{5,95}{5,94} = 1,002$$

$$e_{M_t \text{ série}} = \frac{5,27}{4,97} = 1,060$$

Otáčková pružnost:

$$e_n = \frac{n(P_{max})}{n(M_{t_{max}})}$$

$$e_{n \text{ původní}} = \frac{8854}{8796} = 1,007$$

$$e_{n \text{ série}} = \frac{7708}{6827} = 1,129$$

Celková pružnost:

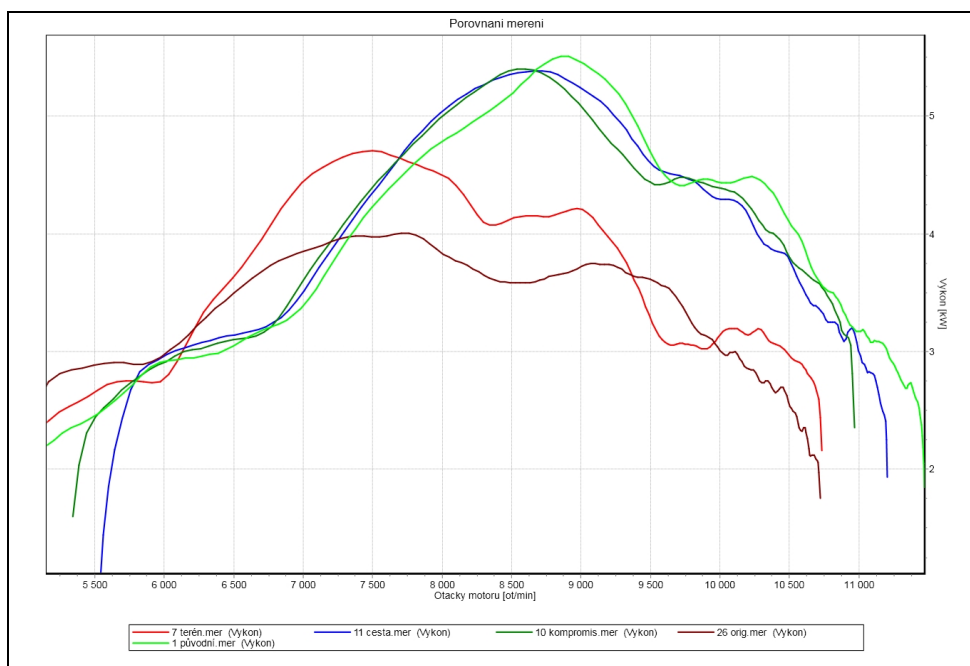
$$e_m = e_{M_t} \cdot e_n$$

$$e_{m \text{ původní}} = 1,002 \cdot 1,007 = 1,009$$

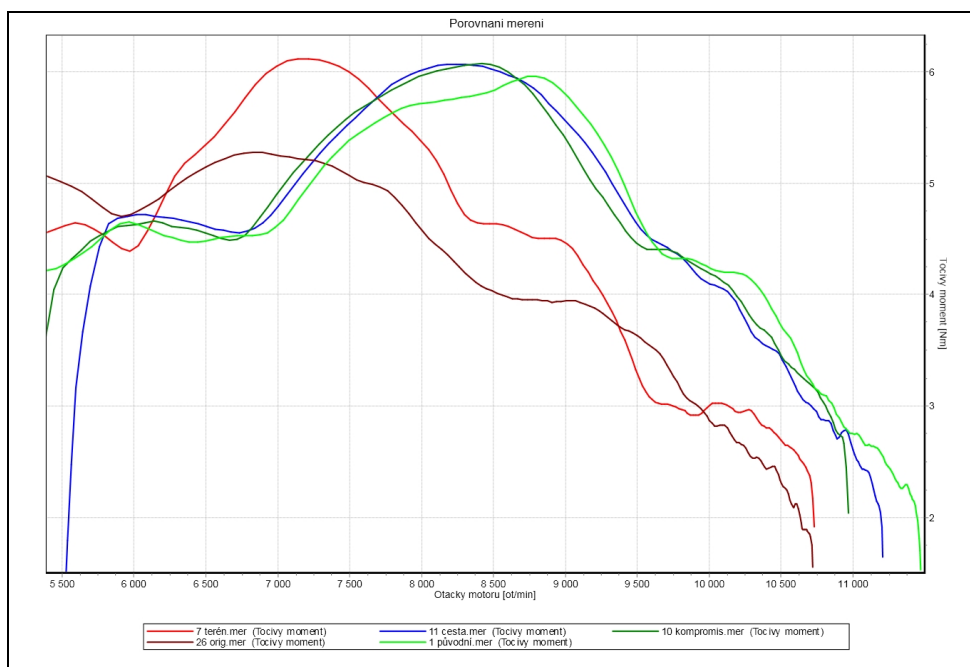
$$e_{m \text{ série}} = 1,060 \cdot 1,129 = 1,197$$

5.6 SROVNÁNÍ

Z porovnání výfuků bude vybrána 1 z variant pro výsledné speciální měření – toto měření zahrnuje ověření dalších několika vlivů. Z grafů na obr. č. 32 a 33 byla vybrána varianta "Cesta" – pro svůj nejplynulejší průběh.



Obrázek 32: Porovnání průběhu výkonu: červená (terén), modrá (cesta), khaki (kompromis), hnědá (serie), zelená (původní)



Obrázek 33: Porovnání průběhu točivého momentu: červená (terén), modrá (cesta), khaki (kompromis), hnědá (serie), zelená (původní)

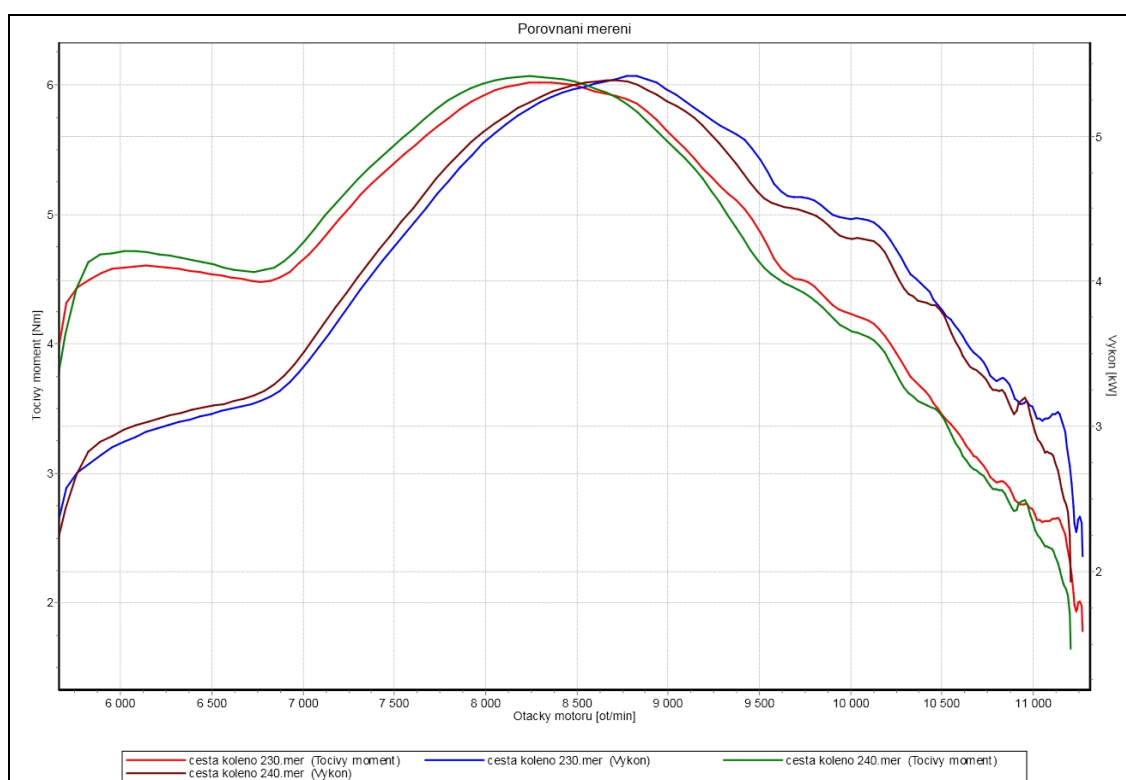
Z celkového srovnání všech varinat jasně vyplývá vliv různých variant výfuku na průběh P a M_t – nejmarkantnější jsou rozdíly v porovnání s seriovým výfukem. Kompromisní varianta téměř kopíruje průběh cestovní varianty, ale dochází u ní k mírně většímu propadu za výkonovým a momentovým maximem. Terénní varianta jasně zaostává za ostatními z hlediska výkonového, ale z hlediska točivého momentu nabízí nejvyšší hodnotu. Původní výfuk stále nabízí nejvyšší hodnotu výkonu, ale jeho průběh je oproti kompromisní a cestovní variantě více špičkovitý. V momentové charakteristice už je jeho maximální hodnota vůči "Cestě" a "Kompromisu" nižší.

