



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

**STANOVIŠTĚ PRO MĚŘENÍ VENTILOVÝCH
ROZVODŮ**

STATION FOR MEASURING VALVE TRAIN MECHANISM

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Matej Martinček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. David Svída, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	Bc. Matej Martinček
Studijní program:	Automobilní a dopravní inženýrství
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	Ing. David Svída, Ph.D.
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 diplomové práce:

Stanoviště pro měření ventilových rozvodů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce je zaměřená na návrh a realizaci měřicího zařízení pro měření ventilových rozvodů.

Cíle diplomové práce:

Rozbor ventilových rozvodů používaných u současných vozidlových spalovacích motorů a rozbor metod pro měření jeho charakteristik. Pro vybraný ventilový rozvod navrhnout vhodné měřicí zařízení.

Seznam doporučené literatury:

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

HEISLER, H. Advanced Engine Technology. 1st edition. Oxford (Great Britain): Arnold, 1995, reprint 2002. 794 s. ISBN 1-56091-734-2.

MERKER, G. P., SCHWARZ, CH., TEICHMAN, R. Combustion Engines Development – Mixture Formation, Combustion, Emissions and Simulation. Heidelberg: Springer, 2012. 642 s. ISBN 978-3-642-02951-6.

SHI, Y., GE, H.-W., REITZ, R. D. Computational Optimization of Internal Combustion Engines. London: Springer, 2011. 309 s. ISBN 978-0-85729-618-4.

MTZ Motorentechnische Zeitschrift. Wiesbaden: Springer Wieweg | Springer Fachmedien Weisbaden GmbH, 1939- . ISSN 0024-8525.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Diplomová práca sa zaoberá rozvodovými mechanizmami spaľovacích motorov. Pre správnu funkciu mechanizmov a pre budúci vývoj je potrebné zistiť ich charakteristiky. Jednou z charakteristík je aj zdvih ventilov v závislosti na pootočení vačkového hriadeľa. Preto bolo navrhnuté a zostrojené univerzálne stanovisko, na ktorom je možné priebeh týchto charakteristík odmerať.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Ventilový mechanizmus, vačkový hriadeľ, stanovisko, zdvih, ventil, uhlové natočenie

ABSTRACT

Diploma thesis deals with valvetrains of internal combustion engines. For the right function and for the future development of valvetrains is important to know their characteristics. One of the characteristic is dependence of valve lift on angular position of camshaft. For this purpose was developed and build universal station where is possible to measure this characteristic.

KEYWORDS

Valvetrain, camshaft, stand, lift, valve, angular position

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

MARTINČEK, Matej. *Stanoviště pro měření ventilových rozvodů*. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/138995>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 67s. Vedoucí práce David Svída.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že táto práca je mojim pôvodným dielom, spracoval som ju samostatne pod vedením Ing. Davida Svídu, Ph.D a s použitím literatúry uvedenej v zozname.

V Brne dňa 20. mája 2022

.....

Bc. Matej Martinček

POĎAKOVANIE

Týmto by som sa rád poďakoval Ing. Davidovi Svídovi, Ph.D za pripomienky, usmernenie a cenné rady pri vedení práce. Taktiež moja vďaka patrí Ing. Lukašovi Růskovi zo spoločnosti Garrett Motion Czech Republic s.r.o za spoluprácu a celkovú realizáciu. V neposlednom rade sa chcem poďakovať mojim rodičom za podporu nielen pri písaní práce ale počas celého štúdia.

OBSAH

Úvod	11
1 Rozvodový mechanizmus	12
1.1 Ventilový rozvod	12
1.1.1 Typy ventilových rozvodov	13
1.2 Časovanie rozvodu	15
1.3 Variabilný ventilový rozvod	16
1.3.1 Variabilný zdvih ventilov	16
1.3.2 Variabilné časovanie ventilov	18
2 Časti vačkového mechanizmu	20
2.1 Ventily	20
2.2 Sedlo ventilu	21
2.3 Ventilová pružina	22
2.4 Ventilové vahadlo	23
2.5 Nástroje na vymedzenie vôle ventilových rozvodov	24
2.6 Vačkový hriadeľ	25
2.6.1 Profil vačkového hriadeľa	25
2.6.2 Druhy Vačiek	27
3 Metódy pre meranie charakteristiky rozvodu	30
3.1 meranie mechanickými meradlami	30
3.2 Meranie optickými prístrojmi	30
3.3 Meranie elektronickými prístrojmi	31
4 Matematický model ventilového rozvodu v prostredí GT-Suite	32
4.1 Model ventilového rozvodu vo VTDesign	32
4.2 Model vačky	33
4.3 Analýza kinematiky hlavy valcov	33
5 Metodika vytvorenia stanoviska	35
5.1 Stanovenie typu merania a aplikovateľnosť na poskytnutú hlavu valcov	35
5.2 Výber snímačov	38
5.3 Lineárny potenciometer TRS-0050-05	38
5.4 Digitálny úchylkomer Mitutoyo	41
.....	42
5.5 Enkodér ISC3806	42
5.6 Konštrukcia rámu	44
5.6.1 Rám poskladaný z hliníkových profilov	44
5.6.2 Rám pripevnený priamo k hlave valcov	46
5.6.3 Modifikovaný rám pripevnený k hlave valcov	48
5.7 Softvér	49
6 Priebeh merania	53
6.1 Príprava hlavy valcov na meranie	53
6.1.1 Variabilné časovanie ventilov a spojenie vačkových hriadeľov	53
6.1.2 Prekonanie sily od ventilových pružín	54
6.1.3 Vymedzenie ventilovej vôle	54

6.2	Osadenie hlavy valcov na stanovisko.....	55
6.3	Osadenie snímačov na hlavu	56
6.4	Meranie.....	57
6.5	Meranie odozvy snímača polohy vačkového hriadeľa	58
7	Výsledky merania.....	59
7.1	Zdvih sacieho ventilu pri malom profile vačky.....	59
7.2	Zdvih sacieho ventilu pri veľkom profile vačky	60
7.3	Zdvih výfukového ventilu	61
7.4	Hallovo snímač polohy vačkového hriadeľa	62
	Záver	63
	Zoznam použitých skratiek a symbolov.....	67

ÚVOD

Spaľovací motor je zariadenie, ktoré spaľuje palivovú zmes vo vnútri valca a premieňa jeho energiu na energiu mechanickú a teplo. Aby bola dosiahnutá čo najvyššia účinnosť je potrebné optimalizovať výmenu zmesi vo valci, čo má súvis s vyšším výkonom, nižšou spotrebou a v neposlednom rade s nižšími emisiami. Prívod čerstvého vzduchu je zabezpečený pomocou rozvodového mechanizmu v hlave valcov a pomocou palivovej sústavy.

V dnešnej dobe u väčšiny motorov reguluje prívod vzduchu do valca ventilový rozvod. Väčšina typov rozvodových mechanizmov obsahuje hriadele nachádzajúce sa v hlave valcov, na ktorých sú osadené vačky. Rotáciou vačkových hriadeľov sa prostredníctvom vahadiel respektíve zdvíhadiel otvárajú ventily pričom musí byť striktné dodržané časovanie. Okamžiky kedy sa otvoria a zatvoria ventily sú rozhodujúce pre výkonnostné a hospodárske parametre motora.

Analýza môže prebiehať z rôznych hľadísk, avšak dôležitá je analýza kinematiky a dynamiky rozvodu ako celku. Táto práca sa venuje kinematickej charakteristike ktorej predmetom je závislosť zdvihu ventilov na uhlovom natočení vačkového hriadeľa. Vďaka nej je možné jednoduchšie zostaviť matematický model rozvodového mechanizmu a taktiež je dôležitým faktorom pre ďalší vývoj spaľovacej jednotky.

Kinematické a dynamické charakteristiky rozvodu značne ovplyvňuje profil vačiek na hriadeľi. Existuje mnoho spôsobov merania týchto charakteristík, ako napríklad pomocou mechanických meradiel, optických vačkometrov a taktiež s elektronickými prístrojmi, ktoré sa dajú priamo pripevniť na motor. Tieto zariadenia avšak nemerajú zdvih ventilu ale iba profil vačky na vačkovom hriadeľi, ktorý sa priradí k uhlu natočenia tohto hriadeľa.

Cieľom tejto diplomovej práce je navrhnúť stanovisko, na ktorom sa bude dať odmerať zdvih ventilu osadeného v hlave moderného motora. Stanovisko musí byť čo najuniverzálnejšie, aby bolo použiteľné aj pre ďalšie ventilové rozvody. Taktiež musia byť použité snímače s vysokou presnosťou a spoľahlivým prenosom dát do PC bez rušenia signálu. Snímače a samotnú hlavu poskytne spoločnosť Garrett Motion Czech Republic, s.r.o. a jedná sa o hlavu z preplňovaného zážihového 2-litrového motora .

1 ROZVODOVÝ MECHANIZMUS

Rozvodový mechanizmus riadi výmenu obsahu valca spaľovacieho motora. Má zásadný vplyv na správnu funkčnosť motora. Princíp spočíva v odvedení spalín zo spaľovacieho priestoru a následným nahradením čerstvou zmesou. Celý tento dej musí prebiehať vo veľmi presných časových intervaloch, aby výmena zmesi vo valci prebehla optimálne, čo má veľký vplyv na výkonnostné parametre a v neposlednom rade na emisie daného motora. Medzi hlavné požiadavky kladené na rozvodový mechanizmus je životnosť, spoľahlivosť a hlučnosť. Z dôvodu veľkého rozsahu otáčok vozidlových motorov je rozvodový mechanizmus dynamicky namáhaný. Okrem tohto mechanického namáhania je namáhaný tlakom plynu vo valci a taktiež vysokými teplotami v určitých fázach. Z tohto dôvodu sú čo sa týka rozvodového mechanizmu predpísané požiadavky na údržbu a servisné kontroly. Rozvodové mechanizmy sa delia na kanálové, šupátkové a ventilové.

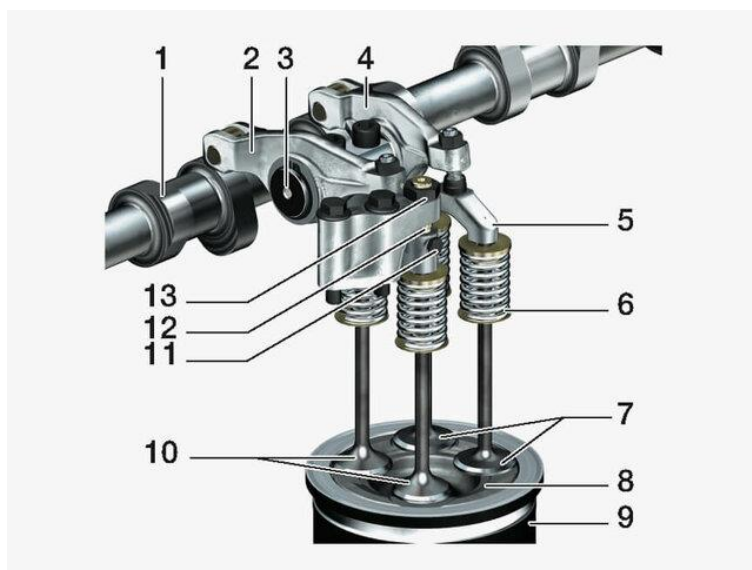
Princíp šupátkového rozvodu spočíva vo využívaní šupátka pre usmernenie a riadenie toku plynov cez motor. Hlavnou výhodou je veľmi tichý chod. Nevýhodou je ich nízka spoľahlivosť a malá životnosť, ktorá je často spôsobená zadrením šupátka v dôsledku prehriatia.

Kanálový rozvod sa používa výhradne v dvojtaktných spaľovacích motoroch. Prívod palivovej zmesi a odvod spalín je zabezpečený kanálmi v stenách bloku motora. Regulácia toku pracovných plynov je zabezpečená piestom, ktorý pri pohybe striedavo odokrýva a zakrýva kanály.

Najrozšírenejší typ rozvodového mechanizmu je ventilový rozvod. Riadenie toku pracovných plynov je zabezpečené ventilmi, ktoré dokonale oddeľujú spaľovací priestor od hlavy valcov. Tento typ rozvodu sa môže vyskytovať v rôznych modifikáciách ako napríklad s pevným zdvihom a časovaním ventilov, ale taktiež aj s variabilným zdvihom a časovaním ventilov a ich kombináciách. Otváranie a zatváranie ventilov je zväčša ovládané mechanicky, hydraulicky ale aj elektricky. Z dôvodu spoľahlivosti a konštrukčnej náročnosti sa najviac používa mechanicky poháňaný ventilový rozvod. Pohyb ventilov 4 taktného motora je zabezpečený hriadeľom, na ktorom sa nachádzajú vačky. Tento hriadeľ je poháňaný kľukovým hriadeľom a to v pomere 1:2. Spojenie vačkového a kľukového hriadeľa je zabezpečené buď reťazou alebo remeňom.

1.1 VENTILOVÝ ROZVOD

Základné komponenty ventilového rozvodu sú vačkový hriadeľ, ktorý svojou rotáciou otvorí ventil prostredníctvom vahadla (v niektorých motoroch zdvihátka). Ventil sa následne vráti do svojej pôvodnej polohy pôsobením ventilovej pružiny. Tento rozvod musí umožniť vymedziť ventilovú vôľu. V nových motoroch túto funkciu vykonáva hydraulická podpera. Na obr.1 možno vidieť hlavné komponenty ventilového rozvodu. Tento konkrétny typ je OHC.



1. Váčkový hriadeľ
2. Vahadlo pre výfuk
3. Vahadlová os
4. Vahadlo pre sanie
5. Mostík
6. Ventilová pružina
7. Nasávacie ventily
8. Piest
9. Vložka valca
10. Výfukové ventily
11. – 13. Prvky motorovej brzdy MAN

Obr. 1 Základné komponenty ventilového rozvodu typu OHC [11]

1.1.1 TYPY VENTILOVÝCH ROZVODOV

SV

Hlavným znakom pre tento typ rozvodu sú ventily, ktoré sú po stranách. V praxi to znamená, že ventily sú umiestnené na jednej strane valca a sú poháňané váčkovým hriadeľom ktorý je uložený v kľukovej skrini. Váčkový hriadeľ je poháňaný reťazovým prevodom alebo ozubenými kolesami a na ventil pôsobí pomocou zdvihátka. Hlavnou výhodou je jednoduchosť, nízka cena, vysoká tuhosť a pomerne tichý chod. Nevýhodou je nízky kompresný pomer a neintuitívne prúdenie zmesi.

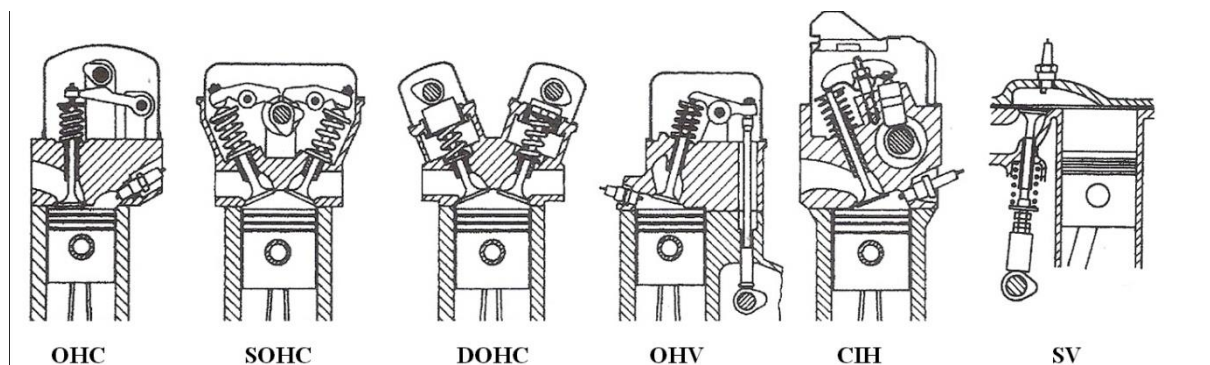
OHV

Pri tomto type rozvodu je váčkový hriadeľ umiestnený v kľukovej skrini. Ventily sú ovládané ventilovými zdvíhačkami a rozvodovými tyčkami, ktoré sú vedené bokom valcov do hlavy, kde sú prostredníctvom vahadiel ovládané ventily. Výhodou je ľahké nastavovanie ventilovej vôle a jednoduchosť konštrukcie. Pri tomto type konštrukcie je však zložitejší blok valcov (ako pri OHC), vyššia hmotnosť a teda aj väčšia zotrvačnosť pohyblivých častí.

OHC

Tento typ rozvodu je v súčasnosti najpoužívanejším. Váčkový hriadeľ sa nachádza v hlave valcov nad ventilmi, ktoré sú ovládané priamo cez hrnčekové zdvihátka. Môže byť taktiež umiestnený medzi ventilmi, ktoré môžu byť ovládané pomocou vahadiel. S kľukovým hriadeľom je spojený pomocou ozubeného remeňa alebo reťaze. Tento typ rozvodu sa ešte delí na SOHC, kde jeden váčkový hriadeľ ovláda aj sacie aj výfukové ventily alebo DOHC kde sú dva váčkové hriadele a jeden ovláda sacie ventily a druhý následne ovláda výfukové ventily. Výhodou tohto typu je nízka zotrvačnosť pohyblivých častí vďaka čomu je vhodný aj do vysokootáčkových motorov. Ďalšími výhodami sú nižší počet stykových plôch a vyššia tuhosť

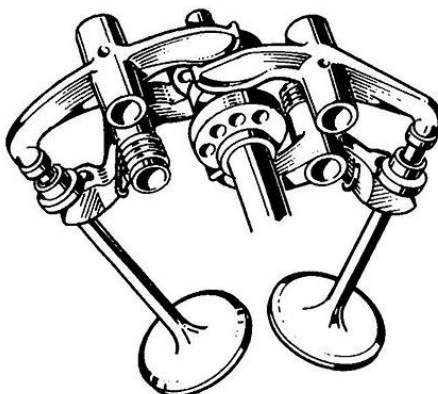
systemu čo umožňuje zvýšiť zdvih a zrýchlenie ventilov. Nevýhodou je zložitejší pohon vačkového hriadeľa, vyššia výška hlavy valcov a v neposlednom rade ťažšie nastavovanie ventilovej vôle. To však môže byť vyriešené pomocou hydraulickej opery. [4]



Obr. 2 Základné druhy ventilových rozvodov [4]

Desmodromický rozvod

Tento typ rozvodu sa využíva pre vysokootáčkové motory. Ventily sú ovládané pomocou vahadiel, ktoré sú ovládané zatváracími a otváracími vačkovými hriadeľmi. To znamená, že v tomto type rozvodu sa nenachádza ventilová pružina, vďaka čomu je možné extrémne časovanie bez rizika stretu ventilu s piestom. Desmodromický rozvod sa používa pri motocykloch ale taktiež aj v monopostoch F1. [12]



Obr. 3 Desmodromický rozvod [12]

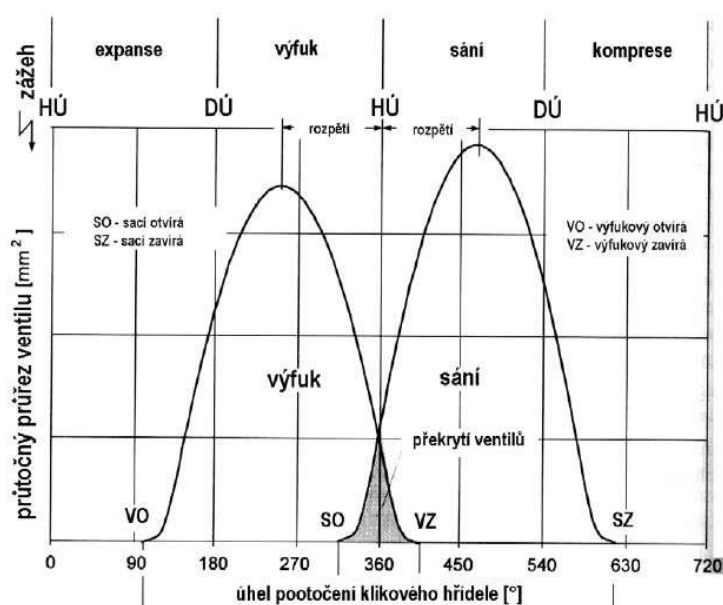
1.2 ČASOVANIE ROZVODU

Časovanie ventilov predpisuje, kedy sa sacie a výfukové ventily otvoria, prípadne zatvoria vo vzťahu k polohe piestu vo valci. Počiatok otvorenia a zatvorenia ventilu je určený uhlom pootočenia kľukového hriadeľa. Časovanie má rozhodujúci vplyv na ekonomické a výkonové parametre motoru, ale taktiež aj na mieru vzniku škodlivých emisií ako sú napríklad uhlíkovodíky, oxid uhoľnatý a taktiež v neposlednom rade vznik pevných častíc.

Obecne platí, že pri štvortaktnom motore tvorí sací zdvih teoreticky 180° pootočenia kľukového hriadeľa. Experimentálne sa však ukázalo, že pre dosiahnutie čo najvyššieho hmotnostného naplnenia valca je potreba začať otvárať sací ventil $10^\circ \div 20^\circ$ pred hornou úvratou a mal by byť uzatvorený $40^\circ \div 70^\circ$ po dolnej úvratí piestu. Hlavným dôvodom predčasného začiatku otvárania ventilu je, že keď sa vo valci objaví podtlak, aby už v tom momente bol voľný prierez v sedle ventilu dostatočný a umožnil maximálne možné prúdenie čerstvej náplne do valca. Dôvodom uzavretia sacieho ventilu až po dolnej úvratí, teda keď sa piest pohybuje k hornej úvratí a stlačuje náplň vo valci je snaha využiť zotrvačnosť pohybu náplne ktorá sa nachádza v sacom potrubí a zvýšiť tým hmotnostné naplnenie valca.

