VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

ZÁSTAVBA INDIKAČNÍ APARATURY PRO VZNĚTOVÝ MOTOR

INDICATION APPARATUS INSTALLATION FOR A DIESEL ENGINE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE Andrej Slávik

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. Martin Beran

SUPERVISOR

BRNO 2022

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	**Andrej Slávik**
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Stavba strojů a zařízení
Vedoucí práce:	**Ing. Martin Beran**
Akademický rok:	2021/22

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

Zástavba indikační aparatury pro vznětový motor

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce je zaměřena na problematiku měření spalovacích tlaku ve válci – indikační aparatura.

Cíle bakalářské práce:

Provést dostupnou rešerši v oblasti problematiky měření průběhu spalovacího tlaku.
Pomocí metod reverzního inženýrství na zadaném vznětovém motoru sestavit CAD model části hlavy válců a spalovacího prostoru pro potřeby návrhu zástavby indikačního snímače zadaného typu.
Návrh vhodného řešení umístění indikačního snímače do spalovacího prostoru s ohledem na konstrukční možnosti hlavy válce a zachování správné funkce měření spalovacího tlaku.
Shrnutí dosažných cílů a zhodnocení uvedených závěrů

Seznam doporučené literatury:

STONE, Richard. Introduction to Internal Combustion Engines. 3rd edition. Hampshire: Palgrave, 1999. ISBN 0-333-74013-01999.

SKOTSKY, Alexander A. Automotive Engines. Springer Verlag, 2009, ISBN 978-3-642-00163-5.

JAN, Zdeněk a ŽDÁNSKÝ, Bronislav. Automobily (3): Motory. Brno: Avid, spol. s r.o., 2009. ISBN 978-80-87143-15-5.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 21. 10. 2021

L. S.

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

V Z.

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

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
DĚKANÁT

ABSTRAKT

Problematika merania spaľovacieho tlaku je súčasťou spaľovacích motorov od ich počiatku. Meraním sa vyhodnocuje priebeh tlaku v závislosti na zmene objemu. Táto závislosť je vykresľovaná do indikátorových diagramov. Ďalšie parametre sa vyhodnocujú priamo, ako napríklad hluk spaľovania, ale aj nepriamo, teda výpočtom z hodnôt indikátorových diagramov. Meranie je možné prevádzať rôznymi druhmi snímačov. Tieto snímače však musia byť vhodne umiestnené, aby došlo k nameraniu správnych hodnôt. Pre zadaný motor s problematickým umiestnením snímača je pomocou výpočtov zvolený vhodný snímač. Metódami reverzného inžinierstva je spracovaná hlava valcov motora. Podľa nadobudnutých znalostí a dostupných riešení sú navrhnuté dva varianty umiestnenia piezoelektrického snímača s odporučeným použitím variantu č.1.

KĽÚČOVÉ SLOVÁ

spaľovací tlak, piezoelektrický snímač, reverzné inžinierstvo, 3D skenovanie, indikácia tlaku

ABSTRACT

The issue of measuring combustion pressure has been a part of internal combustion engines since their inception. The measurement evaluates the course of pressure as a function of volume change. This dependence is plotted in indicator diagrams. Other parameters are evaluated directly, such as combustion noise, but also indirectly, i.e. by calculation from the values of indicator diagrams. Measurements can be performed with different types of sensors. However, these sensors must be properly positioned to measure the correct values. For a given motor with a problematic sensor location, a suitable sensor is selected using calculations. The engine cylinder head is processed by reverse engineering methods. According to the acquired knowledge and available solutions, two variants of piezoelectric sensor placement are proposed with the recommended use of variant no.1.

KEYWORDS

Combustion pressure, piezoelectric sensor, reverse engineering, 3D scanning, indication of pressure

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

SLÁVIK, Andrej. *Zástavba indikační aparatury pro vznětový motor.* Brno, 2022. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/140138. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Martin Beran.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Vyhlasujem, že táto práca je mojím pôvodným dielom, spracoval som ju samostatne pod vedením Ing. Martina Berana a s použitím informačných zdrojov uvedených v zozname.

V Brne dňa 19.mája 2022 ……..……..……..

Andrej Slávik

POĎAKOVANIE

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce Ing. Martinovi Beranovi za jeho cenné poznatky, rady a pripomienky, ktorými mi bol nápomocný pri tvorbe tejto práce.

OBSAH

Úvod **12**

1 Meranie tlaku **13**

2 Priebeh tlaku v spaľovacích motoroch **14**
2.1 Ottov cyklus 14
2.2 Dieselov cyklus 14
2.3 Skutočné termodynamické cykly 16

3 Parametre získavané pomocou indikačnej aparatúry **17**
3.1 Priamo merané parametre 17
3.2 Nepriamo merané parametre 17

4 Spôsoby merania spaľovacieho tlaku **19**
4.1 Piezoelektrické snímače 19
4.2 Piezorezistívne snímače 22
4.3 Optické snímače 23

5 Možnosti inštalácie snímača **24**
5.1 Sviečka s piezoelektrickým snímačom 24
5.2 Žhavič s piezoelektrickým snímačom 25
5.3 Nechladený piezoelektrický snímač 25
5.4 Vodou chladený piezoelektrický snímač 26
5.5 Tesnenie pod hlavu s integrovaným optickým snímačom tlaku 27

6 Súčasné progresívne metódy merania a vyhodnocovania priebehu tlaku **28**
6.1 Metóda rozdelenia na podsignály 28
6.2 Skúmanie rezonancie 28
6.3 Metóda identifikácie klepania založené na analýze priebehu tlaku 28

7 Návrh vhodného snímača **30**
7.1 Parametre vznetového motoru 30
7.2 Výpočet stredného indikovaného tlaku, podľa kapitoly 3 30
7.3 Voľba snímača 31

8 Reverzné inžinierstvo **32**
8.1 3D skenovanie v RE 32
8.2 3D skenery 33
8.3 Kontaktné skenery 33
8.3.1 Deštruktívne skenery 33
8.3.2 Nedeštruktívne skenery 34
8.4 Bezkontaktné skenery 34
8.4.1 Magnetické skenery 34
8.4.2 Transmisívne skenery 34
8.4.3 Reflexívne skenery 34
8.5 Reverzné inžinierstvo v aplikácii pre inštaláciu tlakového snímača 34

9 Voľba miesta pre inštaláciu snímača 35
9.1 Návrh variantov montáže 40
9.1.1 Variant č. 1 40
9.1.2 Variant č. 2 41

Záver 42

Použité informačné zdroje 43

Zoznam použitých skratiek a symbolov 45

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obrázok 1 p-V a T-S diagram Ottovho cyklu [3] 14
Obrázok 2 p-V a T-S diagram Dieselovho cyklu [3] 15
Obrázok 3 p-V diagram skutočných termodynamických cyklov [2] 16
obrázok 4 inverzný piezoelektrický jav [4] 19
Obrázok 5 Pozdĺžny a priečny piezoelektrický jav [2] 20
Obrázok 6 Chladený snímač [2] 21
Obrázok 7 Nechladený snímač [2] 21
Obrázok 8 Piezorezistívny snímač Kistler 4011A 22
Obrázok 9 Schéma optického snímača tlaku [9] 23
Obrázok 10 Znázornenie rôznych možností inštálacie snímača [20] 24
Obrázok 11 Sviečka s piezoelektrickým snímačom Kistler 6113C [11] 24
Obrázok 12 Žhavičový adaptér Kistler 6542Q a senzor tlaku Kistler 6056A1 [12] 25
Obrázok 13 Nechladený snímač Kistler 6054C [13] 26
Obrázok 14 Vodou chladený snímač Kistler 6041B [14] 26
Obrázok 15 Senzor tlaku v tesnení pod hlavou [15] 27
Obrázok 16 Senzor tlaku v tesnení pod hlavou na reálnom motore [15] 27
Obrázok 17 Graf tlakovej analýzy bez klepania [19] 29
Obrázok 18 Graf tlakovej analýzy klepania [19] 29
Obrázok 19 Kistler type 6053C 31
Obrázok 20 Schéma procesu skenovania v RE [21] 33
Obrázok 21 Rozdelenie 3D skenerov [10] 33
Obrázok 22 Pohľad na hlavu valcov a ventily zadaného motoru 35
Obrázok 23 Zadaný vznetový motor 36
Obrázok 24 3D Sken hlavy valcov 36
Obrázok 25 Narezaná hlava valcov na segmenty 37
Obrázok 26 Pohľad zo spodnej strany hlavy valcov a zobrazenie požadovaného priestoru pre umiestnenie snímača 38
Obrázok 27 Zobrazenie masy materiálu segmentu č.1 a č.2 38
Obrázok 28 Skenovanie segmentu č. 3 39
Obrázok 29 Variant umiestnenia č. 1 40
Obrázok 30 Variant umiestnenia č. 1 40
Obrázok 31 Variant umiestnenia č. 2 41
Obrázok 32 Variant umiestnenia č. 2 41

ÚVOD

Meranie spaľovacieho tlaku je nevyhnutnou súčasťou vývoja spaľovacích motorov. Jeho meranie sa posunulo od jednoduchých mechanických meradiel až po elektronické snímače, ktoré dokážu merať tlak s vysokou presnosťou. Dôležitým aspektom každého merania tlaku je správne umiestnenie tlakového senzoru a taktiež správne vyhodnotenie. Znalosť priebehu tlaku slúži k stanoveniu mnohých veličín týkajúcich sa spaľovania a tak napomôcť k lepšiemu návrhu motoru z pohľadu konštrukcie, emisií, výkonu, spotreby paliva , hlučnosti a mnoho ďalšieho. Úlohou tejto práce je rozsiahla rešerš v oblasti problematiky merania priebehu tlaku. Pomocou metód reverzného inžinierstva na zadanom vznetovom motore zostaviť CAD model časti hlavy valcov a spaľovacieho priestoru pre potreby návrhu zástavby indikačnej aparatúry. Návrh vhodného umiestnenia indikačného snímača.

1 MERANIE TLAKU

Tlak v spaľovacom procese bol používaný už pri vývoji parných strojov, teda jeho analýza je minimálne taká stará, ako samotný motor s vnútorným spaľovaním. Na začiatku boli na vyhodnotenie tlaku využívané jednoduché mechanické zariadenia. Výsledky boli vykresľované do diagramu spolu s hodnotami objemu. Takto vytvorené indikátorové diagramy sa následne použili na vyhodnotenie užitočnej práce vykonanej vo valci. Takáto analýza sa používala napríklad pri pomalobežných lodných motoroch, na predbežnú diagnózu porúch motoru. [1]

Vývoj v elektronike a meracej technike viedol k použitiu elektronických indikátorov vhodných už aj pre rýchlobežné motory. Prvé zariadenia pracovali ako osciloskopy s pridanou synchronizáciou s kľukovým hriadeľom.

Pokrok v spracovaní digitálnych signálov napomohol k sofistikovanejším meraniam v reálnom čase a tiež k prvému použitiu úplne digitálneho meracieho systému. Neskôr bolo možné tieto dáta zobraziť počas samotného merania a okamžite mohli byť vyhodnotené používateľom. Od tohto bodu sa analýza spaľovania stala nevyhnutnou súčasťou pri vývoji nových motorov.

V súčasnosti sa najviac používajú piezoelektrické tlakové senzory. Zvyčajne sa používajú na meranie tlaku v spaľovacom priestore, v saní, výfuku, či vo vstrekovaní.

Základom pre vývoj a optimalizáciu spaľovacích motorov je znalosť dejov vo valci. Meranie a analýza priebehu tlaku vo valci poskytuje potrebné dáta k optimalizácii účinnosti, výkonu motoru, emisií a v neposlednej rade životnosti motoru. Dôležitosť tohto signálu spočíva v množstve informácií, ktoré môže poskytnúť, čo je napríklad špičkový tlak (ktorý je kritickým mechanickým obmedzením), indikovaný stredný efektívny tlak, vstrekovací stredný efektívny tlak alebo dokonca môže umožniť zložitejšie výpočty, ako je odhad prietoku vzduchu, alebo aj diagnostiku spaľovania.