5.7 OVĚŘENÍ DALŠÍCH VLIVŮ

Další měření bylo zaměřeno postupně na vliv zkrácení výfukového kolene, délky výletové trubičky a teploty výfukového kolene – všechny měření byly provedeny s výfukem "Cesta".

Teplota [°C]	Koleno	Hlava	Válec
koleno 230	197	95	65
koleno 240	199	95	65

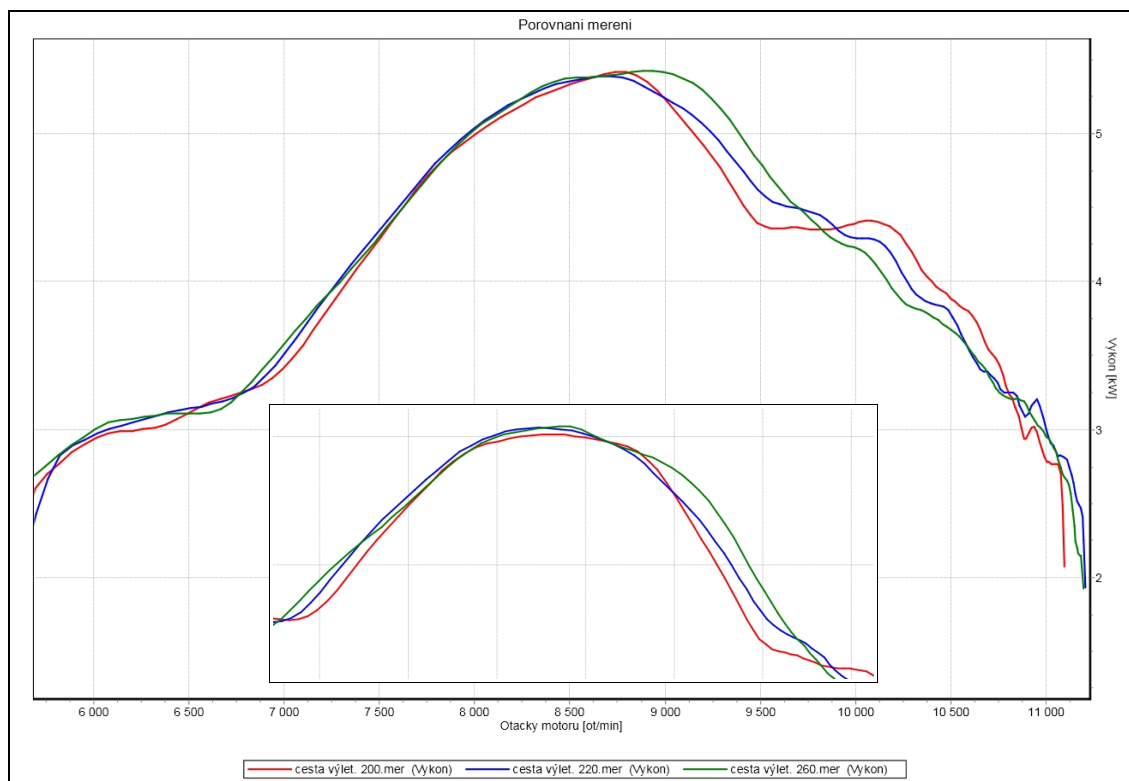
Tabulka 13: Teploty před začátkem měření, zkrácení kolene



Obrázek 34: Vliv zkrácení kolene z 240 mm na 230 mm – M_t : 230 mm (červená), 240 mm (zelená); P : 230 mm (modrá), 240 mm (hnědá)

Teplota [°C]	Koleno	Hlava	Válec
200 mm	200	95	65
230 mm	197	95	65
260 mm	195	100	68

Tabulka 14: Teploty před začátkem měření, prodlužování výletové trubičky

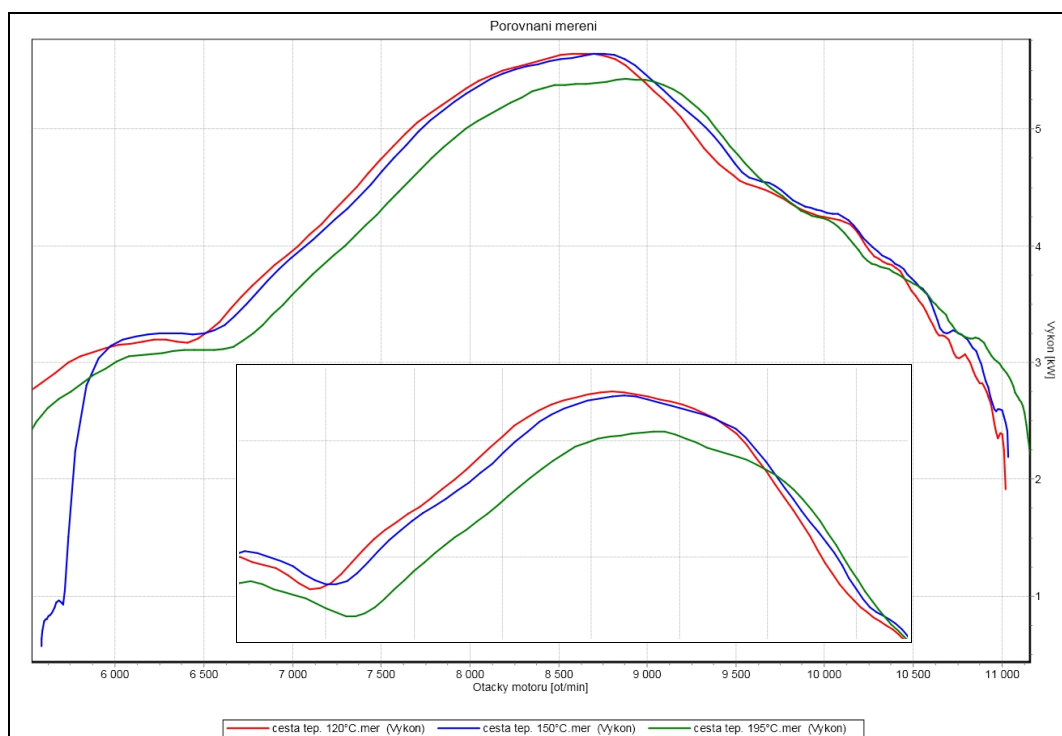


Obrázek 35: Vliv postupného prodlužování výletové trubičky na výkon – 200 mm (červená), 230 mm (modrá), 260 mm (zelená), v detailu je znázorněn vliv na točivý moment

V tomto okamžiku končí ověřování vlivů změnou rozměrů výfuku. Konečnou variantou, která se jeví nejlépe je Cestovní výfuk s prodlouženou výletovou trubičkou na 260 mm, jejíž vliv je jen pozitivní. Zkrácení kolene přineslo nárůst po dosažení maximální hodnoty, ale i propad v předešlé části křivky. Nyní bude ověřen vliv teploty výfukového kolene na konečném nastavení výfuku Cesta:

Teplota [°C]	Koleno	Hlava	Válec
1.měření	195	100	68
2.měření	150	77	53
3.měření	120	79	52