Výfukový ventil sa začína otvárať $40^\circ \div 60^\circ$ pred dolnou úvratou a je úplne zatvorený $15^\circ \div 20^\circ$ po hornej úvratí. Je to z dôvodu tlakového spádu, ktorý pri takto načasovanom otvorení a zatvorení výfukového ventilu dokáže z valca vytiecť rýchlosťou odpovedajúcou kritickému tlakovému spádu tj. v rozmedzí $500 \div 600 \text{ m.s}^{-1}$. Od okamžiku otvorenia výfukového ventilu až do vyrovnania tlaku na úroveň tlaku v zbernom výfukovom potrubí je z valca odstránené približne 70% spalín. Zvyšných 30% je odvedené z valca pri zdvihu. Ak by sa výfukový ventil začal otvárať až v dolnej úvratí bola by práca pre odvedenie spalín z valca oveľa väčšia ako práca získaná expanziou ešte pred dolnou úvratou.

Vo fáze na konci výfukového zdvihu je súčasne otvorený sací aj výfukový ventil. Táto oblasť sa nazýva prekrytie ventilov. Pri zážihových motoroch s variabilným časovaním sa prekrytie otvorenia ventilov využíva hlavne na recirkuláciu spalín pri malých zaťaženiach motoru zabezpečujúce zníženie emisií NO_x . [5]



Obr. 4 Diagram zdvihu ventilov s oblasťou prekrytia otvorenia ventilov [5]

1.3 VARIABILNÝ VENTILOVÝ ROZVOD

Variabilné ventillové rozvody sú pokročilou metódou ovplyvňovania výmeny nasatej zmesi a výfukových plynov. V motoroch s variabilným ventillovým rozvodom sa premenlivo mení časovanie a zdvih ventilov v závislosti na otáčkach a zaťažení motora. Tento typ rozvodu sa väčšinou používa pri zážihových motoroch z dôvodu väčšieho spektra otáčok v ktorom pracujú.

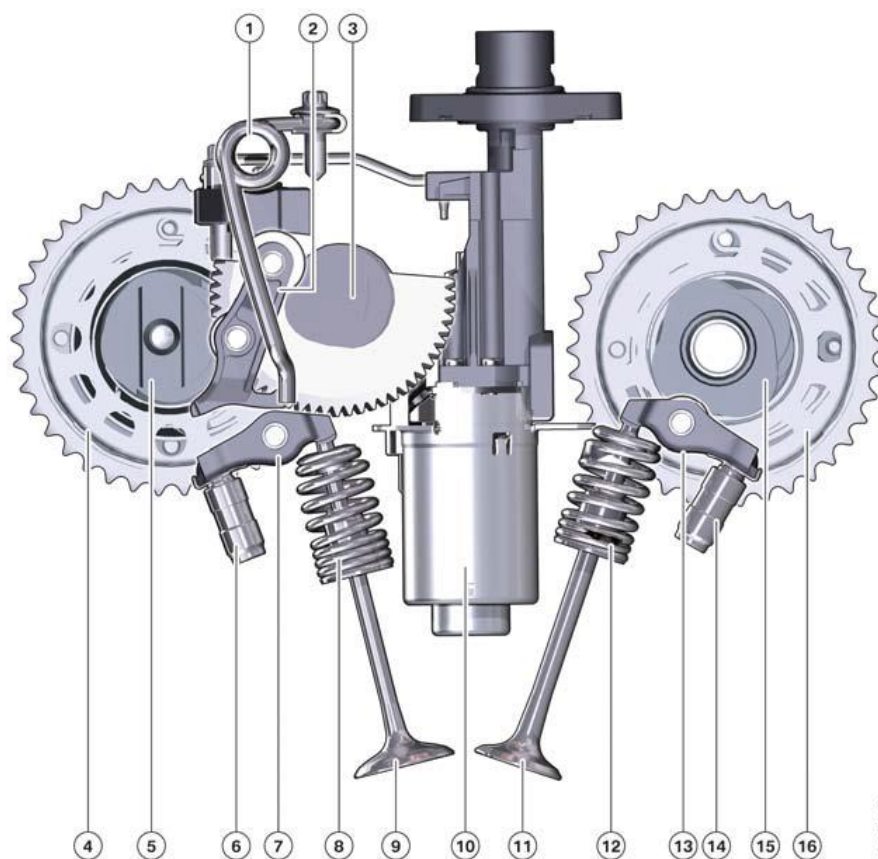
Variabilný ventillový rozvod má za úlohu eliminovať nedostatky pevného časovania. Pri pevnom časovaní ventilov motor pracuje optimálne iba v úzkom spektre otáčok a zaťažení a to zvyčajne v oblasti maximálneho točivého momentu a výkonu. Pri iných oblastiach nie je naplnenie valca a odvedenie výfukových plynov zabezpečené v správny okamžik, čo môže viesť k zníženiu točivého momentu a taktiež sa zvyšujú emisie vo výfukových plynoch.

Pri dnešných moderných motoroch sa teda variabilné ventillové rozvody dajú rozdeliť do dvoch kategórií a to s variabilným zdvihom ventilov a s variabilným časovaním. Tento typ konštrukčného prevedenia sania zaručí plynulejší priebeh točivého momentu a výkonu, nižšej spotreby a v neposlednom rade nižších emisií. Niektoré automobilky používajú obidva systémy súčasne. Vývoj v tejto časti automotive zašiel tak ďaleko, že existuje systém variabilného zdvihu ventilov, pri ktorom sa v konštrukcii sania úplne vynechá škrtiaca klapka, čím sa dokážu eliminovať straty prúdenia vzduchu. [6]

1.3.1 VARIABILNÝ ZDVIH VENTILOV

Variabilný zdvih ventilov (VVL) je technológia založená na zmene veľkosti zdvihu ventilov. Výsledkom je, že pri vysokých otáčkach a vysokom zaťažení dochádza k väčšiemu zdvihom ventilov čo má za dôsledok lepšie rozvietenie a premiešanie zmesi. Naopak pri nízkych otáčkach a malom zaťažení nie je vhodný vysoký zdvih z dôvodu nižšej rýchlosti prúdenia zmesi. Existujú 2 mechanizmy zmeny zdvihu ventilov a to plynulý alebo stupňovitý. Medzi zástupcami plynulej zmeny patrí BMW (Valvetronic), Toyota (Valvematic). Medzi zástupcov stupňovitej zmeny zdvihu ventilov sú Audi (Valvelift), Porsche (VarioCam Plus), Honda (VTEC).

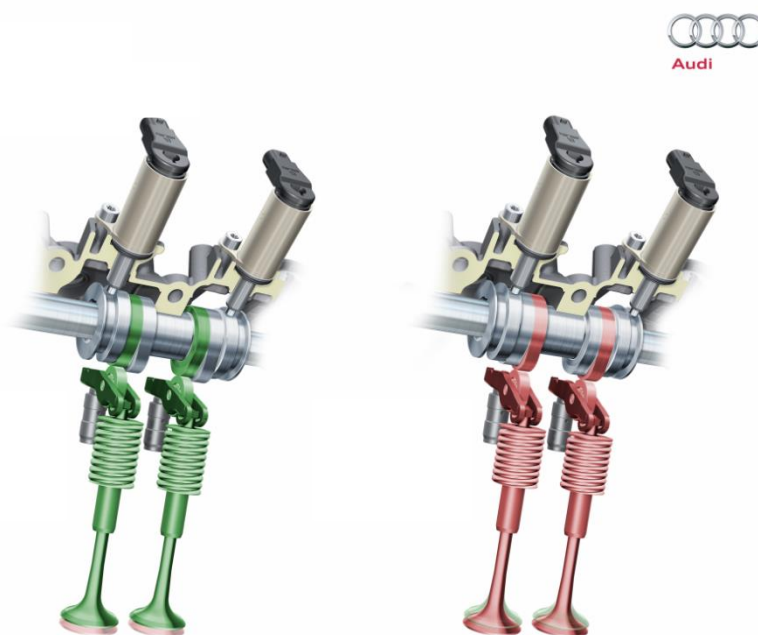
Pri motoroch so stupňovitou zmenou zdvihu ventilov je možné úplne vynechať škrtiacu klapku. Tá sa však v sání nachádza ale je určená len pre núdzový režim motora, v opačnom prípade je neustále otvorená. Systém Valvetronic (BMW) sa kombinuje aj so systémom variabilného časovania ventilov. Kombináciou týchto dvoch systémov sa dosiahne interval zdvihu sacích ventilov od 0,3mm až po 9,7mm čo okrem iného má za následok aj zníženie spotreby až o 10%. Rozvodový mechanizmus s Valvetronicom je doplnený o medzivahadlo, ktoré sa nachádza medzi vačkovým hriadeľom a vahadlom ventilu. Poloha medzivahadla závisí na natočení excentrického hriadeľa, ktorý je spojený s elektromotorom šnekovým prevodom. [6] [7]



Obr. 5 Rozvod motora BMW N20 s jednotkou variabilného zdvihu ventilov (Valvetronic) a variabilným časovaním (Double VANOS) [7]

1-vratná pružina, 2- medzivahadlo, 3- excentrický hriadeľ, 4- jednotka VANOS sanie, 5-vačkový hriadeľ pre sanie, 6- hydraulické zdvihátka, 7-vahadlo na saní, 8- pružina sacieho ventilu, 9- sací ventil, 10- krokový motor Valvetronicu, 11- výfukový ventil, 12- pružina výfukového ventilu, 13- vahadlo výfukového ventilu, 14-hydraulická opera, 15- výfukový vačkový hriadeľ, 16- jednotka VANOS na výfuku [7]

Pri stupňovitej zmene zdvihu ventilov sa používajú vačkové hriadele s rôznymi vačkovými puzdrami. V praxi to znamená že na každý ventil pripadajú 3 rôzne vačkové puzdra. Pri bežných podmienkach sa využívajú puzdra so zdvihom 5,7 a 2 mm a pri plnom výkone profil so zdvihom 11mm. Posunutie vačkového hriadeľa zaisťuje kolík, ktorý zájde do špirálovej drážky a posunie puzdro o 7 mm čo má za následok presunutie úzkeho otočného člena rozvodovej páky a prejde z jedného excentrického profilu na druhý, čím sa mení zdvih. Puzdro je vo svojich koncových polohách aretované guľčikou, ktorá je vytláčaná pružinou. [6]



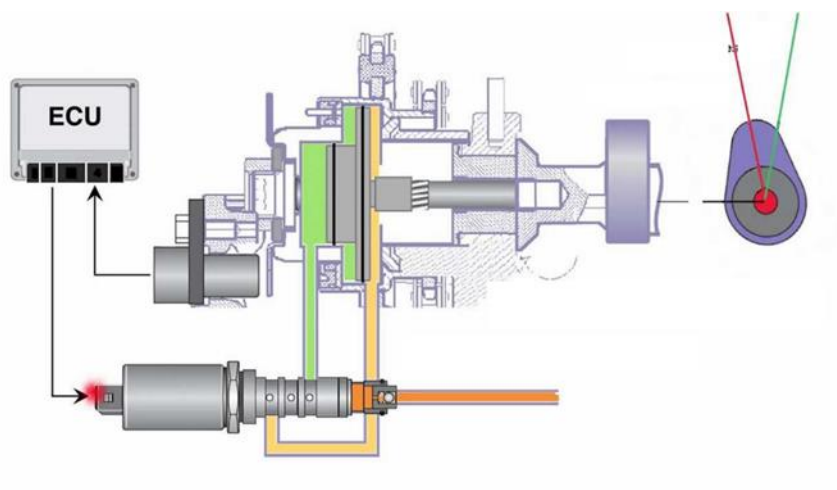
Obr. 6 Stupňovitá zmena zdvihu ventilu Audi Valvelift [10]

1.3.2 VARIABILNÉ ČASOVANIE VENTILOV

Hlavnou úlohou variabilného časovania ventilov je zaistiť optimálnu prácu motoru v čo najširšom rozsahu zaťaženia motora. Okamih otvorenia, zatvorenia a prekrytia ventilov výrazne ovplyvňuje parametre náplne valcov. Cieľom je zabezpečiť čo najvyšší točivý moment a výkon v závislosti na otáčkovej charakteristike pri čo najmenších emisiách a spotrebe pri čiastočných zaťaženiach a na voľnobehu. Tieto požiadavky sú realizované pomocou zmeny nastavenia alebo funkcie rozvodu. Optimalizácia točivého momentu a výkonu na vonkajšej otáčkovej charakteristike motora je riešená pomocou fázového natočenia vačkového hriadeľa. Ako pri variabilnom zdvihu ventilov, tak aj pri variabilnom časovaní ventilov môže byť zmena realizovaná buď stupňovito alebo plynulo. Medzi predstaviteľov zmeny časovania ventilov patri BMW (VANOS, Double VANOS), Hyundai (CVVT), Toyota (VVT-i).

Najčastejším spôsobom na zmenu časovania je využitie tlakového oleja. Riadiaca jednotka aktivuje solenoid, ktorý umožní prúdenie tlakového oleja k piestu. Olej zatlačí piest, ktorý sa zasunie na ozubené koliesko so šikmým ozubením na vačkovom hriadeľi, vďaka čomu sa vačkový hriadeľ natočí. Pri technológii Double VANOS sa takto dokáže natočiť vačkový hriadeľ ovládajúci aj výfukové ventily. Vačkové hriadele pri tejto technológii sa dokážu natočiť až o 60 ° avšak doba otvorenia ventilu je nemenná.

Pri nízkych otáčkach sa vačkový hriadeľ natočí tak, aby sa sacie ventily otvárali neskôr, čo má za dôsledok lepší nástup výkonu a lepší voľnobežný chod motora. Pri zvyšujúcich sa otáčkach sa ventily otvárajú skôr čo vylepšuje priebeh krútiaceho momentu. [6]



Obr. 7 Schéma systému variabilného časovania ventilov BMW VANOS [11]

2 ČASTI VAČKOVÉHO MECHANIZMU

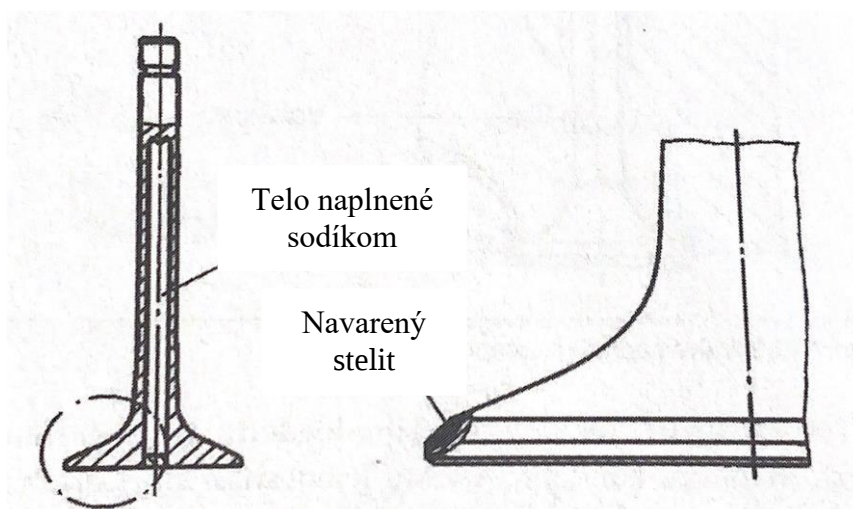
Vo väčšine štvortaktných zážihových motorov sa ventily otvárajú a zatvárajú pomocou sily, ktorú vačka vyvinie na zdvihátka respektíve na vahadla. Táto sila musí prekonať predpätie pružiny, aby sa ventil otvoril. Počas zatváracieho cyklu prepätie tejto pružiny zatvorí ventil a udržuje ho zatvorený. Vačkový hriadeľ je poháňaný a riadený kľukovým hriadeľom a pohybuje sa polovičnou rýchlosťou kľukového hriadeľa. U väčšiny motorov je pohon zabezpečený pomocou ozubeného remeňa respektíve reťaze. Časovanie každého jedného ventilu je dané geometriou a fázovým uhlom natočenia individuálnych vačiek na hriadeľi. Ďalšou funkciou vačky popri výmene zmesi vo valci môže byť dodatočné ovládanie ventilov pre takzvané motorové brzdy používané hlavne pre stredne a ťažké úžitkové vozidlá. Tá funguje na princípe zvýšenia odporu motora pomocou prídavných alebo existujúcich vačiek na hriadeľi pri klesaní vozidla. Jednou z možností brzdenia je otvorenie výfukového ventilu, ktorý sa otvorí práve v určitej fáze cyklu, keď sa píst z hornej úvrate začína vracat' do dolnej.

2.1 VENTILY

Ventily sú komponenty motora, ktoré sú podrobené vysokému mechanickému a termálnemu zaťaženiu ako aj korózii. Jednou z hlavných požiadaviek kladených na ventily je, aby čo najmenej škrtili prechádzajúci prúd zmesi.

Mechanické namáhanie vzniká ohybom hlavy ventilu v dôsledku tlaku plynu pri spaľovaní a taktiež pri zatváraní ventilu pôsobením sily od pružiny. Tieto namáhania môžu byť korigované tvarom a pevnosťou hlavy ventilu. Pre zníženie opotrebovania je kontaktná plocha ventilu vytvrdená technológiou navarenia vrstvy tvrdého kovu napr. stelitu.

Termálne namáhanie vzniká absorpciou tepla zo spaľovacieho priestoru prostredníctvom hlavy ventilu. Pri výfukových ventiloch namáhanie vzniká aj pri odvádzaní výfukových plynov z valca. Sacie ventily môžu dosiahnuť teplotu 300-500°C pričom výfukové ventily pri benzínových motoroch môžu dosiahnuť teploty 700 - 900°C. Z toho dôvodu sa na výfukový ventil používa iný (tepelne odolnejší materiál ako na sací ventil . Sedlo a driek ventilu sú väčšinou vyrobené z tepelne odolných materiálov ako Cr-Si alebo Cr-Mn a taktiež sú kalené a legované. Povrch ventilu je chrómovaný. Pre zlepšenie vedenia tepla cez plášť ventilu je vnútro ventilu duté a naplnené sodíkom. Sodík dokáže znížiť teplotu až o 100 °C z dôvodu že dokáže odvieť teplo až 9 krát účinnejšie ako oceľ a preto sa táto technológia uplatňuje najmä pre výfukové ventily. [9]

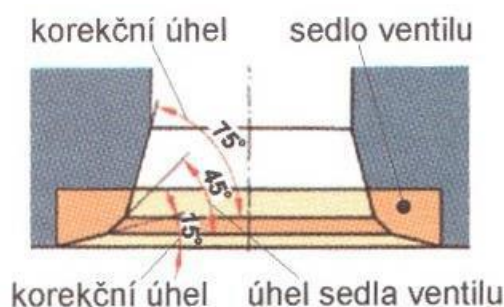


Obr. 8 Výfukový ventil chladený sodíkom a kontaktná plocha vytvrdená navarením stelitu [9]

2.2 SEDLO VENTILU

Konštrukcia sediel ventilov sa líši v závislosti od materiálu hlavy valcov. Pri mäkkších zliatinách sú sedlá nalisované z tvrdšieho materiálu a naopak pri tvrdších materiáloch sú sedla vytvorené priamo na hlave valcov.

Uhol sedla ventilu je zhodný s uhlom kontaktnej plochy ventilu. Vo väčšine prípadov sa nachádza v intervale 30° - 45° . Pre určenie šírky sedla je rozhodujúci faktor skosenie na okrajoch tohto sedla. Skosenie napomáha zníženiu odporov prúdenia a uhly používané pri tomto skosení sú 15° a 75° . Potom sa šírka sedla pohybuje v rozmedzí od 1,5 do 2mm. Širšie sedlo lepšie odvádza teplo ale horšie tesní, užšie zase naopak. Pri sacích ventiloch je tvarovanie sedla väčšinou zložitejšie. [8]



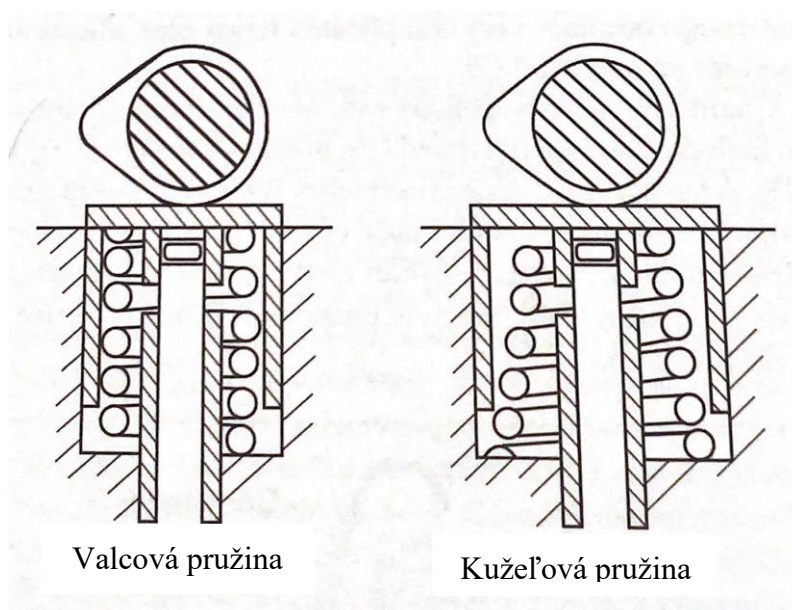
Obr. 9 Schéma sedla ventilu [8]

2.3 VENTILOVÁ PRUŽINA

Funkciou ventilových pružín je zatváranie ventilov. Po dosadnutí ventilu do sedla musí byť zaručené utesnenie spaľovacieho priestoru valca a taktiež musia zabezpečovať zatvorenie ventilu v súlade s tvarom vačkového hriadeľa. Požadovaná tuhosť ventilových pružín je daná požiadavkou na zabezpečenie trvalého kinematického spojenia medzi dielmi rozvodového mechanizmu pri rôznych pracovných oblastiach motora.