Prívod tepla horením zmesi sa prejaví zmenou tlaku. Túto zmenu tlaku je možné zaznamenať s potrebnou presnosťou a výpočtom sa stanoví priebeh prívodu tepla. Priebeh tlaku je reprezentatívny ukazovateľ spaľovacieho procesu, a tým pádom tiež spôsobu ako dochádza k premene energie – premena chemickej energie uloženej v palive a vzduchu na mechanickú energiu a teplo. Z priebehu tlaku a zmeny objemu vo valci sa určí celková mechanická práca jedného cyklu. Na základe toho využili už Nikolaus Otto a Rudolf Diesel k indikácii tlaku jednoduché ukazovatele tlaku a polohy kľukového hriadeľa. Zmena tlaku sa meria pomocou tlakových snímačov pri súčasnom meraní uhlu pootočenia kľukového hriadeľa. Prepočtom z sa z uhlu pootočenia určí okamžitá hodnota objemu spaľovacieho priestoru. Takto získaný graf sa nazýva indikátorový diagram. [1,2]

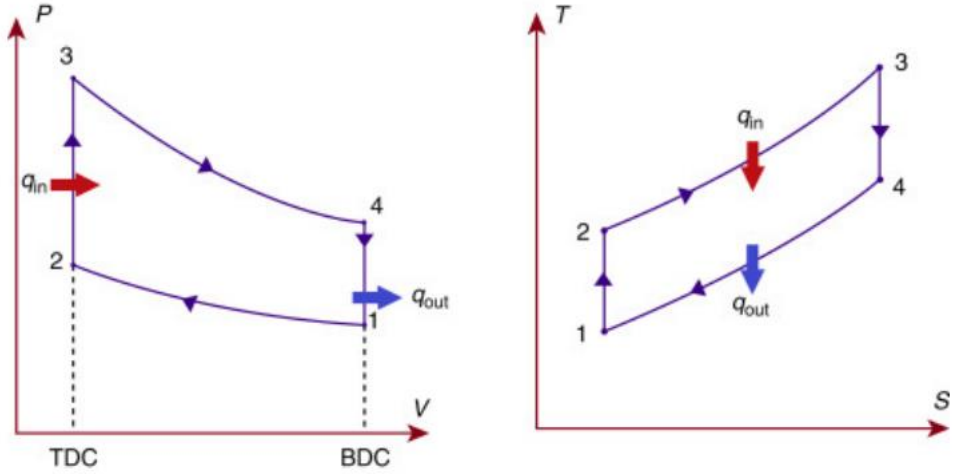
2 PRIEBEH TLAKU V SPAĽOVACÍCH MOTOROCH

Tromi hlavnými ideálnymi vratnými cyklami používanými pri vnútornom spaľovaní sú Ottov, Dieselov a Braytonov cyklus. Všetky tri cykly sú vhodné pre použitie v spaľovacích motoroch. Ottov a Dieselov cyklus sú využívané pri kľukových mechanizmoch, zatiaľ čo Braytonov cyklus sa používa pre plynové turbíny. [3]

2.1 OTTOV CYKLUS

Ottov cyklus je ideálnym cyklom zážihových motorov. Tento cyklus bol prezentovaný na konci 19. storočia, po tom ako Nikolaus Otto úspešne demonštroval štvortaktný zážihový motor. Procesy popisuje *Obrázok 1*:

1-2: Izoentropická kompresia pracovného média, piest sa pohybuje zo spodnej polohy (BDC) do vrchnej polohy (TDC)
2-3: Izochorický prívod tepla, zmes sa vznieti a rapídne narastie tlak
3-4: Izoentropická expanzia, v tomto procese pracovná zmes expanduje a vykonáva prácu, piest sa presúva do spodnej polohy
4-1: Izochorický odvod tepla, v praxi sa teplo odvádza pri vypustení výfukových plynov



Obrázok 1 p-V a T-S diagram Ottovho cyklu [3]

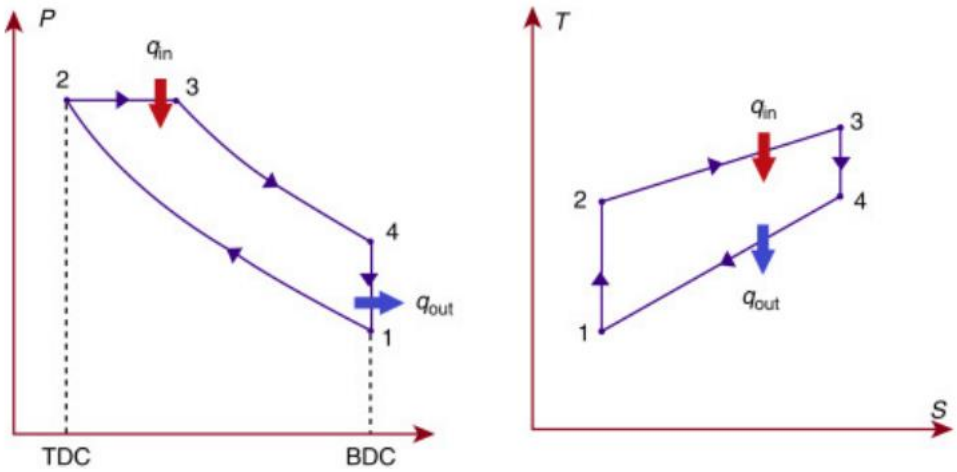
2.2 DIESELOV CYKLUS

Dieselov cyklus je používaný vo viacerých apklikáciách pre generovanie sily. Dieselov cyklus bol prvýkrát prezentovaný pri vznetovom motore Rudolfom Dieselom v Nemecku koncom 19. storočia. Vznietenie paliva v spaľovacom procese je dosiahnuté stlačením pracovného média na teplotu vyššiu ako je teplota samovznietenia paliva. Keď teplota vzduchu nasatého do valca adekvátne vzrastie, palivo sa pod vysokým tlakom vstrekne do spaľovacej komory. Následne prudko nastáva proces vznietenia. Cyklus popisuje *Obrázok 2*:

1-2: Izoentropická kompresia pracovného média, piest sa pohybuje zo spodnej polohy (BDC) do vrchnej polohy (TDC)
2-3: Izobatický prívod tepla, s rastúcou teplotou vzduchu prichádza vstreknutie paliva a okamžité vznietenie palivovej zmesi, čo spôsobí ešte vyšší nárast teploty. Keďže piest sa počas procesu neustále hýbe, teplota narastá za konštantného tlaku

3-4: Izoentropická expanzia, v tomto procese pracovná zmes expanduje a vykonáva prácu, piest sa presúva do spodnej polohy

4-1: Izochorický odvod tepla, v praxi sa teplo odvádza pri vypustení výfukových plynov [3]



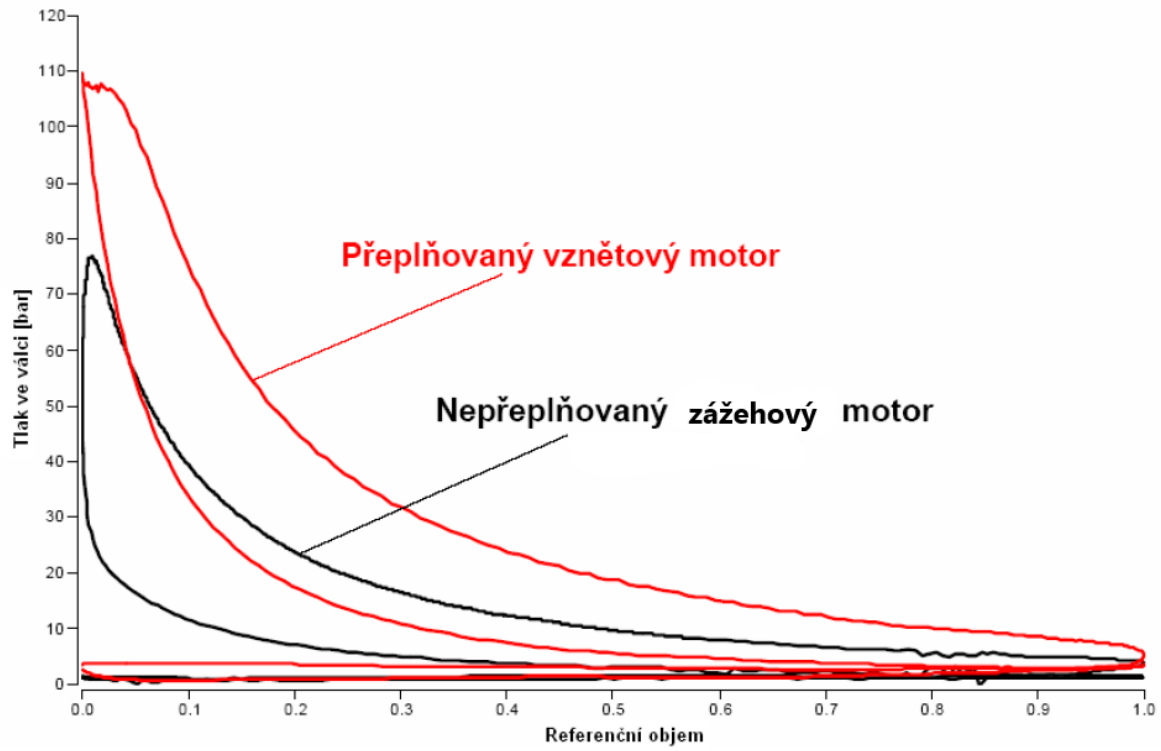
Obrázok 2 p-V a T-S diagram Dieselovho cyklu [3]

2.3 SKUTOČNÉ TERMODYNAMICKÉ CYKLY

Skutočný priebeh sa od ideálneho odlišuje, pretože v skutočnom dochádza k čiastočnej výmene tepla s okolím- nie je to dokonale uzavretý systém. Adiabatické kompresie a expanzie sú v skutočnosti polytropické, izobarické a izochorické premeny nie sú dokonalé. Dôvodom týchto odchýliek sú:

- prestup tepla medzi zmesou a stenami spaľovacieho priestoru
- zmena fyzikálnych vlastností náplne počas spaľovania, pri zmene teploty, aj tlaku
- konečná rýchlosť spaľovania
- únik pracovného média z valca
- konečná rýchlosť šírenia rozruchov
- odparovanie paliva pri kompresii

Skutočné termodynamické cykly popisuje *obrázok 3*.



Obrázok 3 p-V diagram skutočných termodynamických cyklov [2]

3 PARAMETRE ZÍSKAVANÉ POMOCOU INDIKAČNEJ APARATÚRY

3.1 PRIAMO MERANÉ PARAMETRE

Maximálny spaľovací tlak p_{max}- najvyššia hodnota tlaku v celom obehu

Poloha maximálneho spaľovacieho tlaku α_{pmax}- uhol natočenia kľukového hriadeľa, pri ktorom nastáva maximálny spaľovací tlak

maximálny nárast tlaku $\frac{dp}{d\alpha}max$- bod obehu s najvyšším gradientom

poloha maximálneho nárastu tlaku $\alpha_{\frac{dp}{d\alpha}max}$- uhol natočenia kľukového hriadeľa, pri ktorom nastáva maximálny nárast tlaku

3.2 NEPRIAMO MERANÉ PARAMETRE

Hluk spaľovania- hluk vznikajúci pri spaľovaní zmesi v spaľovacom priestore motoru

Premena energie- premena chemickej energie paliva na tepelnú a následne na mechanickú

Priebeh horenia- časový priebeh zápalu, šírenia plameňa

Stredný indikovaný tlak p_i- predstavuje myslenú konštantnú strednú hodnotu tlaku pôsobiacu na piest, pri ktorom by sa za jeden zdvih vykonala práca, rovná veľkosti indikovanej práce jedného obehu.

$$p_i = \frac{W_i}{V_z} = \frac{1}{V_z}\int pdV \tag{1}$$

$Kde\ p_i\ je\ stredný\ indikovaný\ tlak\ [MPa]$, $V_z\ je\ zdvihový\ objem\ valcu\ [m^3]$, $W_i\ je\ indikovaná\ práca\ [J]$, $p\ je\ premenlivý\ tlak\ [Pa]$, $dV\ je\ zmena\ objemu\ [m^3]$

Indikovaná účinnosť- účinnosť premeny chemickej energie paliva na tepelnú energiu pre prácu indikovaného obehu

$$\eta_i = \frac{q_i}{q_p} \tag{2}$$

$Kde\ \eta_i\ je\ indikovaná\ účinnosť\ [-]$,
$q_i\ je\ teplo\ využité\ pre\ prácu\ tepelného\ indikovaného\ obehu\ motoru\ [J]$,
$q_p\ je\ chemická\ energia\ paliva\ [J]$

Mechanická účinnosť- účinnosť premeny tepelnej energie na energiu mechanickú

$$\eta_m = \frac{P_e}{P_i} \tag{3}$$

$Kde\ \eta_m\ je\ mechanická\ účinnosť\ [-],\ P_e\ je\ efektívny\ výkon\ na\ kľukovom\ hriadeli\ [W],$

$P_i\ je\ indikovaný\ výkon\ na\ pieste\ motoru\ [W]$

Celková účinnosť- kombinácia indikovanej a mechanickej účinnosti

$$\eta_c = \eta_i \eta_m \tag{4}$$

$Kde\ \eta_c\ je\ celková\ účinnosť\ [-]$

Stredný efektívny tlak- stredný indikovaný tlak vynásobený mechanickou účinnosťou

$$p_e = p_i \eta_m \tag{5}$$

$Kde\ p_e\ je\ stredný\ efektívny\ tlak\ [MPa]$

Efektívny výkon pre štvortaktný motor- výkon na kľukovom hriadeli

$$P_e = S p_e c_s i \frac{1}{4} \tag{6}$$

$S\ je\ obsah\ plochy\ prierezu\ valca\ [mm^2]\ ,\ c_s\ je\ priemerná\ rýchlosť\ piestu\ [ms^{-1}]\ ,$
$i\ je\ počet\ valcov\ [-]$

[2,3]

4 SPÔSOBY MERANIA SPAĽOVACIEHO TLAKU

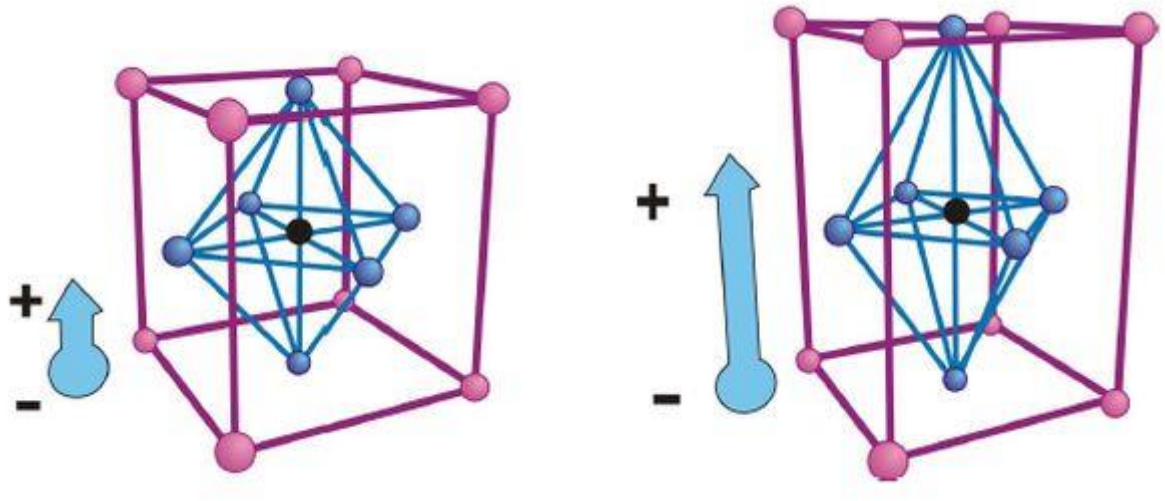
4.1 PIEZOELEKTRICKÉ SNÍMAČE

Piezoelektrický jav bol objavený v roku 1880 a bol pozorovaný pri pokusoch s osovo nerovnomernými kryštálmi tzv. Seignet-tovej soli. Vo všeobecnosti sa rozdeľuje na priamy a nepriamy piezoelektrický jav.

