

ŠOLSKI CENTER VELENJE
ŠOLA ZA STROJNIŠTVO, GEOTEHNIKO IN OKOLJE
Trg mladosti 3, 3320 Velenje

MLADI RAZISKOVALCI ZA RAZVOJ SAŠA REGIJE

RAZISKOVALNA NALOGA

**RAZVOJ IN IZDELAVA IZPUŠNEGA SISTEMA DVOTAKTNEGA
MOTORJA BT TOMOS**

Tematsko področje: TEHNIKA ALI TEHNOLOGIJA

Avtor:
Jonatan Kogelnik, 2. AS

Mentorja:
Boštjan Knez, mag. ekotehnolog
Boštjan Hribar, inž. elektrotehnike

Velenje, 2023

Raziskovalna naloga je bila opravljena na Šoli za strojništvo, geotehniko in okolje. Izdelava izpuha je potekala v delavnici na mojem domu.

Mentorja:

- Boštjan Knez, mag. ekotehnolog
- Boštjan Hribar, inž. elektrotehnike

Datum predavitve: **marec 2023**

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD Šola za strojništvo, geotehniko in okolje 2022/2023

KG dvotaktni motor, dolžina izpuha, izpuh, moč motorja pri različnih obratih, navor

AV KOGELNIK, Jonatan

SA KNEZ, Boštjan, HRIBAR, Boštjan

KZ 3320 Velenje, SLO, Trg mladosti 3

ZA Šola za strojništvo, geotehniko in okolje, Šolski center Velenje

LI 2023

IN RAZVOJ IN IZDELAVA IZPUŠNEGA SISTEMA DVOTAKTNEGA MOTORJA BT
TOMOS

TD Raziskovalna naloga

OP 44 str., 3 graf., 13 vir., 40 slik

IJ sl

JI sl / en

AI Že pred odločitvijo za izvedbo te raziskovalne naloge sem naredil nekaj resonančnih izpuhov. To področje mi namreč ni tuje.

Moj cilj je bil, da naredim s teoretično modulacijo (po formulah profesorja Gordona P. Blaira, strokovnjaka na področju dvotaktnih motorjev) dober izpuh. Pred tem sem delal z formulami drugih avtorjev.

Izpuh sem računal po teoriji, katere avtor je profesor Gordon P. Blair. Lastne teorije v času izvedbe te raziskovalne naloge nisem utegnil izvesti, zanjo bi porabil veliko časa, problematičen pa je tudi ekonomski vidik.

V sklopu raziskovalne naloge sem izdelal dva različna izpuha, ki motor opredeljujeta z vidika navora in moči pri različnih obratih. Usmeril sem se predvsem na različne dolžine izpuha in opredelil, kako dolžina izpuha vpliva na zunanje karakteristike motorja. To sem preveril na testni mizi, ki je omogočila grafični prikaz potrebnih podatkov posameznih karakteristik.

Z izdelavo izpuhov sem želel doseči čim večjo moč motorja pri določenih obratih.

Za zadovoljiv končni izpuh je nujno upoštevati postopnost izdelave izpuhov, ki v smislu nadgradnje spreminjajo predhodno verzijo. Formule in teorija izpuha se preračuna na podlagi izkušenj s prejšnjimi izdelanimi verzijami.

KEY WORDS DOCUMENTATION

ND School of Mechanical, Geotechnical and Environmental Engineering 2022/2023

CX two-stroke engine, exhaust length, exhaust, engine power at different speeds, torque.

AU KOGELNIK Jonatan

AA KNEZ Boštjan, HRIBAR Boštjan

PP 3320 Velenje, SLO, Trg mladosti 3

PB School of Mechanical, Geotechnical and Environmental Engineering, School center
Velenje

PY 2023

TI DEVELOPING AND MAKING AN EXHAUST SYSTEM AT A TWO-STROKE
ENGINE BT TOMOS

DT Research work

NO 44 p., 3 graf., 10 ref., 40 pic.

LA sl

AL sl / en

AB Even before the decision to carry out the research task, I made some resonant exhausts. This is not a foreign field. My goal was to make a good exhaust with theoretical modulation (according to the formulas of Professor Gordon P. Blair, an expert in the field of 2 stroke engines). Before that, I worked with other authors' formulas. I will calculate the exhaust according to the theory researched by Professor Gordon P. Blair. I would not have been able to develop my own theory during the implementation of this research task, I would have spent a lot of time, and the economic aspect is also problematic. As part of my research project, I made two different exhausts that define the engine in terms of torque and power at different speeds. I focused on the different lengths of the exhaust and defined how this affects the above-mentioned characteristics of the engine. I checked this on the test bench, which enabled the graphic display of the necessary data of individual characteristics.

I made the exhaust and wanted to achieve the highest possible engine power at certain speeds. For a satisfactory final exhaust, it is necessary to take into account the gradual production of exhausts, which, in terms of upgrading, change the previous version. Exhaust formulas and theory are recalculated based on experience with previous builds.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
1.1	Hipoteze:.....	2
2	PREGLED OBJAV	3
2.1	Delovanje dvotaktnega motorja	3
2.1	Delovanje resonančnega izpuha pri dvotaktnem motorju	7
2.2	Zgodovina in začetki resonančnega izpuha dvotaktnega motorja	9
2.3	O avtorju formul, uporabljenih za izračun izpuhov	10
2.4	Hrup	12
3	IZDELAVA IZPUHA	12
3.1	Izračun izpuha	12
3.1.1	Merjenje stopinj izpušnega kanala	13
3.1.2	Izračun povprečnega tlaka valja	14
3.1.3	Izračun celotne dolžine izpuha od bata v cilindru do končnega dela izpuha	14
3.1.4	Izpušni kanal	15
3.1.5	Diametri posameznih delov izpuha	16
3.2	Viri formul	18
4	POSTOPEK IZDELAVE IZPUŠNEGA SISTEMA	22
4.1	Izdelovanje plašča dušilca	30
4.2	Določitev pozicije prirobnice izpuha	31
5	MERJENJE REZULTATOV MOČI MOTORJA IN OBRATOV	32
5.1	Meritve	34
5.2	Meritev izpuha 1	35
5.3	Meritev izpuha 2	36
5.4	Primerjava meritev izpuha 1 in izpuha 2	37
6	STROŠEK IZDELAVE RESONANČNEGA IZPUHA	38
7	HRUP RESONANČNEGA IZPUHA	38
7.1	Delovanje dušilca	38
7.2	Meritve hrupa	39
8	ZAKLJUČEK	41
9	VIRI	43

KAZALO SLIK

Slika 1: Prikaz polnjenja ohišja pod batom z zmesjo zraka in goriva.....	3
Slika 2: Končano polnjenje ohišja pod batom.....	4
Slika 3: Pretok zmesi zraka in goriva iz ohišja v valj po pretočnih kanalih	4
Slika 4: Stiskanje zmesi zraka in goriva proti zgornji mrtvi legi in vžig zmesi.....	5
Slika 5: Odpiranje izpušnega kanala, izpust izgorelih plinov iz valja skozi izpušni kanal.....	6
Slika 6: Videz resonančnih izpuhov na motokros motorjih (vir: https://www.hyggeperformance.com/products/cr125-expansion-chamber-2005-2007)....	7
Slika 7: Prvi zvočni val resonančnega izpuha	7
Slika 8: Podtlak prvega zvočnega vala povleče zmes zraka in goriva že iz valja proti izpuhu .	8
Slika 9: Prihod drugega Tlačnega zvočnega vala, ki potisne pobeglo zmes zraka in goriva nazaj v valj	8
Slika 10: Walterja Kaaden (Portal, 2023)	9
Slika 11: Prof. Gordon Purves Blair (Associates, 2023).....	11
Slika 12: Merjenje stopinj odprtega izpušnega kanala (vir: lastni).....	13
Slika 13: Diametri in posamezne dolžine resonančnega izpuha1 (vir: https://birdcagesoft.com/).....	18
Slika 14: Korak 1- merjenje stopinj odprtega izpušnega kanala (vir: How to Design a Two Stroke Expansion Chamber Performance Exhaust - Step 1).....	18
Slika 15: Izračun povprečnega tlaka valja in temperature plinov v resonančnem izpuhu	19
Slika 16: Izračun posameznih dolžin resonančnega izpuha	19
Slika 17: Površina izpušnega kanala (vir: How to Design a Two Stroke Expansion Chamber Performance Exhaust - Step 4	20
Slika 18: površina izpušnega kanala (vir: How to Design a Two Stroke Expansion Chamber Performance Exhaust - Step 5).....	20
Slika 19: Dolžine posameznih delov resonančnega izpuha(vir: How to Design a Two Stroke Expansion Chamber Performance Exhaust - Step 6)	21
Slika 20: dolžine in diametri posameznih delov resonančnega izpuha (vir: How to Design a Two Stroke Expansion Chamber Performance Exhaust - Step 7)	21
Slika 21: Izdelava prirobnic (vir: lastni).....	22
Slika 22: Izdelava prirobnic (vir: lastni).....	23
Slika 23: Izdelava prirobnic (vir: lastni).....	23
Slika 24: Zarisovanje oblike resonančnega izpuha (vir: lastni)	24
Slika 25: Zarisovanje oblike resonančnega izpuha (vir: lastni)	25
Slika 26: Izrisovanje oblike resonančnega izpuha (vir: lastni).....	25
Slika 27: Izrezane in očiščene obe polovice resonančnega izpuha (vir: lastni)	26
Slika 28: Varjenje dveh polovic resonančnega izpuha (vir: lastni).....	26
Slika 29: Varjenje polovic resonančnega izpuha (vir: lastni).....	27
Slika 30: Oblikovanje resonančnega izpuha z vodo pod tlakom (vir: lastni).....	28
Slika 31: Izdelovanje izpustne cevi resonančnega izpuha (vir: lastni).....	29
Slika 32: Izdelovanje zunanega plašča dušilca (vir: lastni)	29
Slika 33: Prileganje izpuha na motocikel (vir: lastni)	30
Slika 34: Namestitvev dušilca na resonančen izpuh (vir: lastni)	31
Slika 35: Priprave na meritve (vir: lastni)	32

Slika 36: Izvedba meritve (vir: lastni).....	34
Slika 37: Sestava dušilca (vir: lastni)	39
Slika 38: Merjenje glasnosti izpuha 1 (vir: lastni)	39
Slika 39: Merjenje glasnosti izpuha 2 (vir: lastni)	40
Slika 40: Logotip bratov Mahkota (vir: lastni).....	42

KAZALO GRAFOV

Graf 1: Moč in obrati z izpuhom 1 (vir: lastni)	35
Graf 2: Moč in obrati z izpuhom 2 (vir: lastni)	36
Graf 3: Primerjava moči in obratov med izpuhom 1 in izpuhom 2 (vir: lastni).....	37

KAZALO TABEL

Tabela 1: Prikaz stroškov	38
---------------------------------	----

SEZNAM UPORABLJENIH KRATIC

f_i – premer

HP – moč motorja v konjskih močeh

KW – moč motorja v kilovatih

MAG – varilni postopek – zaščitni plin je ogljikov dioksid (CO₂)

NM – navor motorja

$P_i - \pi$

RPM – število obratov motorja v eni minuti

SML – spodnja mrtva lega

ZML – zgornja mrtva lega

1 UVOD

Že pred odločitvijo za izvedbo te raziskovalne naloge sem naredil nekaj resonančnih izpuhov. To področje mi namreč ni tuje in me zelo zanima. Od tod tudi motivacija za izvedbo raziskovalne naloge.

Izpuh sem računal po teoriji, katere avtor je profesor Gordon P. Blair. Lastne teorije v času izvedbe te raziskovalne naloge nisem utegnil izvesti, zanjo bi porabil veliko časa, problematičen pa je tudi ekonomski vidik.

V sklopu raziskovalne naloge sem izdelal dva različna izpuha, ki motor opredeljujeta z vidika navora in moči pri različnih obratih. Usmeril sem se predvsem na različne dolžine izpuha in opredelil, kako dolžina izpuha vpliva na zunanje karakteristike motorja. V nalogi sem podrobno prikazal potek izdelave izpuha.