Používajú sa pružiny valcové, kužeľové a pneumatické. Najčastejšie sa v motore nachádzajú v konfigurácii dvoch sústredne uložených pružín. Použitie dvoch sústredných pružín pri rozvode OHC zvyšuje spoľahlivosť, v prípade že sa zlomí jedna pružina, tak druhá zabráni prepadnutiu ventilu do motoru. Aby však nedošlo k stretu závitu zlomenej pružiny s funkčnou pružinou, majú pružiny opačné smery stúpania, čo má taktiež priaznivý vplyv na potlačenie vzniku rezonančného kmitania.

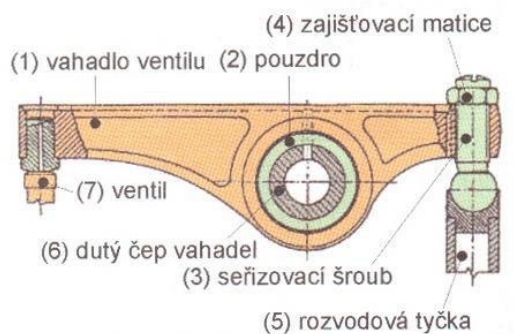
Valcové pružiny majú väčšinou lineárnu charakteristiku, kužeľové majú progresívnu charakteristiku a pneumatické pružiny majú silnú progresívnu charakteristiku. Progresívna charakteristická krivka môže dosiahnuť priaznivé výsledky pri vysokých otáčkach. Kvôli vysokým výdavkom a požiadavkám na stlačený vzduch sú pneumatické pružiny používané výhradne v športových motoroch. [9]



Obr. 10 Valcová a kužeľová pružina [9]

2.4 VENTILOVÉ VAHADLO

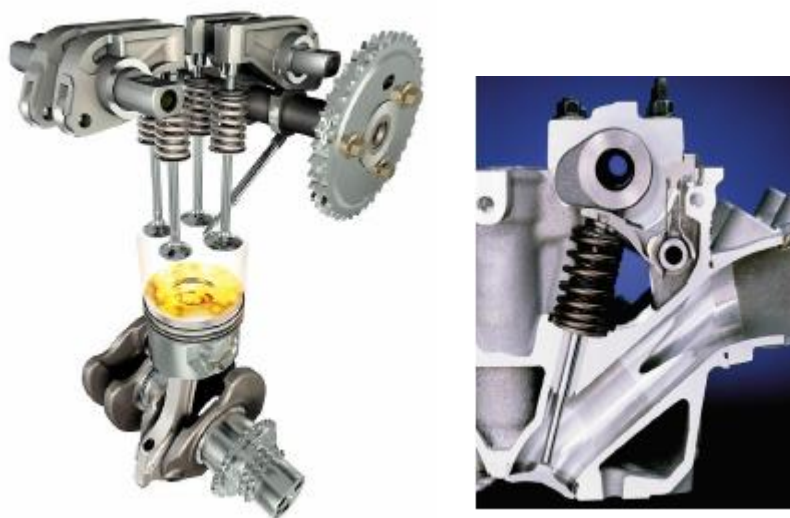
Ventilové vahadla sa používajú pri väčšine typov rozvodov. Hlavnou funkciou je otváranie ventilov. Funguje na princípe dvojramennej páky, ktorá pri rozvode OHV prenáša pohyb z rozvodovej tyčky na ventil a pri rozvode SOHC prenáša pohyb priamo z vačkového hriadeľa na ventil. Môže byť nahradené hrnčekovým zdvihátkom ale toto technologické riešenie je už zastaralé. Vahadlo môže byť otočne uložené na čape pomocou ložiska alebo bronzového klzného puzdra.



Obr. 11 Ventilové vahadlo rozvodu OHV [8]

Pri motoroch SOHC môže vačkový hriadeľ pôsobiť priamo na vahadlo, alebo na jednostranne podopretú páku.

Kontakt s vačkovým hriadeľom zabezpečuje buď kladnička alebo kalená klzná plocha vahadla. V prípade použitia klzného uloženia kladničky musí byť zabezpečené tlakové mazanie ložiska, v prípade valivého uloženia na ihlovom ložisku postačí aj mazanie rozstrekom. Použitie kladničky v styku vahadla a vačkového hriadeľa výrazne znižuje trecie straty. Vahadla sú najčastejšie vyrobené z kovanej oceli. [5]



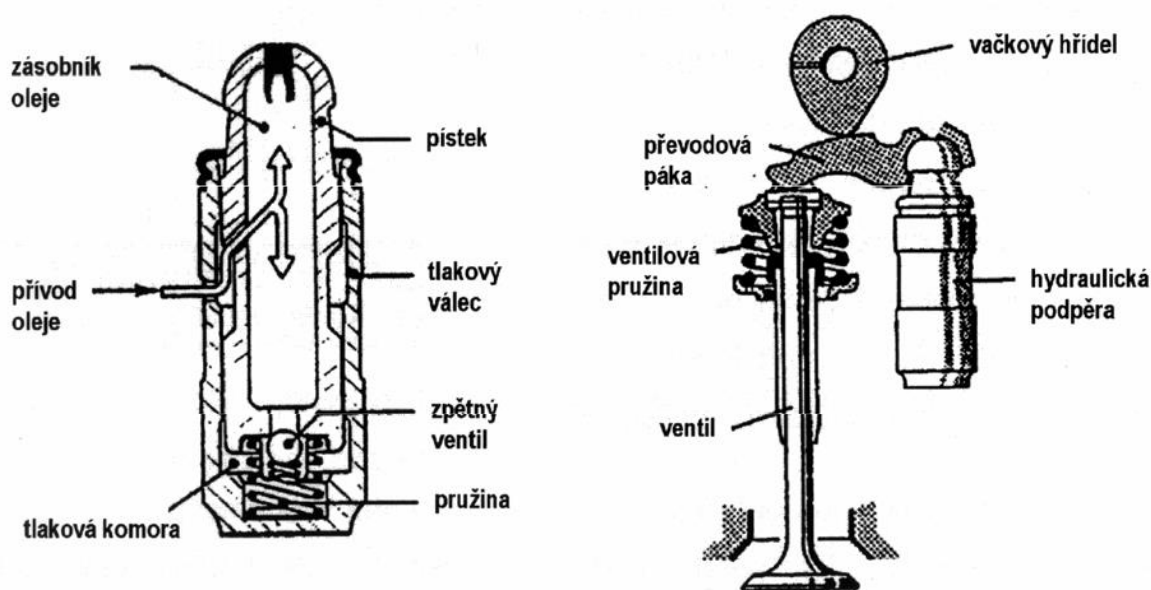
Obr. 12 Vahadlo rozvodu naľavo a páka rozvodu napravo [5]

2.5 NÁSTROJE NA VYMEDZENIE VÔLE VENTILOVÝCH ROZVODOV

Spaľovací motor pracuje v širokom spektre teplôt, z čoho vyplýva, že jeho časti sú náchylné k tepelným rozťažnostiam. Jedným z najviac tepelne namáhaných častí rozvodu sú aj ventily. Aby bolo zabezpečené spoľahlivé dosadnutie ventilu do sedla aj pri plne zohriatom motore, sú zadefinované ventilové vôle na studenom motore. Pri ohrievaní ventilu sa jeho driel postupne predlžuje, čo má za následok postupné zmenšovanie tejto vôle. Pokiaľ na studenom motore by bol táto vôľa príliš malá, tak pri plne zohriatom motore by došlo k vzniku netesnosti v sedle ventilu. V dôsledku netesnosti by horiace a horúce plyny behom expanzie prúdili okolo ventilu až by sa tanierik ventilu deformoval a nakoniec by sa odtavil. Pri veľkej ventilovej vôli je zvýšená hlučnosť motora. Veľkosť ventilovej vôle závisí najmä od typu rozvodu, použitom materiáli v hlave, ventile a bloku motoru. Pri osobných automobiloch sa stredná hodnota vôle pohybuje okolo 0,2mm a pri motoroch nákladných automobilov okolo 0,3mm.

Pri rozvodoch typu OHC, SOHC atď. je vymedzenie ventilovej vôle pomerne zložité a z toho dôvodu boli vyvinuté zdvihátka s hydraulickým vymedzením vôle. K vymedzeniu dochádza pomocou dopĺňania oleja z mazacieho okruhu motora do tlakového priestoru nad piestikom zdvihátka. V praxi to znamená, že keď vačkový hriadeľ otvára ventil dôjde k uzatvoreniu spätného ventilu na zdvihátku a sila je prenášaná cez olej uzatvorený vo vnútri piestiku. Pri každom tomto cykle je piestik zdvihátka z dôvodu úniku oleja zatlačený o približne 0,02mm. To umožňuje postupné prispôsobenie celkovej výšky zdvihátka medzi vačkovým hriadeľom a dosadaciou plochou drieku ventilu v závislosti na zmene dĺžky ventilu. Toto riešenie je zastaralé a už sa moc nepoužíva.

Druhá možnosť vymedzenia ventilovej vôle je hydraulická podpera. Princíp činnosti je v podstate zhodný s hrnčekovým zdvihátkom s vymedzením vôle, avšak opera sa môže použiť iba pri vahadlových rozvodoch. Výhodou hydraulickej podpory oproti zdvihátku je nižšia cena, nižšie trecie straty a menšie množstvo oleja dodávaného čerpadlom. Mazanie v uložení vahadlo-hydraulická podpera zabezpečuje vôľa na vrchole guľovej plochy . [5]



Obr. 13 Schéma hydraulického zdvihátka na vymedzenie ventilovej vôle [5]

2.6 VAČKOVÝ HRIADEL'

Úlohou vačkového hriadeľa pri svojom otáčavom pohybe je zaistiť určitý, tvarom vačky daný priamo vratný pohyb ventilu. Pri konvenčných motoroch je tento pohyb pevne prepojený s pohybom kľukového hriadeľa. Jednotlivé vačky, ktoré riadia otváranie výfukových a sacích ventilov, alebo ich dvojíc pri viac ventilových hlavách, sú uložené na spoločnom vačkovom hriadeľi.

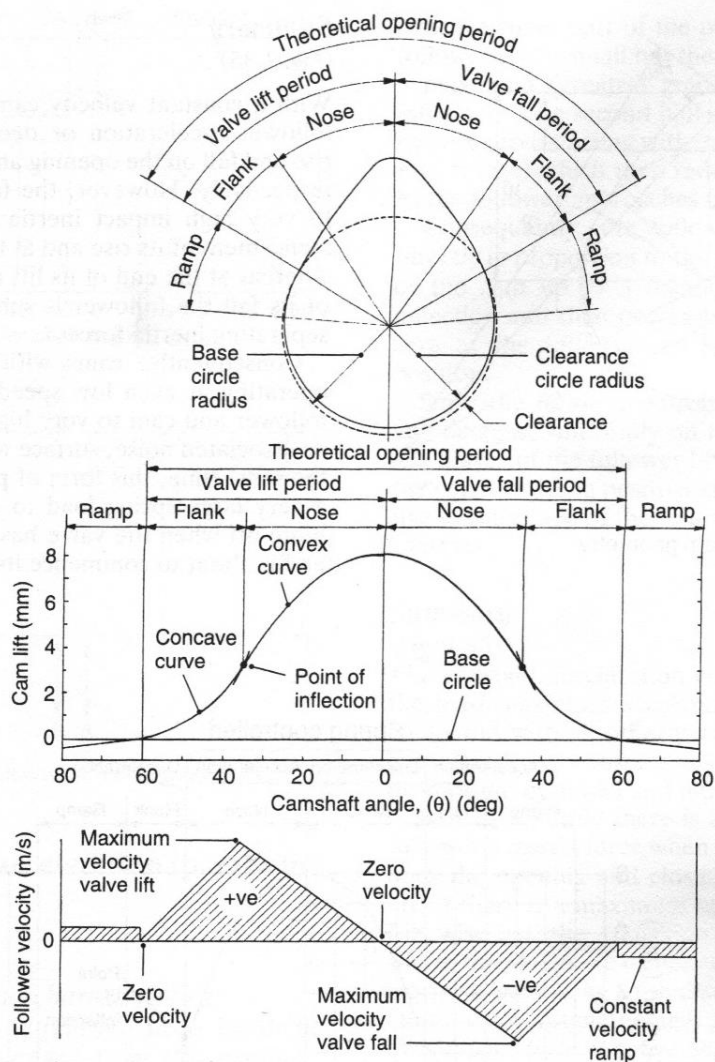
Vačkové hriadele sa vyrábajú dvomi najčastejšími spôsobmi. Prvý spôsob je skladaný vačkový hriadeľ. Pozostáva z jednotlivých častí ako dutá trubka, vačky, ložiska, atď. Tieto jednotlivé časti sa potom následne nalisujú na dutú trubku a vznikne výsledný vačkový hriadeľ. Pri tomto skladanom vačkovom hriadeľi je potrebné profil merať už pri výrobe, pretože pri osádzaní vačiek na hriadeľ môže vzniknúť odchýlka až 3° . Druhou možnosťou sú liate vačkové hriadele, ktoré sú následne opracované. Funkčné plochy vačkových hriadeľov ako napríklad vačky samotné, čapy ložisiek, sú tvrdené najčastejšie kalením a cementovaním a následne brúsené.



Obr. 14 Skladaný vačkový hriadeľ [13]

2.6.1 PROFIL VAČKOVÉHO HRIADEĽA

Profil vačky pozostáva z dvoch bokov a základnej kružnice. Jedná sa o nábežný a úbežný bok, alebo taktiež otvárací a zatvárací bok. Tieto boky sú oddelené vrcholom vačky a následne sa delia ešte na určité podoblasti. Časť vačky, ktorá nie je v kontakte s vahadlom respektíve so zdvihátkom a nemá vplyv na otvorenie ventilu sa nazýva základná kružnica vačky.



Obr. 15 Oblasti profilu vačky [3]

Podoblasti nábežného boku vačky sú nábežný mostík, bok a nos. Nábežný mostík je prvá časť vačky pri ktorej dochádza ku kontaktu vahadla a vačky vďaka čomu sa vymedzí vôľa medzi základnou kružnicou a vahadlom. Otáčky a uhol stúpania mostíka na vačke ovplyvňujú rýchlosť kontaktu vačky s vahadlom. Rýchlosť v tejto prvej podoblasti je konštantná. Druhá podoblasť vačky je bok, ktorý zrýchľuje vahadlo alebo zdvihátko na maximálnu rýchlosť. Na tejto časti vačky sa taktiež nachádza inflexný bod, v ktorom sa stretáva konvexná a konkávna krivka s nosom konvexnej krivky zdvihu. Tretia podoblasť nábežnej hrany vačky je nos. Ten spomaľuje zdvihátko alebo vahadlo do zastavenia pri maximálnom zdvihu. Sila spomalenia v tretej podoblasti nábežnej hrany vačky je definovaná ventilovou pružinou.

Úbežný bok vačky sa taktiež delí na tri podoblasti. Prvá podoblasť je nos, ktorý urýchľuje vahadlo z nulovej do maximálnej rýchlosti. Druhá časť sa nazýva bok, ktorý spomaľuje zatvorenie, spôsobené silou od ventilovej pružiny. Nasleduje posledná, hladká fáza uzatvorenia až do miesta, kde profil prejde na základnú kružnicu. Pri tomto prechode je už ventil plne uzatvorený a k jeho otvoreniu dôjde až pri ďalšej fáze otvárania. [3]

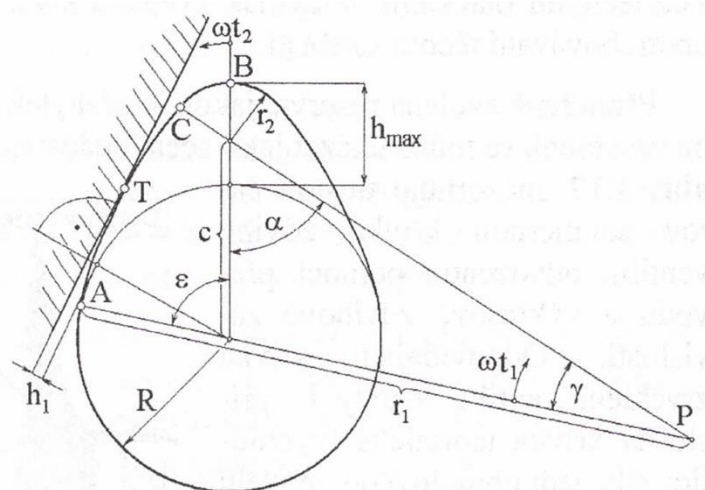
2.6.2 DRUHY VAČIEK

Vačky sa delia podľa mnohých kritérií, no jednou z hlavných je na základe spojitosti profilu. To znamená, že sa delia na vačky nespojité (harmonická, tangenciálna, vačka konštantnej rýchlosti a zrýchlenia) a spojité (vačka Polydyne). Nespojitosť môže zapríčiniť kmitanie rozvodu a taktiež kmitanie ventilovej pružiny, čím sa môže zvýšiť namáhanie celkového rozvodu a taktiež aj hlučnosť. Výhodou tohto typu vačiek je však jednoduchší návrh a vyššia plynosť. Cieľom pri návrhu vačky je mať aspoň prvé tri derivácie priebehu zdvihu vačky spojitú.

Harmonická vačka

Obrys symetrickej harmonickej vačky je tvorený kruhovými oblúkmi o polomeroch r_1, r_2 , základnou kružnicou o polomere R . Pri nesúmernej vačke sa veličiny na druhom boku menia okrem R a h_{max} , pokiaľ by činný uhol otvorenia boku vačky ε ostal bez zmeny.