V podstate ide o konverziu elektrickej energie na mechanickú alebo naopak, a teda pre použitie týchto materiálov ako akčných členov je potrebné aplikovať na ich elektródy elektrické napätie definovanej veľkosti a modulácie. Podľa polarity aplikovaného elektrického napätia nastáva u akčného prvku expanzia alebo kontrakcia v smere polarizačnej osi.

Priamy piezoelektrický jav je ten, pri ktorom deformácia vyvolaná mechanickou silou je príčinou elektrickej polarizácie kryštálu, úmernej mechanickej sile.

Nepriamy (inverzný) piezoelektrický jav je ten, pri ktorom polarizácia kryštálu vyvolaná elektrickým napätím zapríčiňuje prostredníctvom mechanickej deformácie zmenu vonkajších rozmerov kryštálového výbrusu. *(obrázok 4)* [4]



obrázok 4 inverzný piezoelektrický jav [4]

V meracej technike sa najčastejšie používa kremeň (SiO_2). Kryštalizuje šesterečnej sústave, pričom elementárnym prvkom je šesťboký hranol, ktorý má 3 základné osi, ktoré sú pre vznik piezoelektrického javu veľmi dôležité.

Veľkosť elektrického náboja:

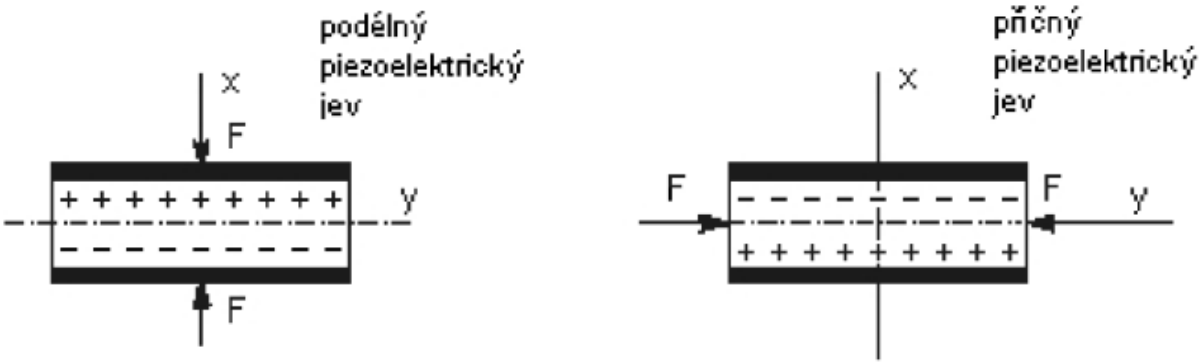
Pozdĺžny piezoelektrický jav *(obrázok 5):*

$$Q = K_p F_x \tag{7}$$

Priečny piezoelektrický jav *(obrázok 5):*

$$Q = -K_p\, F_y \frac{b}{a} \tag{8}$$

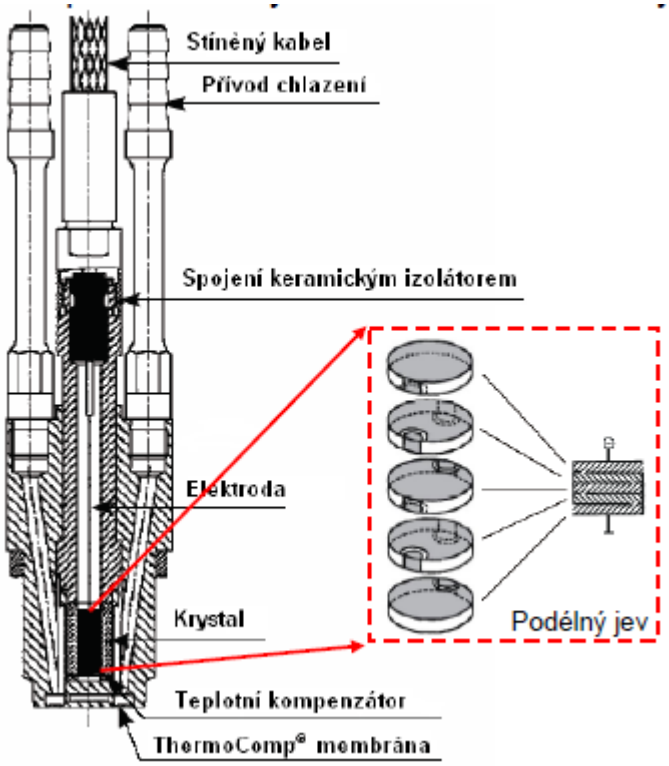
Kde Q je veľkosť náboja, K_p je piezoelektrická konštanta; a, b sú rozmery kvádra, F_x, F_y sú sily pôsobiace v príslušnej osi



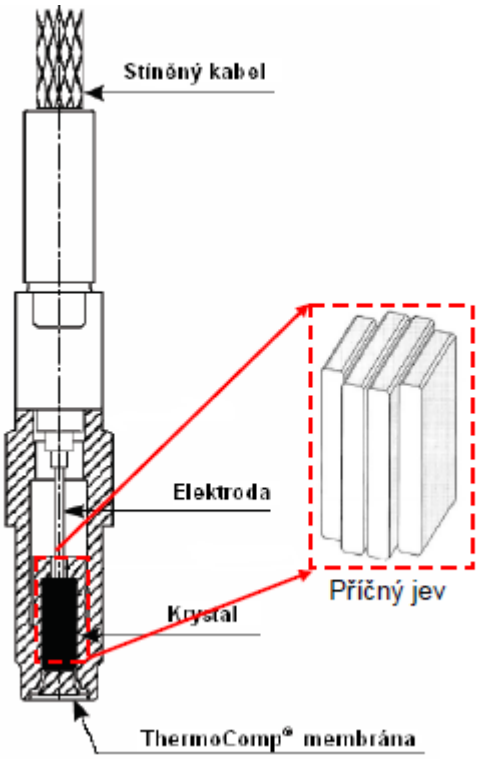
Obrázok 5 Pozdĺžny a priečny piezoelektrický jav [2]

Snímač sa pri pôsobení neelektrickej veličiny chová ako generátor náboja. Pre získanie informácie sa medzi merací prístroj a snímač umiestňuje zosilňovač náboja s veľkým vstupným odporom. Jeho hlavnou úlohou je impedančné prispôsobenie, menej už vlastné zosilnenie signálu. Nie sú vhodné na meranie statických tlakov, pretože sú citlivé len na zmenu tlaku. Hlavnou oblasťou požitia je meranie tlakových rázov a impulzov. Rezonančné frekvencia dosahuje až niekoľko stoviek kHz, maximálne pracovné tlaky až 500 MPa.

Snímače možno rozdeliť na chladené *(obrázok 6)* a nechladené *(obrázok 7)*. Bez núteného chladenia môžu snímače pracovať v rozmedzí teplôt -140 °C – 240 °C, nad teplotu 240 °C sa musia používať prídavné adaptéry pre chladenie alebo chladené snímače. [2,4]



Obrázok 6 Chladený snímač [2]

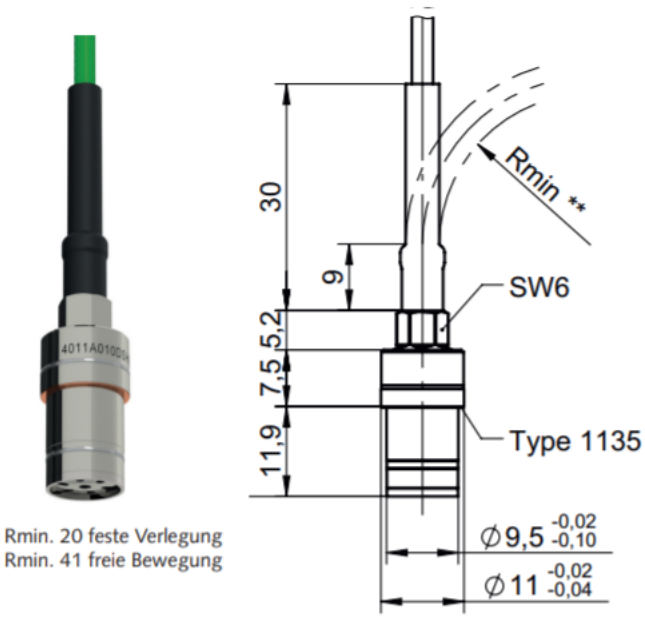


Obrázok 7 Nechladený snímač [2]

4.2 PIEZOREZISTÍVNE SNÍMAČE

Piezorezistívny efekt je zmena elektrického odporu v polovodiči alebo v kove pri pôsobení mechanickej deformácie. V porovnaní s piezoelektrickým javom, piezorezistívny jav spôsobuje zmenu v elektrickom odpore a nie v elektrickom potenciále.

Ako pružný prvok sa používa monokryštalická kremíková doštička a sada ekvivalentných odporov sa rozptyľuje v špecifickom smere monokryštalickej kremíkovej membrány pomocou procesu integrovaného obvodu. Rezistory sú spojené do mostíka a monokryštalická kremíková doštička je umiestnená v dutine snímača. Piezorezistívny snímač tlaku je založený na piezorezistívnom účinku monokryštalického kremíka. Piezorezistívne senzory (*Obrázok 8)* pracujú veľmi dobre bez výchyliek a preto sa používajú hlavne na meranie statických tlakov. Sú veľmi spoľahlivé a stabilné aj po dlhšom čase používania. Nevýhodou týchto senzorov je, že majú väčšiu spotrebu energie ako niektoré iné typy senzorov. To môže znamenať, že nie sú vhodné pre použitie batériou napájaných alebo pohyblivých systémov. [6,7,8]

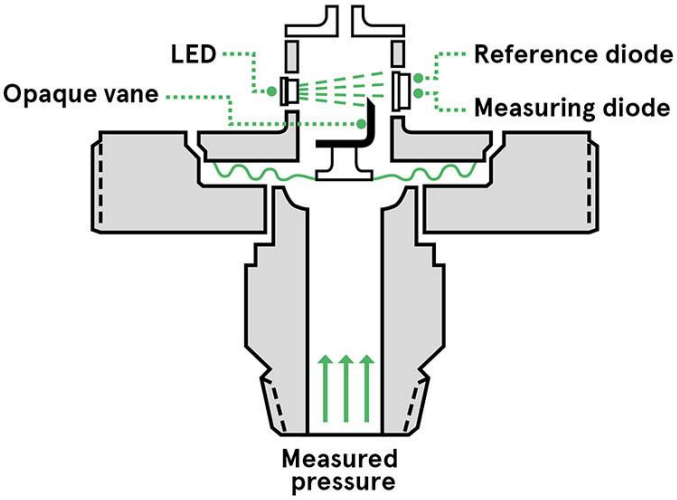


Obrázok 8 Piezorezistívny snímač Kistler 4011A

4.3 OPTICKÉ SNÍMAČE

Oproti ostatným snímačom tlaku využívajú optické snímače iný nosič informácie-fotóny. Z tejto zásadnej odlišnosti vyplývajú ich charakteristické vlastnosti, ku ktorým patrí hlavne veľká citlivosť, odolnosť voči rušeniu, iskrová bezpečnosť a malá hmotnosť. K nevýhodám patrí doposiaľ náročnejšia konštrukcia. Optické snímače využívajú ako svetelný zväzok, tak stále častejšie optické vlákna.