Meritve karakteristik (moči in vrtljajev) motorja sem izvedel s pomočjo bratov Mahkota, ki sta mi brezplačno omogočila izvedbo meritev na testni mizi. Tudi opis in potek meritev sem v nalogi podrobno prikazal.

Z izdelavo izpuhov sem želel doseči čim večjo moč motorja pri določenih obratih.

1.1 Hipoteze:

1. Dolžina resonančnega izpuha vpliva na območje največje moči v določenih obratih motorja.
2. Strošek izdelave resonančnega izpuha je nizek.
3. Hrup izpušnega sistema se z geometrijo spremembe oblike izpušne cevi spremeni.

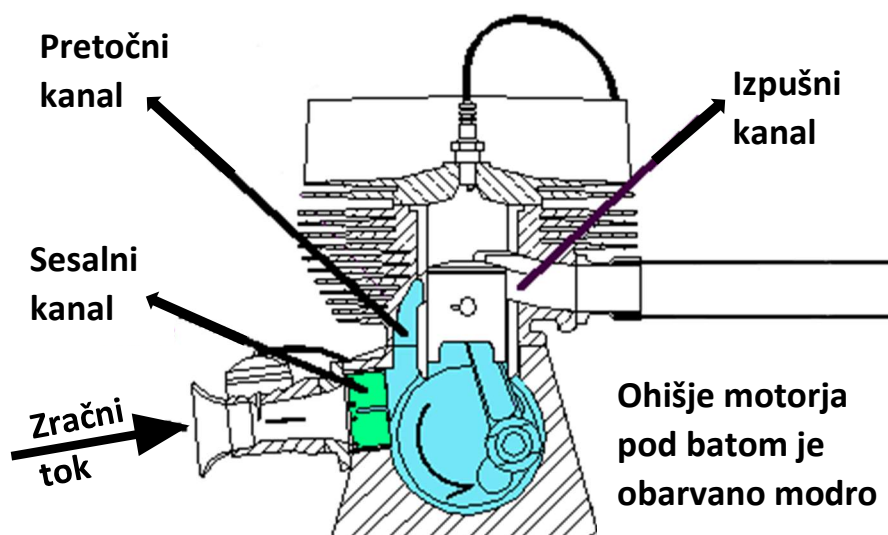
2 PREGLED OBJAV

Prvič sem se z izdelovanjem resonančnega izpuha srečal, ko sem za svoj prvi moped Tomos apn6 izdelal prvi resonančni izpuh. Z izdelkom sem hotel ugotoviti, kako se bo moč motorja povečala. Čeprav sem kopiral mere izpuha drugega motorja ter nisem imel dobrega varilnega aparata, sem bil na koncu z izdelanim izpuhom zelo zadovoljen. Moč motorja se je zelo povečala. V primerjavi z originalnim izpuhom sem v isti klanec lahko peljal eno prestavo višje. Od takrat naprej sem se poglobljeno začel učiti o izpuhih za dvotaktne motorje in njihovem delovanju. Nadgradil sem tudi znanje pri izdelavi izpuhov ter si kupil boljši varilni aparat. Čeprav je delovanje dvotaktnih motorjev zelo enostavno, so motorji lahko zelo zapleteni, zato jih je včasih zelo težko razumeti, sploh pri računanju resonančnih izpuhov.

Veliko že vem o osnovah dvotaktnih motorjev in njihovih izpuhih, vendar je še ogromno, kar mi je še neznanega in se želim še naučiti.

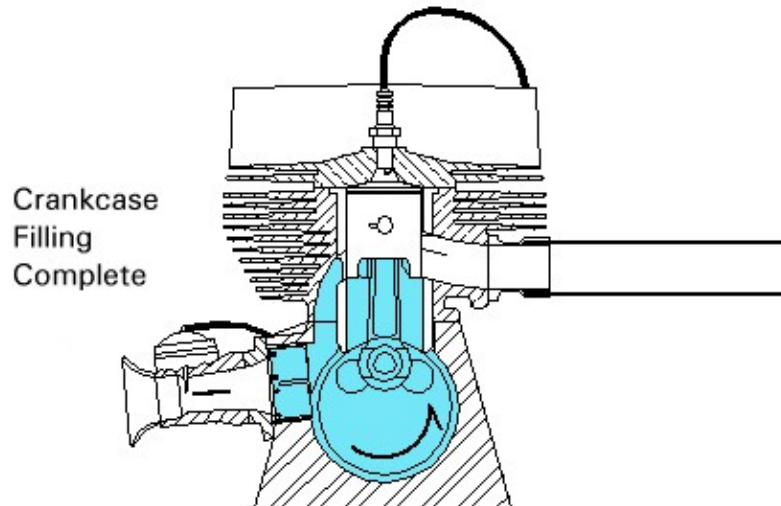
2.1 Delovanje dvotaktnega motorja

Najprej bom predstavil, kako deluje dvotaktni motor z notranjim izgorevanjem. Tako bom kasneje lažje predstavil, kako deluje resonančni izpuh pri dvotaktnih motorjih z notranjim zgorevanjem.



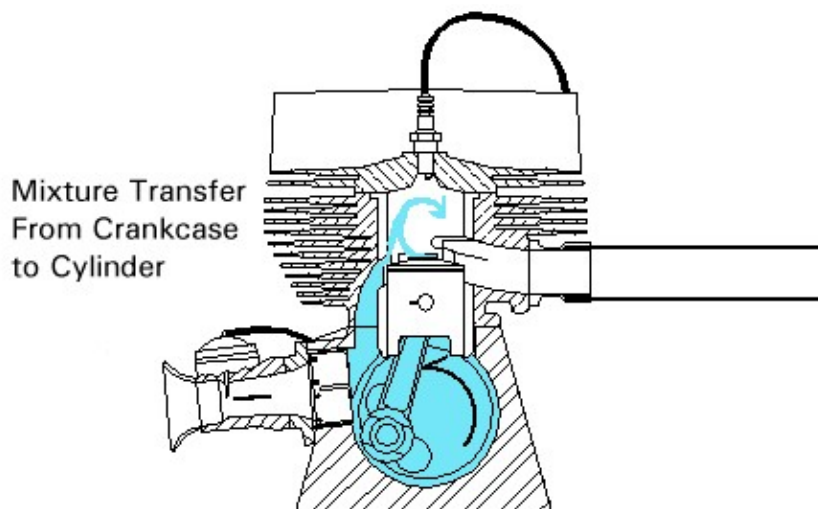
Slika 1: Prikaz polnjenja ohišja pod batom z zmesjo zraka in goriva
(vir: <http://www.2strokeengine.net/index.php>)

Ko se bat motorja premika navzgor, se pod njim v zaprtem prostoru ohišja ustvari vakum oziroma podtlak. Zrak teče skozi lamelni ventil in uplinjač, ki zapolni prostor v ohišju motorja. Ko bat doseže zgornjo mrtvo točko, se konča faza sesanja. Pri visokih vrtljajih motorja zmes zraka in goriva še naprej teče v ohišje motorja, kar je posledica vztrajnosti mešanice in podtlaka (Marquardt, 2023).



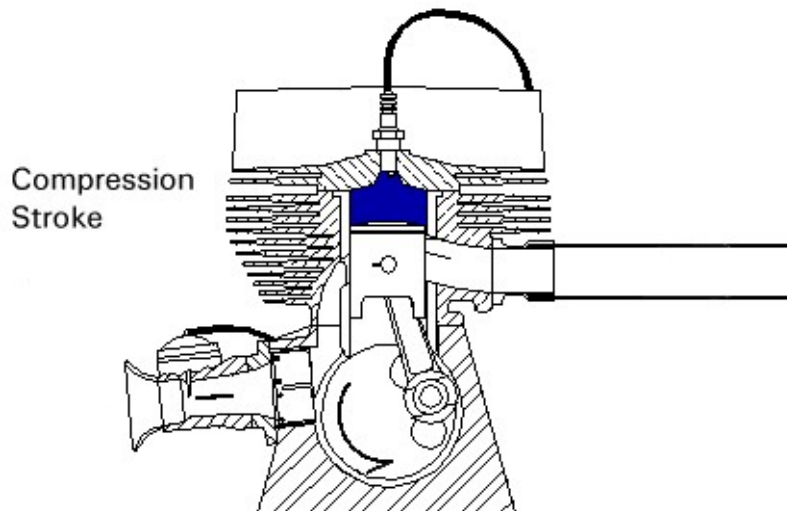
Slika 2: Končano polnjenje ohišja pod batom
(vir: <http://www.2strokeengine.net/index.php>)

Med hodom bata navzdol, bat ustvari pozitiven tlak v ohišju ročične gredi, zaradi česar se lamelni ventil zapre. Zmes v ohišju ročične gredi se stisne, dokler bat ne odpre odprtin za prenos zmesi preko pretočnih kanalov v valj motorja (Marquardt, 2023).



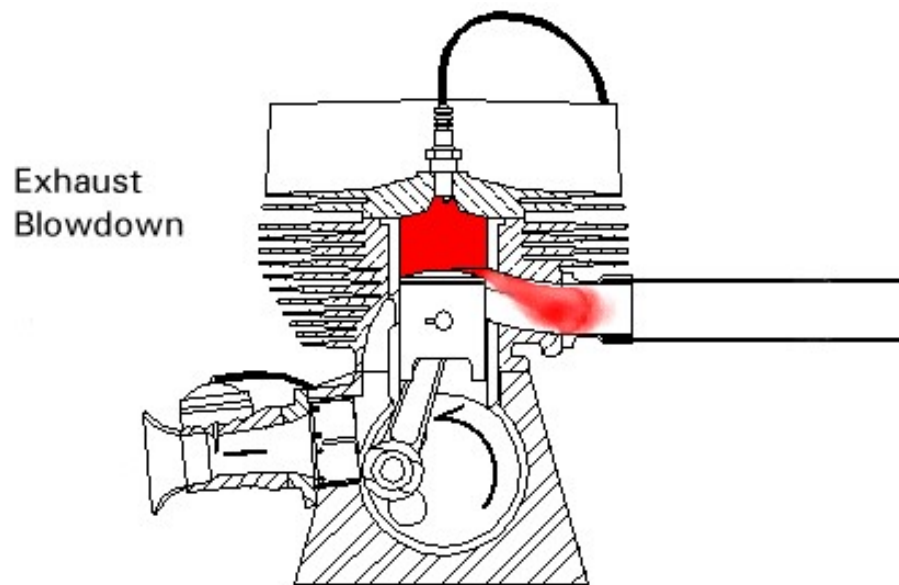
Slika 3: Pretok zmesi zraka in goriva iz ohišja v valj po pretočnih kanalih
(vir: <http://www.2strokeengine.net/index.php>)

Prenos zmesi se nadaljuje, dokler se bat ponovno ne dvigne dovolj visoko, da zapre pretočne kanale in nato še izpušni kanal. Ujeto mešanico zdaj stisne navzgor premikajoči se bat (hkrati, se novo polnjenje povleče v ohišje motorja spodaj zaradi vakuma, ki se ustvari zaradi bata) (Marquardt, 2023).



Slika 4: Stiskanje zmesi zraka in goriva proti zgornji mrtvi legi in vžig zmesi
(vir: <http://www.2strokeengine.net/index.php>)

Preden bat doseže vrh giba (približno 30° pred zgornjo mrtvo točko), vžigalna svečka vžge mešanico. Preskok iskre je časovno tako nastavljen, da goreča zmes doseže najvišji tlak nekoliko za zgornjo mrtvo točko. Mešanica, ki se vžge, povzroči velik tlak, ki potisne bat navzdol proti spodnji mrtvi točki. Ko bat odpre izpušni kanal, se prične izpušni takt. Takrat v valju pade tlak, zgoreli plini pa se sprostijo v izpušni sistem (Marquardt, 2023).