Rovnice popisujúce zrýchlenie, rýchlosť a zdvih majú iba harmonické zložky. Tieto rovnice platia iba pri spojení s plochým zdvihátkom. Pre nesúmernú vačku je priebeh zrýchlenia nespojitý nielen na počiatku zdvihu a v mieste kde sa spájajú oblúky, ale aj v oblasti vrcholu nosu. To môže viesť ku vzniku rázov.[10]



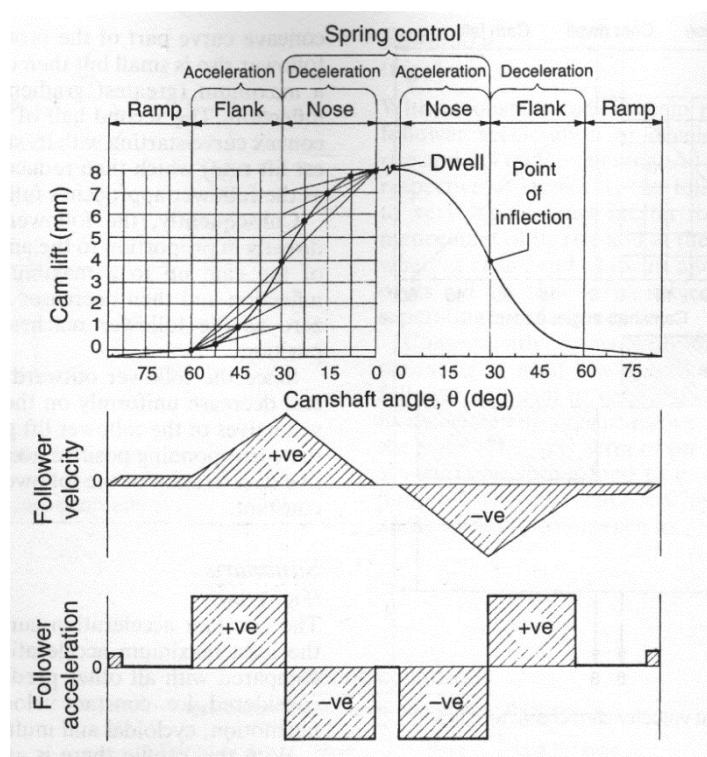
Obr. 16 Obrys symetrickej harmonickej vačky [10]

Tangenciálna vačka

Obrys jednej polovice je tvorený základnou kružnicou o polomere R , úsečkou AC a kruhovým oblúkom s polomerom krivosti r_2 . Z dôvodu, že tangenciálna vačka obsahuje na svojom obryse úsečku, nemôže sa nachádzať v spojení s plochým zdvihátkom. To by zapríčinilo, že by tomuto členу mechanismu udeľovala nespojitý priebeh rýchlosti ale aj zrýchlenia. Preto sa ploché zdvihátko muselo nahradiť kladičkovým zdvihátkom o polomere ρ . [10]

Vačka konštantného zrýchlenia

Tento typ vačky je nazývaný aj parabolický, z dôvodu, že je zložený z dvoch parabolických oblúkov pretínajúcich sa v inflexnom bode. V prvej konkávnej časti profilu t.j. na začiatku zdvihu je tempo rastu rýchlosti malé, ale v inflexnom bode rýchlo narastá z dôvodu najväčšieho gradientu. Druhá časť profilu, ktorá je tvorená konvexnou krivkou, začína ostrým stúpaním, to sa následne redukuje na jemné stúpanie, kým zdvihátka nedosiahne plný zdvih a nulovú rýchlosť. Následne začne fáza zatvárania v ktorej zdvihátka opäť zrýchľuje až kým nedosiahne inflexný bod, v ktorom začne rýchlosť klesať do nuly, keď dôjde k zatvoreniu ventilu. Nevýhodou tohto profilu je okamžitý nárast zotrvačných síl v mieste prechodu zo základnej kružnice a jeho bokov. Tieto sily taktiež v inflexných bodoch menia orientáciu, kvôli čomu musia byť použité veľmi silné pružiny na udržanie kontaktu zdvihátka s vačkou. Tento profil garantuje najmenšie maximálne zrýchlenie a spomalenie zo všetkých profilov.[3]



Obr. 19 Priebeh kinematických veličín pri vačke konštantného zrýchlenia [3]

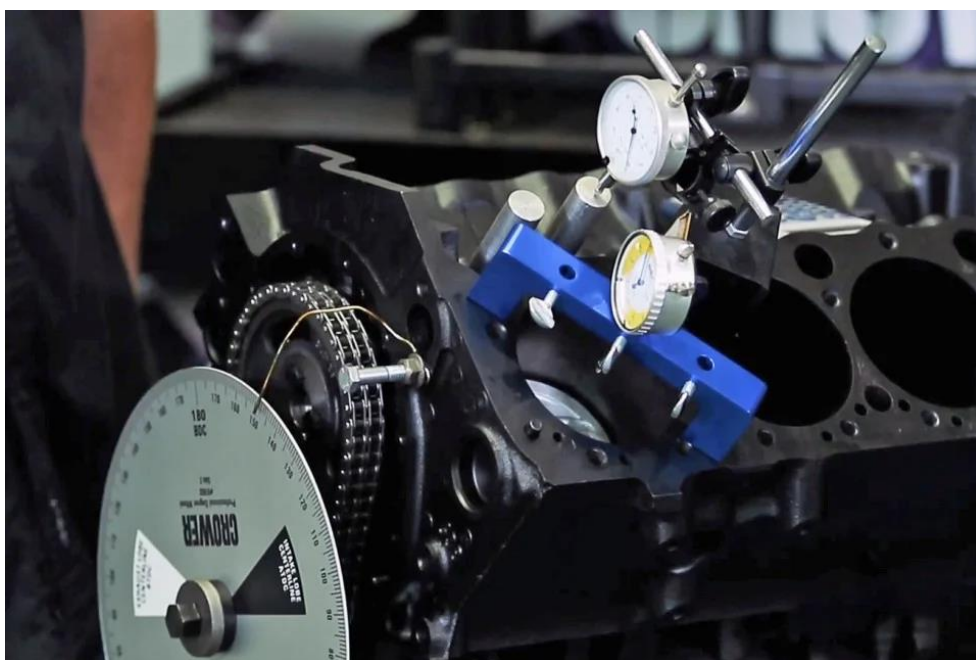
Vačky so spojitým priebehom zrýchlenia

Pri návrhu vačky je v neposlednom rade dôležité odstránenie nežiadúceho kmitania a rázov. Tie môžu nastať pri prvých dvoch až troch deriváciách. Návrh tohto typu vačky môže prebiehať dvomi prístupmi. Prvou možnosťou je navrhnutie, ktoré vychádza z analytického vyjadrenia zdvihovej krivky. Tá má definovanú spojitosť a požadovaný priebeh funkcie vďaka mnohočlenu s vyjadrenými okrajovými podmienkami. Tento prístup sa používa pri návrhu vačky Polydyne. Druhou možnosťou je návrh vychádzajúci z niektorej derivácie zdvihovej krivky, najčastejšie zrýchlenia. Tento prístup sa používa pri návrhu vačky s eliptickým alebo parabolickým priebehom zrýchlenia.[3]

3 METÓDY PRE MERANIE CHARAKTERISTIKY ROZVODU

3.1 MERANIE MECHANICKÝMI MERADLAMI

Najjednoduchší a zároveň kedysi najbežnejší spôsob merania charakteristiky ventilového rozvodu bolo pomocou mechanických prístrojov. Jednalo sa o uhlomer s ručičkou, ktorý sa pevne pripojí na vačkový hriadeľ a číselníkový úchylkomer. Meranie prebiehalo tak , že sa pootáčalo vačkovým hriadeľom a pri každom pootočení sa odčítala hodnota uhlu a taktiež zdvih vačky. Toto meranie sa používa v prípade, že nezáleží na dlhšom čase merania. Hlavnou nevýhodou je zdĺhavé a nepraktické spracovanie dát, keďže je nutné prepísať všetky hodnoty do PC aby vznikla daná zdvihová charakteristika. Naopak výhodou je veľmi nízka kúpna cena a meranie priamo na motore bez nutnosti demontáže vačky.



Obr. 20 Meranie rozvodu mechanickými meradlami [16]

3.2 MERANIE OPTICKÝMI PRÍSTROJMI

Optické meranie vačiek prebieha pomocou profiloprojektorov. Tieto prístroje umožňujú meranie závitov, vačiek a mnoho ďalšieho. Podstata spočíva v osvetlení skúmaného predmetu a cez optickú sústavu sa zobrazí jeho priemet na projekčnej ploche. Potom sa dá tento predmet vyhodnotiť porovnávacou metódou alebo dáta uložiť pomocou softvéru do súradníc a ďalej ich spracovať v PC. Táto metóda neumožňuje odmeranie celého profilu vačky, ale iba jedného palca. Pri tomto meraní musí byť vačkový hriadeľ demontovaný z hlavy valcov. Čiže z tohto merania je veľmi obtiažné zostrojiť zdvihovú krivku v závislosti na pootočení vačky.

3.3 MERANIE ELEKTRONICKÝMI PRÍSTROJMI

Tento princíp merania je zhodný s meraním s mechanickými prístrojmi avšak mechanické prístroje sú nahradené elektronickými. Medzi veľké výhody patrí najmä jednoduchá digitalizácia a spracovanie dát a následné vyhodnotenie. Keďže nie je potreba manuálne odčítat' dáta je táto metóda rýchlejšia. Nevýhodou je vyššia obstarávajúca cena.

Jedným z výrobcov týchto prístrojov je americká firma Performance Trends, Inc., ktorá vyrobila merací reťazec na meranie zdvihu vačky. Tento reťazec sa dá jednoducho pripevniť na motor bez nutnosti demontáže vačkového hriadeľa. Pozostáva zo senzoru uhlového natočenia, dvoch snímačov zdvihu, displeja, káblov na prenos dát do pc a v neposlednom rade softvéru. Senzor uhlového natočenia (enkodér) pracuje s krokom $0,1^\circ$ a dá sa pripevniť na ktorúkoľvek časť motora ktorá rotuje spolu s vačkovým respektíve kľukovým hriadeľom. Lineárne snímače pracujú s rozlíšením $0,0004\text{ mm}$ a sú upevnené na ráme. Cena tohto reťazca sa pohybuje okolo 907 € bez poštovného. [17]



Obr. 21 Zariadenie na meranie ventilových rozvodov s použitím snímačov [17]

4 MATEMATICKÝ MODEL VENTILOVÉHO ROZVODU V PROSTREDÍ GT-SUITE

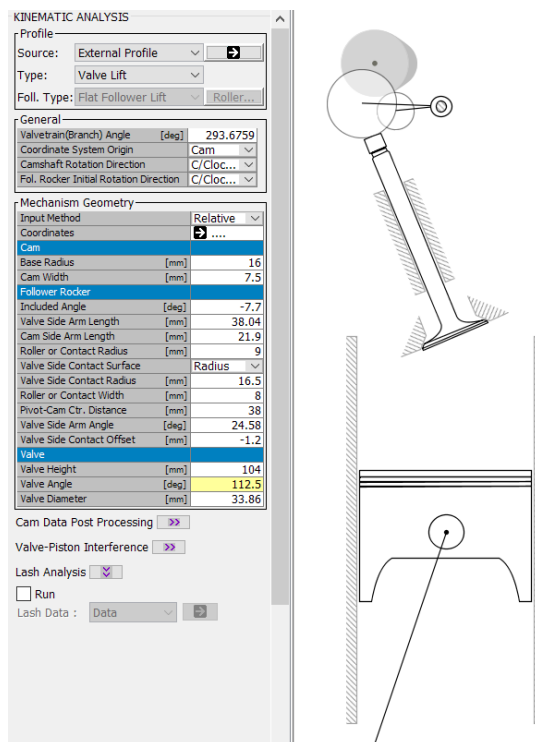
Na základe štúdia ventilových rozvodov a pre porovnanie dosiahnutých výsledkov aspoň na jednej vačke bol vytvorený aj model vo výpočtovom programe GT-SUITE. Súčasťou balíka GT-SUITE je aj program VTDesign. Tento program slúži priamo na modelovanie ventilového rozvodu.

VTDesign sa skladá z troch podkategórií. Hlavná podkategória Valvetrain slúži na definovanie rozmerov a typu ventilového rozvodu. Na základe týchto parametrov je schopný program Valvetrain vygenerovať profil vačky. Následne sa používa podkategória CamDesign ktorá slúži na návrh a úpravu zdvihovej krivky vačky respektíve ventilu a je potrebná pre kinematickú analýzu. V neposlednom rade využíva Spring Design, ktorý slúži na návrh pružín a je neoddeliteľnou súčasťou dynamickej analýzy ventilového rozvodu. V tomto prípade sa bude vyšetrovať iba kinematika mechanizmu, preto budú použité iba podkategórie Valvetrain a CamDesign.

Po vytvorení kinematického modelu sa môže ďalej pokračovať v tvorbe dynamiky ventilového rozvodu. Vďaka takto vytvorenému modelu je možné rozvodový mechanizmus priradiť k hlave valcov a po spojení s motorom analyzovať rôzne deje ako napríklad termodynamiku motora.

4.1 MODEL VENTILOVÉHO ROZVODU VO VTDESIGN

Pre určenie kinematických veličín sa v prvom rade musí určiť typ rozvodového mechanizmu. Hlava valcov, ktorá bude použitá na meranie má rozvod typu DOHC. Typ rozvodu sa volí ihneď na začiatku tvorby modelu. V tomto prípade som zvolil už vyššie spomínaný typ DOHC. V ďalšom kroku bolo potrebné určiť vstupné parametre, ktoré popisujú geometriu ventilového rozvodu.

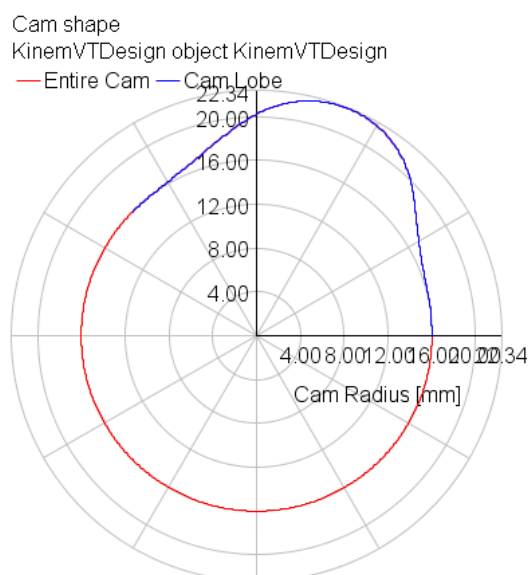


Obr. 22 Prostredie programu VTDesign

Jedná sa o veličiny ako napríklad dĺžka ventilu, dĺžka ramena vahadla na strane vačky a taktiež na strane hydraulického podpery. Dáta pre zostavenie tohto modelu boli poskytnuté spoločnosťou Garrett Motion.

4.2 MODEL VAČKY

Po vyplnení parametrov potrebných k stanoveniu ventilového rozvodu bolo možné vygenerovať profil vačky.

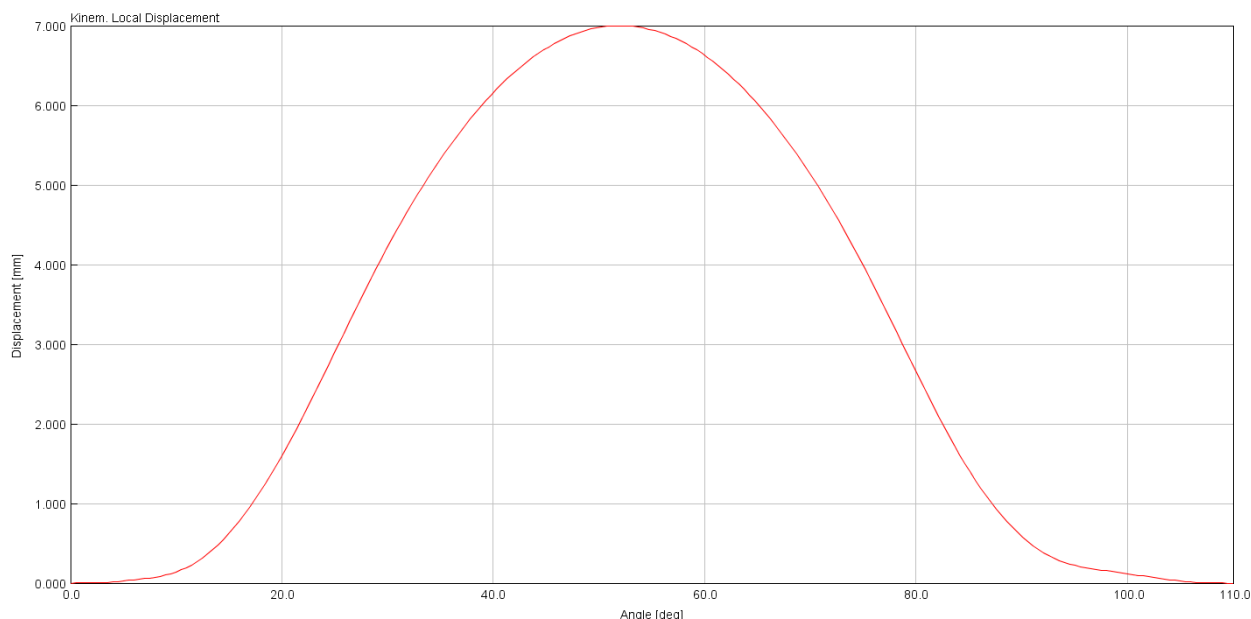


Obr. 23 Vygenerovaná vačka v programe VTDesign

Ako je možné vidieť na obr.23, nábežná a úbežná strana vačky nie sú rovnaké. Je to dané tvarom a veľkosťou vahadla s rolnou a z toho dôvodu je úbežná hrana konkávnejšia. Konkávnosť je však limitovaná výrobitelnosťou preto sa vždy kontroluje najmenší absolútny záporný polomer krivosti. Hlava valcov taktiež obsahuje systém variabilného zdvihu ventilov (Valvelift), v tomto prípade bol model vytvorený iba pre malý profil sacej vačky.

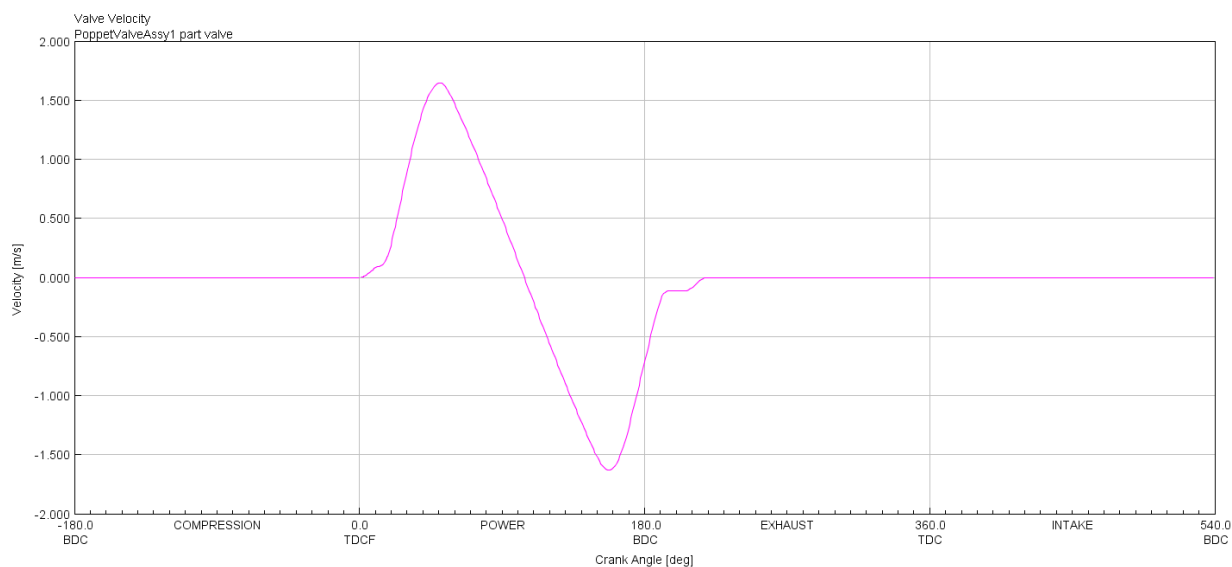
4.3 ANALÝZA KINEMATIKY HLAVY VALCOV

Po správnom vygenerovaní vačky je už možné zostrojiť rôzne kinematické charakteristiky, ako napríklad rýchlosť ventilu, zrýchlenie ventilu ale taktiež zdvih ventilu v závislosti na pootočení vačky. Keďže výstupom merania má byť závislosť zdvihu ventilu na pootočení vačky, tak ďalej sa bude skúmať tento parameter. Ostatné charakteristiky môžu taktiež slúžiť pre kontrolu, či rozvodový mechanizmus pracuje stabilne a či nedochádza k odskakovaniu ventilu od sedla.



Obr. 24 Zdvih sacieho ventilu v závislosti na pootočení klukového hriadeľa

Až po vytvorení modelu ako celku je možné zistiť kinematické veličiny ako zdvih ventilu, rýchlosť a taktiež aj zrýchlenie v závislosti na uhlovom pootočení vačkového hriadeľa. Tento matematický prístup je pomerne zložitý, pretože vyžaduje znalosť programu GT-SUITE. Taktiež je náročný z časového hľadiska pretože je potrebné hlavu valcov rozobrať a posuvným meradlom respektíve iným meracím zariadením zmerať vstupné parametre. Jednoduchším riešením je odmerať zdvih ventilu v závislosti na pootočení vačkového hriadeľa priamo na hlave valcov a potom následnou deriváciou dať získať kinematické veličiny ako rýchlosť a zrýchlenie. Aj toto je jeden z dôvodov prečo zostrojenie stanovišťa na odmeranie ventilového rozvodu môže byť prínosom.

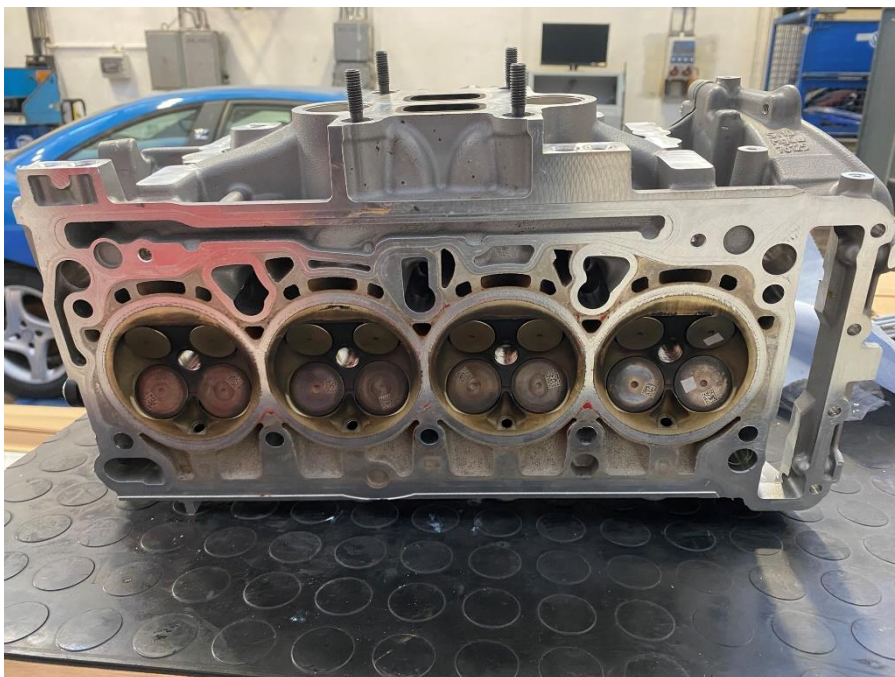


Obr. 25 Rýchlosť ventilu v závislosti na pootočení klukového hriadeľa

5 METODIKA VYTVORENIA STANOVISKA

5.1 STANOVENIE TYPU MERANIA A APLIKOVATEĽNOSŤ NA POSKYTNUTÚ HLAVU VALCOV

Pre zostrojenie stanoviska na meranie ventilového rozvodu a overenie funkčnosti dodala spoločnosť Garrett Motion hlavu valcov zo zážihového motoru od koncernu VW 2.0 TFSI. Hlava bola privezená do priestorov laboratórií ústavu Automobilného a dopravného inžinierstva VUT v Brne.