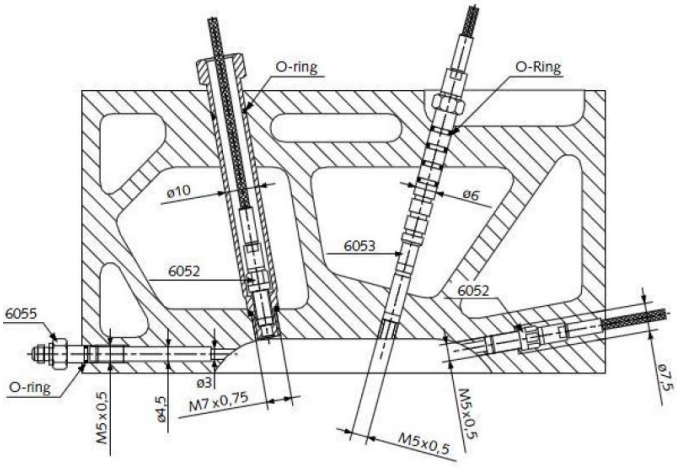
Optické snímače firmy Optrand (*Obrázok 9)* fungujú na princípe zmeny intenzity svetla odrazeného od Inconelovej membrány vychylovanej za pôsobenia tlaku. Prednosťami snímačov tohto typu sú dlhá životnosť a nižšia cena oproti piezoelektrickým snímačom. V praxi však oproti piezoelektrickým snímačom zaostávajú hlavne linearitou a teda nie sú vhodné na veľmi presné merania. [8,9]



Obrázok 9 Schéma optického snímača tlaku [9]

5 MOŽNOSTI INŠTALÁCIE SNÍMAČA

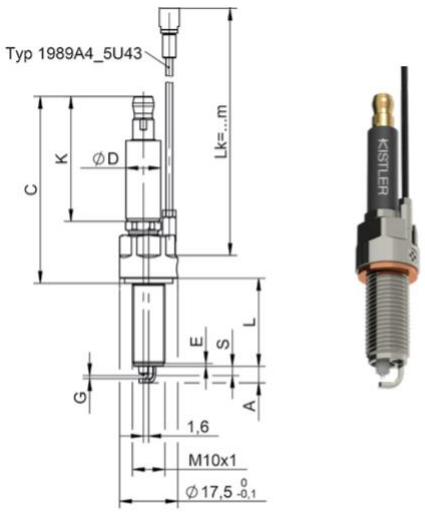
Tlakové snímače môžu byť inštalované v rôznych pozíciách (*Obrázok 10),* napríklad do samostatnej vŕtanej diery, namiesto žhaviacej sviečky alebo ako snímač umiestnený v zapaľovacej sviečke. V ideálnom stave je snímač nasmerovaný do stredu guľovej plochy, ktorou sa šíri plameň.



Obrázok 10 Znázornenie rôznych možností inštálacie snímača [20]

5.1 SVIEČKA S PIEZOELEKTRICKÝM SNÍMAČOM

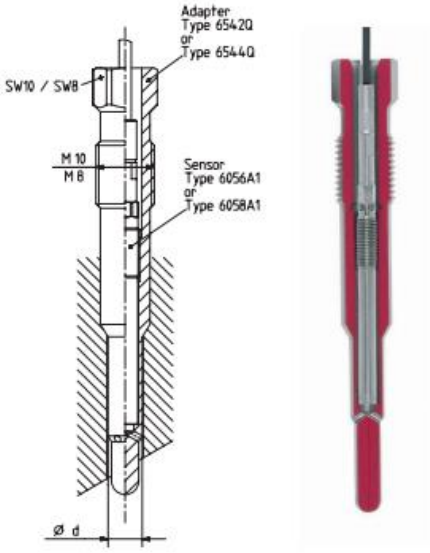
Piezoelektrické snímače integrované do zapaľovacej sviečky majú veľkú výhodu v jednoduchosti zástavby. Používa sa práve tam, kde samotný snímač nemôže byť použitý zo zástavbových dôvodov. Pre túto aplikáciu sa nepoužíva kremíkový kryštál, ale fosforečnan gállitý ($GaPO_4$). Sviečka je konštruovaná tak, že elektróda je mierne mimo osu tak, aby sa tam zmestil miniatúrny snímač (*Obrázok 11*). Takýto snímač vie pracovať až do teploty 350 °C. [10,11]



Obrázok 11 Sviečka s piezoelektrickým snímačom Kistler 6113C [11]

5.2 ŽHAVIČ S PIEZOELEKTRICKÝM SNÍMAČOM

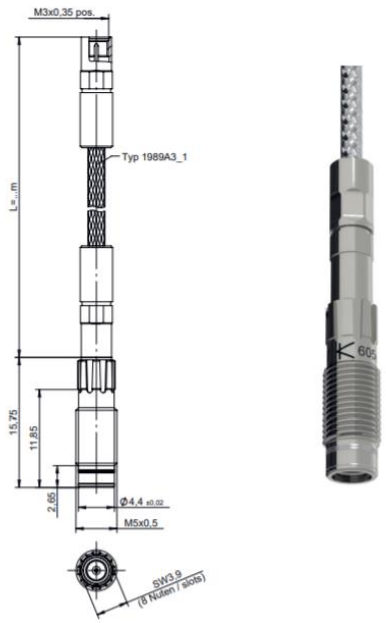
Vo vznetových motoroch, kde nie je možná alebo je obtiažna montáž samostatného tlakového senzoru sa používajú senzory, ktoré sa zabudujú namiesto žhaviča. Takýto typ zástavby sa skladá z dvoch častí. Z adaptéru, ktorý nahrádza sériový žhavič a zo samotného tlakového senzoru, ktorý je nainštalovaný priamo do diery v adaptéri (*Obrázok 12)*. Adaptér je jednoducho namontovaný do už existujúcej diery po žhaviči, teda nie je nutné vŕtať separátne diery do motora. Senzor je v kontakte so spaľovaním vďaka krátkym hviezdicovitým vŕtaniam na špičke adaptéra. Tiež sa nachádza blízko spaľovacieho procesu, čo poskytuje vysokú kvalitu signálu. Žhaviče sa primárne používajú na optimalizáciu studeného štartu motoru za znížených emisií. Samotný motor je však možné naštartovať aj bez žhavičov, ak nie je používaný v príliš nízkych teplotách. Takže senzory možno bez problémov nainštalovať namiesto žhavičov, pri potrebe merania tlaku. [12]



Obrázok 12 Žhavičový adaptér Kistler 6542Q a senzor tlaku Kistler 6056A1 [12]

5.3 NECHLADENÝ PIEZOELEKTRICKÝ SNÍMAČ

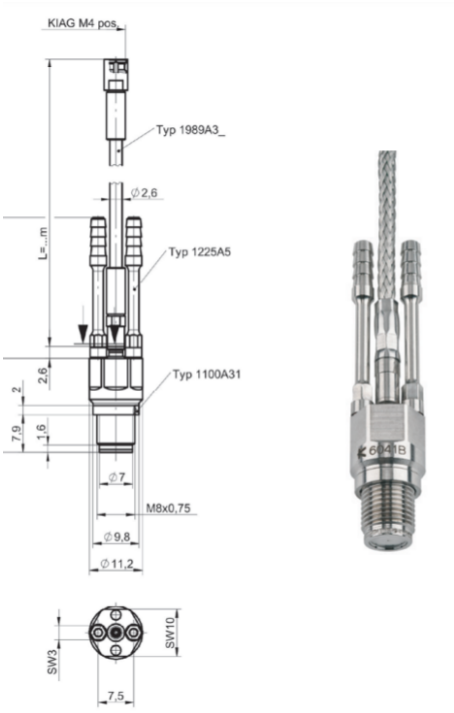
Samostatný snímač tlaku *(Obrázok 13)* je podobnej konštrukcie ako už spomenutý integrovaný snímač tlaku do zapaľovacej sviečky. Jeho hlavnou prednosťou je kompromis kompaktnosti a citlivosti, ktorá sa pohybuje okolo 20 $pC{\cdot}bar{-}1$. Ďalej sa vyznačuje dobrou teplotnou stabilitou citlivosti a dobrou životnosťou. Aplikácia týchto snímačov sa rieši vŕtaním hlavy motoru, často cez vodný okruh chladenia. Chladiaci okruh sa zatesní pomocou montážneho púzdra. [10,13]



Obrázok 13 Nechladený snímač Kistler 6054C [13]

5.4 VODOU CHLADENÝ PIEZOELEKTRICKÝ SNÍMAČ

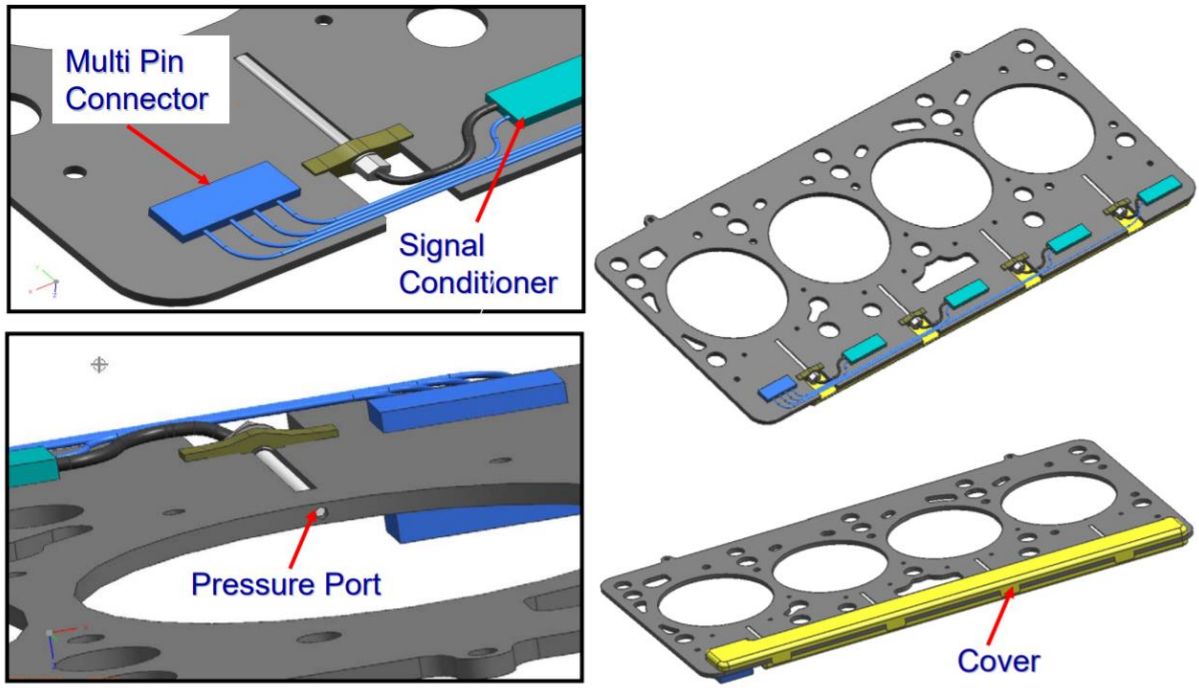
Vodou chladené snímače (*Obrázok 14)* sú najcitlivejšie (okolo 40 $pC{\cdot}bar_{-1}$), nejmenej ovplyvnené teplotou a najodolnejšie. Ich aplikácia je ale možná pre veľké motory alebo motory s prebytkom miesta v hlave. Nevýhodou je veľká citlivosť na zrýchlenie spôsobené napríklad ventilovým rozvodem. [10,14]



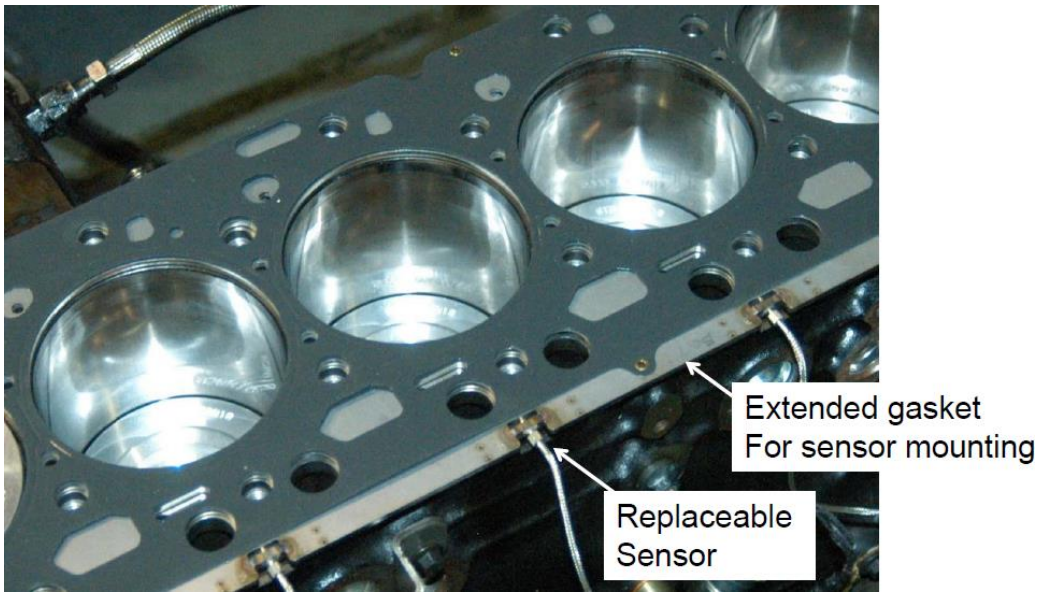
Obrázok 14 Vodou chladený snímač Kistler 6041B [14]