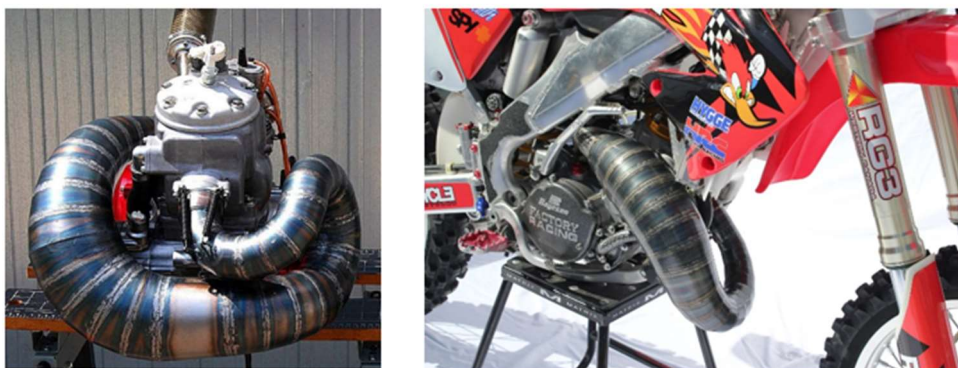


Slika 5: Odpiranje izpušnega kanala, izpust izgorelih plinov iz valja skozi izpušni kanal
(vir: <http://www.2strokeengine.net/index.php>)

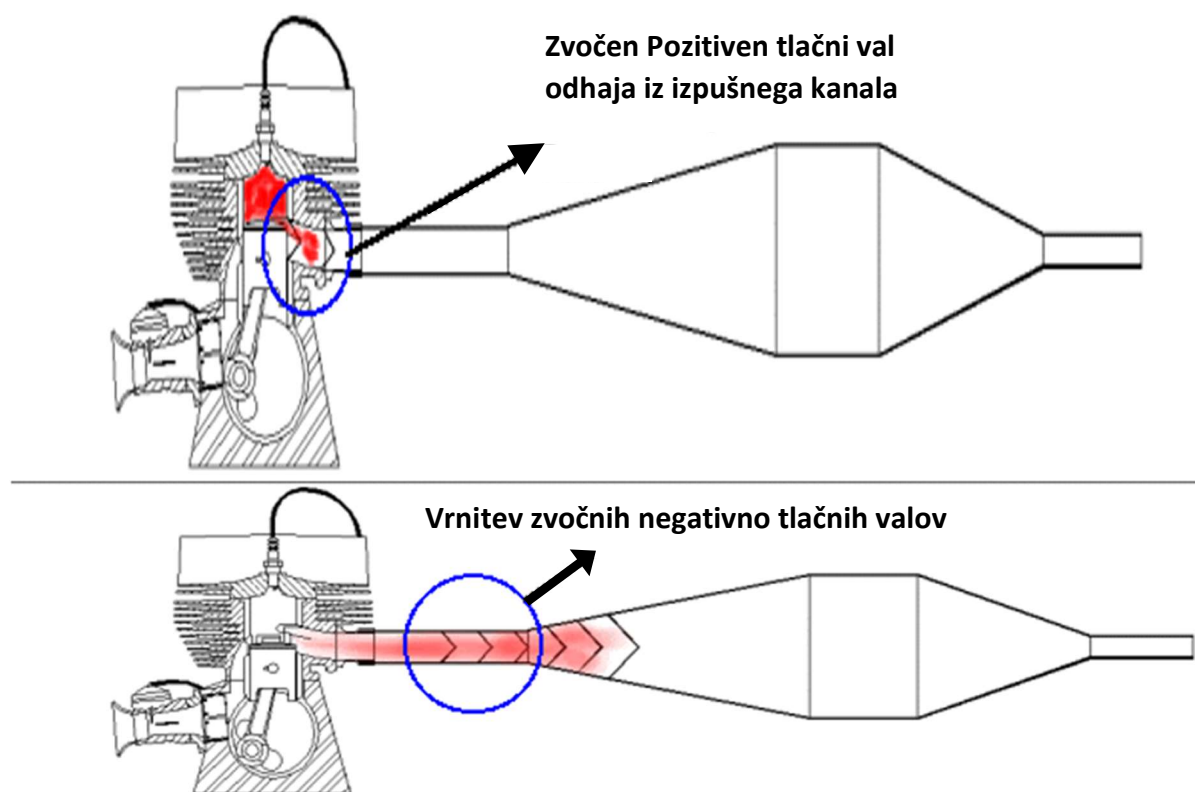
Izpušni plini izstopijo iz valja v izpuh pod tlakom, del izpušnih plinov pa se iztisne iz valja s pomočjo nove mešanice, ki vstopa v valj preko pretočnih kanalov. To imenujemo izpiranje valja dvotaktnega motorja (Marquardt, 2023).

2.1 Delovanje resonančnega izpuha pri dvotaktnem motorju

Za pravilno delovanje dvotaktnega motorja je v sistem umeščena ekspanzijska komora, ki je pritrjena na izpušno odprtino. Ekspanzijska komora ali resonančni izpuh pretvarja zvočno energijo, ki jo povzroči začetni močan impulz izpušnih plinov, izstopajoč iz valja. To povzroči, da se stopnja polnjenja valja poveča.

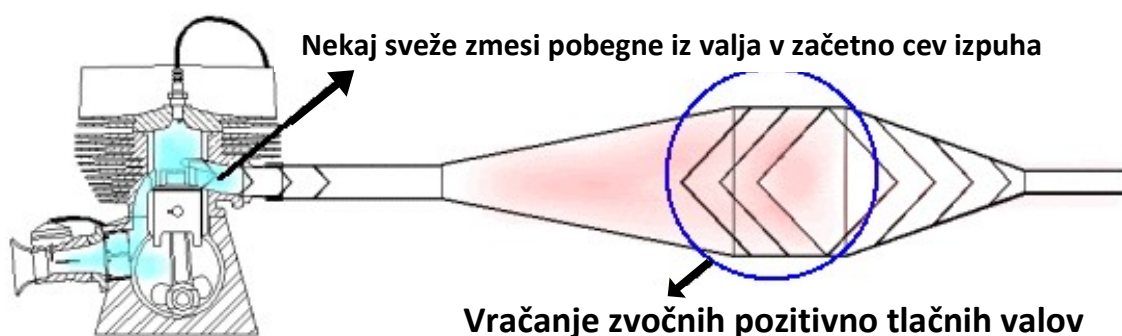


Slika 6: Videz resonančnih izpuhov na motokros motorjih
(vir: <https://www.hyggeperformance.com/products/cr125-expansion-chamber-2005-2007/>)
(vir: <https://www.pinterest.com/eriksosa32/2-stroke-pipe/>)



Slika 7: Prvi zvočni val resonančnega izpuha
(vir: <http://www.2strokeengine.net/index.php>)

Zvočni kompresijski val je posledica nenadne sprostitve tlaka v valju. Ta potuje po izpušni cevi, dokler ne doseže začetka divergentnega stožca ali difuzorja ekspanzijske komore. Z vidika zvočnih valov, ki dosežejo to stičišče, je difuzor videti skoraj kot cev z odprtim koncem. Tu se del energije impulza odbije nazaj navzgor po cevi, ki se vrne kot vakumski impulz. Podtlak pomaga zmesi, ki prihaja skozi pretočne kanale, ter tako dejansko potegne nekaj zmesi goriva in zraka iz spodnjega ohišja skozi pretočne kanale v valj (Marquardt, 2023).

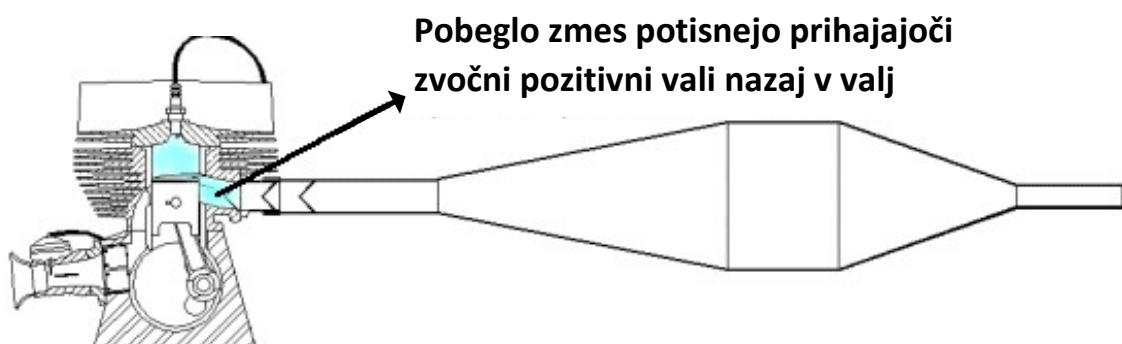


Slika 8: Podtlak prvega zvočnega vala povleče zmes zraka in goriva že iz valja proti izpuhu

(vir: <http://www.2strokeengine.net/index.php>)

Del zmesi goriva in zraka občasno tudi pobegne iz izpušnega kanala. Medtem se izvirni tlačni impulz še vedno prebija navzdol po ekspanzijski komori, se precejšen del energije pri ustvarjanju podtlačnih valov zmanjša. Konvergentni odsek komore je v tlačnem impulzu videti kot cev z zaprtim koncem. Ta povzroči, da se drugi niz valov odbije navzgor po cevi s tlačnimi valovi.

Upoštevati moramo, da ima stožec konca izpuha ostrejši kot kot difuzor, kar povzroči črpanje dela energije zmesi iz šibkega tlačnega impulza (Marquardt, 2023).



Slika 9: Prihod drugega Tlačnega zvočnega vala, ki potisne pobeglo zmes zraka in goriva nazaj v valj

(vir: <http://www.2strokeengine.net/index.php>)

Ta impulz je časovno nastavljen tako, da doseže izpušni kanal po zaprtju pretočnih kanalov, medtem ko izpušni kanal še ni odprt. Povratni kompresijski val potisne mešanico, ki jo val podtlaka vleče iz valja v izpuh, nazaj v valj. S tem se doseže boljše polnjenje valja z zmesjo. Ravni del cevi med stožcema pa zagotavlja, da pozitivni valovi dosežejo izpušni kanal v pravilnem in ustreznem času. To predstavlja pravilnost in izjemno pomembno specifikacijo izdelave cevi pri dvotaktnem motorju (Marquardt, 2023).

2.2 Zgodovina in začetki resonančnega izpuha dvotaktnega motorja

Walter Kaaden (1919–1996) je bil nemški inženir, ki je izboljšal zmogljivost dvotaktnih motorjev z razumevanjem vloge resonančnih valov v izpušnem sistemu z delom za MZ (Motorrad und Zweiradwerk). Postavil je temelje sodobnega dvotaktnega motorja. Njegovo razumevanje pretoka plina in resonance mu je omogočilo, da je s svojim 125-kubičnim dirkalnikom iz leta 1961 naredil prvi motor, ki je dosegel specifično moč 200 km/liter. Njegovi motorji so med letoma 1955 in 1976 dosegli 13 zmag na Grand Prixu in 105 uvrstitev na stopničke.

Walter Kaaden se je rodil v Pobershauu na Saškem v Nemčiji. Njegov oče je delal kot vodja prodaje v tovarni DKW. Pri osmih letih se je udeležil otvoritve dirkališča Nürburgring, pomembnega dogodka, ki mu je kasneje pripisal svoje navdušenje nad inženiringom.

Z eksperimentiranjem je ugotovil, da izpušne lastnosti vplivajo na karakteristike delovanja motorja. Ugotovil je, da se s spreminjanjem dolžine izpušne cevi hkrati spreminja tudi delovanje motorja. Po nadaljevanju eksperimentiranja je ugotovil, da divergentni stožec namesto ravne cevi deluje bolje in to je napovedalo prihod resonančnih izpuhov za dvotaktne motorje.