Obr. 26 Hlava valcov motora 2.0 TFSI

Po prvom zoznámení sa postupne začalo rozmýšľať nad umiestnením snímačov. To viedlo k otázke výberu typu merania. Existujú rôzne prístupy ako napríklad kontaktný typ merania, meranie laserom a tak ďalej. Keďže v dnešnej dobe sú schopné aj digitálne respektíve analógové snímače pracovať s pomerne vysokou presnosťou, bolo vybraté kontaktné riešenie. Ďalšie pozitívum kontaktného merania ktoré stojí za zmienku je fakt, že digitálne snímače s požadovanou presnosťou na 0,001mm sa pohybujú v nižších cenových reláciách ako laserové snímače. Taktiež sa určilo, že meranie bude prebiehať bez natlakovanej hlavy valcov olejom, ktorý ma v hlave valcov veľa dôležitých funkcií ako napríklad vymedzenie vôle medzi vačkou a vahadlom.

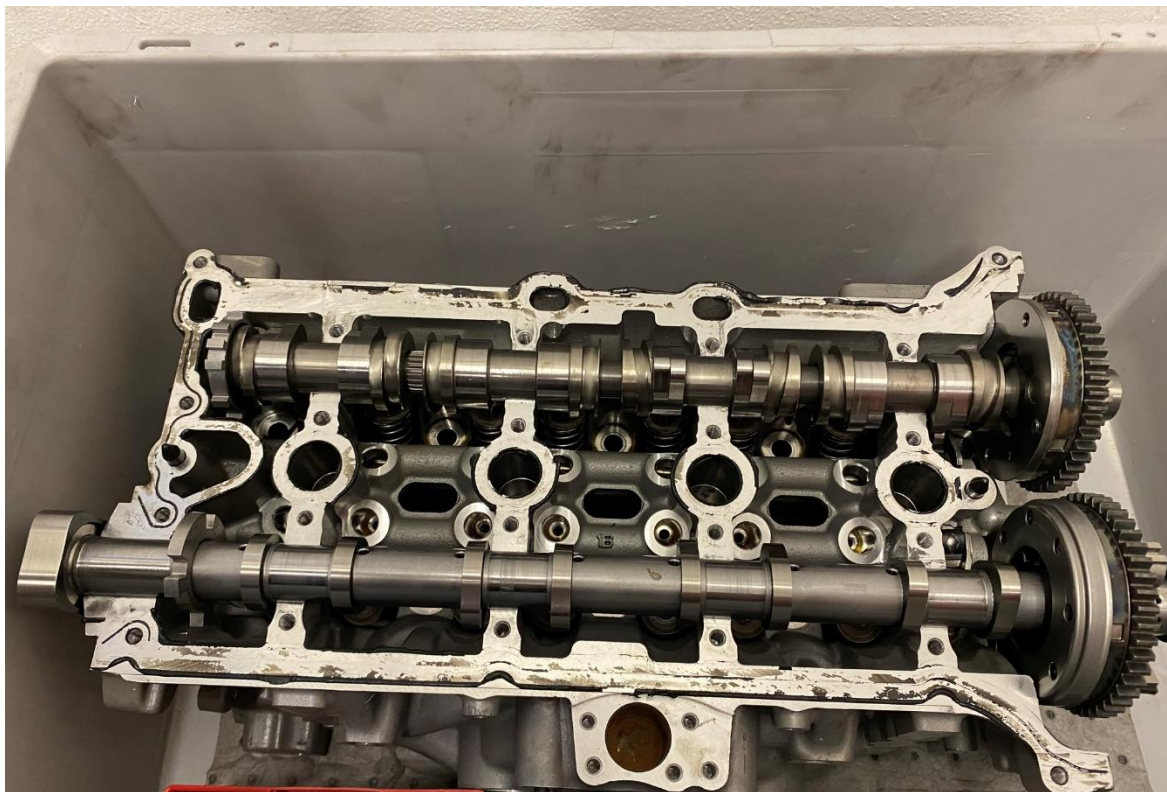
Po určení kontaktného typu merania bolo potrebné pouvažovať nad umiestnením snímačov. Faktom je, že najjednoduchšie umiestnenie snímača, ktorý bude merať zdvih ventilu bude z kompresnej časti hlavy valcov. Pre meranie natočenia vačkového hriadeľa bolo tých možností viac, ale stanovil sa najjednoduchší variant a to umiestniť snímač priamo na vývod vačkových hriadeľov. Z dôvodu, že sa jedná o moderný zážihový motor, je táto hlava valcov vybavená variabilným časovaním ventilov. Pri meraní presného uhla pootočenia by bol tento aspekt veľký problém, z toho dôvodu bolo potrebné vymyslieť systém na aretáciu vačkových hriadeľov proti pootočeniu vnútorného rotoru vačkového hriadeľa oproti vonkajšiemu rotoru.



Obr. 27 Vývody vačkových hriadeľov so systémom variabilného časovania ventilov

Pri snahe pretočiť vačkové hriadele sa zistilo, že otvoriť ventil vačkou je skoro nemožné. Príčina bola vo veľkej sile pôsobiacej proti otvoreniu ventilu. Táto sila bola vyvolávaná veľmi vysokou tuhosťou ventilových pružín. Pre meranie by to bolo prakticky nemožné, keďže vačkou sa bude otáčať ručne respektíve za použitia stroja s vysokým prevodovým pomerom ale na ručný pohon.

Následne sa demontovalo horné veko hlavy valcov. Ako u väčšiny dnešných motorov sa ventilová vôľa nastavuje pomocou hydraulických zdvihátiek. Tie sú schopné vďaka tlaku vyvolaným olejom samostatne dorovnávať ventilovú vôľu. Keďže počas merania sa olej v hlave vyskytovať nebude, bolo potrebné vymyslieť systém, ktorý nahradí toto hydraulické zdvihátko plnohodnotne a bude možné vďaka nemu nastaviť respektíve vymedziť vôľu medzi vačkou a ventilom.



Obr. 28 Poskytnutá hlava valcov s demontovaným vrchným vekom

Hlava valcov takisto obsahuje aj systém variabilného zdvihu ventilov. Ako je možné pozorovať na obr.28, na nasávacom (hornom) vačkovom hriadeľi sa nenachádza len jeden profil vačky na každý ventil ale sú dva a každý má iný profil. Tento systém variabilného zdvihu ventilov je popísaný v kapitole 1.3.1. Pretože meranie bude prebiehať pri oboch profiloch je potrebné čo najľahšie tieto vačky prepínať.

V poslednom rade bolo potrebné určiť otázku pohonu. Keďže vývody vačkových hriadeľov (obr.28 naľavo) boli určené na snímač polohy, neostával iný variant ako na pravej strane výfukovom (spodnom) vačkovom hriadeľi, kde sa nachádza vývod na čerpadlo. Tým pádom, že poháňaný bude len výfukový vačkový hriadeľ bolo potrebné hriadele spojiť, aby sa otáčali súčasne a bez vôľe.

Po analýze hlavy a stanovení faktorov, ktoré bolo treba vyriešiť sa mohlo prejsť k výberu snímačov a návrhu rámu do ktorého sa hlava valcov pred meraním osadí. Ako posledné bolo potrebné navrhnuť softvér k snímačom.

5.2 VÝBER SNÍMAČOV

Pri zostavovaní meracieho reťazca je jeden z najdôležitejších aspektov výber správnych meracích zariadení a ich vzájomná spolupráca. Keďže sa jedná o meranie zdvihu ventilu v závislosti na uhle natočenia vačkového hriadeľa, tak na zdvih ventilu bude použitý buď lineárny potenciometer alebo digitálny úchylkomer. Na meranie uhla enkodér. Signály z týchto snímačov budú spracované v softvéri od National Instruments – LabVIEW.

5.3 LINEÁRNY POTENCIOMETER TRS-0050-05

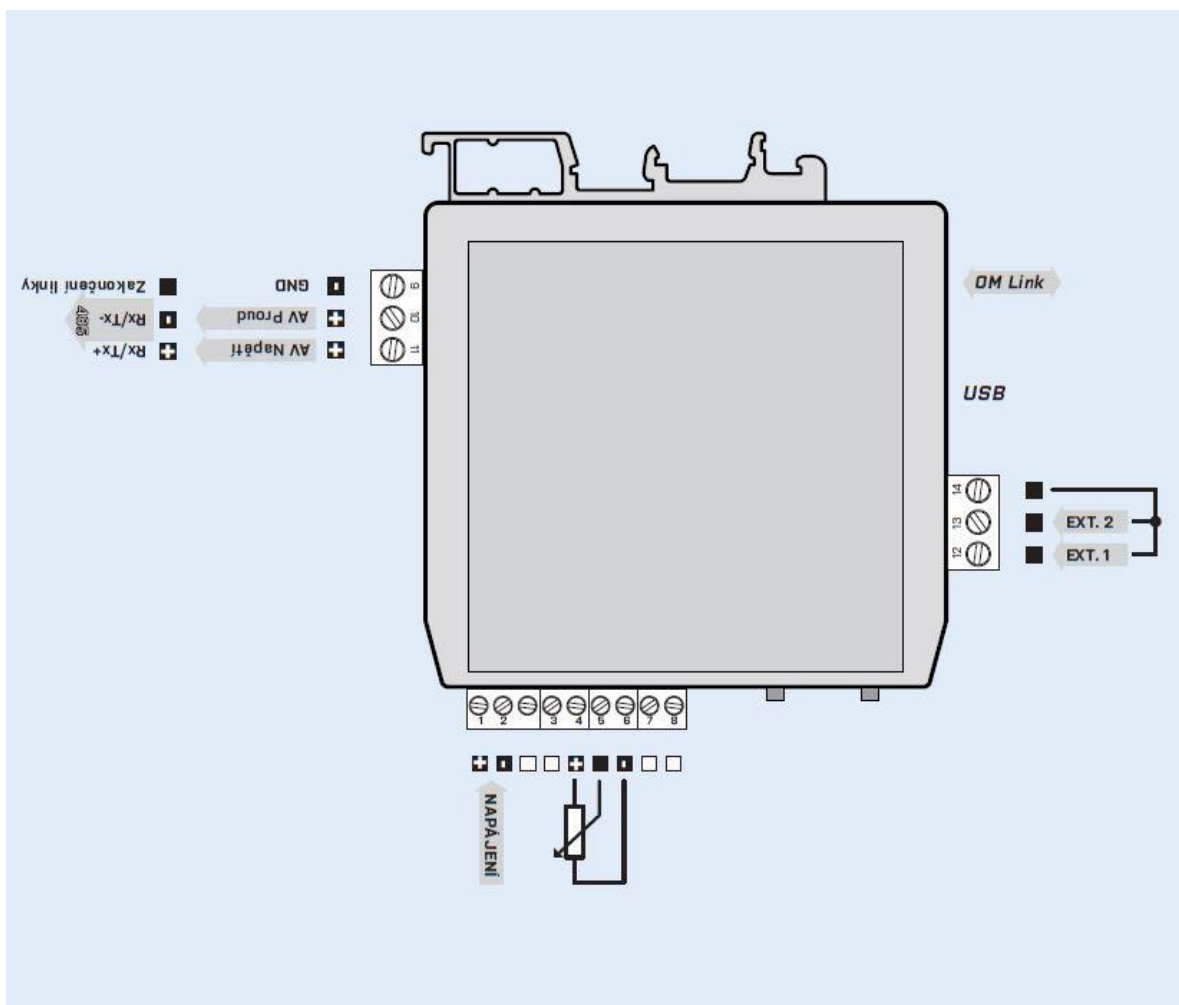
Potenciometre sú vo všeobecnosti definované ako 3-vývodové variabilné odpory, v ktorých je veľkosť elektrického prúdu regulovaná mechanickým prestavovaním bežca potenciometra. Sériá T/TR je potenciometrický prevodník na priame a presné meranie zdvihu jednej osi, ktorý má pri plnom vysunutí 50 mm hodnotu 5 k Ω . Práve pre to sa spočiatku javil ako optimálny snímač na meranie zdvihu ventilu. Opakovateľnosť tohto snímaču je na úrovni $\pm 0,075\%$ z rozsahu merania. [21]



Obr. 29 Potenciometrický prevodník TRS-0050-05 a zapojenie pinov [21]

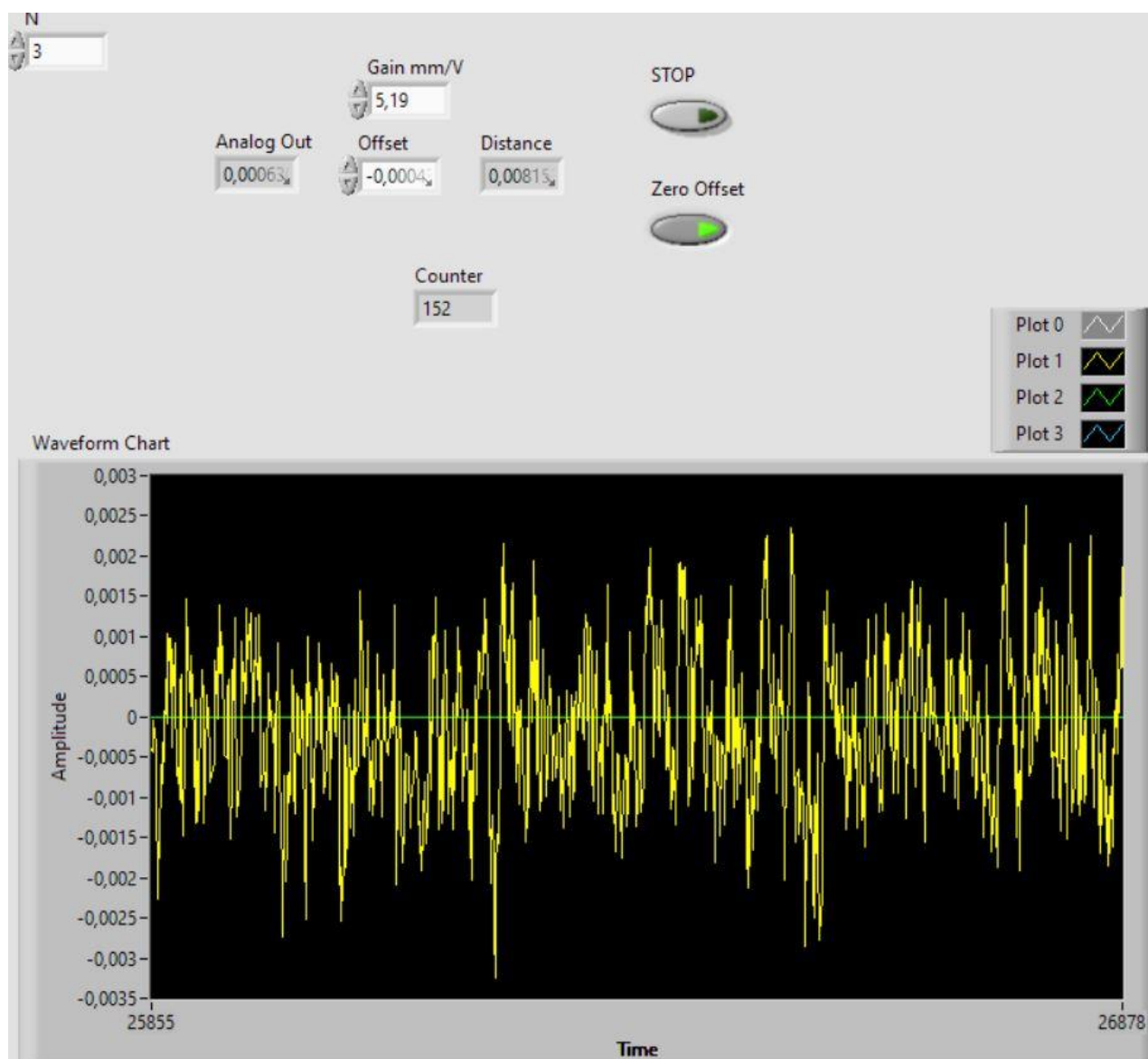
Pri zapojení vývodu potenciometra do konektoru bola zvolená klesajúca charakteristika, čiže na pozícii č.1 bol pripojený zdroj napätia, k pinu č.2 je pripojený bežec potenciometra a pin č.3 bol pripojený na zem (záporný pól). Pri takomto zapojení počas zasúvania lineárneho bežca potenciometra klesalo napätie. Správnosť zapojenia sa dalo overiť pomocou meracieho zariadenia (ohm metra) a to tak, že pri posúvaní bežca sa na meracom zariadení menila hodnota odporu. Pri meraní zdvihu ventilu s týmto zariadením bola potrebná analógová forma signálu, ktorá je daná nejakou spojitou funkciou závislou v čase. Na vygenerovanie analógového signálu bude slúžiť digitálny prevodník OMX 380 DU.

Digitálny prevodník OMX 380 DU je zariadenie určené pre lineárne potenciometre. V princípe ide o dekodovací obvod, ktorý spracuje signál z potenciometra. V tomto prípade na analógovú formu výstupného signálu, výstupné napätie respektíve prúd. Základom tohto prístroja je jednočipový mikrokontrolér, 24bitový A/D a 16bitový D/A prevodník.[20]



Obr. 30 D/A prevodník OMX 3800DU [20]

Prevodník sa s pripojil k potenciometru podľa schémy zapojenia na obr.30 tak, že na pin č.4 sa pripojil kladný pól zdroja z potenciometra, na pin č.5 sa pripojil signálový výstup z potenciometra a na pin č.6 sa pripojilo uzemnenie z potenciometra. Pre činnosť prevodníka je potrebné k nemu priviesť aj napájacie napätie v rozmedzí 10-30 V na piny č.1 a 2. Následne je možné vybrať výstupný typ signálu a to buď na výstupné napätie alebo prúd. Tieto výstupy sa následne pripoja do meracej karty. V tomto prípade bol zvolený napäťový prístup, čiže boli použité piny č.11 a 9. Na prevodníku sa taktiež nachádza USB výstup ktorý v spolupráci so softvérom OM Link SW a USB izolátorom umožní konfiguráciu a kalibráciu prevodníka. Avšak nie je to nutné a kalibrácia a základné funkcie sa dajú nastaviť aj priamo na prevodníku.



Obr. 31 Nepresnosť spôsobená el. šumom pri lineárnom potenciometri

Už prvotný odhad presnosti meracieho zariadenia bol, že výstupné dáta budú nepresné z dôvodu veľkého počtu medzičlenov zapojených v meracom obvode ako je prevodník (A/D, D/A) a meracia karta. Táto teória sa neskôr potvrdila aj v softvéri LabView na obr.31. Pre zníženie nepresnosti bol použitý filter, ktorý síce nepresnosť znížil ale stále bola pomerne vysoká rádovo v 0,01 mm. Z tohto dôvodu tento variant bol pre meranie nevhodný.

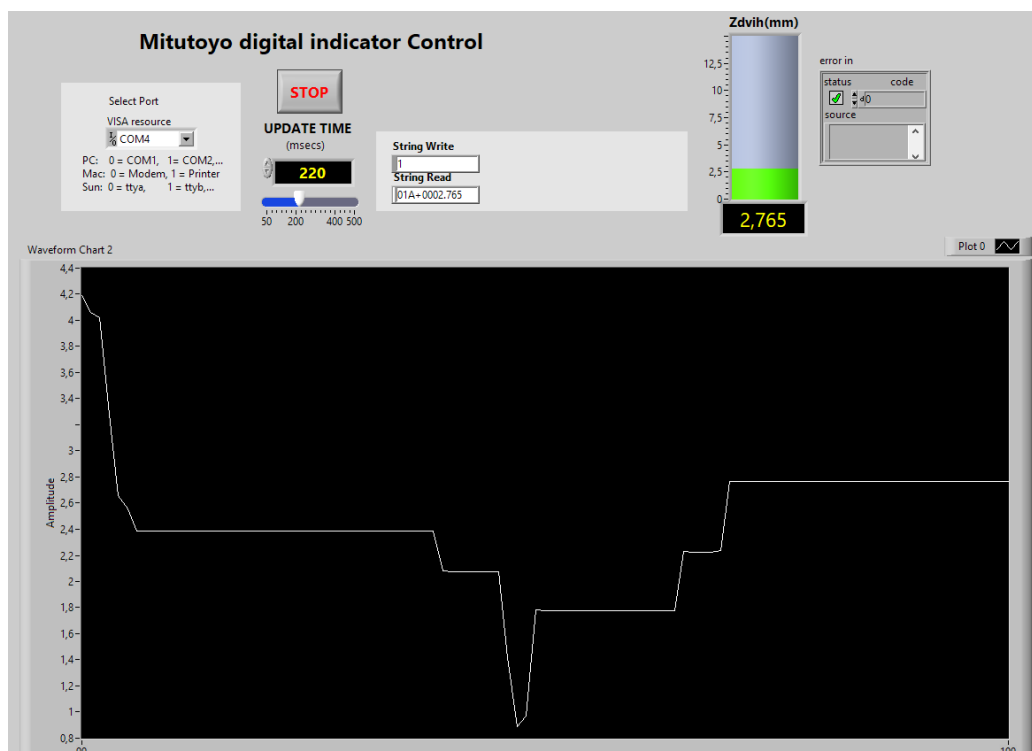
5.4 DIGITÁLNY ÚCHYLKOMER MITUTOYO

Digitálny úchylkomer je prístroj pre presné odmeranie vzdialenosti. Meranie prebieha v jednej osi, pričom axiálny posuv hrotu zaznamená prevodník integrovaný v zariadení, prevedie ho na elektronický signál a následne zobrazí na integrovanom displeji.