5.5 TESNENIE POD HLAVU S INTEGROVANÝM OPTICKÝM SNÍMAČOM TLAKU

Použitie optického snímača tlaku integrovaného do tesnenia pod hlavou motoru (*Obrázok 15, Obrázok 16)* sa javí ako veľmi výhodná metóda merania z hľadiska výhodnej polohy na okraji valca, kde sa dá dobre analyzovať tiež klepanie motoru. Použitie snímača v tesnení pod hlavou je však veľmi finančne a časovo náročné, pretože zaindikovanie je potreba spraviť samostatne pre tesnenie konkrétneho motora. [10, 15]



Obrázok 15 Senzor tlaku v tesnení pod hlavou [15]



Obrázok 16 Senzor tlaku v tesnení pod hlavou na reálnom motore [15]

6 SÚČASNÉ PROGRESÍVNE METÓDY MERANIA A VYHODNOCOVANIA PRIEBEHU TLAKU

6.1 METÓDA ROZDELENIA NA PODSIGNÁLY

Nová metóda merania tlaku spočíva v rozdelení tlakového signálu do troch podsignálov, vďaka čomu je možné získať kompletnejší základ pre analýzu. Tlak vo valcoch je rozdelený do podsignálov podľa troch relevantných fyzikálnych fenoménov objavujúcich sa pri operácii vznetového motoru, a to pseudo-motorickom, spaľovacom a rezonančnom budení. Energia spojená s týmito podsignálmi je rozdelená jednotlivo na nízke, stredné a vysoké frekvencie. Pseudo-motorický signál závisí hlavne na podmienkach operácie motora- zaťažení motora a rýchlosti, zatiaľ čo prvky spojené so spaľovaním a rezonanciou sú ovplyvnené vstrekovacou stratégiou. Táto technika merania by mohla byť vhodná na výkonnostné a emisné štúdie, ale tiež na analýzu hluku spaľovacieho motoru. [16]

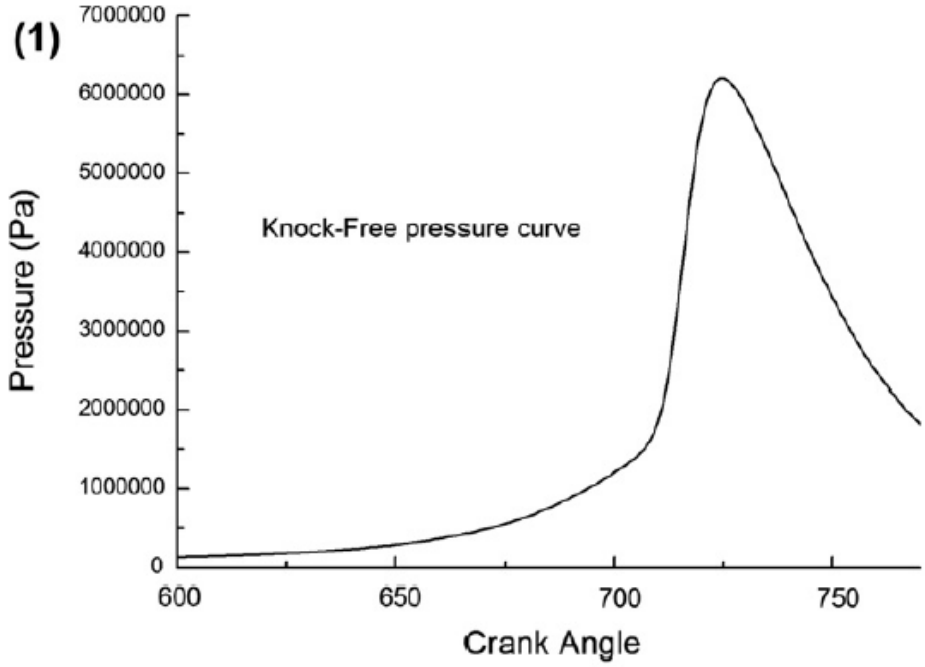
6.2 SKÚMANIE REZONANCIE

Oscilácia tlaku vo valci v spaľovacích motoroch je vyvolávaná lokálnymi tlakovými gradientmi, ktoré vznikajú spaľovaním a rezonujú v spaľovacej komore valca počas expanzného zdvihu. Vývoj rezonančnej frekvencie bol prvýkrát charakterizovaný Draperom v roku 1938,pomocou analytického riešenia vlnovej rovnováhy s okrajovými podmienkami vo valci. Draper uviedol, že rezonančné prípady boli úmerné rýchlosti zvuku. Vo vznetových motoroch, závislosť medzi rýchlosťou zvuku a rezonančnou frekvenciou sa môže líšiť od valcovej akustickej odozvy ako popísal Torregrosa.[17] „Rezonančná oscilácia spálených plynov v spaľovacej komore zážihového motoru sa javí ako hlavný zdroj rozruchov bloku motoru počas spaľovania.“[17]
Tlakové oscilácie spôsobené rezonanciou sú nežiadúcim následkom spaľovania a musí byť kontrolovaná pre bezpečný a účinný chod. [18]

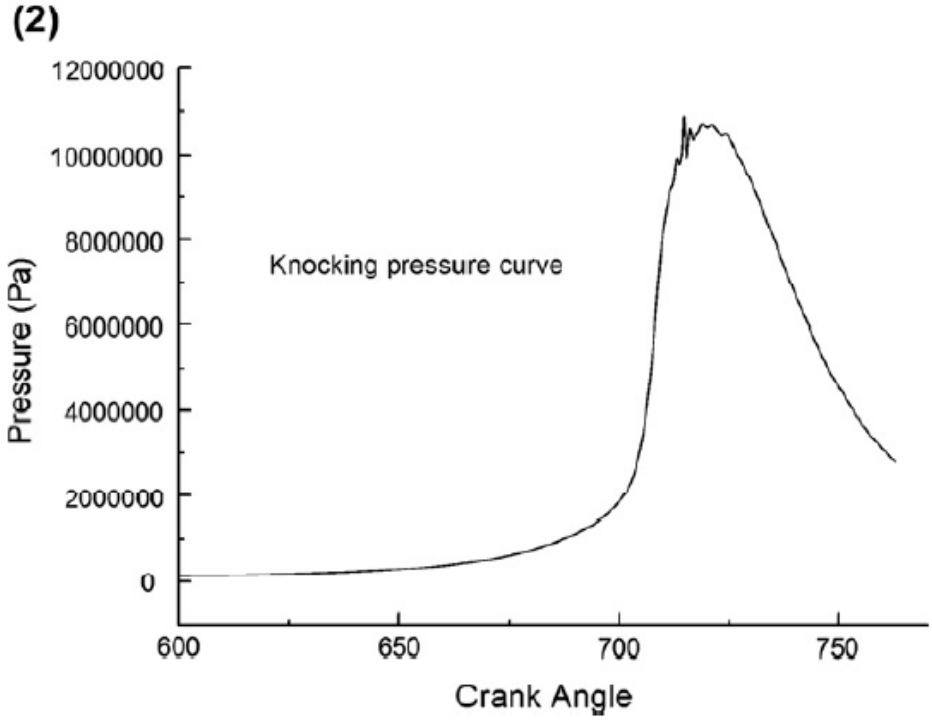
V zážihových motoroch je hlavným limitujúcim faktorom pri veľkom zaťažení fenomén klepania, ktorý vzniká zo samozapaľovania koncového plynu (nespálenej zmesi), pred tým ako okraj plameňa spaľovania dokáže spotrebovať všetko palivo v spaľovacej komore. Rýchle samozapálenie koncového plynu silno vybudzuje rezonanciu a následné vibrácie znižujú účinnosť motoru a taktiež môžu viesť k poškodeniu motoru. [18,19]

6.3 METÓDA IDENTIFIKÁCIE KLEPANIA ZALOŽENÉ NA ANALÝZE PRIEBEHU TLAKU

Zámerom tejto metódy je priama analýza spaľovacieho procesu, ktorý je ovplyvnený klepaním. Typický vysokofrekvenčný znak klepania je spojený s rezonančnými frekvenciami, ktoré sú spôsobované rýchlym nárastom tlaku v spaľovacej komore. Typické príklady klepajúceho a neklepajúceho priebehu sú zobrazené na *Obrázku 17, Obrázku 18* . [19]



Obrázok 17 Graf tlakovej analýzy bez klepania [19]



Obrázok 18 Graf tlakovej analýzy klepania [19]

7 NÁVRH VHODNÉHO SNÍMAČA

7.1 PARAMETRE VZNETOVÉHO MOTORU

Vedúcim práce boli zadané parametre:
Maximálny efektívny výkon $P_e = 850$ kW pri otáčkach n $= 2200\ min^{-1}$;
Zdvihový objem valcov motora $V = 13\ l$; Počet valcov je $i = 6$;
Mechanická účinnosť je uvažovaná 80%

7.2 VÝPOČET STREDNÉHO INDIKOVANÉHO TLAKU, PODĽA KAPITOLY 3

$$P_e = Sp_e c_s i \frac{1}{4} \tag{9}$$

$$P_e = Sp_e \frac{2Ln}{60} i \frac{1}{4} \tag{10}$$

Kde L je dráha zdvihu [m]

$$P_e = Vp_e \frac{2n}{60} \frac{1}{4} \tag{11}$$

Kde V je zdvihový objem motora [m^3]

$$p_e = \frac{120P_e}{Vn} = \frac{120 \cdot 850\ 000}{0{,}013 \cdot 2200} = 3\ 566\ 434\ Pa \tag{12}$$

$$p_i = \frac{p_e}{\eta_m} = \frac{3\ 566\ 434}{0{,}8} = 4\ 458\ 043\ Pa \tag{13}$$

Pre presný výpočet maximálneho spaľovacieho tlaku by bolo nutné mať zadané viacero premenných, preto je maximálny spaľovací tlak odhadnutý podľa iných motorov s podobnými parametrami a dopočítanými hodnotami [25]. Je zvolený snímač do maximálneho tlaku 200 bar.

7.3 VOĽBA SNÍMAČA

Motor je vznetový, preto sa tam nenachádza žiadna zapaľovacia sviečka. Žhavenie sa uskutočňuje už v sacom potrubí pomocou výhrevného telesa, preto nie je vhodná ani aplikácia do puzdra umiestneného namiesto žhaviacej sviečky. Optické snímače nedosahujú vysokú presnosť, ich použitie by nebolo vhodné vzhľadom na požiadavky. Najvýhodnejšie je použiť nechladený snímač inštalovaný do samostatnej diery.

Je zvolený nechladený snímač Kistler type 6053CC (*obrázok 19)*. Na základe parametrov, ktoré boli zadané vedúcim práce sa odhadol maximálny spaľovací tlak, podľa ktorého bol zvolený variant snímača s meracím rozsahom do 200 bar.

Obrázok 19 Kistler type 6053C

8 REVERZNÉ INŽINIERSTVO

Zatiaľ, čo tradičné inžinierstvo používa logické, matematické a abstraktné nápady a transformuje ich na fyzické produkty alebo systémy, koncept reverzného inžinierstva je presným opakom, pričom prechádza z hotového produktu alebo systému k digitálnemu modelu, ktorý je možné konvertovať do computer-aided design (CAD) súboru. Existuje niekoľko dôvodov, prečo aplikovať reverzné inžinierstvo, vrátane prípadov, kedy výrobca určitého produktu alebo strojnej súčasti už neexistuje alebo viac nevyrába daný produkt, pôvodná dokumentácia mohla byť stratená alebo nemusela nikdy existovať, kontrola kvality potrebuje CAD model, existujúci produkt je nutné vylepšiť, v CAD modeli je potreba urobiť modifikácie produktu, atď.

Aj keď metódy reverzného inžinierstva sa líšia od odvetvia k odvetviu, všetky sa vyvinuli s inováciami v oblasti počítačových technológii a digitálnej kontroly počas posledného storočia. Tradične sa využíva demontáž existujúcich produktov a manuálne meranie pomocou ručných meradiel, merajú sa priemery, hĺbky, atď., a následne sa manuálne vytvorí počítačový návrh. Tento proces je efektívny a presný len v jednoduchých prípadoch, ale stáva sa zložitejší, keď ho treba použiť na stále viac komplexné tvary, ako napríklad nerovinné alebo nepravidelné povrchy.

Tento prístup sa s vývojom nových technológii tešil lepšej presnosti získaných digitálnych dát. Tradičné metódy merania sa začali nahradzovať novými technológiami, v 60. rokoch sa objavili prvé trojosé meracie stroje, ktoré bolo neskôr možné prepojiť s počítačom, a tak presnejšie nadefinovať nepravidelné povrchy. Tieto stroje sa najprv ovládali ručne, neskôr sa dala dokonca naprogramovať cesta merania. Ich nevýhodou však je, že k meraniu potrebujú byť v kontakte s meraným objektom.[21, 22]

8.1 3D SKENOVANIE V RE

Celý proces reverzného inžinierstva (*Obrázok 20)* môže byť rozdelený na 4 fázy:

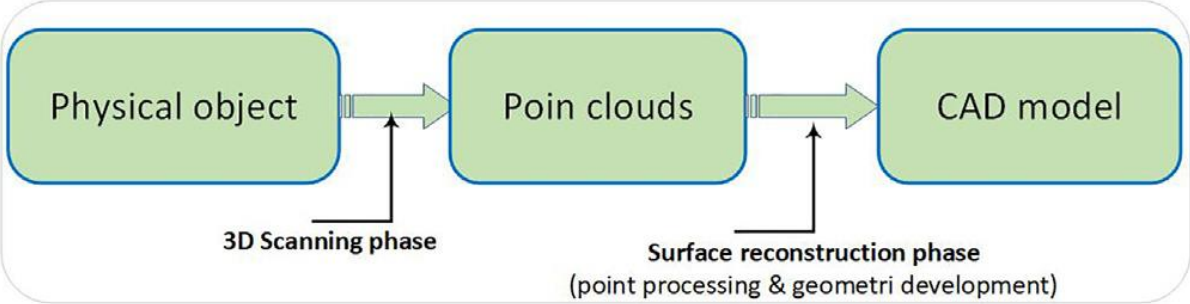
1. Skenovanie- digitalizácia
2. Spracovanie nazbieraných dát
3. Vytvorenie 3D modelu (CAD)
4. Konkrétne využitie (výroba, modifikácia...)