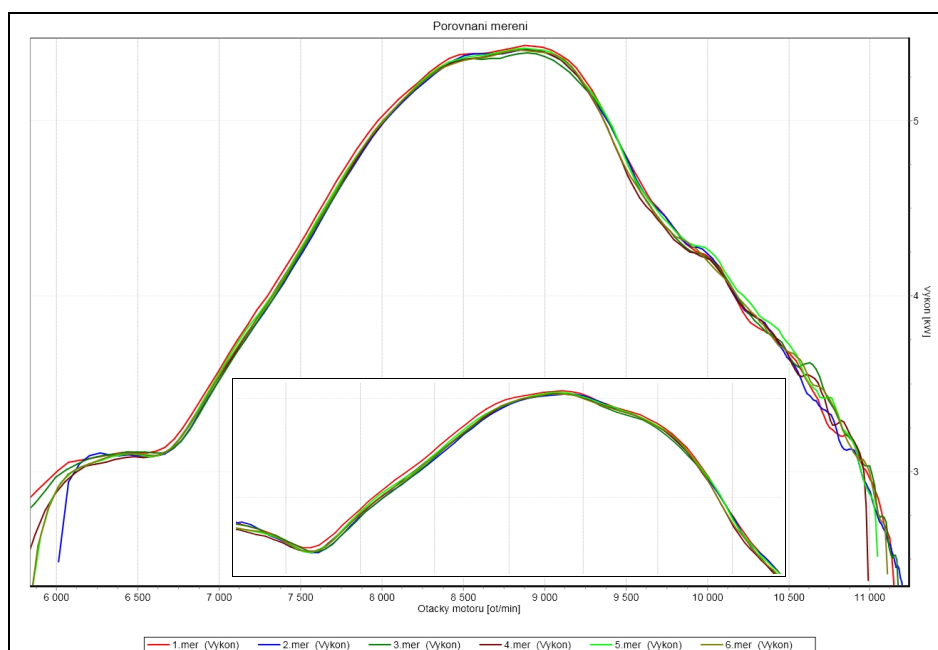
Tabulka 15: Teploty před začátkem měření, vliv teploty výfukového kolene. Pozn. Při dosažení nižší teploty výfukového kolene jsou i teploty hlavy a válce nižší.



Obrázek 36: Vliv změny teploty výfukového kolene: 120°C (červená), 150°C (modrá), 195°C (zelená), v detailu je znázorněn vliv na točivý moment

5.8 NEJLEPŠÍ VARIANTA

Na závěr bylo 6x proměřeno nejlepší nastavení cestovní varianty ke statistickému zpracování.



Obrázek 37: 6 po sobě jdoucích měření výkonu a točivého momentu (v detailu)

PRAKTICKÉ OVĚŘENÍ NÁVRHŮ

č. měř.	koleno [°C]	hlava [°C]	válec [°C]	$M_{t_{max}}$ [Nm]	$M_t(P_{max})$ [Nm]	$n(M_{t_{max}})$ [1/min]	$n(P_{max})$ [1/min]	P_{max} [kW]	e_{mt} [-]	e_n [-]	e_m [-]
1	195	100	68	6,070	5,830	8352	8879	5,40	1,041	1,063	1,107
2	195	101	70	6,040	5,795	8381	8903	5,40	1,042	1,062	1,107
3	195	101	70	6,040	5,780	8371	8892	5,30	1,045	1,062	1,110
4	196	101	70	6,040	5,800	8303	8888	5,40	1,041	1,070	1,115
5	195	103	73	6,060	5,820	8347	8873	5,40	1,041	1,063	1,107
6	195	103	72	6,040	5,820	8324	8851	5,30	1,038	1,063	1,104
\bar{x}				6,048		8346	8881	5,37			1,108
s				0,013		29	18	0,05			0,004

Tabulka 16: Vyhodnocení nejlepší varianty

Z tab. č. 16 lze pomocí Studentova rozdělení určit interval spolehlivosti pro střední hodnotu celkové pružnosti motoru, maximálního M_t a P . Studentovo rozdělení bylo použito z důvodu počtu měření $n < 30$; $n=6$, čemuž odpovídá počet stupňů volnosti $\nu = n-1=5$. Na základě těchto hodnot lze ve statis. tabulkách [5] najít hodnotu kvantilu $t_{1-\frac{\alpha}{2}} = t_{0,995} = 4,032$ pro hodnotu, $\alpha = 0,01$ která odpovídá 99% intervalu spolehlivosti.

$$\mu \in \bar{x} \pm \frac{s}{\sqrt{n}} \cdot t_{1-\frac{\alpha}{2}}$$

$$\mu_{n(M_{t_{max}})} \in 8346 \pm \frac{29}{\sqrt{6}} \cdot 4,032 = \langle 8298; 8394 \rangle \text{ ot. l min.}$$

$$\mu_{P_{max}} \in 5,37 \pm \frac{0,05}{\sqrt{6}} \cdot 4,032 = \langle 5,29; 5,45 \rangle \text{ kW}$$

$$\mu_{e_m} \in 1,108 \pm \frac{0,004}{\sqrt{6}} \cdot 4,032 = \langle 1,101; 1,115 \rangle$$

$$\mu_{n(P_{max})} \in 8881 \pm \frac{18}{\sqrt{6}} \cdot 4,032 = \langle 8851; 8911 \rangle \text{ ot. l min.}$$

$$\mu_{M_{t_{max}}} \in 6,048 \pm \frac{0,013}{\sqrt{6}} \cdot 4,032 = \langle 6,027; 6,069 \rangle \text{ Nm}$$

5.9 VYHODNOCENÍ

Pro potřeby práce bylo provedeno celkem 24 měření, během kterých zůstal motocykl stále stejně připásán k brzdovému stanovišti. Před začátkem každého měření bylo snahou zahřát motor na, co nejvíce, totožné hodnoty teploty kolene, hlavy a válce. Díky tomuto postupu je možné jednotlivá měření mezi sebou porovnat a zhodnotit tak účinnost každé varianty v porovnání se stavem původním.

Konkrétní hodnoty výkonu a točivého momentu jsou zavádějící, pokud nejsou porovnány vždy s jiným měřením. Přesné měření P a M_t by obnášelo komplexnější znalost všech ztrát, které vznikají v motoru (např. účinnost mechanismů, odpor setrvačných hmot...) než se výkon dostane až na zadní kolo, kde byl měřen. Zajištěním porovnatelnosti jednotlivých měření lze vyhodnotit bez ohledu na absolutní hodnoty, zdali daná varianta vede ke zlepšení, či ke zhoršení a zdali se jí vyplatí na závodech používat.

	$M_{t_{max}}$ [Nm]	$n(M_{t_{max}})$ [1/min]	P_{max} [kW]	$n(P_{max})$ [1/min]	e_m [-]
Série	5,270	6827	4,00	7708	1,197
Terén	6,210	7230	4,70	7447	1,040
Kompromis	6,060	8418	5,30	8599	1,034
Původní	5,950	8796	5,50	8854	1,009
Cesta	6,060	8239	5,30	8719	1,089
Cesta*	6,048	8346	5,37	8881	1,108

Tabulka 17: Srovnání parametrů všech měřených výfuků, * jedná se o nejlepší (maximální) variantu a střední hodnoty intervalu spolehlivosti – u ostatních výfuků se jedná o hodnoty jednoho měření

Oproti teoretickému návrhu se ani u jedné varianty neshodují navržené rezonanční otáčky s otáčkami maximálního výkonu a točivého momentu. Tento fakt může být způsoben odlišnou provozní teplotou motoru a komponentů výfuku během měření, které ovlivňují rychlost šíření vln.

Terénní varianta nabízí největší hodnotu točivého momentu v otáčkách okolo 7200 ot/min, což odpovídá filosofii návrhu – důraz na točivý moment, ale křivka samotná P i M_t je příliš zvlněná, což záměrem nebylo. Tento výfuk by se hodil na velice zatáčkovitou trať.

Kompromisní varianta se svým průběhem velice podobá variantě cestovní. Z tohoto hlediska je tento návrh také nepřesný. Avšak průběh křivek je ve srovnání se všemi ostatními, kromě varianty „Cesta“, méně špičkovitý a ladnější. Tato varianta se jeví jako ideální náhradní výfuk za cestovní variantu na závodech a jako vodítko pro případné další návrhy.

Cestovní varianta je nejzdařilejší ze všech tří návrhů. Po doladění délky výletové trubičky z původních 220 mm na 260 mm (Cesta*) nabízí nejkultivovanější chod. Oproti ostatním výfukům dodává motoru i větší pružnost (viz. tab. č. 17) – kromě výfuku sériového, jež je znázorněn na obr. č. 39. „Cesta*“ bude nasazována na závodech namísto výfuku původního.