Obr. 32 Digitálny úchylkomer Mitutoyo a prevodník na analógový signál [18]

Absolútny digitálny úchylkomer značky Mitutoyo série 543 pracuje s presnosťou 0,001 mm a to do maximálneho zdvihu, ktorý je okolo 12,7 mm, čo je pre tento prípad postačujúce. Opakovateľnosť merania je 0,002 mm. Aktuálny zdvih je vyslaný vo forme digitálnej správy. Pre spracovanie signálu v PC je potrebné digitálnu správu dekodovať. Preto je k úchylkomeru potrebný kábel, ktorý slúži na spojenie s PC a taktiež je v ňom integrovaný prevodník na analógový signál. Spočiatku sa nedarilo sfunkčniť komunikáciu medzi prístrojom a PC z dôvodu, že PC videl prístroj ako USB HID a nie ako COM Port. Preto bolo potrebné zabezpečiť softvér od firmy Mitutoyo, v ktorom sa nachádzal ovládač na premenu USB HID na COM Port. Potom nasledovalo overenie komunikácie v LabView (obr.33), kde pri vzorkovacej frekvencii 4,5 Hz nenastával žiadny šum. Oproti lineárnemu potenciometru je toto riešenie jednoduchšie, pretože nie je potreba žiadnych medzičlenov okrem kábla, cez ktorý zariadenie komunikuje s PC a zároveň sú výstupné hodnoty presnejšie a bez šumu.



Obr. 33 Graf závislosti zdvihu úchylkomeru na čase

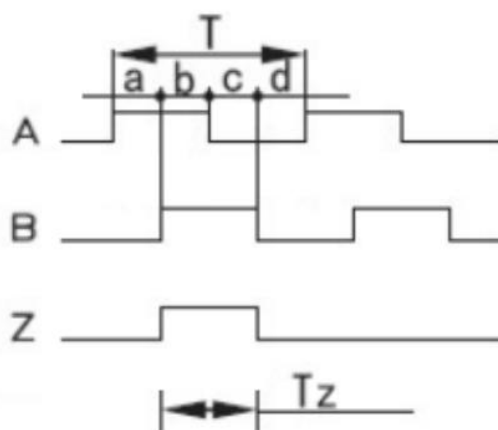
5.5 ENKODÉR ISC3806

Enkodér je zariadenie, ktoré mení uhlové natočenie alebo celkovo pohyb na digitálny alebo analógový signál. V tomto prípade sa použije inkrementálny enkodér, ktorého výstupom sú digitálne signály. Tie sa následne spracujú v software LabView, kde sa prepočítajú na uhlové natočenie. Signály poskytujú pozíciu v reálnom čase. To znamená, že inkrementálny enkodér hlási zmenu polohy bez toho aby bol k tomu vyzvaný a táto informácia je prenášaná rádovo väčšou rýchlosťou ako pri absolútnych enkodéroch. Z toho vyplýva, že pri inkrementálnych enkodéroch je presnosť merania väčšia ako pri absolútnych enkodéroch. Práve to bol dôvod, prečo bol zvolený na meranie uhlového natočenia vačkového hriadeľa.



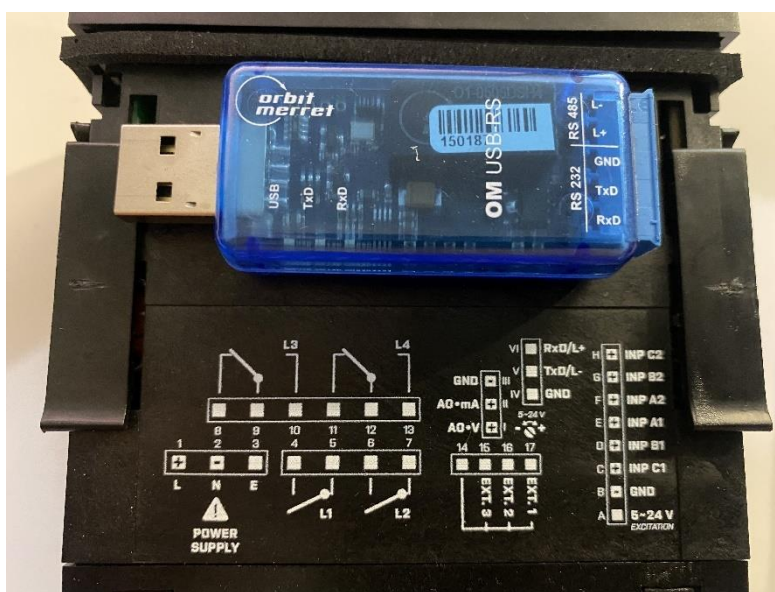
Obr. 34 Rotačný inkrementálny enkodér [19]

Enkodér musí byť napájaný z externého zdroja napätím 5V. To je možné získať z meracej karty, ktorá poskytuje port s napájaním 5V. Taktiež musí byť pripojený k zemi a mať zapojený štít, ktorý bráni rušeniu signálov. Následne sa do meracej karty pripoja aj tri výstupy z enkodéru a to z dôvodu, že enkodér poskytuje tri signály a to A,B,Z. Signály tvoria periodické a digitálne tvary vlny pri otáčaní hriadeľa enkodéra. Tieto vlny sa následne podľa vzájomného prekrytia dajú previesť na uhol pootočenia pomocou rovníc pričom je nutné poznať počet impulzov pri vykonaní 360° otočenia hriadeľa čo je v tomto prípade 14400 impulzov. Pri tomto enkodéri je jeden impulz prepočítaný na 0,025° čo zabezpečuje vysokú presnosť merania.



Obr. 35 Výstupy signálov A,B,Z z enkodéru a ich fázové posuny [19]

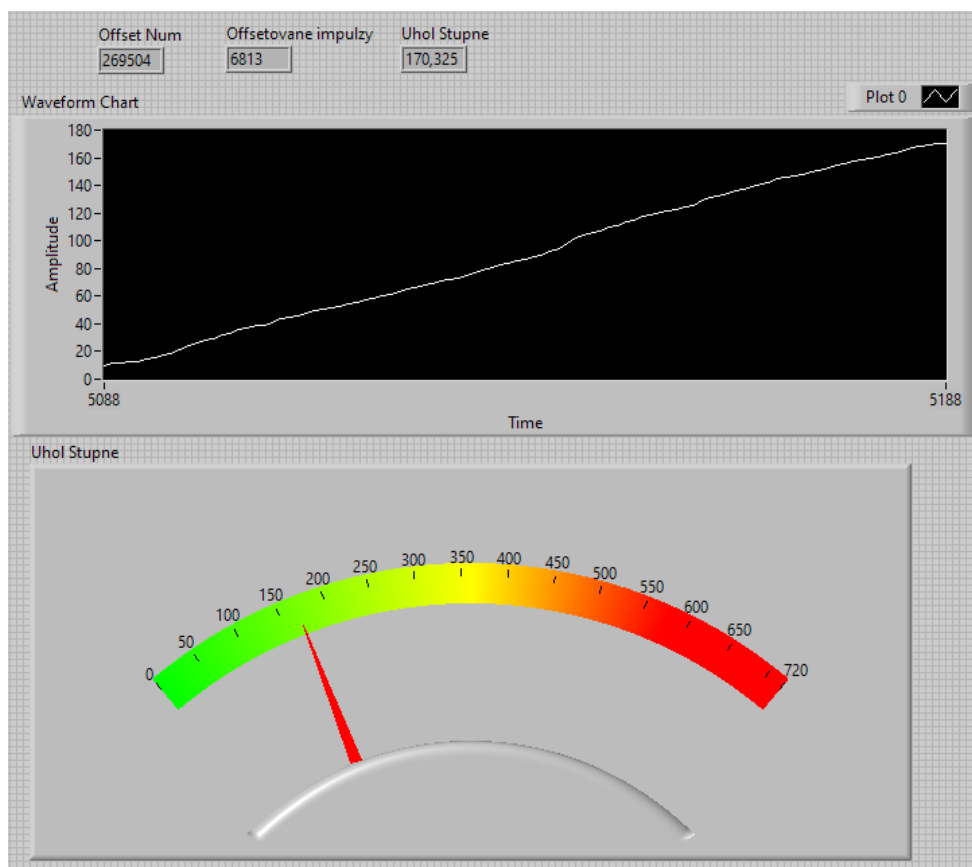
Pre prevod signálu z enkodéra na určitý typ správy bude slúžiť univerzálny dvojkanálový čítač impulzov OM 602UQC od firmy Orbit Merret. Toto zariadenie je schopné počítat impulzy z enkodéra a následne odoslať dáta do pc cez USB prevodník podporujúci komunikáciu pomocou sériovej linky RS232 využívajúcu protokol ASCII. Výrobca deklaruje presnosť $\pm 0,01\%$ z rozsahu a má zabudované digitálne filtre, čo dosť uľahčí ďalšie spracovanie signálu.



Obr. 36 Čítač impulzov so schémou zapojenia a USB prevodník využívajúcu sériovú linku

Do čítača impulzov sa zapojí enkodér podľa schémy na zariadení (obr.36), sériová linka a v neposlednom rade napájanie v rozmedzí od 10 do 30 V. Po overení správnosti komunikácie zariadenia s PC sa v prostredí LabView tento signál spracuje, nastaví sa nulovanie a prepočítanie impulzov na uhol natočenia hriadeľa enkodéra, kde sa impulzy vynásobia $0,025^\circ$ a z toho je možné odčítať aktuálne natočenie hriadeľa enkodéra.

Pri experimentoch bolo zistené, že toto zariadenie v spojení s enkodérom dokáže pracovať so vzorkovacou frekvenciou na úrovni 50 Hz, čo zaručuje veľmi vysokú presnosť a rýchlosť prenosu dát do PC



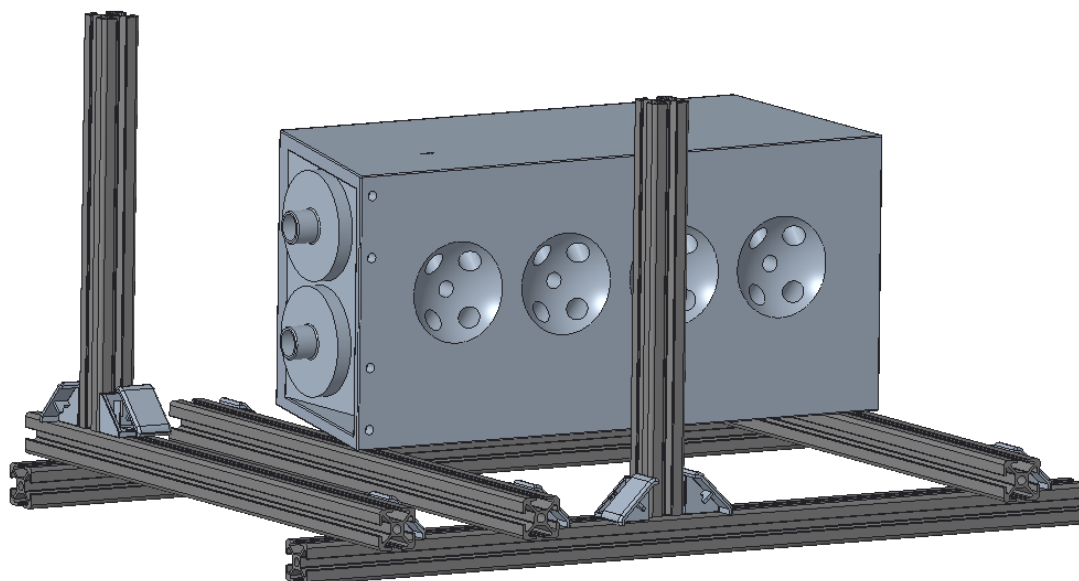
Obr. 37 Meranie uhlu prostredníctvom enkodéra a čítača impulzov v prostredí LabView

5.6 KONŠTRUKCIA RÁMU

Pri konštrukcii rámov sa postupne navrhli tri varianty, pričom každá z nich musela obsahovať systém na umiestnenie snímača na meranie zdvihu ventilu a taktiež systém na upevnenie enkodéra, ktorý meria natočenie vačkovej hriadele. Každá z týchto variant bola následne overená v systéme Ansys aby sa vybral variant s najlepšimi parametrami čo sa týka tuhosti a vlastnej rezonančnej frekvencie.

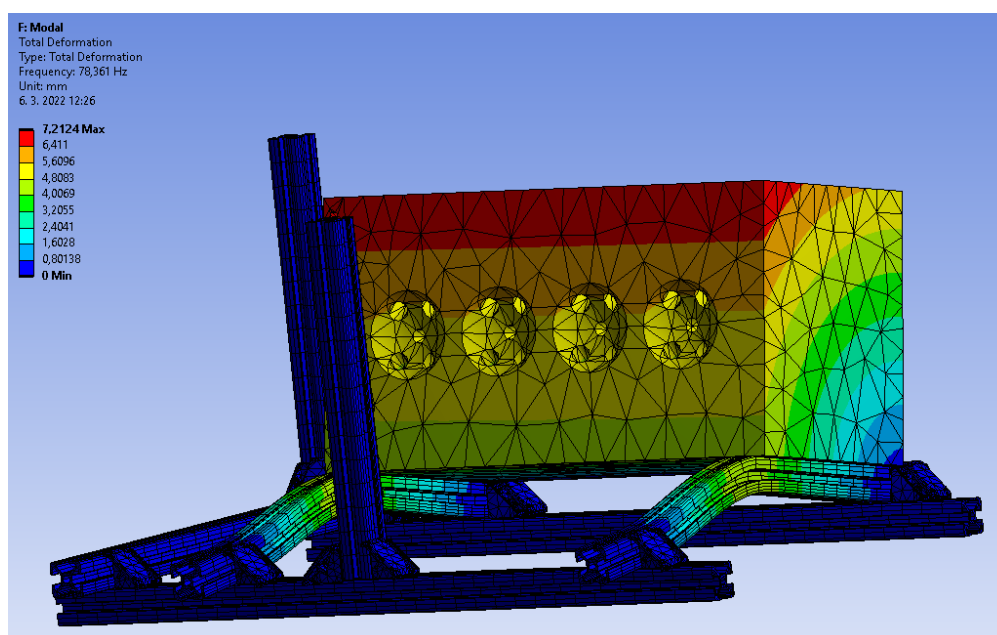
5.6.1 RÁM POSKLADANÝ Z HLINÍKOVÝCH PROFILOV.

Tento variant je najuniverzálnejší a taktiež najjednoduchší na zostrojenie. Jedná sa v podstate iba o poskladanie a pospájanie hliníkových profilov v rozmere 30x30mm. Na profiloch sa nachádzajú drážky ktoré umožňujú napojenie ďalších profilov respektíve iného príslušenstva.



Obr. 38 Rám na uchytienie snímačov z hliníkových profilov

Ako je na obrázku možné vidieť na obr.38, tak v priestore pred ventilmi sa nachádza hliníkový profil, ktorým sa dá pohybovať doprava a doľava a naň sa pripevní polohovacie zariadenie, na ktoré sa následne pripevní snímač na meranie zdvihu ventilu. Polohovacie zariadenie zaručí natáčanie snímača a tým meranie zdvihu presne v osi ventilu. Na strane ozubení vačkových hriadeľov sa taktiež nachádza hliníkový profil, na ktorý sa upevní enkodér. Týmto profilom je takisto možné pohybovať doprava aj doľava a na samotnom profile sa enkodér dá posúvať hore a dole, čo zaručuje vysokú univerzalitu tohto variantu.

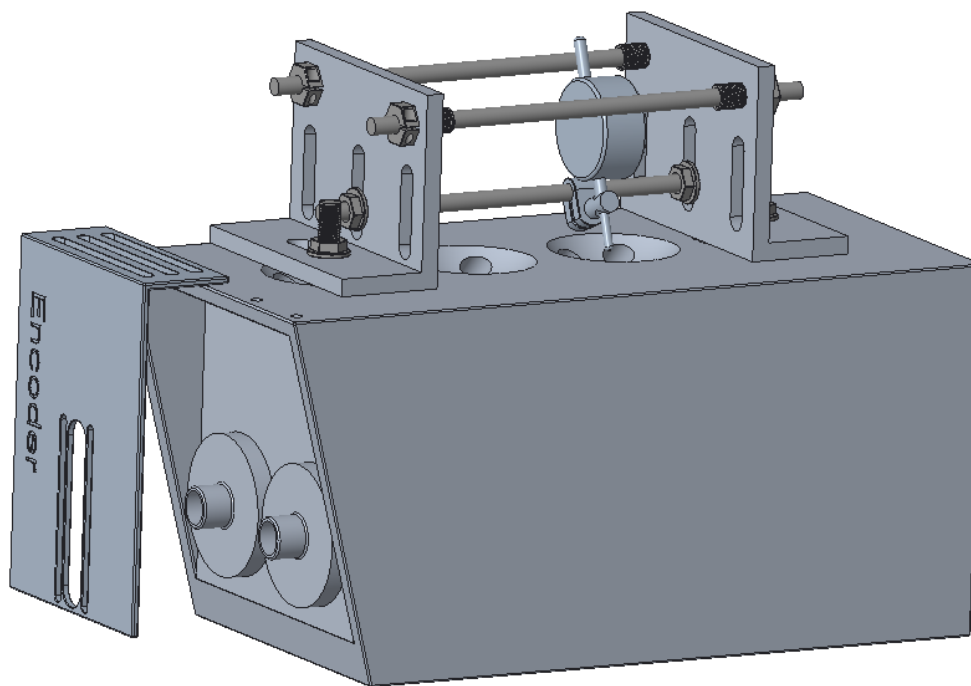


Obr. 39 Modálna analýza

Na úkor vysokej univerzality je však rám málo tuhý, aj keď má najvyššiu hodnotu vlastnej frekvencie oproti ostatným variantom a to 78Hz. Je to hlavne z dôvodu že snímače nie sú pripevnené priamo na hlave valcov ale mimo nej. Tento fakt môže následne zapríčiniť vysokú nepresnosť merania. Z tohto dôvodu sa táto možnosť nepovažovala za vhodnú.

5.6.2 RÁM PRIPEVNENÝ PRIAMO K HLAVE VALCOV

Pri tejto variante je použitý hliníkový L profil hrubý 10 mm. Ten je priskrutkovaný priamo k hlave valcov a to cez otvory na sviečky. Na kontaktnej strane L profilu a hlavy valcov bude drážka, vďaka ktorej sa bude dať celým prípravkom pohybovať a úchylkomer bude možné posunúť nad nasávací aj výfukový ventil. Drážka je vyrobená s nadmierou, aby sa tento prípravok dal použiť aj na iný typ hlavy. Na strane kolmej k hlave valcov sa nachádzajú tri tyče, z ktorých sú dve určené na zaručenie pevnosti a zamedzeniu ohybu L profilov a jedna hladko brúsená je vodiaca pre puzdro úchylkomera. Taktiež sú tam pridané drážky na prípadné nadvihnutie úchylkomera pri použití pre iný typ hlavy.

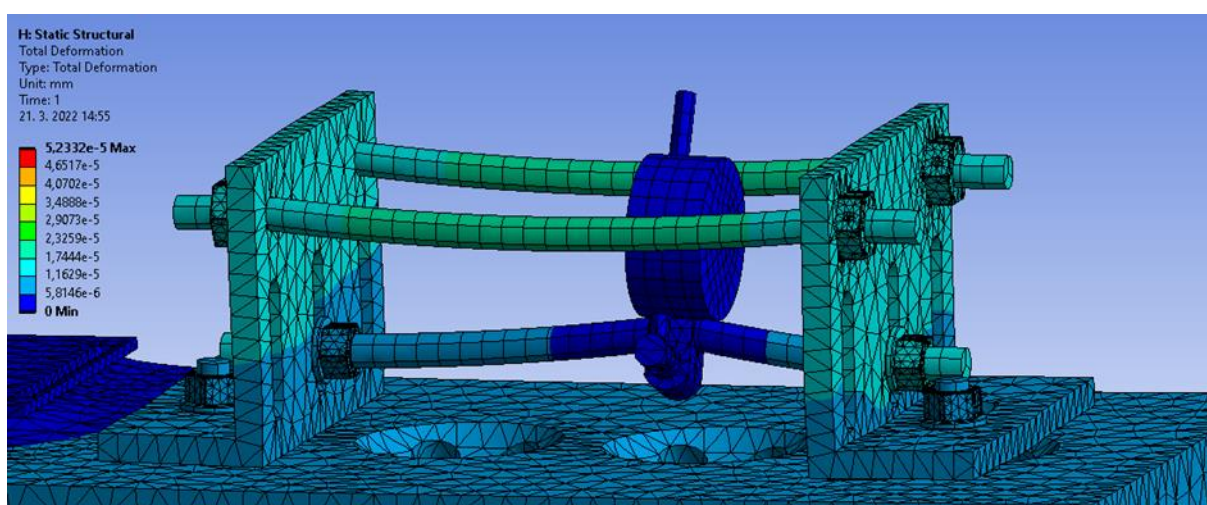


Obr. 40 Návrh rámu pripevneného k hlave valcov

Na bočnej strane hlavy sa nachádza ďalší L profil ale tentokrát z plechu hrúbky 4 mm. Tento plech slúži na uchytenie enkodéru na vačkový hriadeľ. Taktiež sa na ňom nachádzajú drážky a to na strane kontaktu hlavy valcov a plechu čo zaručí posunutie pred obidva vačkové hriadele a aj na strane pred vačkovými hriadeľmi čo zaručí výškové nastavenie enkodéru.