Slika 10: Walterja Kaaden (Portal, 2023)

2.3 O avtorju formul, uporabljenih za izračun izpuhov

Gordon Purves Blair se je rodil v Larne Co Antrim leta 1937. Šolal na Gimnaziji Larne. Nato je na Queen's University v Belfastu študiral strojništvo. Diplomiral je leta 1959, doktoriral leta 1962. leta 1978 pa je prejel »višji doktorat«, podeljen kot priznanje za znaten in trajen prispevek do znanstvenih spoznanj.

Leta 1962, ko je doktoriral, se je Gordon Blair preselil v ZDA. Tam je dve leti preživel kot docent za strojništvo na državni univerzi New Mexico. Leta 1964 se je vrnil na Queen's University, kjer je delal in ostal do predčasne upokojitve leta 1996.

Med svojo kariero na Queen's University je Gordon postal profesor strojništva, vodja oddelka, dekan inženirstva in nazadnje prorektor univerze. Njegovo objavljeno raziskovalno delo obsega več kot 100 strokovnih člankov in tri raziskovalne učbenike. Bil je urednik treh raziskovalnih zbirk. Prijavil je tudi devet patentov (Associates, 2023).

V akademskem času je dosegel tudi številna strokovna inženirska priznanja, in sicer:

- bil je pooblaščen inženir (CEng),
- leta 1974 je postal član Inštitut inženirjev strojništva (FIMechE),
- leta 1978 je postal član Društva avtomobilskih inženirjev,
- leta 1982 je postal član Kraljeve inženirske akademije,
- od leta 1991 do 1992 je bil predsednik avtomobilskega oddelka Inštitut inženirjev strojništva (VB),
- od leta 1993 do 1997 je bil član upravnega odbora Društva avtomobilskih inženirjev,
- od leta 1994 do 1996 je bil član tehničnega odbora kraljevega avtomobilskega kluba in je bil njegov predsednik od leta 1997 do 1999,
- junija 1995 je prejel nagrado CBE.

Do konca šestdesetih let prejšnjega stoletja je raziskovalno delo Gordona Blaira o motorjih ustvarilo potrjene računalniške simulacijske programe, ki so pomagali oblikovati zmogljivejše motorje in zagotavljali teoretične in oblikovalske vpogleda, ki so ekipi Queen's University dajali prednost celo pred največjimi tovarniškimi motociklističnimi ekipami. Leta 1969 so ta raziskovalna in oblikovalska prizadevanja začela rojevati sadove, ko je Steenson, dirkač na

motorju, na GP Ulstra 1969 v Dundrodu na štiritaltnem motociklu QUB končal na drugem mestu, takoj za velikim Giacomom Agostinijem.

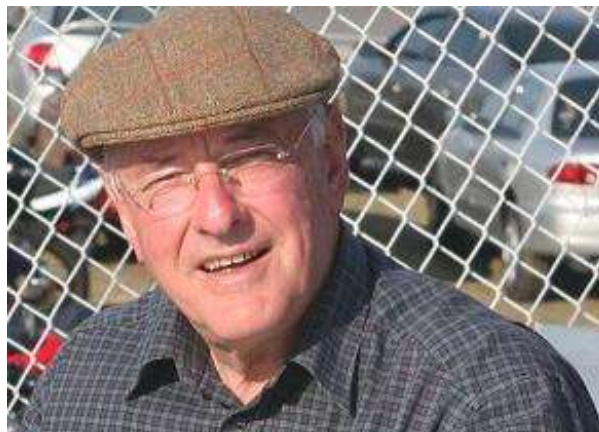
Gordon je predvidel, da je prihodnost dirkanja na dvotaktnih motorjih, zato je veliko raziskovalnega dela usmeril v njih.

Leta 1984 je profesor Gordon Purves Blair postal dekan inženiringa na Queen's University in tako predal dirkaški plašč svojim kolegom, ki so delo nadaljevali z nenehnimi dirkalnimi uspehi.

Obstaja tudi dolg seznam drugih vizionarskih projektov oblikovanja in razvoja motorjev, ki izhajajo iz del profesorja Blaira.

Profesor Blair se je leta 1996 upokojil kot zaslužni profesor. Od takrat naprej se je zanimal za načrtovanje motorjev in simulacijo. Sprva je sodeloval z ameriškim podjetjem Optimum Power Technology, da bi komercializiral programsko opremo za načrtovanje motorjev, ki jo je razvil v 30-letnih raziskavah, ki jih je izvedel s sodelavci. V pokoju je začel preučevati štiritaltne motorje.

Profesor Gordon P. Blair je umrl 21. oktobra 2010 po večletnem boju z rakom (Associates, 2023).



Slika 11: Prof. Gordon Purves Blair (Associates, 2023)

2.4 Hrup

Hrup je neželeni zvok, ki je prisoten v okolju. Povzročajo ga različni viri, zelo pogosto so to promet, industrija, gradbena dela, glasba in drugo, kar povzroča zvočne vibracije (NIJZ, 2023). Enota za merjenje hrupa je decibel (dB).

Dolgotrajna izpostavljenost prekomernemu hrupu lahko negativno vpliva na zdravje, med drugim zmanjšuje kakovost spanca, povečuje stres in tveganje za izgubo sluha. Predpisi in standardi, ki urejajo raven hrupa v različnih okoljih in panogah skrbijo za zaščito ljudi pred škodljivimi učinki hrupa (NIJZ, 2023).

3 IZDELAVA IZPUHA

Metodologija izdelave izpušnega sistema je bila sledeča:

- izračun izpušnega sistema,
- izdelava izpušnega sistema,
- merjenje rezultatov moči motorja pri določenih obratih vrtenja motorja.

3.1 Izračun izpuha

Podatki o agregatu:

- stopinje odprtega izpušnega kanala: 175° ,
- volumen izgorevalnega prostora: $55,39 \text{ cm}^3$,
- gostota v metrih na sekundo: 512,25,
- BMEP: 5,41 barov,
- temperatura izpušnih plinov: 370°C ,
- moč motorja = 4 KW,
- dolžina od bata do konca izpušnega kanala = 55 mm.

3.1.1 Merjenje stopinj izpušnega kanala

Stopinje odprtega izpušnega kanala so za računanje zelo pomembne. Ta številka pove, koliko časa je odprt izpušni kanal v enem obratu glavne gredi oziroma koliko časa potrebuje zvočni val, da prepotuje pot do konca izpuha in nazaj. Ko naredi glavna gred en obrat (360°), je izpušni kanal odprt pri večini dvotaktnih motorjih približno 180° vrtenja glavne gredi. Potreboval sem krog, na katerem je prikazanih vseh 360° . Izdelal sem ga sam.

Ta krog sem prilepil na vztrajnik, v katerem je pri dvotaktnih motorjih integriran magnet. Na blok motorja sem pritrdil žico, ki je služila kot kazalnik, na kateri stopinji vrtenja je glavna gred. Za merjenje stopinj izpušnega kanala je bilo potrebno uskladiti začetek odpiranja izpušnega kanala z lego žice, ki kaže ničlo na krogu. Ko sem zavrtel vztrajnik, se je začel kanal odpirati in potem spet zapirati. Ko se je kanal zaprl, sem s pomočjo žice razbral, pri kateri kotni stopinji se je zaprl. Tako sem dobil stopinje odprtega izpušnega kanala pri svojem motorju.



Slika 12: Merjenje stopinj odprtega izpušnega kanala (vir: lastni)

3.1.2 Izračun povprečnega tlaka valja

Izračunati je treba prostornino valja, ki se jo izračuna po naslednji formuli:

$$\begin{aligned} & (P_i/4) \times (f_i \times f_i) \times \text{hod} / 1000 = \\ & = (3,14/4) \times (40,5 \times 40,5) \times 43 / 1000 = \\ & = 55,39 \text{ ccm}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Povprečen tlak cilindra} &= (10000 \times \text{kW}) / (\text{prostornina valja} \times (\text{RPM}/60)) \\ &= 40000 / (55,39 \times (8000/60)) \\ &= 5,41 \text{ bar.} \end{aligned}$$

3.1.3 Izračun celotne dolžine izpuha od bata v cilindru do končnega dela izpuha

Zrak

Specifično toplotno razmerje = 1,4

Konstanta plinov = 287

Izpuh

Specifično toplotno razmerje = 1,36

Konstanta plinov = 300

$Y = 1,36$ $R = 300$

Temperaturo dobimo iz povprečnega tlaka, ki je približek:

- 5 bar = 350⁰ C in 7 bar = 450, v mojem primeru je 5,41 približno 370⁰ C
- $\text{TempK} = 370 + 273,15$

Gostota v metrih na sekundo = koren ($Y \times R \times \text{tempK}$)

$$\begin{aligned} \text{Gostota v metrih na sekundo} &= \text{koren} (1,36 \times 300 \times 643,15) \\ &= 512,25 \end{aligned}$$

Čas odprtja izpušnega kanala v milisekundah = (stopinje odprtja izpušnega kanala/360) x (60000/RPM)

$$\text{Čas izpuha 1} = (175/360) \times (60000/8000) = 3,645 \text{ s}$$

$$\text{Čas izpuha 2} = (175/360) \times (60000/9000) = 3,24 \text{ s}$$

Dobljeni rezultat je čas, v katerem prepotuje zvočni val do konca izpuha in nazaj do izpušnega kanala.

Ko sem imel vse potrebno za izračun celotne dolžine resonančnega izpuha, sem vse vnesel v formulo.

Dolžina izpuha v milimetrih = (gostota x 1000) x (čas izpušnega kanala/1000)/2

- izpuh1 = $(512,25 \times 1000) \times (3,645/1000) / 2 = 933,5 \text{ mm}$
- izpuh2 = $(512,25 \times 1000) \times (3,24/1000) / 2 = 829,8 \text{ mm}$

3.1.4 Izpušni kanal

Širina = 20,2 mm

Višina = 17 mm

$17\text{mm} \times 20,2\text{mm} = 343,4 \text{ mm}^2$

Ker kanal ni pravi pravokotnik, temveč ima zaobljene robove, sem moral izračunati površino namišljenih površin v kotih kanala in to površino odšteti od pravokotnika. Tako sem dobil pravo površino kanala.

$P_{\text{radi}_i} = (\text{radius} \times \text{radius}) - (\pi \times \text{radius} \times \text{radius}/4)$

$P_{\text{radi}_i} = (5,5 \times 5,5) \times (3,14 \times 5,5 \times 5,5/4)$

$P_{\text{radi}_i} = 6,5 \text{ mm}^2$

$\text{Površina izpušnega kanala} = 343,4 \text{ mm}^2 - (6,5 \text{ mm}^2 \times 4) = 317,4 \text{ mm}^2$

$\text{Diameter izpušnega kanala} = \sqrt{4 \times \text{površina izpušnega kanala} / \pi} = 20,1 \text{ mm}$

Dolžino izpušnega kanala (od bata do prirobnice) moramo odšteti od dolžine začetne cevi, ker izpušni kanal spada k dolžini začetne cevi.

L_T = celotna dolžina

$L_1 = 0,1 \times L_T$ - dolžina izpušnega kanala

izpuh1 $L_1 = 93,3 \text{ mm} - 55 = \mathbf{38,3 \text{ mm}}$ izpuh2 $L_1 = \mathbf{27,8 \text{ mm}}$

$L_2 = 0,275 \times L_T$ izpuh1 $L_2 = \mathbf{256,7 \text{ mm}}$ izpuh2 $L_2 = \mathbf{228,1 \text{ mm}}$

$L_3 = 0,183 \times L_T$ izpuh1 $L_3 = \mathbf{170,8 \text{ mm}}$ izpuh2 $L_3 = \mathbf{151,8 \text{ mm}}$

$L_4 = 0,092 \times L_T$ izpuh1 $L_4 = \mathbf{85,8 \text{ mm}}$ izpuh2 $L_4 = \mathbf{76,3 \text{ mm}}$

$L_5 = 0,11 \times L_T$ izpuh1 $L_5 = \mathbf{102,6 \text{ mm}}$ izpuh2 $L_5 = \mathbf{91,2 \text{ mm}}$

$L_6 = 0,24 \times L_T$ izpuh1 $L_6 = \mathbf{224 \text{ mm}}$ izpuh2 $L_6 = \mathbf{199 \text{ mm}}$

$L_7 = L_6$

3.1.5 Diametri posameznih delov izpuha

P_D = diameter izpušnega kanala = $20,1 \text{ mm}^2$

D_1 = razmerje med kanalom in izpuhom x $P_D = \mathbf{21 \text{ mm}}$

D_4 = razmerje med kanalom in srednjim delom x $P_D = \mathbf{65,3 \text{ mm}}$

$D_5 = D_4$

D_6 = razmerje med kanalom in odprtino izpuha x $P_D = \mathbf{13 \text{ mm}}$

$D_7 = D_6$

Razmerja:

Razmerje med kanalom in izpuhom = PP 1,01 do BP 1,125

Razmerje med kanalom in srednjim delom = PP 3,25 do BP 2,125

Razmerje med kanalom in odprtino izpuha = PP 0,6 do BP 0,7

Koeficient difuzorja = PP 1 do BP 2. Za moj primer je 1,25.