Zkrácení výfukového kolene o 10 mm (obr. č. 34) způsobilo posunutí maximální hodnoty P o 100 ot/min, M_t o řádově desítky ot/min. Výkon vzrostl o 0,1 kW a točivý moment klesl 0,05 Nm. Tento rozdíl je dán i malým rozdílem od délky, ve které měl výfuk pracovat nejlépe. Větší posuny nebylo možné provést kvůli konstrukčního řešení výfuku (obr. č. 38) – větší posuny nebyly ani dopředu plánovány.

Zkracování výletové trubičky (obr. č. 35), odhalilo vliv na P a M_t charakteristiku za maximálními hodnotami těchto veličin. Prodlužováním délky se posunovala maximální

hodnota P a M_t nahoru a do vyšších otáček a zároveň docházelo k narovnávání nerovnosti („zuby“) jasně pozorovatelné při délce 200 mm.

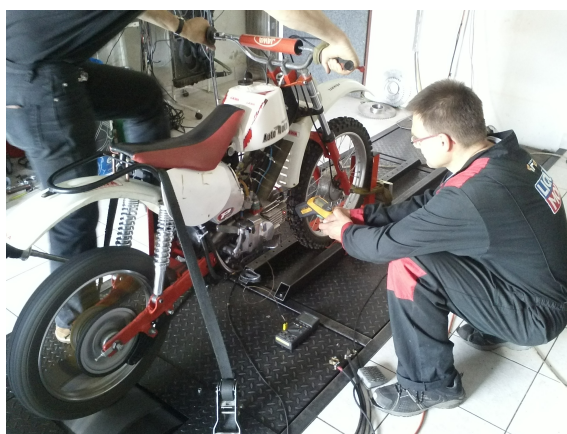
Poslední měření odhalilo a potvrdilo zásadní vliv teploty výfukového kolene (obr č. 36), která ovlivňuje rychlost šíření vln ve výfuku. Tento fakt jen potvrzuje, že absolutní hodnota P a M_t na brzdovém stanovišti, je z hlediska nasazení výfuku na závodech nic neříkající. Není tedy možné navrhnout výfuk, který by fungoval úplně stejně na každé trati. Výkon a točivý moment je nepřímo úměrný růstu teploty. Pro, co možná, nejdokonalejší variantu je zapotřebí každou trať projet v závodním tempu a udělat záznam teploty jednotlivých částí výfuků (ideálně vícekrát a při různých klimatických podmínkách) a na základě toho upravit výpočet rezonanční délky, resp. rychlosti šíření vln.



Obrázek 38: Uchycení kolene výfuku s možností zkrácení o 10 mm



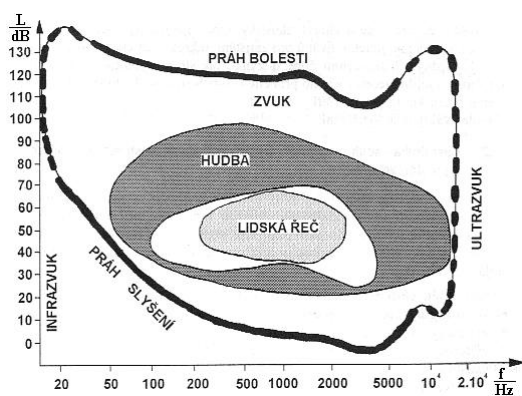
Obrázek 39: Sériový výfuk na brzdovém stanovišti



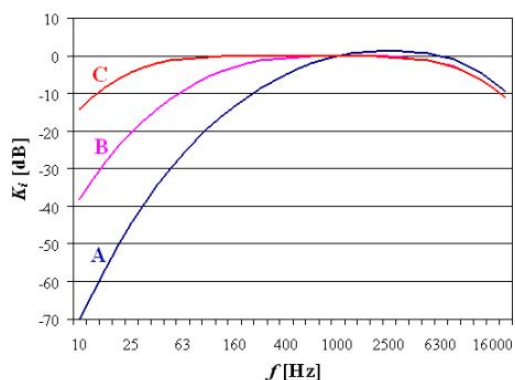
Obrázek 40: Příprava před začátkem měření, zahřívání motoru a měření teploty

6 HLUK

Hluk je jednou z emisí vydávaných silničním vozidlem během provozu. Za hluk je považován nežádoucí zvuk. Zvuk je mechanické kmitání šířící se pružným prostředím konečnou rychlostí. Lidské ucho vnímá kmitočty od 20 Hz do 20 kHz (obr. č. 42) – definování hluku je velice obtížné, neboť každý příjemce má jiný práh škodlivosti. [3]



Obrázek 42: Prahové křivky slyšení [8]



Obrázek 41: Váhové křivky filtrů A, B a C [7]

Účinek hluku na jedince je určen hladinou akustického tlaku L_p [dB]. Jelikož každé lidské ucho vnímá zvuky různých kmitočtů jinak, je v dopravě často aplikován frekvenční váhový filtr A, jehož charakteristika je na obr.č. 41, který dle frekvence zvuku stanoví korekci K_i . [6] [7] Hladina akustického tlaku je definována vztahem:

$$L_p = 20 \cdot \log \frac{p}{p_0}; \quad p_0 = 2 \cdot 10^{-5}; \quad L_{pA} = 10 \cdot \log \sum_{i=1}^{n_{fp}} 10^{\frac{L_{pi} + K_{Ai}}{10}}$$

- Kde
- p = akustický tlak [Pa]
 - p_0 = referenční akustický tlak (pro vzduch) [Pa]
 - L_p = hladina akustického tlaku [dB]
 - L_{pA} = hladina akustického tlaku vážená filtrem A [dB]
 - L_{pi} = hladina akustického tlaku v příslušném frekvenčním pásmu [dB]
 - K_{Ai} = korekce váhovým filtrem A [dB]
 - n_{fp} = počet frekvenčních pásem

Motocykl, na němž budou používány navržené výfuky, není určen k jízdě po pozemních komunikacích, proto se na něj vztahují hlukové limity konkrétních závodů – viz. kapitola 3.2 Využití motoru. Motocykl však může být vyjimečně využit i na jiných podnicích. Prozkoumána bude možnost účasti na „Fichtlcupech“ a závodech pořádaných Autoklubem ČR a ČAMS.

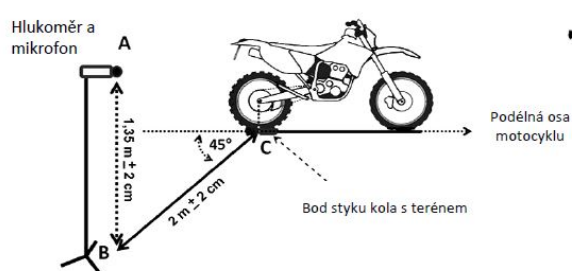
6.1 PRAVIDLA

Fichtlucy nemají jednotná pravidla, ovšem v limitech pro hluk se shodují téměř vždy. Drtivá většina závodů hluk vůbec neomezuje. Pokud už je v pravidlech hluk omezen, je povinně předepsána tlumící koncovka bez dalšího určení. Pravidla většiny závodů lze vyhledat přes webovou stránku www.jawa50zavody.wz.cz.

Další závody, kterých se může motocykl i motor zúčastnit, jsou v posledních letech pořádány i Autoklubem ČR – kategorie Jawa 50 GP. „Všechny motocykly musí splňovat dobový hlukový limit 120 dB/A při 5000 ot./min.“ [9], takto vypadá přesné znění pravidel.