Pri modálnej analýze tohto typu rámu sa potvrdil prvotný predpoklad väčšej tuhosti a menšej vlastnej frekvencie ktorá má hodnotu 59 Hz v prvom móde. Keďže tento variant je podobný poslednej tretej variante, muselo sa vybrať ďalšie hodnotiace kritérium a to bola statická štrukturálna analýza.

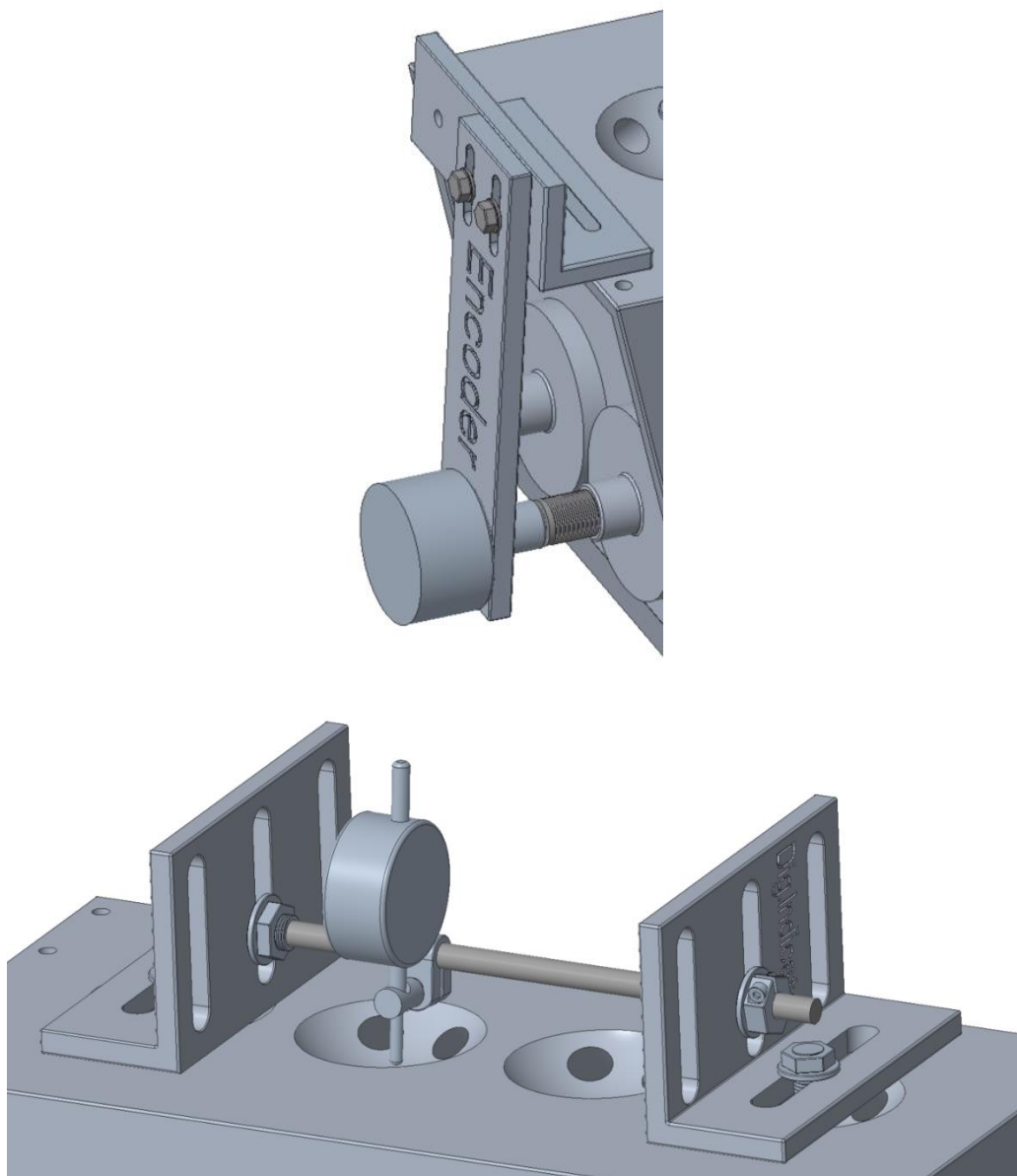
Pri statickej štrukturálnej analýze sa zisťovala celková deformácia zostavy v okolí ventilov a úchylkomera. Pri enkodéri nebolo potrebné vyšetrovať deformáciu. Do modelu zostavy bolo pridané pôsobenie gravitačnej sily a následne sila pôsobiaca v ose pohyblivej časti úchylkomera. Táto sila bola reálne odmeraná a má veľkosť okolo 2 N. Taktiež bola zameraná hmotnosť konzoly a hmotnosť úchylkomeru aby sa výsledky čo najviac približovali reálnemu modelu. Následne sa celý model vysietoval a zaväzbil, aby riešenie skonvergovalo. Výsledok maximálnej deformácie vyšiel $5,23 \cdot 10^{-5}$ mm čo je v podstate zanedbateľná hodnota, čiže tento variant rámu vyhovuje pre daný účel.



Obr. 41 Statická štrukturálna analýza

5.6.3 MODIFIKOVANÝ RÁM PRIPEVNENÝ K HLAVE VALCOV

Posledný variant je modifikáciou predchádzajúceho. Enkodér bude upevnený na hliníkovej platni, ktorá bude priskrutkovaná k L hliníkovému profilu, v ktorom sa budú nachádzať otvory s vnútornými závitmi. Toto riešenie je najideálnejšie z dôvodu dostupnosti hliníkového profilu 100x100x10 mm. Univerzálnosť uchytenia enkodéra spočíva v drážkach na platni a taktiež v drážkach na hliníkovom L profile. Samotný enkodér bude pevne pripevnený v otvoroch na to určených skrutkami, čo zaručí dostatočne pevné a tuhé spojenie. Taktiež je tento variant jednoduchší na výrobu.

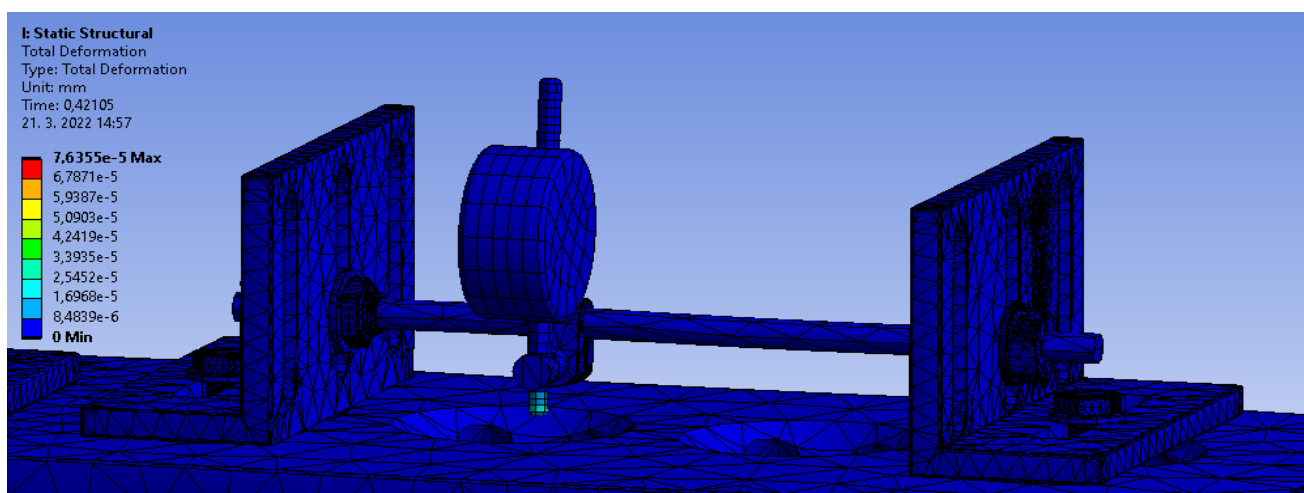


Obr. 42 Modifikácia rámu pripevneného k hlave valcov

Úchylkomer sa nachádza na hladko brúsenej vodiacej tyči a je o ňu uchytý konzolou na to určenu. Z dôvodu absencie ďalších dvoch tyčí ako vo variante č.2 je možno L profily zmenšiť, a taktiež je možno využiť dostupný hliníkový profil 100x100x10 mm ako v prípade enkodéru. Univerzálnosť nastavenia úchylkomera je zhodná s variantom č.2

Vlastná frekvencia pri modálnej analýze vyšla trochu vyššia a to okolo 70 Hz v prvom móde. S touto skutočnosťou sa počítalo a to najmä z dôvodu nižšej tuhosti.

Pri statickej štruktúrálnej analýze sa postupovalo podobne ako vo variante č.2. Model sa zaväzobil, pridalo sa pôsobenie gravitačnej sily a ako posledné silové pôsobenie v osi úchylkomeru. Výsledkom je maximálna celková deformácia o veľkosti $7,6 \cdot 10^{-5} \text{ mm}$ čo je pre daný prípad merania nadpriemerne dobrá hodnota a rám vyhovuje daným požiadavkám. Z dôvodu vysokého počtu normalizovaných súčiastok a menšej náročnosti na výrobu (čo má priaznivý vplyv aj na celkovú cenu, ktorá je nižšia ako pri predchádzajúcich variantoch) bol vybraný variant č.3

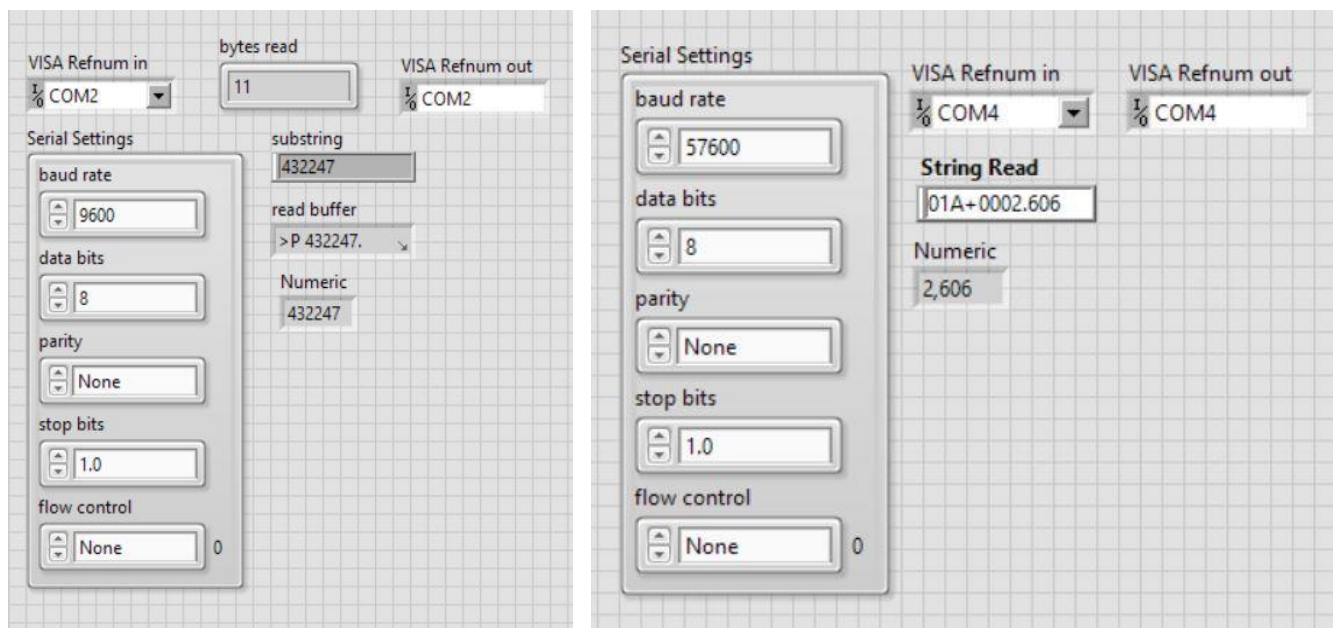


Obr. 43 Statická štruktúrálna analýza modifikovaného rámu.

5.7 SOFTVÉR

Ako bolo v minulých kapitolách spomenuté, signály zo snímačov sa spracujú v softvéri LabView (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench). V podstate sa jedná o grafický programovací jazyk od spoločnosti National Instruments. Táto platforma je určená pre aplikácie, ktoré vyžadujú testovanie, meranie s rýchlym prístupom k dátam meraného hardvéru. Skladá sa z dvoch hlavných častí a to z block diagramu a front panelu. V block diagrame sa priamo graficky skladajú rôzne bloky, ktoré sa vzájomne prepoja podľa istých zákonitostí, ktoré musia spĺňať požiadavky pre správnu činnosť merania. Front panel už následne slúži ako nejaký výstup, v ktorom sa zobrazujú namerané hodnoty v rôznych formách ako napríklad v grafoch, ukazovateľoch atď. LabView taktiež ponúka po úspešnom overení funkčnosti programu vytvoriť aplikáciu vo formáte exe. To je výhodné v prospech užívateľa, pretože nepotrebuje poznať samotný program a taktiež nie je obmedzený znalosťou systému LabView.

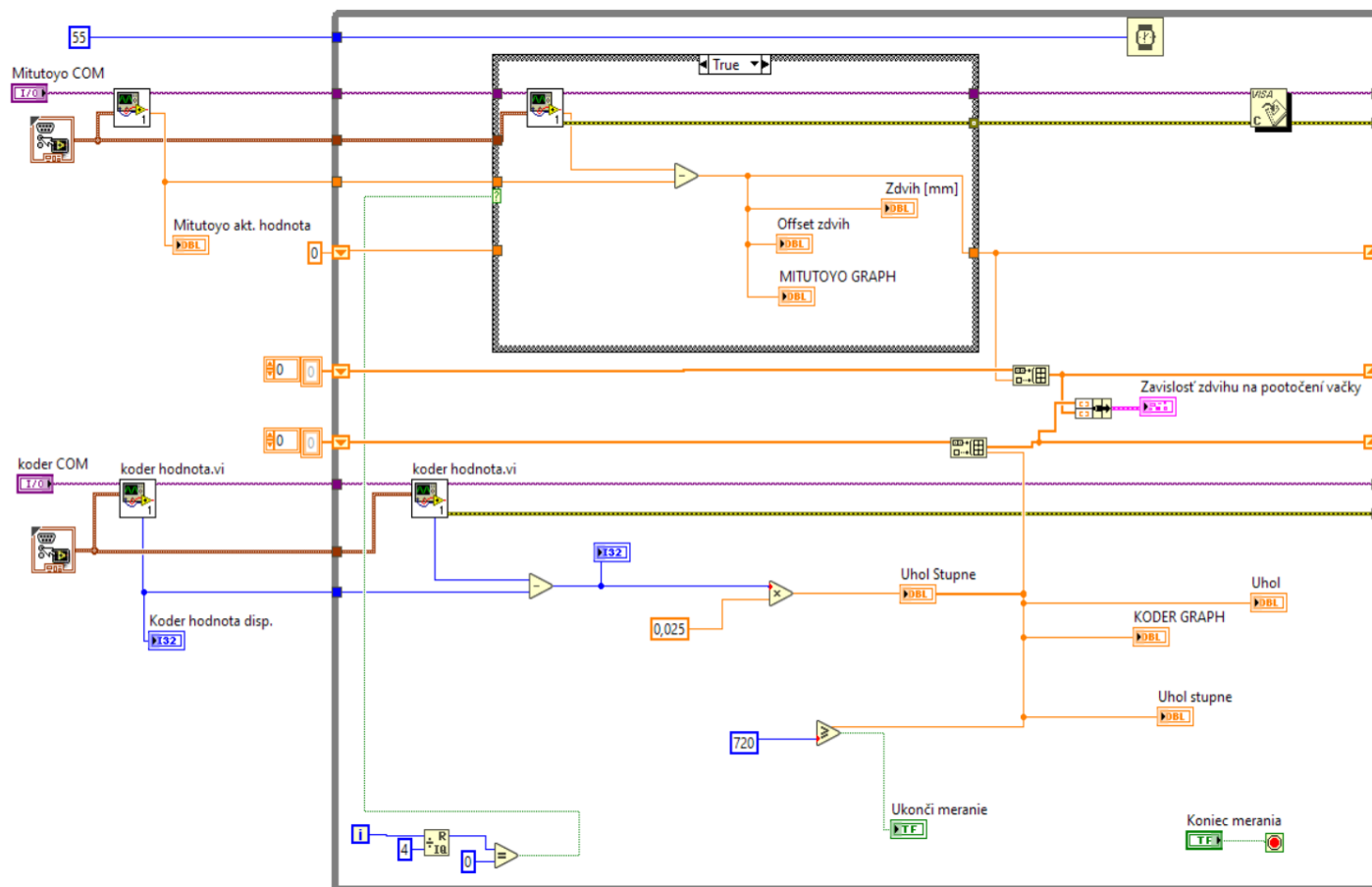
Použité snímače fungujú na princípe prijatia správy a následnej odpovedi. To znamená, že sa do zariadenia pošle nejaká správa a zariadenie na túto správu odpovie ďalšou správou, ktorá už na určitých bitoch obsahuje nameranú hodnotu. Každé zariadenie má však svoj komunikačný protokol ktorý je súčasťou datasheetov. Po overení komunikácie v programe NI MAX, ktorý je súčasťou platformy LabView, je potrebné túto správu dekodovať a určitým spôsobom spracovať, pretože zariadenia vracajú surové dáta.



Obr. 44 Overenie komunikácie enkodéru naľavo a digitálneho úchylkomeru Mitutoyo napravo

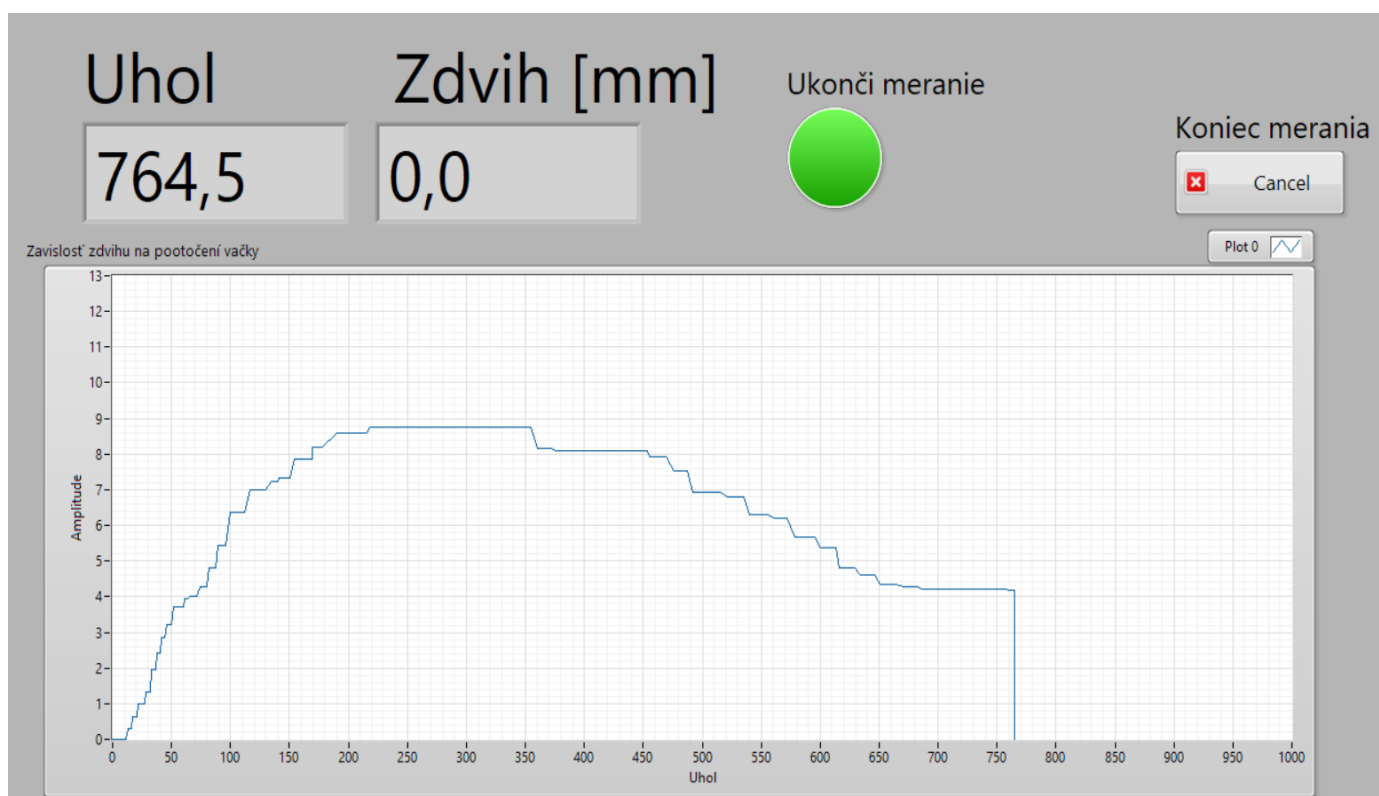
Komunikácia s digitálnym úchylkomerom Mitutoyo funguje tak, že sa do neho vyšle správa obsahujúca číslo 1. On následne vráti správu v tvare napríklad 01A+0002.606. Každý bit z tejto správy reprezentuje istú položku. Pre príklad, na pozícii tretieho bitu sa nachádzalo písmeno A, čo reprezentuje požiadavku na vyslanie dát, ktoré sa viažu ku kanálu A atď. Na pozícii 8. bitu sa už nachádza hodnota zdvihu zaznamenaná úchylkomerom. Zoznam týchto položiek sa nachádza v datasheete výrobcu. Takto sa muselo pristupovať aj k čítaču impulzov z enkodéra, ktorý taktiež vysielal istý druh správy, ktorá sa musela dekodovať.