11 BMEP = PP

6 BMEP = BP

PP je moč na vrhuncu.

BP je moč bolj razporejena po obratih.

Treba je izračunati še dva dela, ki bosta izpeljana iz zgornjih izračunov.

$$D2a = L2 / (L2 + L3 + L4) = 256,7 / (256,7 + 170,8 + 85,8) = 0,5$$

$$D2b = D2a ^ \text{koeficient difuzorja} = 0,5 ^ 1,25 = 0,42$$

$$D2c = D2b \times \text{Log} (D4 / D1) = 0,42 \times \log (65,3/21) = 0,206$$

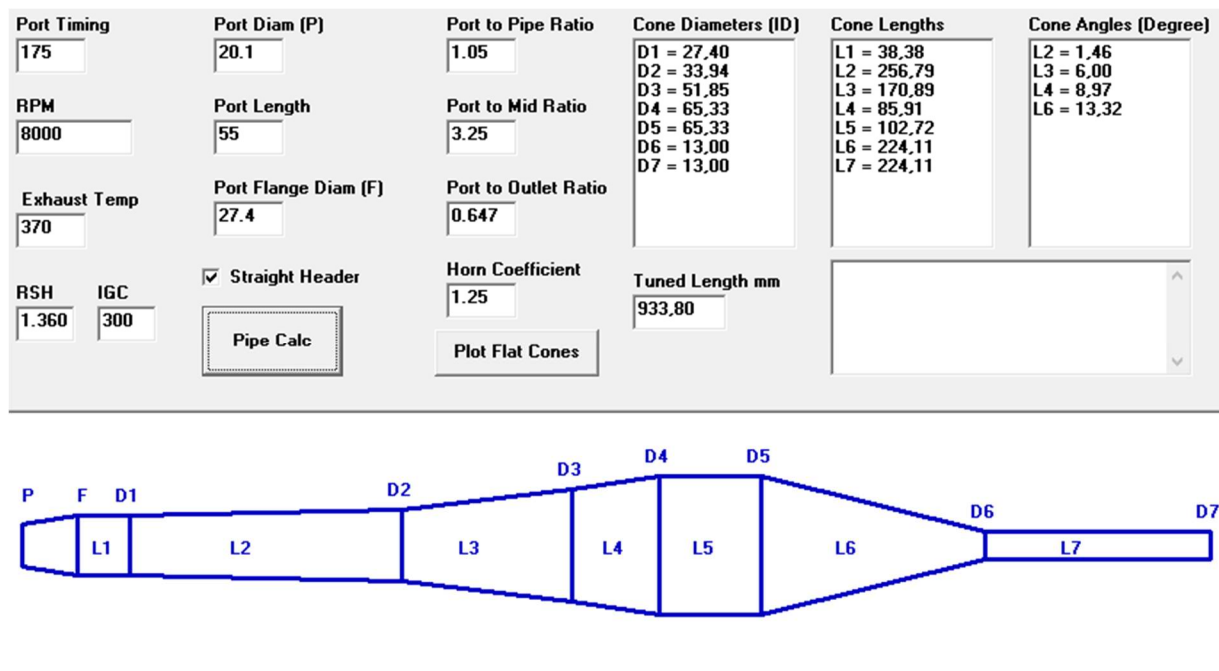
$$D2 = D1 \times \text{Exp} (D2c) = \mathbf{25,8 \text{ mm}}$$

$$D3a = (L2 + L3) / (L2 + L3 + L4) = (256,7 + 170,8) / (256,7 + 170,8 + 85,8) = 0,832$$

$$D3b = D3a ^ \text{koeficient difuzorja} = 0,795$$

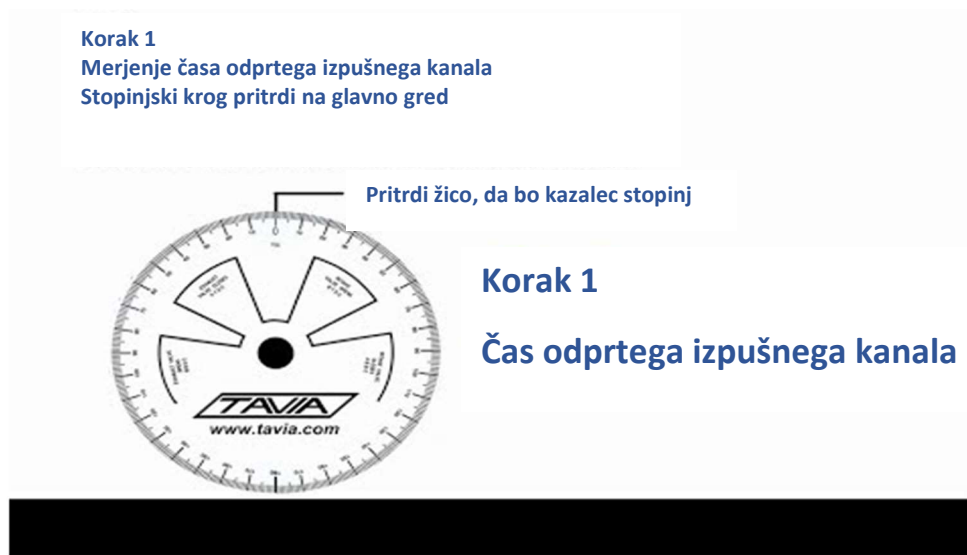
$$D3c = D3b \times \log (D4/D1) = 0,391$$

$$D3 = D1 \times \text{Exp} (D3c) = \mathbf{31,04 \text{ mm}}$$



Slika 13: Diametri in posamezne dolžine resonančnega izpuha1 (vir: <https://birdcagesoft.com/>)

3.2 Viri formul



(AuMechanic, How to Design a Two Stroke Expansion Chamber Performance Exhaust - Step 1, 2023)

Slika 14: Korak 1- merjenje stopinj odprtega izpušnega kanala (vir: [How to Design a Two Stroke Expansion Chamber Performance Exhaust - Step 1](#))

Izračunaj si svoj resonančen izpuh za dvotakten motor



Korak 2

Kako priti do BMEP ter temperature izpuha

(AuMechanic, How to Design a Two Stroke Expansion Chamber Performance Exhaust - Step 2, 2023)

Slika 15: Izračun povprečnega tlaka valja in temperature plinov v resonančnem izpuhu
(vir: <https://www.youtube.com/watch?v=cgTGWuVAasU&t=69s>)

Izračunaj resonančnega izpuha

ZRAK

specifično toplotno razmerje= 1,4

konstanta plinov= 287

IZPUH

specifično toplotno razmerje= 1,36

konstanta plinov= 300

$\gamma=1,36$

$R=300$

$temp_k = temp_C + 273,15$

Gostota v metrih na sekundo = koren ($\gamma \times R \times temp_k$)

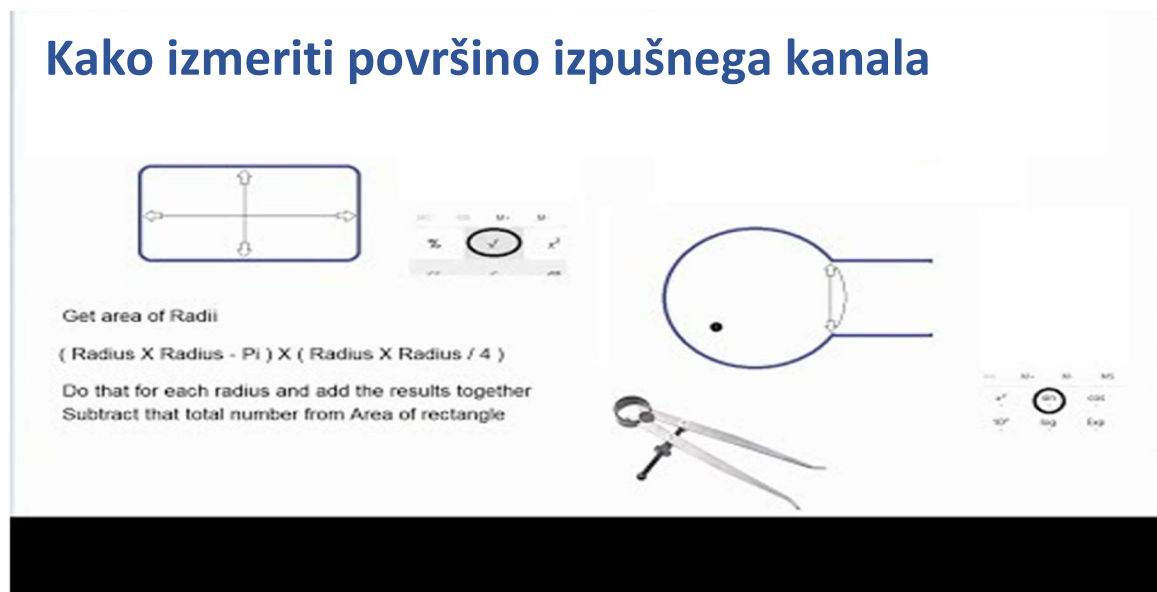
Čas odprtja izpušnega kanala v milisekundah = (stopinje odprtja izpušnega kanala/360) x (60000/RPM)

Dolžina izpuha v milimetrih = (gostota x 1000) x (čas izpušnega kanala/1000)/2

Korak 3

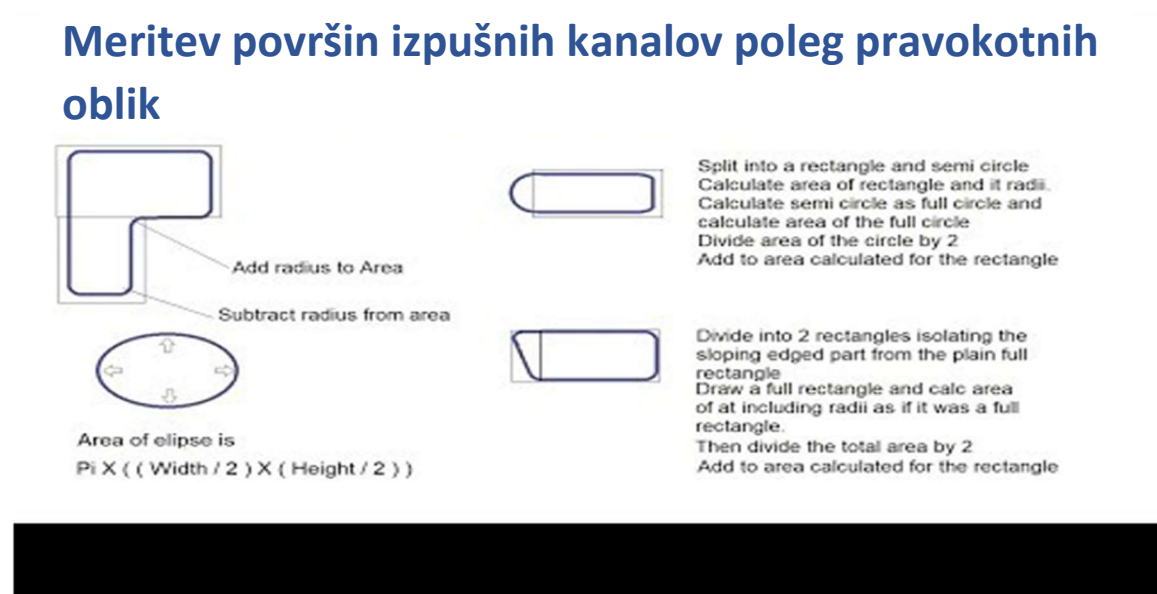
Enačbe za dolžine

Slika 16: Izračun posameznih dolžin resonančnega izpuha
(vir: [How to Design a Two Stroke Expansion Chamber Performance Exhaust - Step 3](#))