Skenovacia fáza pozostáva z voľby skenovacej techniky, prípravy objektu a samotného skenovania. Je to proces získavania dát nenadefinovaného trojrozmerného objektu. Počas tohto procesu sa skenovacia sonda pohybuje po alebo pri povrchu objektu a zaznamenáva informácie o povrchu vo forme numerických dát. Výsledkom skenovania je trojrozmerná mapa bodov (point cloud). Je to zväčša súbor pozostávajúci zo súradníc (x,y,z). [23]

Vo fáze spracovania nazbieraných dát sa upravuje point cloud, opravujú sa poruchy, znižuje sa počet bodov pomocou filtračných algoritmov. Následne sa spoja point cloud dáta z jednotlivých skenov, pre vytvorenie modelu.

Vytvorenie presného 3D modelu je najkomplexnejšia fáza v procese reverzného inžinierstva. Je to spôsobené hlavne potrebou zložitých algoritmov pre vytvorenie presného povrchu. Keďže väčšina CAD softvérov nie je prispôsobená veľkému množstvu point cloud

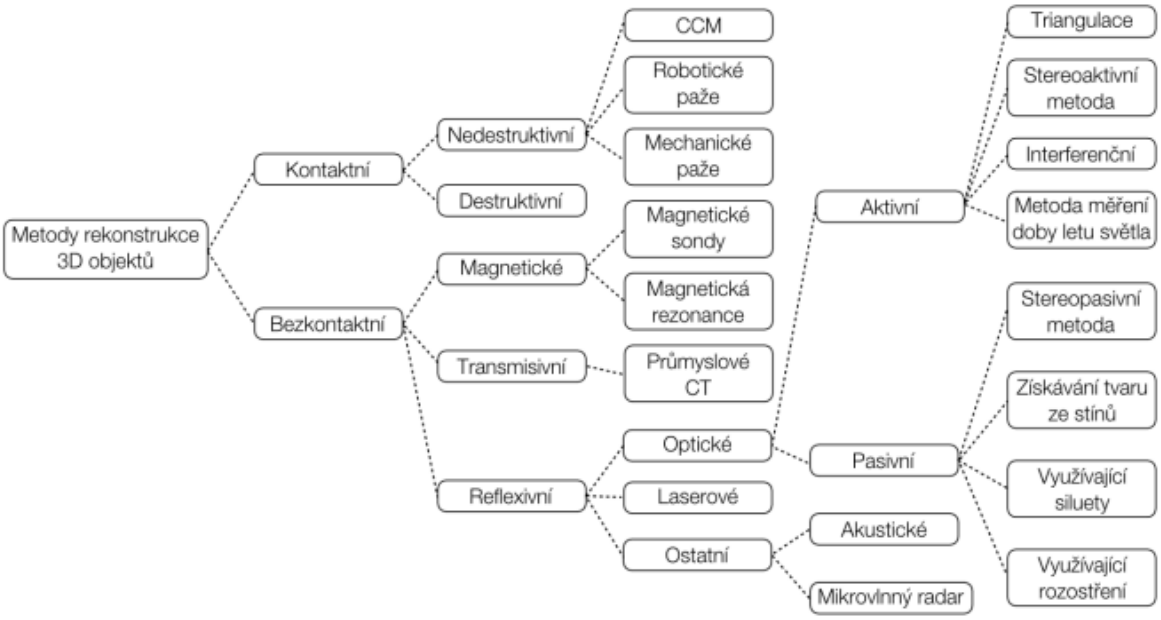
dát, je nutné používať ďalší softvér, ktorý by vedel transformovať point cloudy na povrchy, ktoré môžu byť použité v CAD softvéroch. [21, 22, 23]



Obrázok 20 Schéma procesu skenovania v RE [21]

8.2 3D SKENERY

3D skenery sú zariadenia používané na trojrozmerné skenovanie objektov. Ako bolo spomenuté v časti 7.1, hlavné rozdelenie je na kontaktné a bezkontakté. Ich ďalšie rozdelenie je popísané na *obrázku 2*1.



Obrázok 21 Rozdelenie 3D skenerov [10]

8.3 KONTAKTNÉ SKENERY

8.3.1 DEŠTRUKTÍVNE SKENERY

Toto zariadenie má okrem vonkajšieho povrchu, schopnosť digitalizovať aj vnútornú geometriu. Súčiastka je uložená do rámu a pokrytá špeciálnym náterom, je vyčerpaný vzduch z pracovného priestoru, tak aby vzniklo vákuum. Súčasť je potom upevnená do frézovacieho stolu. Frézka odfrézováva ultratenké vrstvy materiálu za súčasného optického skenovania.

8.3.2 NEDEŠTRUKTÍVNE SKENERY

Kontaktné 3D skenery skúmajú povrch objektu pomocou fyzického hmotného dotyku. Zatiaľ, čo objekt zostáva v kľude pripevnený k podložke, CMM polohovacie rameno, na ktorom je upevnená bodová alebo guličková sonda umožňuje užívateľovi bodovo sníma 3D dáta z fyzického objektu

8.4 BEZKONTAKTNÉ SKENERY

Bezdotykové (bezkontaktné) snímacie systémy, na rozdiel od dotykových, nevyžadujú ku svojej funkcii fyzický dotyk. Vďaka jednoduchosti, presnosti a rýchlosti sú v dnešnej dobe najrozšírenejším variantom 3D skenerov na trhu. Môžeme ich ďalej deliť na:

8.4.1 MAGNETICKÉ SKENERY

Môžeme ich rozdeliť na skenery s magnetickou sondou alebo skenery využívajúcu magnetickú rezonanciu. Použitím druhého spomenutého typu, môžeme získavať informácie o vnútornej geometrii súčastí. Jedná sa o nedeštruktívnu metódu. Zariadenia pracujú na rovnakom princípe ako magnetická rezonancia v zdravotníctve. Zariadenia sú mobilné a používajú sa väčšinou na kontrolu potrubí, kotlov, uzavretých nádob.

8.4.2 TRANSMISÍVNE SKENERY

Zástupcom transmisívnych skenerov sú skenery využívajúce počítačovú tomografiu (CT). Rovnako, ako u skenerov využívajúcich magnetickú rezonanciu, je možné získavať informácie o vnútornej stavbe objektu. Pre prenos informácií sa používa roentgenové žiarenie. Na rozdiel od zdravotníckych zariadení sa pri technickom použití používa vyššia intenzita žiarenia.

8.4.3 REFLEXÍVNE SKENERY

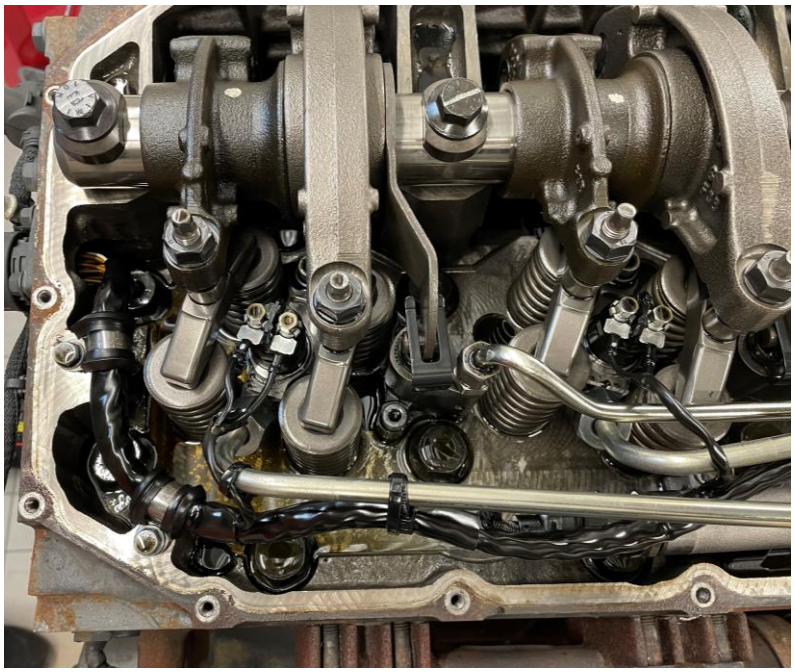
Do tejto kategórie spadajú skenery akustické, laserové a predovšetkým optické.
Akustické skenery využívajú emitovanie zvukových vĺn k digitalizácii objektu. To môže byť napríklad sonar alebo ultrazvuk. Ich presnosť je relatívne malá (0,3 až 0,5 mm). Cena týchto zariadení je celkom vysoká, preto sa používajú najmä na kontrolu kvality.
Optické skenery- snímanie objektu je prevádzané z niekoľkých uhlov za pomoci optického zariadenia. Z rôznych pohľadov je následne pomocou algoritmov vytvorený 3D digitalizovaný model. Pred samotným skenovaním sa na objekte vyznačia orientačné body, ktoré potom slúži na zarovnanie jednotlivých skenov. Referenčné body sa lepia priamo na povrch snímaného objektu. [10, 22, 24]

8.5 REVERZNÉ INŽINIERSTVO V APLIKÁCII PRE INŠTALÁCIU TLAKOVÉHO SNÍMAČA

V aplikácii pre inštaláciu tlakového snímača sa dá princíp reverzného inžinierstva uplatniť pri voľbe vhodného miesta inštalácie. Pre presný návrh je vhodné vytvorenie CAD modelu časti, kde by mal byť umiestnený snímač. CAD model je možno vytvoriť napríklad nameraním potrebnej geometrie. Avšak tento princíp je neefektívny. Použitím optického 3D skeneru je možné celú potrebnú geometriu zdigitalizovať a pomocou referencií vytvoriť CAD model. V praxi to spresní návrh, uľahčí prácu a zníži celkový čas práce.

9 VOĽBA MIESTA PRE INŠTALÁCIU SNÍMAČA

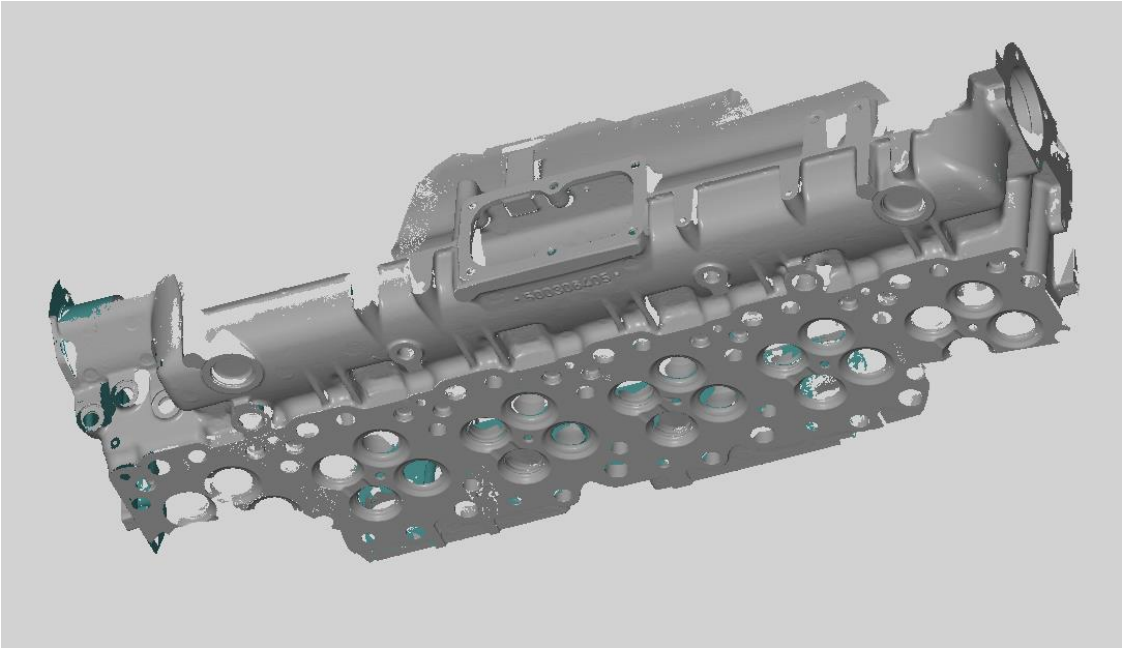
Ako je spomenuté v kapitole 8, na zadanom motore *(Obrázok 22, Obrázok 23)* je nutné použiť nechladený snímač, inštalovaný do samostatnej diery. Pre konkrétne umiestnenie musí byť braný aj ohľad na vývod kábla, ktorý je potreba viesť pomedzi hlavu a veko tak, aby nenarušoval činnosť motorových prvkov. Pre lepšiu manipuláciu a idealizovanie pohľadu pre voľbu vhodného miesta bola naskenovaná hlava valcov (*Obrázok 24).*