Zcela vyjimečně by se mohl motocykl účastnit i závodů pořádaných ČAMS, kde nemá zcela svou kategorii. Zde se nabízí účast na podnicích Motocrossu. Pravidla ČAMS definují 2 metody měření hluku – metodu „2 m max“ a statickou zkoušku FIM. Statická zkouška přichází na řadu, když tlumič neprojde měřením dle „2 m max“. [10]

Dle metodiky pro statickou zkoušku FIM lze změřit i dobový limit dle Autklubu ČR s rozdílem v otáčkách motoru – stat. zk. FIM se u motorů do objemu válců 85 ccm provádí při 8000 ot./min. s limitem max 96 db/A pro motocrossové závody. Při této metodě je osa maximální citlivosti mikrofону rovnoběžná s vozovkou a mikrofon je umístěn 0,5 m od ústí výfuku pod úhlem 45° ve výšce ústí nejméně 0,2 m nad zemí. Metoda „2 m max“ měří hluk při maximálních otáčkách motoru s kritériem 116 db/A před a 117 db/A po závodě, umístění mikrofónu je znázorněno na obr. č. 44. [10], [3]



Obrázek 44: Metoda "2 m max" [10]



Obrázek 43: Tlumič výfuku

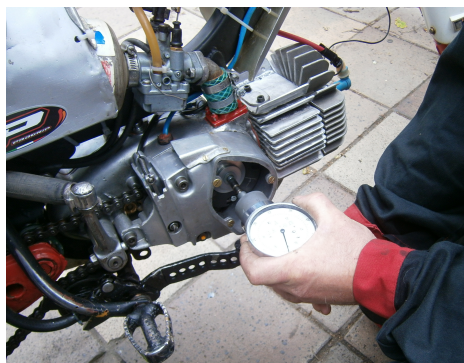
6.2 MĚŘENÍ

Do měření hluku byly zapojeny všechny 3 navržené varianty a také původní výfuk. Všechna měření probíhala se stejným tlumičem hluku (obr. č. 43). Každý výfuk byl zkoumán dle dobového limitu a statické zkoušky FIM – vždy minimálně 5 měření. Během měření stál

motocykl na místě s nastartovaným motorem. Otáčky byly měřeny mechanickým otáčkoměrem přímo na klikové hřídeli (obr. č. 46) a pro kontrolu i elektronickým otáčkoměrem na řídicích snímajícím otáčky ze zapalovacího kabelu – pouze orientačně, tento otáčkoměr má dlouhou odezvu. Mikrofon byl umístěn po vzoru statické zkoušky FIM (obr. č. 45). Hluk byl vždy změřen nejprve při 8000 ot./min. a následně při 5000 ot./min. Pro vyhodnocení je opět důležité porovnání s původním výfukem.



Obrázek 45: Kontrola rovnoběžnosti osy mikrofonu



Obrázek 46: Snímání otáček motoru mechanickým otáčkoměrem

6.3 VYHODNOCENÍ

Během měření byl v závislosti na čase snímán průběh akustického tlaku v [Pa]. Grafické zpracování všech průběhů včetně statistického vyhodnocení se nachází v Příloze č. 2 a 3. Některé varianty byly proměřeny i vícekrát.

Použitý mikrofon měřil pouze akustický tlak, nicméně z vyhodnocení plyne, že při 5000 ot./min. jsou všechny varianty s původním výfukem srovnatelné a téměř se neliší – nejvíce výfuk Kompromis o +0,9 dB v horní hranici 99% intervalu spolehlivosti, ostatní varianty jsou pak v tomto intervalu obsaženy celé. Při 8000 ot./min. se rovněž nejvíce liší od původního stejným způsobem o +2,05 dB výfuk Kompromis. Celkově neměly úpravy výfuků oproti původnímu velký vliv. Během měření bylo obtížné udržet motor přesně na požadovaných otáčkách.

Potvrzení, zdali varianty vyhovely pravidlům je problematické z důvodu absence váhového filtru A. Z hodnot korekčních koeficientů (obr. č. 41) lze předpokládat, že dobovému limitu by vyhovely všechny varianty, ale toto tvrzení není 100%. Před účastí na závodech Autoklubu ČR a ČAMS je zapotřebí provést přesnější měření. Ale jak již vyplývá z pravidel „Fichlcupů“, všechny varianty pro tyto závody vyhovují a právě výhradně těchto podniků se motor i celý motocykl v minulosti účastnil.

7 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo uvést teorii vlivu výfukového systému na parametry dvoudobého motoru a aplikovat ji na konkrétní motor Jawa 50 typ 21. Aplikace spočívala v teoretickém návrhu 3 variant výfuků. Následovala výroba a konstrukce. Praktická účinnost výfuků byla ověřena na válcové brzdě. Pro ověření vlivu úprav na emisi hluku bylo provedeno hlukové měření.

První část práce se věnuje jednotlivým částem výfuku a způsobu jakým lze navrhnout jejich rozměry. Většina rozměrů je volena pomocí empiricky zjištěných hodnot dle [1] a [2]. Pro, co možná, nejlepší návrh je nutné přesně vědět, co od motoru očekáváme – tomuto se věnuje následující kapitola. Tyto úpravy vstupují přímo, či nepřímo do výpočtu.

V další kapitole jsou spočteny rozměry 3 různých výfuků včetně úpravy tvaru, který je podobný výfuku původnímu. Bez této úpravy by nemohly být nasazeny během závodu – hrozilo by jejich poničení. Všechna vlastní schémata byla tvořena v programu AutoCAD.

Nejzásadnějším krokem bylo proměření průběhů křivek točivého momentu a výkonu na válcové brzdě brzdového stanoviště. Porovnání všech měření v základním tvaru je uvedeno na obr. č. 32 a 33 – měření byla zpracována programem MotoCOM Test. Ověření vlivu zkrácení kolene ukázalo mírný propad křivky točivého momentu a výkonu před dosažením maximální hodnoty kompenzovaný stejně mírným nárůstem v druhé části grafu (obr. č. 34). Volba proměnlivé délky výletové trubičky se ukázala jako velice účinná (obr. č. 35). Díky tomuto kroku došlo k rozšíření a větší kultivovanosti průběhu křivek výkonu a točivého momentu. Sledování vlivu teploty ukázalo, jak zásadní vliv má teplota motoru a výfukového kolene na P a M_t – obr. č. 36. Z tohoto plyne, že pro co nejpřesnější fungování výfuku je nutné znát detailně průběh teplot a jim přizpůsobit návrh. To vede k závěru, že je návrh velice závislý i na počasí, vnější teplotě a povrchu trati (bláto, voda, sníh atd.). Nicméně průběh křivek P a M_t při vyšších teplotách zůstává téměř stejný, přičemž se zvyšující se teplotou je utlumován v první půli grafu směrem dolů – před dosažením maximálních hodnot.

V poslední části rešerše pravidel „Fichtlcupů“ ukázala, že jsou splněny podmínky pro účast na těchto závodech. Dále byla zkoumána i možnost účasti na podnicích Autoklubu ČR a ČAMS – k přesnému určení zdali je možno účastnit se na těchto závodech je nutné provést přesnější měření. Měření, které proběhlo bylo vyhodnoceno za pomoci programu Matlab a zjistilo v rámci 99% intervalu spolehlivosti hladiny akustického tlaku bez vážení zvukovým

filtrem typu A. I přes tento nedostatek se ale jeví splnění limitu, pro účast na podnicích organizovaných Autoklubem ČR v kategorii Jawa 50 GP, velice pravděpodobné.

Ze všech 3 návrhů se ukázal nejlepším výfuk „Cesta“. Tento výfuk poskytuje motoru nejširší momentovou a výkonovou charakteristiku. Z tohoto hlediska se jedná o úspěšnou variantu, která bude nadále používána na závodech místo výfuku původního. V kontrastu s tímto průběhem lze demonstrovat i zásadní vliv rezonančního výfuku v praxi v porovnání s výfukem sériovým – 14,76% nárůst točivého momentu a 34,25% nárůst výkonu. Uvedené hodnoty odpovídají hodnotám sériového výfuku při nasazení na upraveném motoru.

Splněn byl také cíl podložení vlivů zkrácení kolene, změny délky výletové trubičky a teploty komponent motoru praktickým měřením a ukázaní závislostí v grafech. Tyto poznatky jsou velice cenné pro další práci s celým motorem a nastavení motocyklu pro závod.