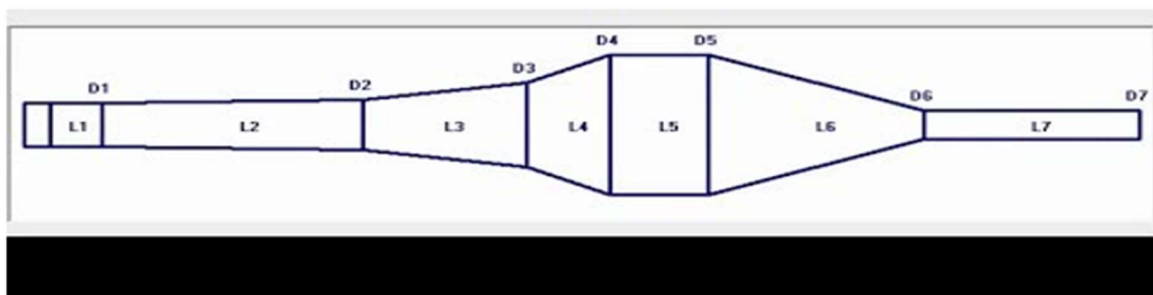
(AuMechanic, How to Design a Two Stroke Expansion Chamber Performance Exhaust - Step 4, 2023)

Slika 17: Površina izpušnega kanala (vir: [How to Design a Two Stroke Expansion Chamber Performance Exhaust - Step 4](#))



(AuMechanic, How to Design a Two Stroke Expansion Chamber Performance Exhaust - Step 5, 2023)

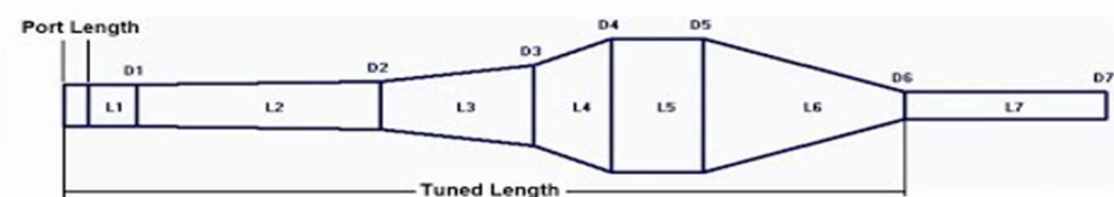
Slika 18: površina izpušnega kanala (vir: [How to Design a Two Stroke Expansion Chamber Performance Exhaust - Step 5](#))



(AuMechanic, How to Design a Two Stroke Expansion Chamber Performance Exhaust - Step 6, 2023)

Slika 19: Dolžine posameznih delov resonančnega izpuha(vir: [How to Design a Two Stroke Expansion Chamber Performance Exhaust - Step 6](#))

Računalniški program za pomoč pri računanju resonančnega izpuha



(AuMechanic, How to Design a Two Stroke Expansion Chamber Performance Exhaust - Step 7, 2023)

Slika 20: dolžine in diametri posameznih delov resonančnega izpuha (vir: [How to Design a Two Stroke Expansion Chamber Performance Exhaust - Step 7](#))

4 POSTOPEK IZDELAVE IZPUŠNEGA SISTEMA



Slika 21: Izdelava prirobnic (vir: lastni)

Najprej sem izdelal prirobnico izpuha. Tesnilo izpuha sem obrisal na robu pločevine, debeline 5 mm. Zarisane luknje za vijake sem najprej zatočkal in kasneje izvrtal. Luknjo na sredini sem naredil tako, da sem izvrtal več manjših lukenj po notranjem robu. Stene med luknjami so bile tako tanke, da sem notranji del z izsekalom lahko izsekal.



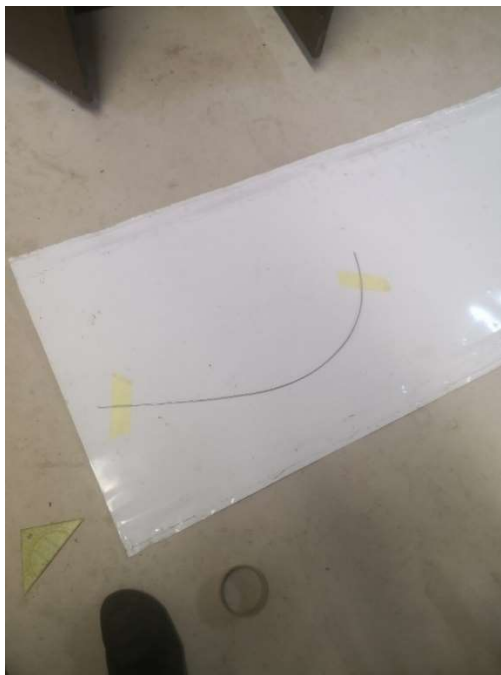
Slika 22: Izdelava prirobnic (vir: lastni)

S pomočjo pile sem dodatno obdelal luknjo in jo razširil na pravo dimenzijo. Premer luknje prirobnice je bil na koncu 27,5 mm (slika 17).



Slika 23: Izdelava prirobnic (vir: lastni)

Prirobnice sem s kotim brusilnikom odrezal in jim zgladil robove.



Slika 24: Zarisovanje oblike resonančnega izpuha (vir: lastni)

Dolžina žice na sliki 24 predstavlja dolžino izpušnega sistema. Z žico sem izmeril celotno dolžino vsakega izpuha in jo na tej dolžini odrezal. Označil sem tudi dolžine posameznih delov izpuha. Nato sem žico po meri mopeda zvil v želeno obliko. Pri tem sem moral paziti, da se bo oblikovno izpušna cev lahko pritrdila na izpušni kanal bloka motorja. Pri tem sem pazil, da geometrijsko ne bo vplival na vožnjo mopeda.

Na izpušni cevi je bilo potrebno predvideti tudi nosilec za pritrditev izpušnega sistema. Za lažji izris izpušne cevi sem žico prilepil neposredno na pločevino, iz katere sem izdelal izpušno cev. Debelina pločevine je 0,5 mm.

Po vsaki označbi dolžine izpuha sem določil premer kroga za vsak posamezni dolžinski del izpuha. Ko sem želel dobiti premer 65 mm, sem 65 mm pomnožil s 3,14. Tako sem dobil obseg izpuha na določeni dolžini, Ker sem izdeloval izpuh iz dveh polovic, sem obseg delil z 2. Ena polovica izpuha je predstavljala polovico obsega kroga.



Slika 25: Zarisovanje oblike resonančnega izpuha (vir: lastni)

Potem sem žico odlepil. Z njo sem zarisal krivine. Pike sem, ki sem jih prej narisal, sem povezal.



Slika 26: Izrisovanje oblike resonančnega izpuha (vir: lastni)

Narisan izpuh ene polovice sem izrezal s škarpami za pločevino.



Slika 27: Izrezane in očiščene obe polovice resonančnega izpuha (vir: lastni)

Izrezani polovici izpuha je bilo potrebno očistiti barvnega premaza. Sledil je zavij robov, da je bila oblika izpuha na koncu čim bolj okroglega preseka. Tako sem lažje zavaril obe polovici.



Slika 28: Varjenje dveh polovic resonančnega izpuha (vir: lastni)

Polovici sem najprej točkovno zavaril. S kladivom sem zvarjeni polovici oblikoval v končno obliko. Ko sta bili oblika izpuha in zvarna površina izoblikovani, sem polovici dokončno zavaril. Dobil sem kompaktno izpušno cev z želeno geometrijo.



Slika 29: Varjenje polovic resonančnega izpuha (vir: lastni)

Varil sem z MAG-varilnim postopkom. Zaradi zelo tanke pločevine sem varil točkovno.



Slika 30: Oblikovanje resonančnega izpuha z vodo pod tlakom (vir: lastni)

S pomočjo vodnega pritiska sem oblikoval izpuh. Izvedel sem napih in tako dobil enakomerno izbočeno površino izpuha. Notranjost izpuha sem napolnil z vodo in ga obremenil z visokim tlakom. Pri tem je pomembno, da v izpuhu ni zračnih mehurčkov, ki bi povzročili težave v postopku oblikovanja površine. Prisotnost zračnih mehurčkov pri tem oblikovanju površine lahko povzroči tudi neuporabnost izpušnega sistema v praksi.



Slika 31: Izdelovanje izpušne cevi resonančnega izpuha (vir: lastni)

Izvrtal sem luknje v izpušno cev. Luknje služijo zmanjšanju hrupa, pretok izpušnih plinov pa se ne zmanjša veliko. Dušilec deluje na način, da se zvok porazgubi v izolativni snovi (stekleni volni) dušilca.



Slika 32: Izdelovanje zunanjega plašča dušilca (vir: lastni)

4.1 Izdelovanje plašča dušilca

Pri izdelovanju plašča dušilca sem moral upoštevati dolžino, da je plašč pokril tudi vse luknje na izpušni cevi. Tako sem dobil skupno dolžino izpuha. Določiti je bilo treba še premer zunanega ovoja izpuha. Premer dušilca na karakteristike motorja ne vpliva bistveno, zato sem si pri oblikovanju zunanega ovoja pomagal s geometrijo enega predhodno testno izdelane različice izpušnega sistema.

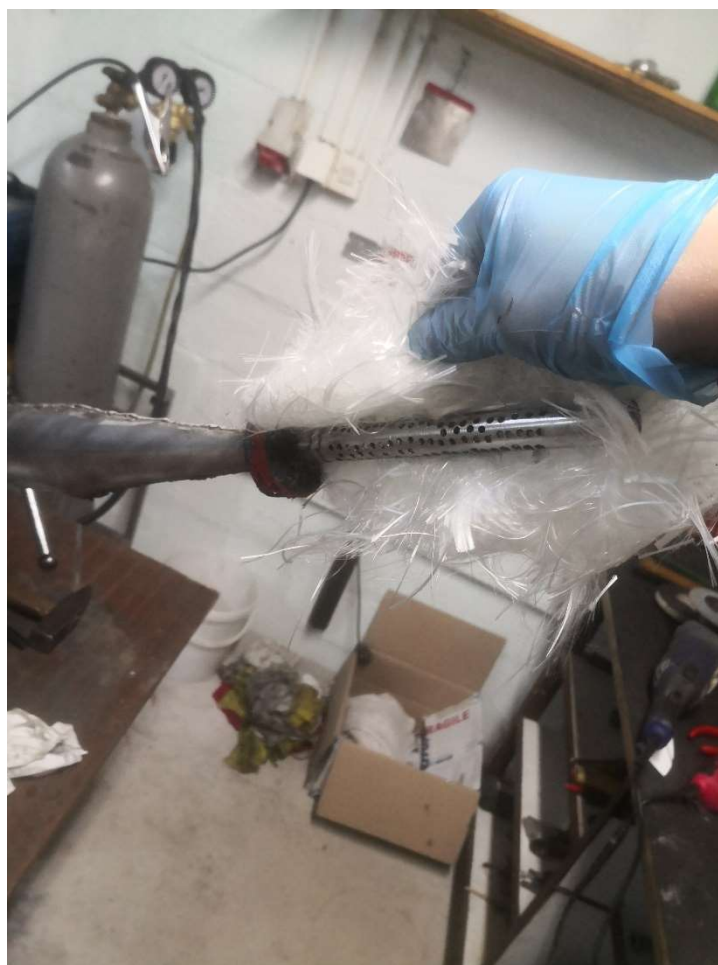
Za obe različici izpuha sem predvidel geometrijsko in vsebinsko enak dušilec.