Obrázok 22 Pohľad na hlavu valcov a ventily zadaného motoru

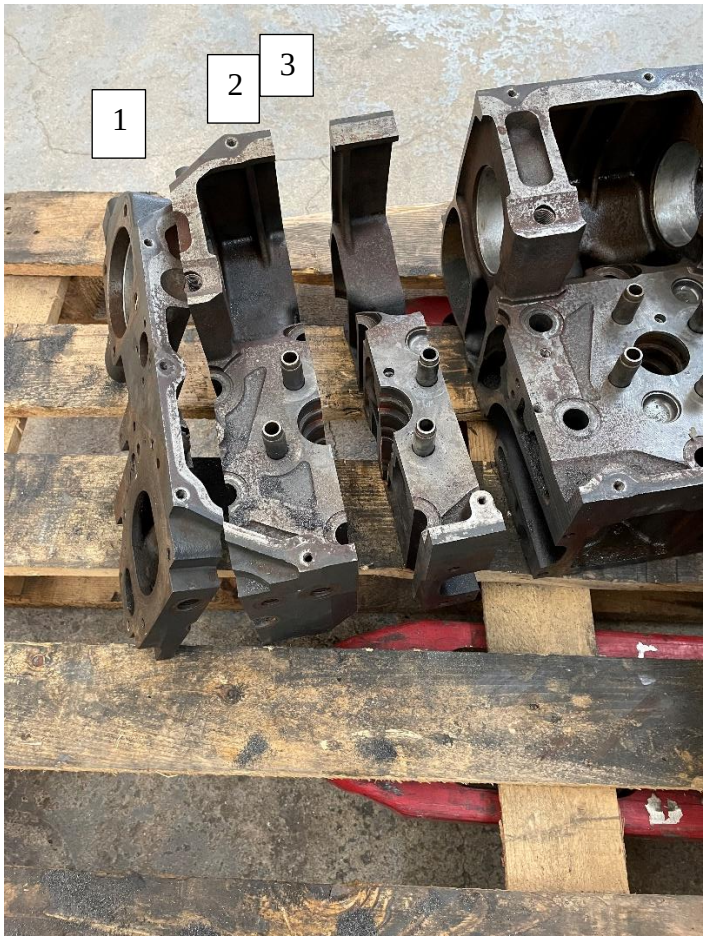
Obrázok 23 Zadaný vznetový motor

Po detailnej analýze samotného motoru a 3D skenu hlavy (*Obrázok 25)* bolo usúdené, že pre kvalitný návrh umiestnenia tlakového snímača, by bolo vhodné využiť vyradenú hlavu z druhého motora, ktorá by mohla byť rozrezaná.



Obrázok 24 3D Sken hlavy valcov

Následne bola hlava narezaná na niekoľko segmentov *(obrázok 25)*, pre zistenie prístupu ku valcu a vizualizáciu vnútornej geometrie hlavy- kanáliky chladiaceho a mazacieho okruhu, vŕtania ventilov a vstrekovačov, kanáliky prívodu vzduchu a výfuku .

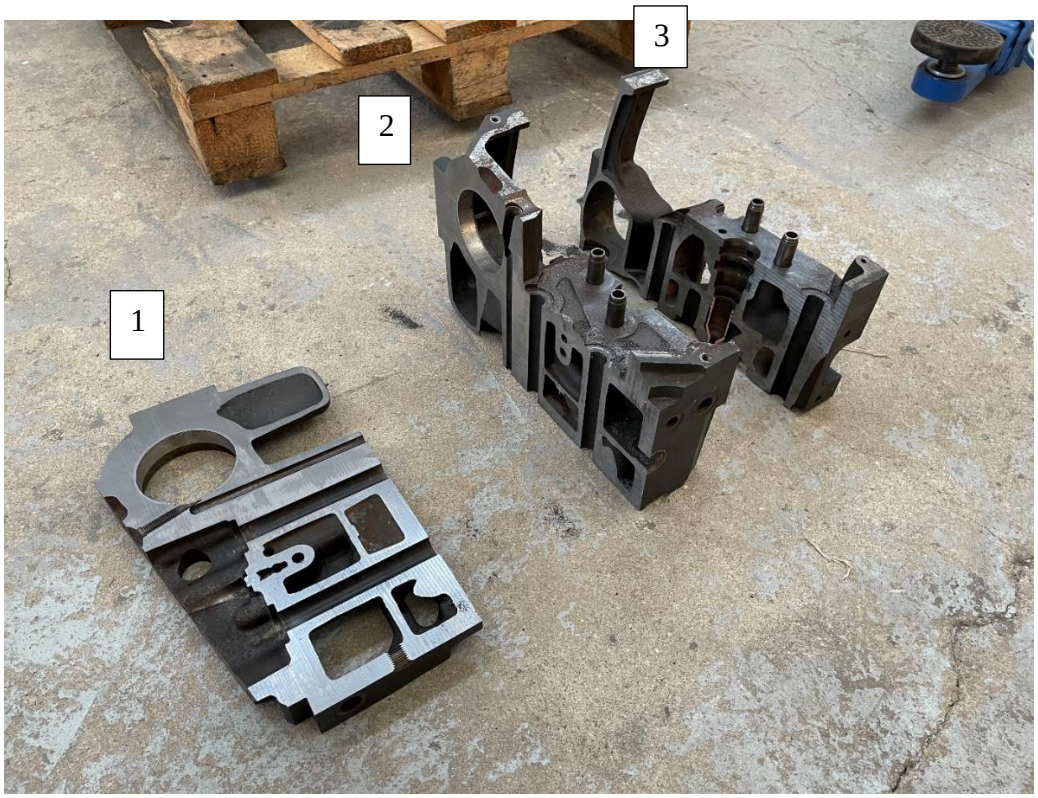


Obrázok 25 Narezaná hlava valcov na segmenty

Na *Obrázku 26* je znázornená spodná časť hlavy, na ktorej jasne vidno priestor valca. Zvolený senzor sa musí nachádzať v tejto oblasti, aby bol umožnený kontakt so spaľovaním.

Obrázok 26 Pohľad zo spodnej strany hlavy valcov a zobrazenie požadovaného priestoru pre umiestnenie snímača

Pre inštaláciu bol zvolený segment 3. Inštalácia do segmentu č.1 a č. 2 nie je vhodnejšia, pretože vyžaduje vŕtanie cez veľkú masu materiálu, ako je možné vidieť na *Obrázku 27*.



Obrázok 27 Zobrazenie masy materiálu segmentu č.1 a č.2

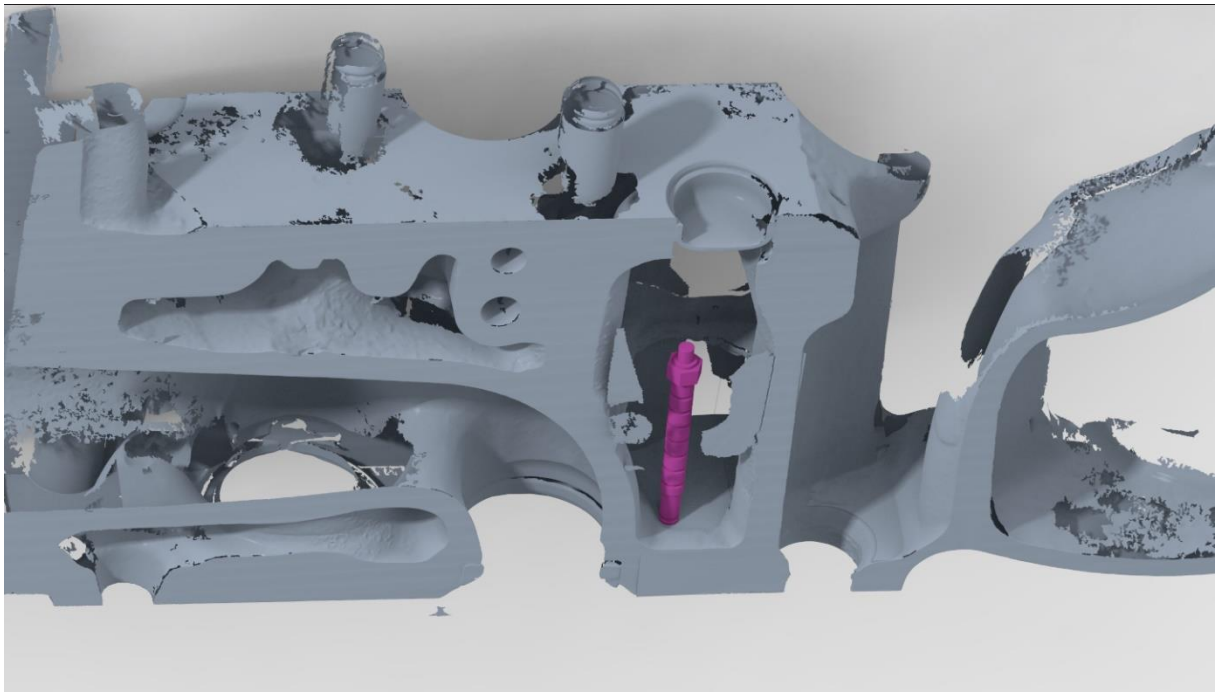
Segment č. 3 sa javí ako najlepší z pohľadu možných variantov montáže, pretože je možné sa dostať najbližšie k valcu motoru. Poskytuje tiež viacero variantov montáže, ktoré je možné uplatniť pre všetky valce. Segment č. 3 je ďalej zvolený k 3D skenovaniu pre detailnejšiu analýzu. Pred skenovaním bol objekt dôkladne vyčistený a na povrch bol upravený matným postrekom, aby sa nasnímaný obraz neskresľoval. Následne boli nalepené referenčné body. Samotné skenovanie bolo uskutočnené pomocou optického skeneru, viz. *Obrázok 28.* Výsledok skenovania bol ďalej spracovaný v CAD softvéri, kde bolo nutné navrhnúť miesto montáže tlakového snímača.

Obrázok 28 Skenovanie segmentu č. 3

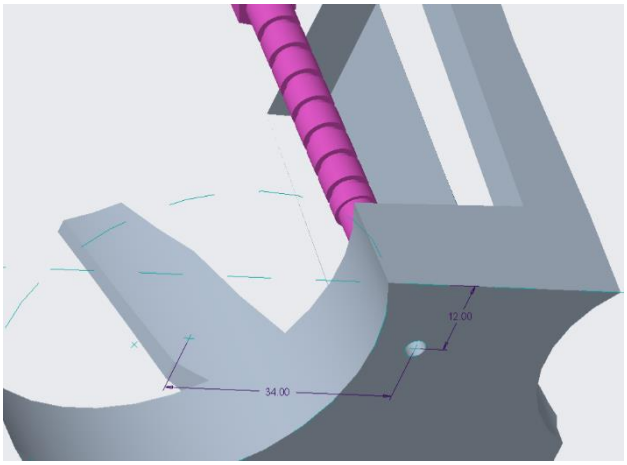
9.1 NÁVRH VARIANTOV MONTÁŽE

9.1.1 VARIANT Č. 1

Variant č. 1 (*Obrázok 29, Obrázok 30)* je výhodnejší z pohľadu montáže, pretože sa vyjme jedine zátka na kanáli chladenia z vrchnej strany hlavy a diera pre snímač sa vyvŕta cez ideálnu hrúbku materiálu. Pri vŕtaní totiž nie je nutná vysoká presnosť umiestnenia diery. Takáto zátka sa nachádza pri každom valci, a teda je možná montáž pre každý valec. Snímač, ktorý sa nachádza v kanáli chladenia je zároveň chladený chladiacou kvapalinou. Avšak hlavu je teda nutné adekvátne utesniť. Snímač je tiež nutné pripojiť k zosilňovaciemu a vyhodnocovaciemu zariadeniu. Na toto pripojenie sa používa informačný kábel, ktorý nemôže byť v kontakte s chladiacou kvapalinou. Aby sa predišlo kontaktu s chladiacou kvapalinou, je potreba použiť krytie kábla, ktoré by malo byť namontované od vrchnej časti snímača až po okraj hlavy.