POUŽITÉ ZDROJE

- [1] BELL, A a A BELL. *Two-stroke performance tuning*. 2nd ed. Newbury Park, Calif., USA: Haynes North America, 1999, 271 s. ISBN 18-596-0619-9.
- [2] JENNINGS, Gordon. *Two-stroke tuner's handbook*. Tucson, AZ: HP Books, 1973, iv, 156 s. ISBN 09-126-5641-7.
- [3] FIRST, Jiří. *Zkoušení automobilů a motocyklů: příručka pro konstruktéry*. Vyd. 1. Praha: S, 2008, 348 s. ISBN 978-80-254-1850-5.
- [4] FIRST, Jiří. *Energetická analýza pozemní dopravy: systémy přeměny energií*. Vyd. 1. elektronické, 2014, 1 CD-ROM (115 stran). ISBN 978-80-01-05664-6.
- [5] Statistika: Tabulky [online]. [cit. 2015-07-26]. Dostupné z:
<http://statistika.vse.cz/download/materialy/tabulky.pdf>
- [6] NEUBERGOVÁ, Kristýna. *Ekologické aspekty dopravy*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005, 163 s. ISBN 80-010-3131-4.
- [7] Průběhy váhových křivek filtrů typů A, B a C. In: *Decibelové veličiny v akustice, kmitočtová pásma* [online]. [cit. 2015-07-26]. Dostupné z:
http://ufmi.ft.utb.cz/texty/env_fyzika/EF_03.pdf
- [8] Prahová křivka slyšení. In: *Weber - Fechnerův psychofyzikální zákon* [online]. [cit. 2015-07-26]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/index.php/main.article/view/210-weber-fechneruv-psychofyzikalni-zakon>
- [9] FEDERACE MOTOCYKLOVÉHO SPORTU AČR. Technické předpisy: JAWA 50 GP. In: *Řády svazu SZM* [online]. [cit. 2015-07-26]. Dostupné z:
<http://www.autoklub.cz/dokument/5162-2014-technicke-predpisy-jawa-50-gp.html>
- [10] Technické řády CAMS: Technické řády pro motokros. In: *Technické řády divize motokros* [online]. [cit. 2015-07-26]. Dostupné z:
http://www.motocams.cz/ckfinder/userfiles/files/T%C5%98_MX_2015.pdf

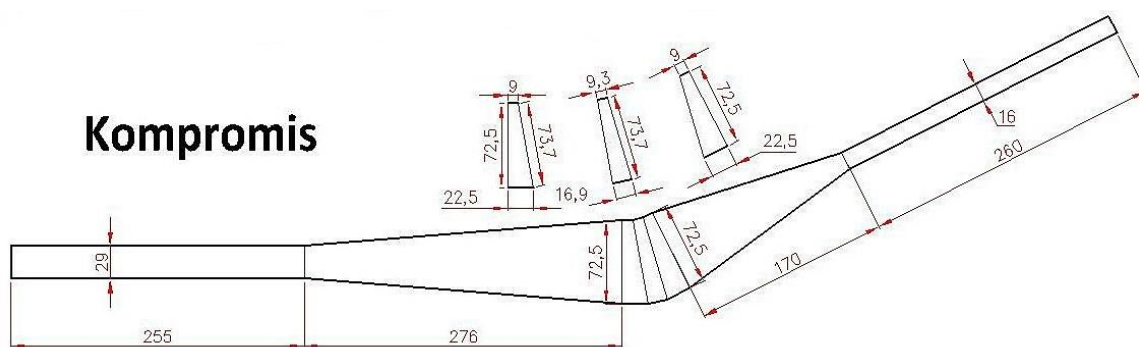
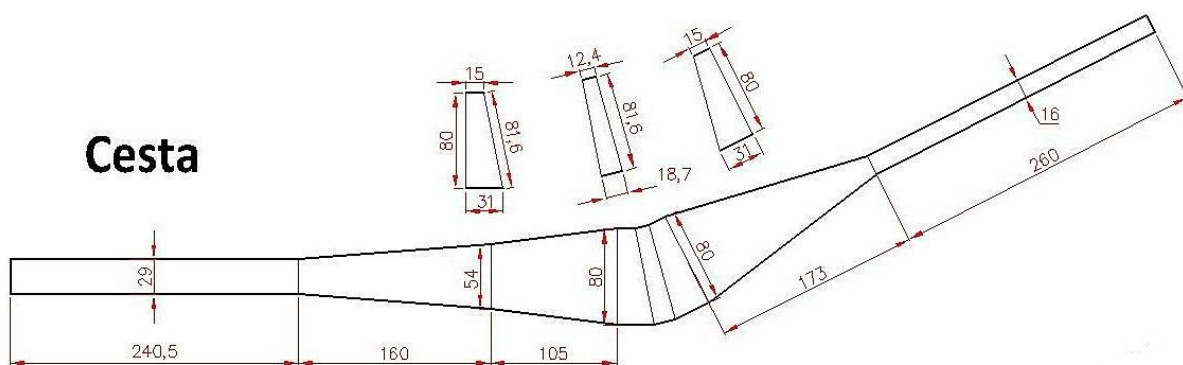
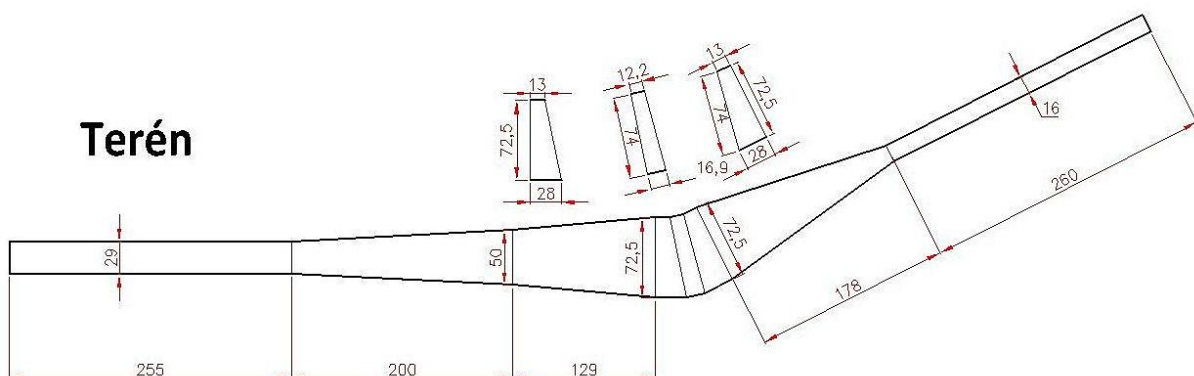
SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1: Schémata konečných podob navržených výfuků

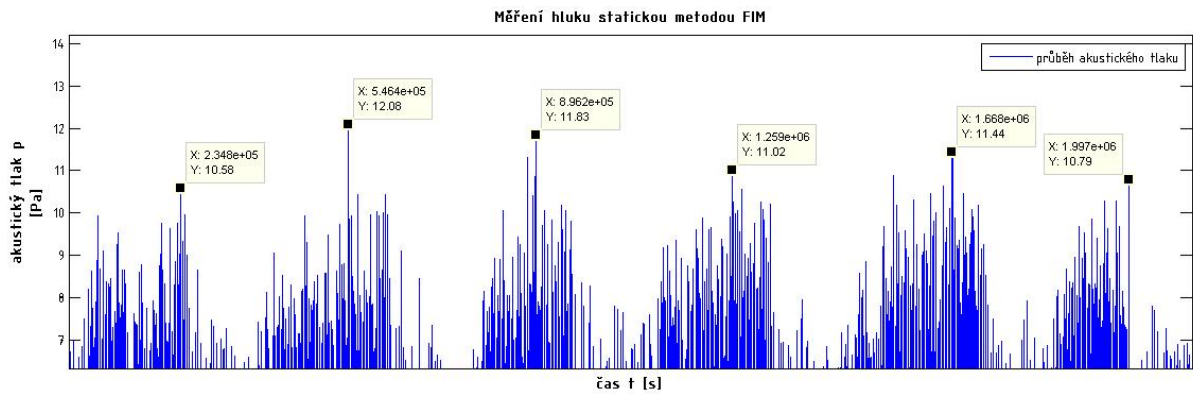
Příloha č. 2: Grafické znázornění měření hluku