Slika 33: Prileganje izpuha na motocikel (vir: lastni)

4.2 Določitev pozicije prirobnice izpuha

Prirobnico sem pritrdil na valj (blok) motorja. Izpušni sistem sem s pomočjo vrvice fiksiral v čim bolj optimalno lego. Na ta način sem dobil pritrdilno pozicijo med izpušnim sistemom in prirobnico izpušnega sistema. Dobljeno pozicijo sem fiksiral s točkovnim varjenjem. Na osnovi ugotovitve pravilnosti položaja prirobnice in izpušnega sistema je sledilo fiksno varjenje prirobnice in celotnega izpušnega sistema.



Slika 34: Namestitev dušilca na resonančen izpuh (vir: lastni)

Vsa mesta spojev izpušnega sistema sem namazal s temperaturno obstojno tesniln maso. Del izpušnega sistema, ki je namenjen dušenju zvoka, sem napolnil s stekleno volno, ki duši hrup. Pritrditev tega dušilnega dela na izpušni sistem sem izvedel s postopkom kovičenja.

Protikorozijsko zaščito izpušnega sistema sem izvedel s premazom z visokotemperaturno obstojno barvo.

5 MERJENJE REZULTATOV MOČI MOTORJA IN OBRATOV

Izdelal sem dve različici izpuha in za oba izdelal teoretične geometrijske preračune. Tako sem skupaj s prvotnim (originalnim) izpušnim sistemom razpolagal s tremi različicami. Meritve moči pri določenih vrtljajih motorja so me zanimali predvsem za izpuhe, ki sem jih izdelal, zato sem meritev na merilni oziroma testni mizi izvedel le zanj.



Slika 35: Priprave na meritve (vir: lastni)

Preden sem izvedel meritve, sem moral pripraviti testno mizo. To je zajemalo:

1. stabilizacijo konzole,
2. privez motorja na testno mizo tako, da je bila ves čas zadnja pnevmatika na poziciji merilnega valja,
3. zagotovljen ustrezen tlak v zadnji pnevmatiki,
4. namestitev kapice svečke z upornostjo (z navadno kapico svečke senzor namreč ne bi zaznaval pravih informacij o obratih motorja),

5. umeritev merilnih naprav: merilnika vrtljajev motorja, termometra ...,
6. vpis vrednosti zraka, in sicer tlaka, temperature in vlažnosti, ki je potreben za primerjavo podatkov,
7. vpis tehniških podatkov: imena, prestavnega razmerja, meritev, vrtljajev kalibracije,
8. priprava mape za shranjevanje na računalniku,
9. hladilni ventilator za hlajenje motorja,
10. namestitev cevi za odsesavanje izpušnih plinov iz prostora,
11. start motorja in začetek merjenja/ogrevanje motorja,
12. kontrola zavore na valju,
13. kalibracija prestavnega razmerja in njegova kontrola.

Kalibracija merilne naprave je zelo pomembna. Uskladiti je bilo potrebno vrtljaje motorja in vrtljaje merilnega valja merilne naprave. Tako je lahko prek merilnih vrtljajev računalnik beležil trenutne vrtljaje motorja. Vnesti je bilo potrebno tudi podatek o prestavnem razmerju pogonskih verižnikov.

5.1 Meritve

Za posamezni izpuh sem naredil več meritev. Razlog je v tem, da se s spreminjanjem delovne temperature motorja (predvsem valja motorja), bata in izpuha spreminja tudi moč motorja.

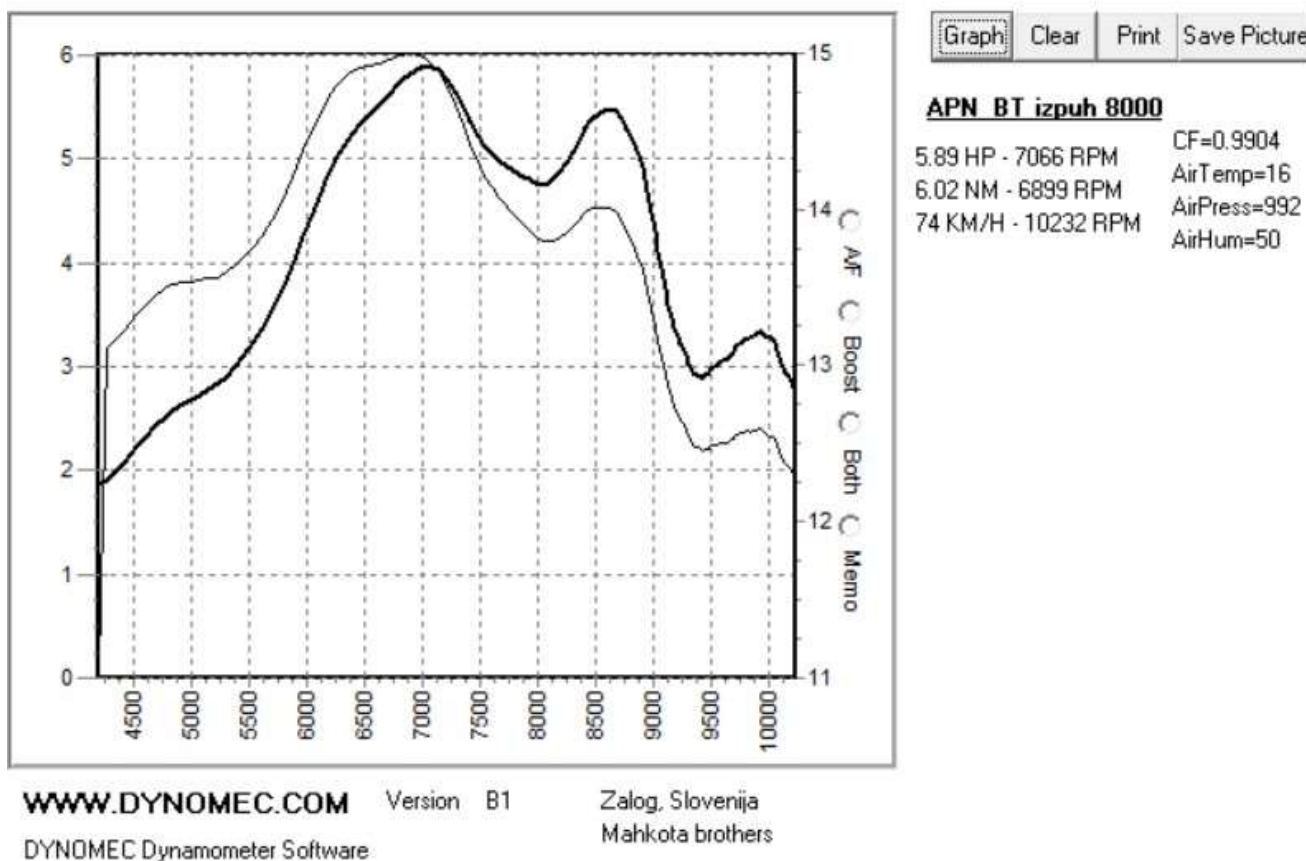


Slika 36: Izvedba meritve (vir: lastni)

Link posnetka izvedbe meritev:

<https://www.youtube.com/shorts/FsjRQ8vzk30> , (vir: lastni), 17. 2. 2023

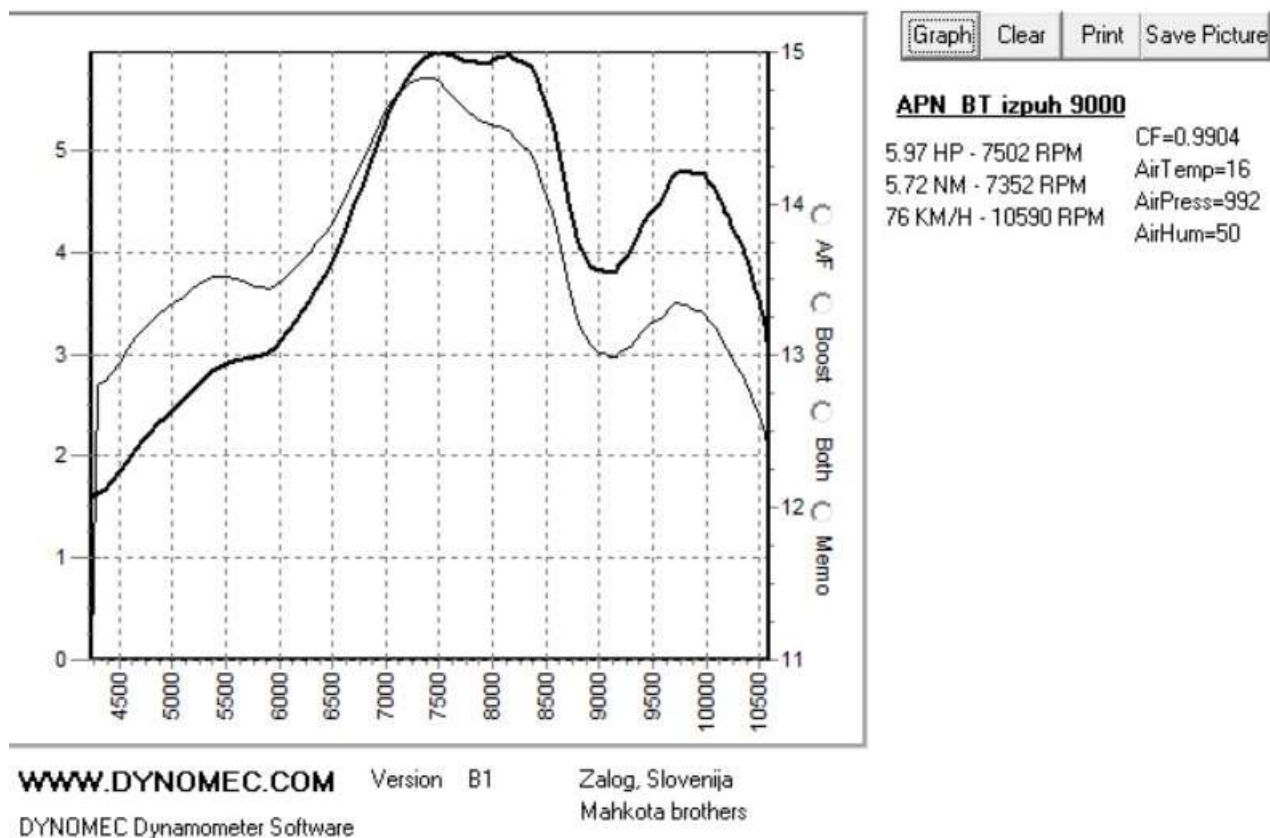
5.2 Meritev izpuha 1



Graf 1: Moč in obrati z izpuhom 1 (vir: lastni)

Pri merjenju z različico izpuha 1 je na grafu največja moč pri 7066 vrtljajih motorja. Izračunal sem, da bo imel motor največ moči pri 8000 obratih. To izkazuje, da je teoretični izračun zelo blizu realnih vrednosti. Odstopanja so predvsem zaradi nenatančnih vhodnih podatkov, ki sem jih vnesel v teoretične enačbe. Ugotovljeno je zame pomemben podatek. Pri računanju naslednjih izpuhov moram naslednjič korigirati vhodne vrednosti, ki se upoštevajo pri izračunu izpuha.