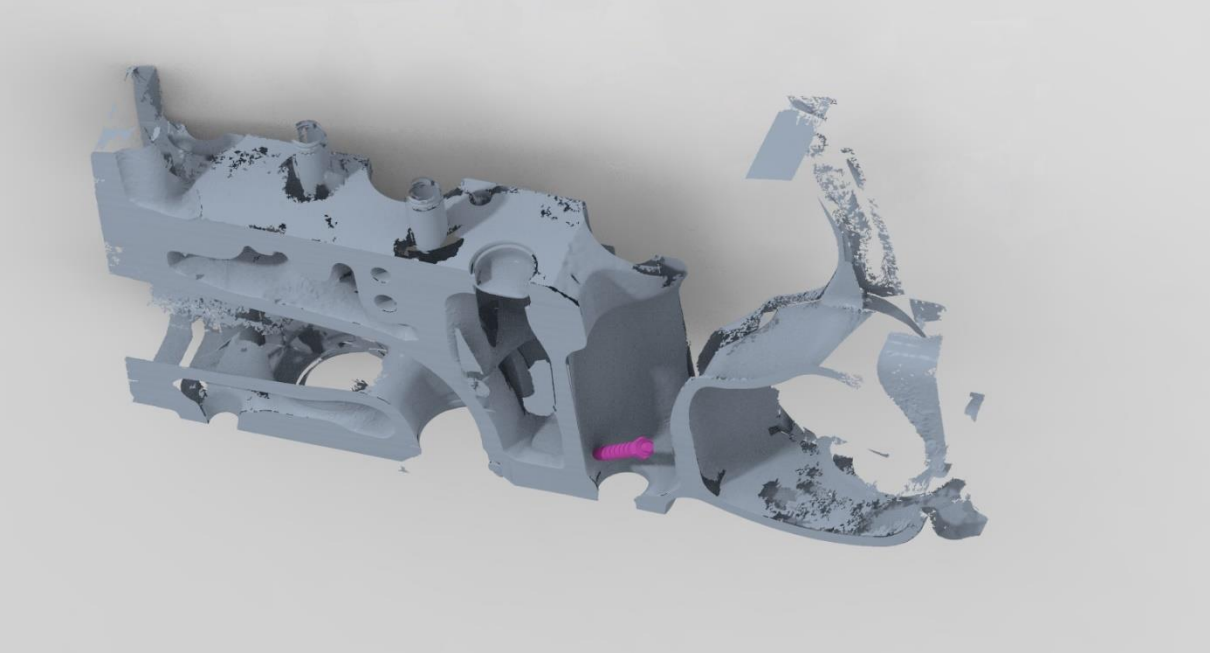
Obrázok 29 Variant umiestnenia č. 1



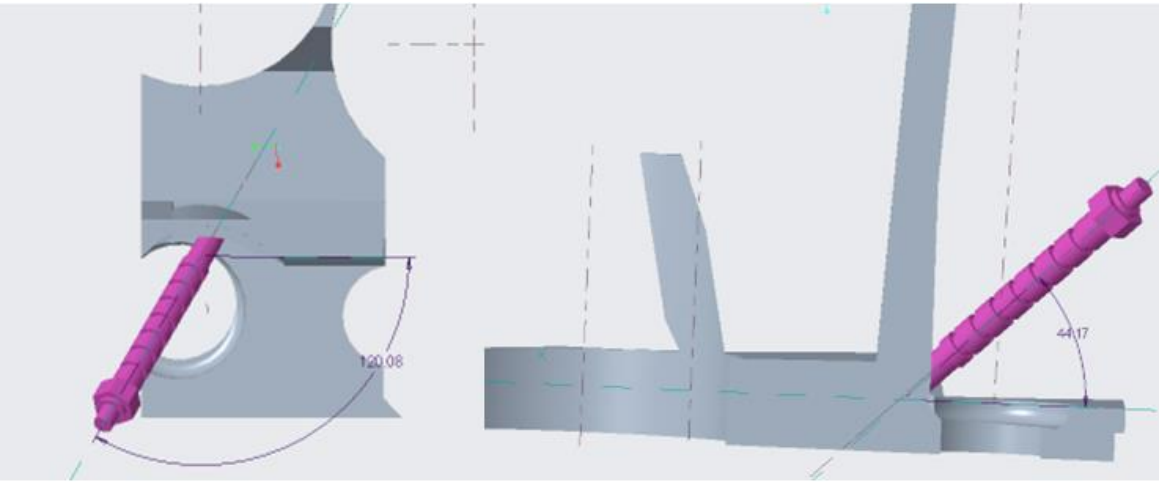
Obrázok 30 Variant umiestnenia č. 1

9.1.2 VARIANT Č. 2

Variant č. 2 (*Obrázok 31, Obrázok 32)* je založený na umiestnení snímača v škáre hlavy. Pri tomto umiestnení sa treba priblížiť vnútornému priestoru valca, preto je nutné snímač umiestniť pod uhlom. Toto ovplyvňuje náročnosť vŕtania diery a následnej montáže. Výhodou je, že snímač nebude nutné inštalovať do chladiaceho okruhu. Taktiež smerovanie pod uhlom zaručí lepšie snímanie šíriaceho sa plameňa spaľovania- bude nasmerovaný viac do stredu guľovej plochy.



Obrázok 31 Variant umiestnenia č. 2



Obrázok 32 Variant umiestnenia č. 2

Z navrhnutých variantov je odporučený variant č. 1, kvôli náročnosti montáže. Pri variante č.2 by pravdepodobne museli byť použité špeciálne nástroje. Variant č. 1 svojimi výhodami výrazne prevažuje nevýhody.

ZÁVER

Nadobudnuté znalosti v rešerši problematiky merania spaľovacieho tlaku boli použité pre výpočet, voľbu a návrh montáže tlakového snímača. Na meranie priebehu spaľovacieho tlaku sa využíva niekoľko druhov snímačov. V tejto bakalárskej práci sa pracovalo s piezoelektrickými snímačmi, ktoré na rozdiel od optických, či piezorezistívnych snímačov vyhovujú zámeru merania zmien v priebehu spaľovacieho tlaku s potrebnou presnosťou. Pomocou výpočtov pre zadaný vznetový motor bol dopočítaný stredný indikovaný tlak. Podľa parametrov motora a vypočítaného indikovaného tlaku bol odhadnutý maximálny spaľovací tlak. Ďalej bol na základe maximálneho spaľovacieho tlaku a možností inštalácie zvolený nechladený piezoelektrický snímač Kistler type 6053CC. Hlava motoru bola rozrezaná na niekoľko segmentov, z ktorých bol vybraný segment s potenciálne najlepšími variantmi umiestnenia senzoru. Tento segment bol naskenovaný optickým 3D skenerom a bol vytvorený jeho CAD model. V CAD programe boli navrhnuté dva varianty umiestnenia senzoru. Táto by práca mala byť nápomocná pri reálnom výbere umiestnenia senzoru pri nastavovaní parametrov zadaného motoru.

POUŽITÉ INFORMAČNÉ ZDROJE

[1] ROGERS, Dave. 2005. Engine combustion analysis- current and future development. In *Engineering technology*. 2005, č. 6, s. 39-42.

[2] BLAŽEK, Josef. 2012. *Měření a analýza spalovacích tlaků*: Materiál projektu „In-TECH 2“. Liberec: TUL.

[3] NABEL, J.D. , JOHNSON, J.E. 2014. *Internal combustion engine cycles and concepts*. In Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance. 2014, s. 197-224. [cit. 22.4.2022].
Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978085709522050008X

[4] KELEMENOVÁ, Tatiana. 2012. *Piezoelektrické akčné členy.* Materiál projektu „Centrum výskumu riadenia technických environmentálnych a humánnych rizík pre trvalý rozvoj produkcie a výrobkov v strojárstve“. 2012, [cit. 22.4.2022]. Dostupné z: https://www.engineering.sk/clanky2/stroje-a-technologie/1764-piezoelektricke-akne-leny

[5] VON BERG, ZIERMANN, REICHERT, OBERMEIER. Measurement of the Cylinder Pressure in Combustion Engines with a Piezoresistive P-Sic-on-SO1 Pressure Sensor. 1998. [cit. 22.4.2022]. Dostupné z: https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.lib.vutbr.cz/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=676796&tag=1

[6] Piezoresistive pressure sensor. [online]. [cit. 22.4.2022]. Dostupné z: https://www.kistler.com/en/glossary/term/piezoresistive-pressure-sensor/

[7] Čo je piezorezistívny snímač. 2020. [online]. [cit. 22.4.2022]. Dostupné z: http://m.sk.youchurt-sensor.com/info/what-is-a-piezoresistive-pressure-transmitter-49297088.html

[8] BEJČEK, Ludvík. 2007. *Snímače tlaku.* In Automa. 2007, č. 2, s. 24-30. [cit. 22.4.2022]. Dostupné z: https://automa.cz/cz/casopis-clanky/snimace-tlaku-2011_01_42719_4920/

[9] Optical pressure sensors. [online]. [cit. 22.4.2022]. Dostupné z: https://www.avnet.com/wps/portal/abacus/solutions/technologies/sensors/pressure-sensors/core-technologies/optical/

[10] FORMÁNEK, Jiří. 2017. *Konstrukční řešení měření indikovaného tlaku ve válci motocyklového motoru formule SAE:* Bakalárska práca. Praha: ČVUT. 2017. s. 13-16

[11] Measuring spark plug. [online]. [cit. 22.4.2022]. Dostupné z: https://www.kistler.com/files/document/003-281e.pdf

[12] Glow plug adapter. [online]. [cit. 22.4.2022]. Dostupné z: https://www.kistler.com/en/product/type-654xq/

[13] Compact M5 cylinder pressure sensor. [online]. [cit. 22.4.2022]. Dostupné z: https://www.kistler.com/en/product/type-6054c/

[14] Water cooled pressure sensor. [online]. [cit. 22.4.2022]. Dostupné z: https://www.kistler.com/en/product/type-6041b/

[15] TOTH, David. TRIPATHY, Bhawani. 2010. Cylinder head gasket with integrated combustion pressure sensors. [online]. Dostuné z: http://www.optrand.com/Papers/DEER2010.pdf

[16] PAYRI,F. BROATCH, A. TORMOS, B. MARANT,V. New methodology for in-cylinder pressure analysis in direct injection diesel engines—application to combustion noise. 2005. [cit. 22.4.2022]. Dostupné z: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0957-0233/16/2/029

[17] Torregrosa, A.J.; CMT-Motores Térmicos, Universidad Politécnica de Valencia, Spain © Copyright 2008. [cit. 22.4.2022]

[18] GUOARDIOLA,C. PLA,B. BARES,P. 2018. *An analysis of the in-cylinder pressure resonance excitation in internal combustion engines*. In Applied Energy. 2018, s. 1272-1279. [cit. 22.4.2022].
Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261918310274

[19] XUDONG, Zhen; YANG, Wang; SHUAIQING, Xu; YONGSHENG, Zhu; CHENGJUN, Tao; TAO, Xu; MINGZHI, Song. 2018. *The engine knock analysis.* In Applied Energy. 2018, s. 628-636. [cit. 22.4.2022]. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261918310274

[20] ČAJKA, Lukáš. 2010. *Analýza vnitřní termodynamiky spalovacího motoru:* Diplomová práca. Brno: VUT. 2010. s. 31

[21] HELLE, Robin H.; LEMU, Hirpa G. 2021. *A case study on use of 3D scanning for reverse engineering and quality control.* In Materials Today. 2021. s. 5255- 5262. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785321009251

[22] *Types of 3D scanning technologies: comparison, advantages and applications*. [online]. Dostupné z: https://bitfab.io/blog/types-of-3d-scanning/

[23] SOKOVIC, Mirko; *Use of 3D- scanning and reverse engineering by manufacturing of complex shapes.* 2005. [online]. Dostupné z: https://www.academia.edu/17235829/Use_of_3D-scanning_and_reverse_engineering_by_manufacturing_of_complex_shapes

[24] Abbas a.s. 2017. *3D Skenery pro kontrolu kvality a reverzní inženýrství*. In Automa. 2017, č. 8, s. 17-18. [cit. 22.4.2022]. Dostupné z: https://www.automa.cz/cz/casopis-clanky/3d-skenery-pro-kontrolu-kvality-a-reverzni-inzenyrstvi-2017_08_0_10995/

[25] JAYASHANKARA, B.; GANESAN, V.; 2009. *Effect of fuel injection timing and intake pressure on the performance of a DI diesel engine – A parametric study using CFD.*
In Energy Conversion and Management. 2009, s. 1835-1848. [cit. 8.5.2022].
Dostupné z: https://www-sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0196890409004269

ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV

p_{max}	[Pa]	Maximálny spaľovací tlak
α_{pmax}	[rad]	Poloha maximálneho spaľovacieho tlaku
$\frac{dp}{d\alpha}max$	[-]	Maximálny nárast tlaku
$\alpha_{\frac{dp}{d\alpha}max}$	[rad]	Poloha maximálneho nárastu tlaku
p_i	[Pa]	Stredný indikovaný tlak
V_z	[m^3]	Zdvihový objem valcu
W_i	[J]	Indikovaná práca
p	[Pa]	Premenlivý tlak
dV	[m^3]	Zmena tlaku
η_i	[-]	Indikovaná účinnosť
q_i	[J]	Teplo využité pre prácu tepelného indikovaného obehu
q_p	[J]	Chemická energia paliva
η_m	[-]	Mechanická účinnosť
P_e	[W]	Efektívny výkon na kľukovom hriadeli
P_i	[W]	Indikovaný výkon na pieste motoru
η_c	[-]	Celková účinnosť
p_e	[Pa]	Stredný efektívny tlak
S	[m^2]	Obsah plochy prierezu valca
c_s	[ms^{-1}]	Priemerná rýchlosť piestu
i	[-]	Počet valcov
K_p	[-]	Piezoelektrická konštanta
a	[m]	Rozmer kvádra
b	[m]	Rozmer kvádra
F_x	[N]	Sila pôsobiaca v osi x
Fy	[N]	Sila pôsobiaca v osi y
Q	[C]	Elektrický náboj
n	[s^{-1}]	Otáčky kľukového hriadeľa
L	[m]	Dráha zdvihu
V	[m^3]	Zdvihový objem motora