Příloha č. 3: Statistické vyhodnocení hlukové zkoušky

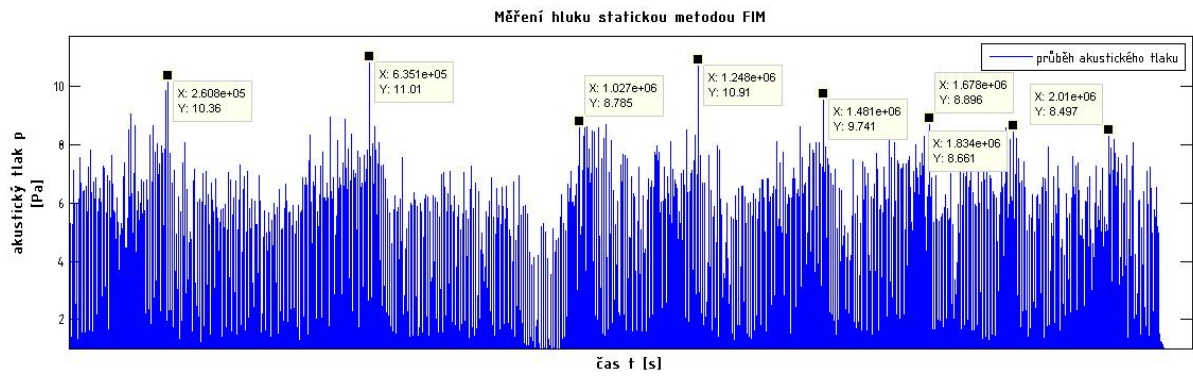
Příloha č. 1: Schémata konečných podob navržených výfuků:



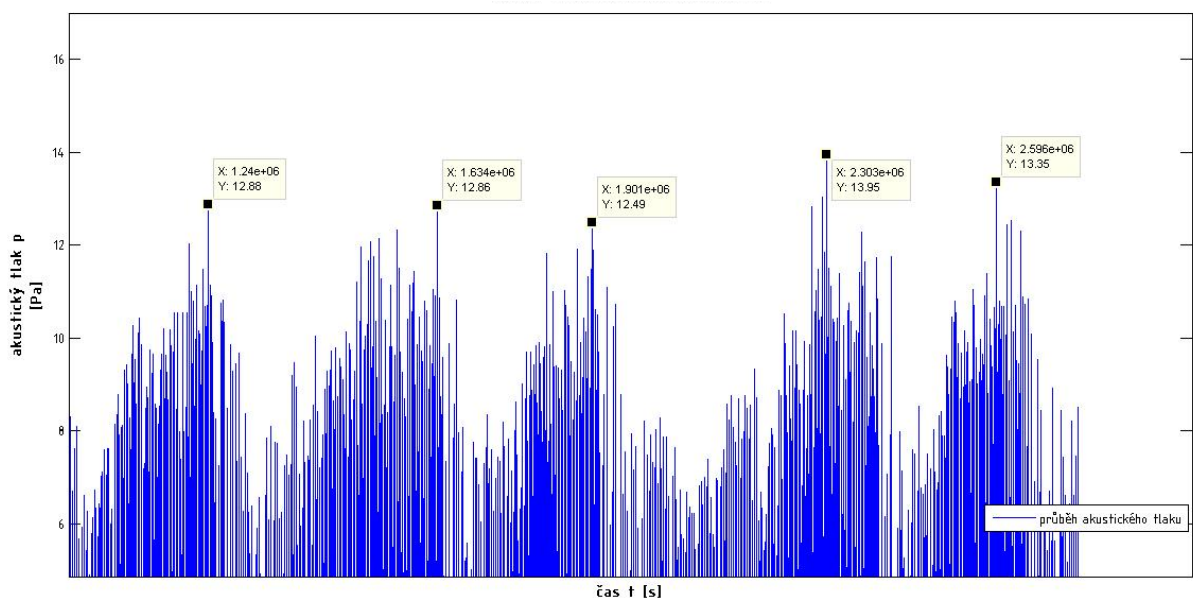
Příloha č. 2: Grafické znázornění měření hluku:



Původní - 8000 ot./min.

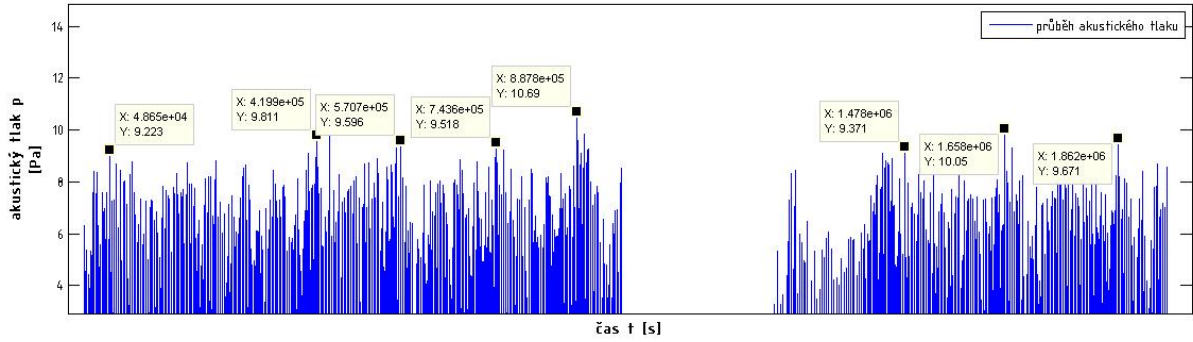


Původní - 5000 ot./min.



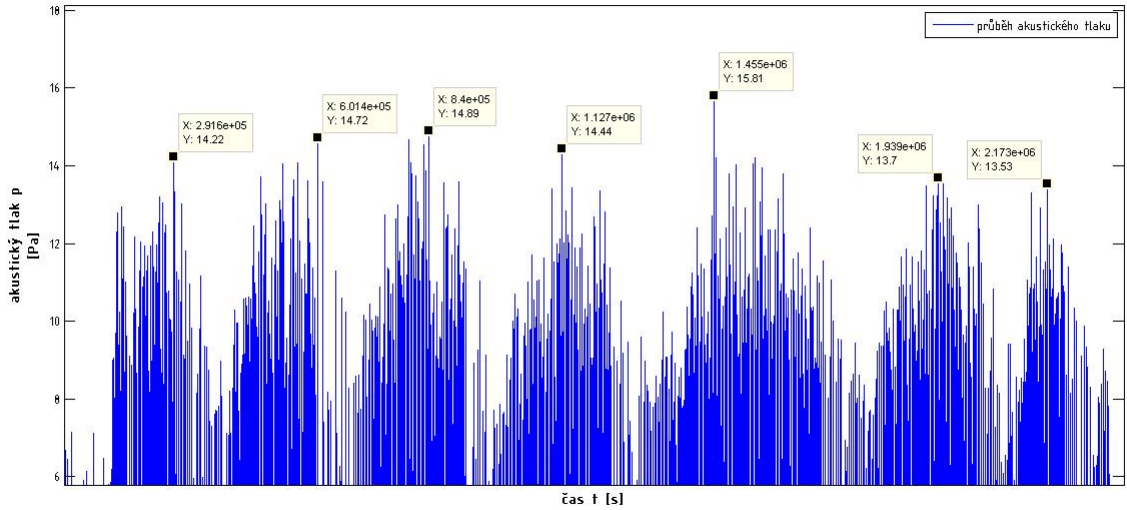
Cesta - 8000 ot./min.

Měření hluku statickou metodou FIM



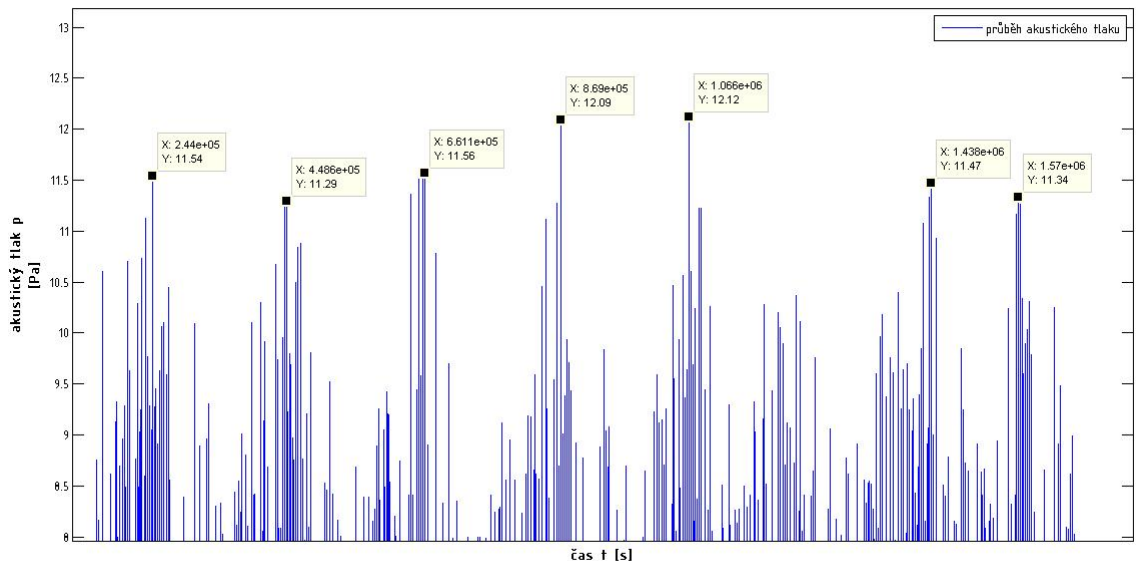
Cesta - 5000 ot./min.