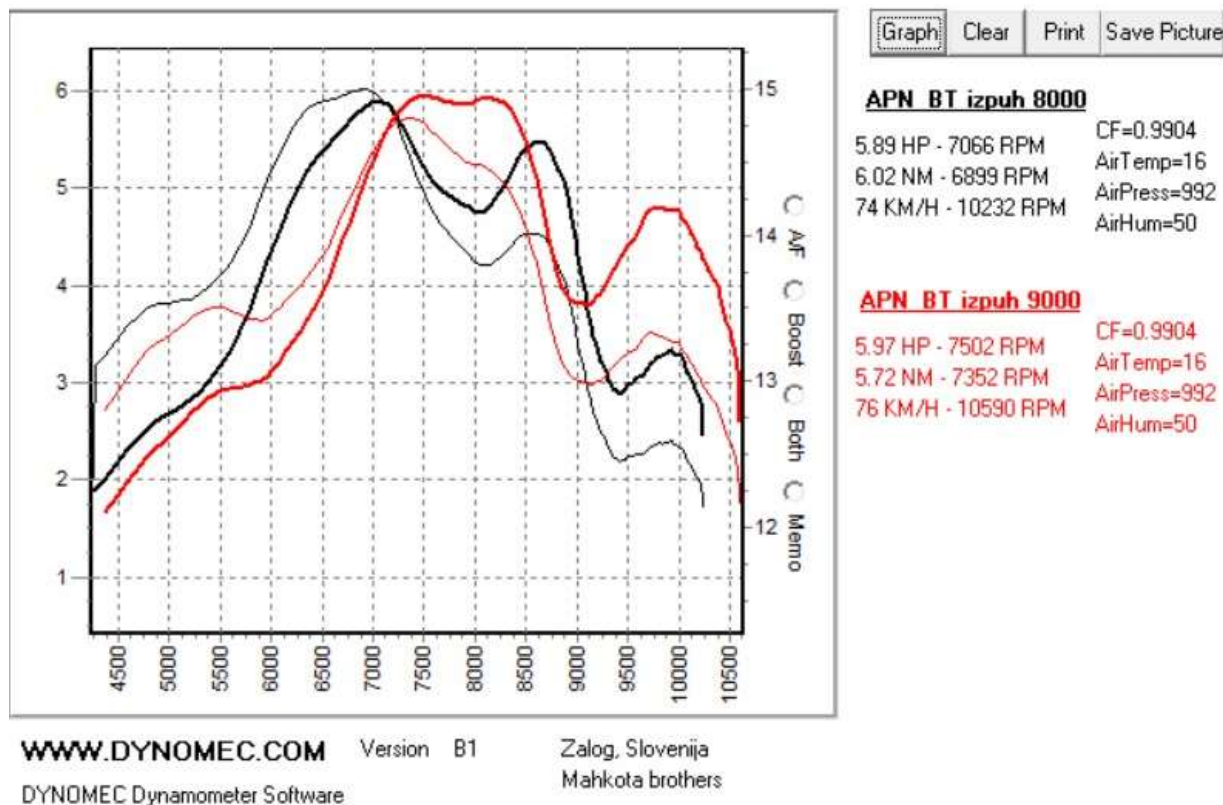
5.3 Meritev izpuha 2



Graf 2: Moč in obrati z izpuhom 2 (vir: lastni)

Tudi pri tej različici je območje največje moči nižje, kot sem ga definiral pri izračunu. Največjo moč je motor proizvedel pri 7502 vrtljajih.

5.4 Primerjava meritev izpuha 1 in izpuha 2



Graf 3: Primerjava moči in obratov med izpuhom 1 in izpuhom 2 (vir: lastni)

Iz primerjalnega grafa obeh različic je razvidno, da je pri prvem največja moč pri 7066 vrtljajih, pri drugem pa pri 7502 vrtljajih motorja. Iz ugotovljenega izhaja, da je dolžina izpuha pomemben dejavnik pri določanju območja največje moči dvotaktnega motorja. Posledično dolžina izpuha vpliva tudi na elastičnost motorja. To je območje vrtljajev motorja, ki pri vožnji predstavlja maksimalno izkoriščenost goriva in predstavlja območje maksimalne uporabnosti motorja. To je še posebej pomembno pri dirkalnih različicah motorja.

Glede na ugotovljeno, lahko postavljeno hipotezo (Dolžina resonančnega izpuha vpliva na območje največje moči v določenih vrtljajih motorja), **potrdim**.

V mojem primeru je primerjava rezultatov dala zadovoljive podatke za potrditev hipoteze. Ugotovil sem tudi, kje so nastala odstopanja pri teoretičnem izračunu. Ta odstopanja sem opredelil in razložil že v prejšnjem poglavju.

6 STROŠEK IZDELAVE RESONANČNEGA IZPUHA

Vsak raziskovalni proces je povezan tudi s stroškovnim vidikom. Tako so tudi v mojem primeru pri izdelavi resonančnega izpuha nastali stroški.

Opredelitev stroškov:

Tabela 1: Prikaz stroškov

steklena volna za dušilec	10 €
kolut varilne žice (porabljene žice približno 5 % koluta)	29 €
elektrika	okoli 3 €
pločevina	okoli 12 €
Skupaj	okoli 54 €

Na strošek izdelave posameznega izpuha je vplivalo tudi to, da sem poskušal uporabiti materiale, ki sem jih imel doma. S tem sem želel vključiti tudi komponento krožnega gospodarstva. Kot zanimivost lahko navedem, da sem za izdelavo izpuha uporabil pločevino ohišja zavrženega hišnega hladilnika.

Glede na ocenjeno vrednostjo stroškov izdelave izpiha lahko drugo hipotezo naloge (Strošek izdelave resonančnega izpuha je nizek) **potrdim**.

7 HRUP RESONANČNEGA IZPUHA

Na hrup resonančnih izpuhov vplivajo:

- količina steklene volne v dušilcu resonančnega izpuha,
- diameter izpustne cevi,
- vrsta dušilca in lokacija izpustne cevi na izpuhu.

7.1 Delovanje dušilca

Luknjice v izpustni cevi so izvrtane, da se lahko zvok, ki ga povzročijo izpušni plini, absorbira v stekleni volni. Steklena volna je ovita okoli izpustne cevi, ta pa je prekrita z zunanjo pločevino, ki predstavlja plašč dušilca.



Slika 37: Sestava dušilca (vir: lastni)

7.2 Meritve hrupa

Merjenje hrupa sem izvedel z mobilno aplikacijo. Lokacija meritve je bila na koncu izpuha. Meritev sem izvedel za vsako posamezno različico. Izvedbeni pogoji so bili pri obeh različicah enaki (oddaljenost meritve od izpuha, vrtljaji motorja in kraj izvedbe). Izmerjena vrednost pri obeh različicah je znašala 74 decibelov (Db).



Slika 38: Merjenje glasnosti izpuha 1 (vir: lastni)



Slika 39: Merjenje glasnosti izpuha 2 (vir: lastni)

Razlike med izmerjeno vrednostjo hrupa posameznih različic so bile tako majhne, da sem tretjo hipotezo (Hrup izpušnega sistema se z geometrijo spremembe oblike izpušne cevi spremeni) **ovrgel**.

8 ZAKLJUČEK

Na podlagi potrjenih in ovrženih hipotez sem ugotovil naslednje:

Dolžina resonančnega izpuha vpliva na območje največje moči pri določenih vrtiljajih motorja. To je razlog, da proizvajalci motorjev in izpušnih sistemov vlagajo veliko napora v raziskovanje optimalnih geometrij izpuhov za določene pogonske agregate. Predvsem je to pomembno za športne agregate.

Glede na strošek izdelave eksperimentalnega resonančnega izpuha bi poudaril, da gre za eksperiment, pri katerem sem teoretični del izvedel tako, da sem uporabil že raziskano teorijo na področju razvoja izpuhov. Če bi v izdelavo vključil tudi razvoj teoretičnega dela, bi bil strošek izdelave bistveno višji.

Hrup izpušnega sistema se z geometrijo spremembe oblike izpušne cevi ne spremeni bistveno. Razlog je v funkciji, ki jo opravlja dušilec hrupa. Pri mojih različicah izpuha sem uporabil enake dušilce, kar je na meritvah predstavljalo enako količino hrupa. Posledično dolžina izpušne cevi na količino hrupa nima pomembnega vpliva.

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorjema Boštjanu Knezu in Boštjanu Hribarju za pomoč pri vodenju in izdelavi raziskovalne naloge. Posebno se zahvaljujem bratoma Mahkota, strokovnjakoma za dvotaktne motorje, ki sta v mojem delu prepoznala voljo in mi zato brezplačno omogočila izvedbo meritev na testni mizi. Ob tem sta mi podala še ogromno dodatnih izkustvenih informacij o izpušnih sistemih in dvotaktnih motorjih. Zahvaljujem se tudi svoji družini, ki me je povsem podpirala pri izdelavi te naloge.



Slika 40: Logotip bratov Mahkota (vir: lastni)

9 VIRI

Associates, P. B. (17.. januar 2023). http://www.profbclairandassociates.com/GPB_Tribute.html.

Pridobljeno iz http://www.profbclairandassociates.com/GPB_Tribute.html:

http://www.profbclairandassociates.com/GPB_Tribute.html

AuMechanic. (18.. januar 2023). *How to Design a Two Stroke Expansion Chamber Performance Exhaust - Step 1*. Pridobljeno iz *How to Design a Two Stroke Expansion Chamber Performance Exhaust - Step 1: How to Design a Two Stroke Expansion Chamber Performance Exhaust - Step 1*

AuMechanic. (18.. januar 2023). *How to Design a Two Stroke Expansion Chamber Performance Exhaust - Step 2*. Pridobljeno iz *How to Design a Two Stroke Expansion Chamber Performance Exhaust - Step 2: How to Design a Two Stroke Expansion Chamber Performance Exhaust - Step 2*

AuMechanic. (19.. januar 2023). *How to Design a Two Stroke Expansion Chamber Performance Exhaust - Step 3*. Pridobljeno iz *How to Design a Two Stroke Expansion Chamber Performance Exhaust - Step 3: How to Design a Two Stroke Expansion Chamber Performance Exhaust - Step 3*

AuMechanic. (19.. januar 2023). *How to Design a Two Stroke Expansion Chamber Performance Exhaust - Step 4*. Pridobljeno iz *How to Design a Two Stroke Expansion Chamber Performance Exhaust - Step 4: How to Design a Two Stroke Expansion Chamber Performance Exhaust - Step 4*

AuMechanic. (19.. januar 2023). *How to Design a Two Stroke Expansion Chamber Performance Exhaust - Step 5*. Pridobljeno iz *How to Design a Two Stroke Expansion Chamber Performance Exhaust - Step 5: How to Design a Two Stroke Expansion Chamber Performance Exhaust - Step 5*

AuMechanic. (20.. januar 2023). *How to Design a Two Stroke Expansion Chamber Performance Exhaust - Step 6*. Pridobljeno iz *How to Design a Two Stroke Expansion Chamber Performance Exhaust - Step 6: How to Design a Two Stroke Expansion Chamber Performance Exhaust - Step 6*

AuMechanic. (20.. januar 2023). *How to Design a Two Stroke Expansion Chamber Performance Exhaust - Step 7*. Pridobljeno iz *How to Design a Two Stroke Expansion Chamber Performance Exhaust - Step 7: How to Design a Two Stroke Expansion Chamber Performance Exhaust - Step 7*

gfjugfju. (10. 1 2023). *gfugfc*. Pridobljeno iz ghucfhju: www.jgfuthj

Marquardt, J. (15.. januar 2023). <http://www.2strokeengine.net/index.php>. Pridobljeno iz <http://www.2strokeengine.net/index.php>: <http://www.2strokeengine.net/index.php>

NIJZ. (20. 2 2023). *Vpliv hrupa na zdravje*. Pridobljeno iz NIJZ: <https://nijz.si/moje-okolje/hrup/osnovne-informacije-o-hrupu/>

Portal, W. D. (16.. januar 2023). https://en.wikipedia.org/wiki/Walter_Kaaden. Pridobljeno iz https://en.wikipedia.org/wiki/Walter_Kaaden: https://en.wikipedia.org/wiki/Walter_Kaaden

Trenc, P. d. (2022). *Motorno vozilo 2022*. V P. d. Trenc, *Motorno vozilo 2022* (str. 846). Ljubljana: Tehniška založba Slovenije 2022.