Měření hluku statickou metodou FIM



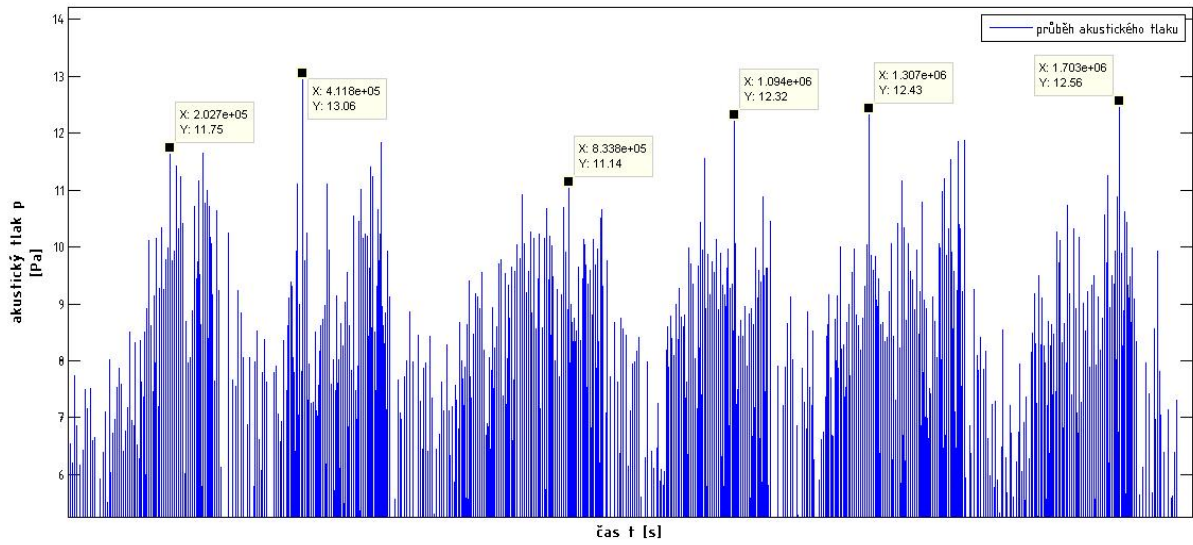
Kompromis - 8000 ot./min.

Měření hluku statickou metodou FIM



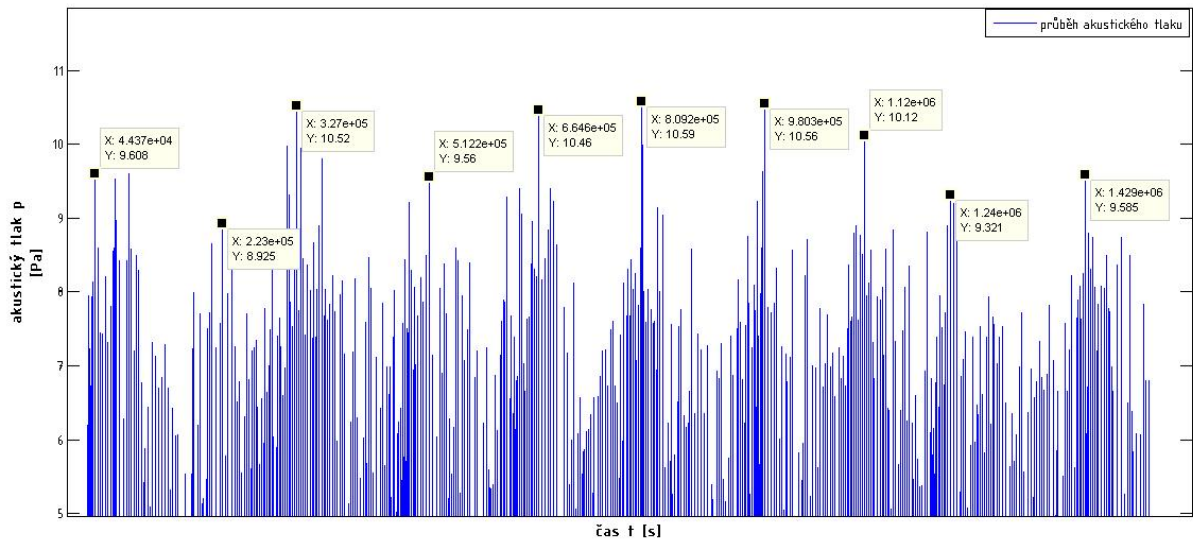
Kompromis - 5000 ot./min.

Měření hluku statickou metodou FIM



Terén - 8000 ot./min.

Měření hluku statickou metodou FIM



Terén - 5000 ot./min.

Příloha č. 3: Statistické vyhodnocení hlukové zkoušky:

	č. měř.	p_{8000} [Pa]	L_{p8000} [dB]	p_{5000} [Pa]	L_{p5000} [dB]		č. měř.	p_{8000} [Pa]	L_{p8000} [dB]	p_{5000} [Pa]	L_{p5000} [dB]	
Původní	1	10,58	114,47	10,36	114,29	Cesta	1	12,88	116,18	9,22	113,27	
	2	12,08	115,62	11,01	114,82		2	12,86	116,16	9,81	113,81	
	3	11,83	115,44	8,79	112,86		3	12,49	115,91	9,60	113,63	
	4	11,02	114,82	10,91	114,74		4	13,95	116,87	9,52	113,55	
	5	11,44	115,15	9,74	113,75		5	13,35	116,49	10,69	114,56	
	6	10,79	114,64	8,90	112,97		6			9,37	113,41	
	7			8,66	112,73		7			10,05	114,02	
	8			8,50	112,57		8			9,67	113,69	
\bar{x}			115,02		113,59	\bar{x}			116,32		113,74	
s			0,46		0,93	s			0,37		0,40	
$t_{0,995}$			4,032		3,499	$t_{0,995}$			4,604		3,499	
	č. měř.	p_{8000} [Pa]	L_{p8000} [dB]	p_{5000} [Pa]	L_{p5000} [dB]		č. měř.	p_{8000} [Pa]	L_{p8000} [dB]	p_{5000} [Pa]	L_{p5000} [dB]	
Kompr.	1	14,22	117,04	11,54	115,22	Terén	1	11,75	115,38	9,61	113,63	
	2	14,72	117,34	11,29	115,03		2	13,06	116,30	8,93	113,00	
	3	14,89	117,44	11,56	115,24		3	11,14	114,92	10,52	113,42	
	4	14,44	117,17	12,09	115,63		4	12,32	115,79	9,58	113,61	
	5	15,81	117,96	12,12	115,65		5	12,43	115,87	10,46	114,37	
	6	13,70	116,71	11,47	115,17		6	12,56	115,96	10,59	114,48	
	7	13,53	116,61	11,34	115,07		7			10,56	114,45	
\bar{x}			117,18		115,29		\bar{x}			115,70		113,90
s			0,46		0,25		s			0,49		0,53
$t_{0,995}$			3,707		3,707		$t_{0,995}$			4,032		3,250

	při 8000 ot./min [dB]	při 5000 ot./min. [dB]
původní	<114,27;115,77>	<112,44;114,74>
cesta	<115,56;117,08>	<113,25;114,24>
kompromis	<116,54;117,82>	<114,94;115,64>
terén	<114,90;116,50>	<113,36;114,44>

99% interval spolehlivosti střední hodnoty hladiny akustického tlaku