Po dekodovaní dát a spustení komunikácie bolo potrebné nastaviť vzorkovaciu frekvenciu, to znamená, že ako často LabView vyzve zariadenie aby odpovedalo. Táto komunikácia a úprava surových dát sú sprostredkované v samostatných takzvaných sub.vi.



Obr. 45 Blokový diagram softvéru LabView použitý pri meraní

V programe na obr. 45 je možno vidieť slučku, ktorá posíla do zariadení požiadavku na vyslanie dát v danom okamžiku. V podstate sa jedná o podmienku while, ktorá sa opakuje pokiaľ bude dosahovať logickú hodnotu 1 teda true. Slučka požiadavku na vyžiadanie dát posíla každých 55 milisekúnd. Enkodér dokáže pracovať so vzorkovacou frekvenciou až 50Hz pričom úchylkomer Mitutoyo iba 4,5 Hz. Tento fakt bolo treba taktiež zohľadniť a to tak, že úchylkomer bude posílať každú štvrtú hodnotu, preto spracované dáta boli umiestnené do ďalšej slučky a to takzvanej case structure. Tá taktiež pracuje na základe logických operátorov 0 a 1. V poslednom rade bolo nastavené nulovanie hodnôt zariadení v okamžiku spustenia programu. Program je navrhnutý tak, aby nebolo potrebné nulovať zariadenia manuálne pred každým jedným meraním.



Obr. 46 Front panel softvéru LabView použitý pri meraní

Správna funkčnosť programu a kolaborácia zariadení bola overená vo front paneli. Pred spustením programu bolo treba zvoliť na ktorom COM Porte sa nachádza digitálny úchylkomer a na ktorom enkodér. Následne sa program spustil s počiatočnými hodnotami nastavenými na 0, čo bolo potvrdenie, že nulovanie zariadení taktiež funguje správne. Ako je možno vidieť na obr.46, graf vykresľuje závislosť zdvihu úchylkomeru na uhle pootočenia enkodéra. Front panel pôsobí jednoducho a intuitívne, aby ho nemal problém ovládať ktorýkoľvek užívateľ. V poslednom rade bolo z celého súboru .vi vygenerovaná aplikácia .exe

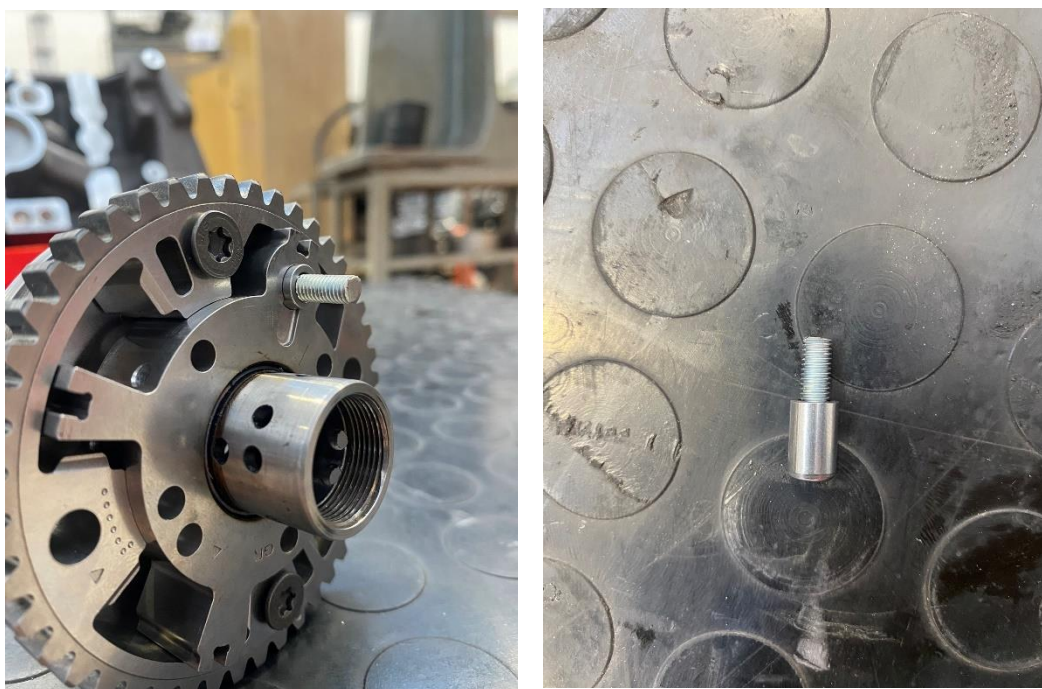
6 PRIEBEH MERANIA

6.1 PRÍPRAVA HLAVY VALCOV NA MERANIE

Z dôvodu, že sa jedná o statické meranie je potreba hlavu valcov pripraviť tak, aby sa jej charakteristiky čo najviac priblížili bežnej prevádzke v motore. To znamená, že je potrebné vyriešiť variabilné časovanie ventilov, prekonanie sily od ventilových pružín a taktiež zaistiť vymedzenie ventilovej vôle medzi vahadlom a vačkovým hriadeľom. Taktiež bolo potrebné vymyslieť druh pohonu, ktorý pre zjednodušenie otáča obidvomi vačkovými hriadeľmi naraz a otáčanie je v rámci možností čo najplynulejšie, pretože pri otáčaní rukou by hodnoty boli nepresné a výsledná krivka by nebola plynulá.

6.1.1 VARIABILNÉ ČASOVANIE VENTILOV A SPOJENIE VAČKOVÝCH HRIADEĽOV

Výstupom merania má byť krivka, ktorá popisuje zdvih ventilu v závislosti na otáčaní vačkovým hriadeľom. Z toho dôvodu môže byť zanedbané časovanie celého ventilového rozvodu. Jediný aspekt, ktorý v tomto prípade bolo potrebné vyriešiť je aretácia pootáčania vačkového hriadeľa, ktoré zabezpečuje variabilné časovanie ventilov. Pri prevádzke hlavy v motore sa pootáčanie zamedzuje pomocou oleja, ktorý je privedený na vymedzovací valček a ten je zatlačený do zadnej steny remenice hriadeľa čím sa zaaretuje. Pri požiadavke zmeny časovania je tento olej odvedený a pomocou pružinky sa valček vysunie a tým je umožnené pootočenie.



Obr. 47 Vlastné riešenie aretácie pootáčania vačkového hriadeľa naľavo

Najjednoduchším riešením bolo zatlačiť valček do zadnej steny remenice pomocou tyčky s priemerom zhodným s vnútorným priemerom valčeka a presnou dĺžkou. Z čelnej strany bude túto tyčku aj s valčekom zatláčať ozubené koleso, ktoré bude zároveň slúžiť aj pre spojenie obidvoch vačkových hriadeľov. Spojenie hriadeľov bolo realizované hlavne z dôvodu zjednodušenia pri meraní, keďže pohon bude zabezpečený pomocou príruby pre pohon čerpadla na jednom z hriadeľov. Druhý hriadeľ je bez tejto príruby, čiže vymyslieť samostatný pohon pre druhý hriadeľ by bola značná komplikácia.

Z dôvodu prenášania malých obvodových síl a otáčania malou rýchlosťou, boli ozubené kolesá vyrobené pomocou technológie 3D tlače. Následne boli nasunuté na vačkové hriadele a pevne spojené pomocou skrutkového spoja. Ako posledná bola overená aretácia variabilného časovania a toto riešenie spĺňalo všetky požiadavky, to znamená že pootáčanie vačkového hriadeľa bolo znemožnené a nevyskytovala sa tam ani žiadna vôľa.



Obr. 48 Spojenie vačkových hriadel'ov pomocou ozubených kolies

6.1.2 PREKONANIE SILY OD VENTILOVÝCH PRUŽÍN

Meranie je zamerané hlavne na kinematiku rozvodového ústrojenstva. Dynamika môže teda v tomto prípade byť zanedbaná. To znamená že tuhosť ventilových pružín nemá žiaden vplyv na výslednú zdvihovú krivku ventilov.

Ventilové pružiny majú vysokú tuhosť. Pri ručnom otáčaní hriadeľom by bol dosť veľký problém silu od ventilových pružín prekonať. Z tohto dôvodu sa pôvodné ventilové pružiny nahradili pružinami s oveľa menšou tuhosťou.

6.1.3 VYMEDZENIE VENTILOVEJ VÔLE

Vymedzenie ventilovej vôle pri danom motore zabezpečujú hydraulické opery. Tie sú schopné vďaka oleju vymedziť vôľu automaticky. Keďže je riešená kinematika ventilového rozvodu, tak vôľa ktorá by nastala medzi vačkou a vahadlom by mala veľmi nepriaznivý vplyv na výsledky merania. Z tohto dôvodu bolo treba vymyslieť mechanizmus, ktorý zabezpečuje vymedzenie vôle ako je hydraulická opera, ale k jeho funkcii nie je potrebný olej.



Obr. 49 Nastaviteľné hydraulické zdvihátka naľavo, vymedzenie ventilovej vôle napravo

Optimálne riešenie bolo navrhnuť a vyrobiť takzvané nastaviteľné zdvihátka. Ako je možné vidieť na obr.48 naľavo, tak oproti pôvodnému hydraulickému zdvihátku sa nastaviteľné zdvihátka výškovo nastavuje vďaka závit. Následne sa vloží do sedla pôvodného hydraulického zdvihátka a osadí sa naň vahadlo. Zdvihátka sa otáčaním nastavuje výškovo, kým nie je vôľa medzi vahadlom a vačkou úplne vymedzená.

6.2 OSADENIE HLAVY VALCOV NA STANOVISKO

Po príprave hlavy valcov bolo možné jej osadenie na stanovisko. Pohon bol zabezpečený pomocou vačkového stojanu, ktorý sa nachádza v laboratóriách ústavu Automobilného a dopravného inžinierstva VUT v Brne. Primárne je tento prístroj určený na optické meranie vačiek, a jeho súčasťou je aj ručný pohon s vysokým prevodovým pomerom. Pre potreby merania sa demontovalo príslušenstvo ako držiaky vačiek a rôzne optické zariadenia. Príslušenstvo býva osadené v drážkach. Tieto drážky sa využili na prichytenie hliníkových profilov. Následne sa hlava priskrutkovala k týmto profilom viz. obr. 52 využitím skrutiek pre montáž výfukovej príruby na hlave valcov. Vďaka využitiu hliníkových profilov je možné hlavu posúvať v rôznych smeroch.

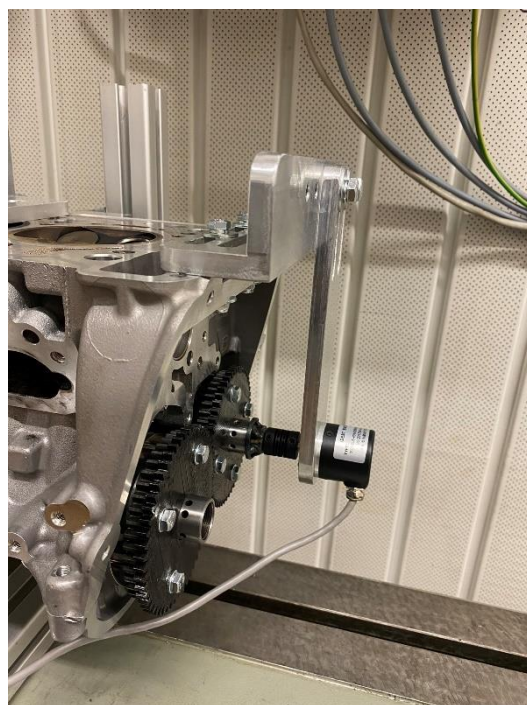
Po prichytení hlavy o profily sa vyvážila digitálnou vodováhou a bola pripravená na spojenie výstupného hriadeľa prístroja a vačkového hriadeľa na hlave valcov. Toto spojenie zabezpečovala spojka, ktorá sa nasunula na výstupný hriadeľ vačkového stojanu a z druhej strany sa do nej vsunula príruby na pohon čerpadla, ktorá sa nachádza priamo na vačkovom hriadeľi. Z dôvodu nízkeho krútiaceho momentu a reakčných síl v spojení bola aj v tomto prípade zvolená výroba pomocou 3D tlače.



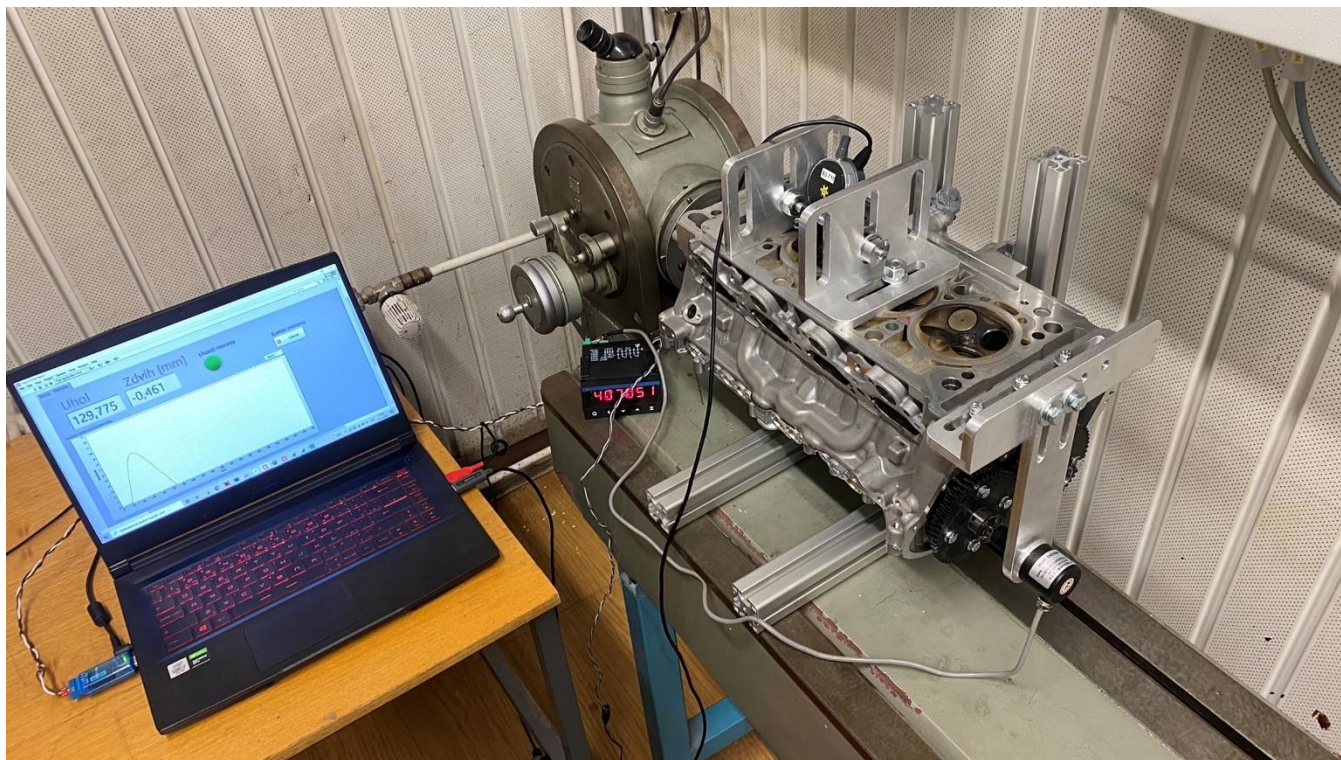
Obr. 50 Spojka medzi vačkovým stojanom a vývodom na čerpadlo na výfukovom vačkovom hriadeľi

6.3 OSADENIE SNÍMAČOV NA HLAVU

Po úspešnej montáži hlavy na stanovisko sa mohlo prejsť na ďalší krok a to inštalácia príslušenstva slúžiaceho k uchyteniu potrebných snímačov na hlavu valcov. Niektoré súčiastky sa museli modifikovať kvôli zjednodušeniu výroby a aj kvôli vylepšenému dizajnu. Podstata však ostala zachovaná ako pri návrhu rámu v kapitole 5.6.3. Pri osadení príslušenstva na hlavu sa potvrdila správnosť návrhu a neboli potrebné žiadne ďalšie úpravy. V poslednom kroku sa nainštaloval na príslušenstvo enkodér a digitálny úchylkomer.



Obr. 51 Osadenie úchylkomera naľavo a enkodéra napravo



Obr. 52 Stanovisko pre meranie ventilového rozvodu

6.4 MERANIE

Pri takto nachystanej hlave aj so snímačmi už bolo potrebné iba pripojiť k nim káble, zapojiť čítač impulzov a pripojiť ich k PC.

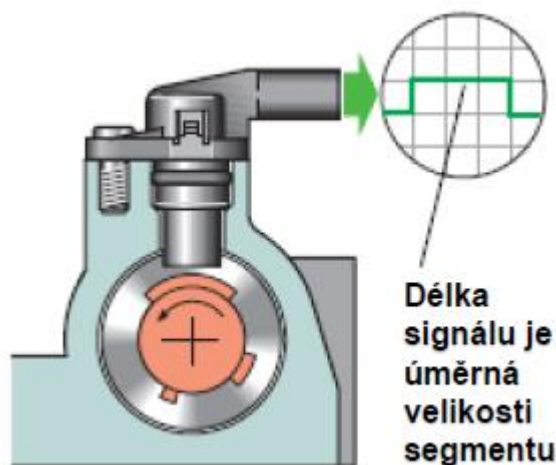
Na začiatku merania sa spustil softvér LabView a v prvých krokoch sa nastavovala správna vzorkovacia frekvencia. Tým, že enkodér ju má vyššiu ako úchylkomer sa muselo dôjsť k správne kompromisu, aby jeden snímač neobmedzoval ten druhý. Nakoniec sa meralo pri frekvencii 4,5 Hz, pretože pri vyššej úchylkomer nepracoval optimálne.

Keď už bolo všetko pripravené na meranie, tak sa ručne začalo otáčať vývodom vačkového stojanu, ktorý vďaka vysokému prevodovému pomeru prenášal nízke otáčky na vačkový hriadeľ. Meranie vyžadovalo aj v prípade vysokého prevodového pomeru pomalé otáčanie, aby sa zaznamenalo čo najviac hodnôt a to zaručilo vysokú presnosť. Ako prvý sa meral zdvih výfukového ventilu. Následne sa úchylkomer aj enkodér premiestnili na stranu nasávacích ventilov. Najprv sa odmeral zdvih ventilu ovládaný malým profilom vačky a následne sa profil ručne prepol na veľký profil a odmeral sa taktiež.

Meranie sa opakovalo približne 6 krát, aby sa čo najviac eliminovala chyba merania.

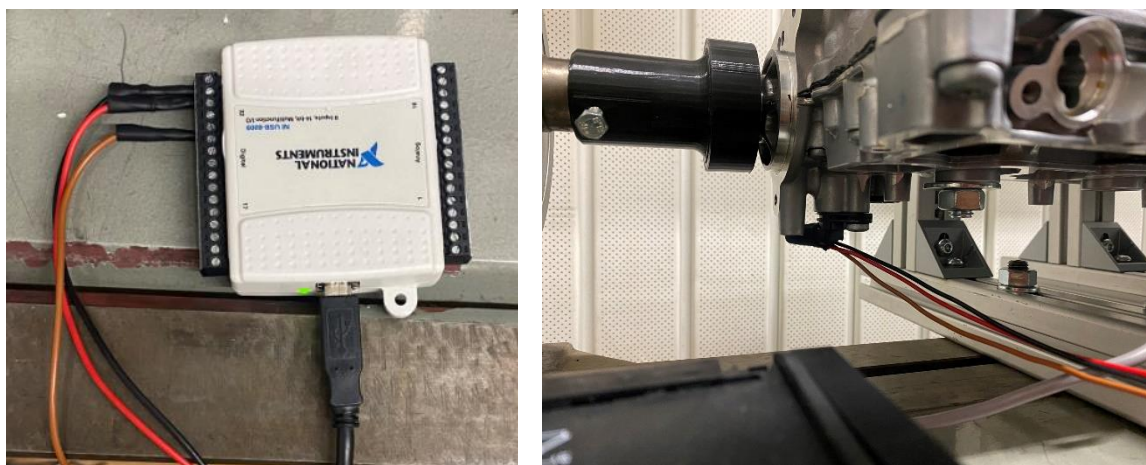
6.5 MERANIE ODOZVY SNÍMAČA POLOHY VAČKOVÉHO HRIADEĽA

Pre dokázanie univerzálnosti stanoviska bola na stanovisku odmeraná aj odozva snímača polohy vačkového hriadeľa. Ten pracuje na princípe Hallovho efektu. Na vačkovom hriadeľi sa nachádzajú tri respektíve štyri segmenty, ktoré tento snímač sleduje. Vždy keď pod snímačom prechádza segment sa indukuje napätie. Dĺžka napäťového signálu je úmerná veľkosti prechádzajúceho segmentu. Snímač zaisťuje HÚ piestu prvého valca pri kompresii. Táto informácia je nutná pre sekvenčné vstrekovanie a pre reguláciu klepania.



Obr. 53 Princíp funkcie snímača polohy vačkového hriadeľa [21]

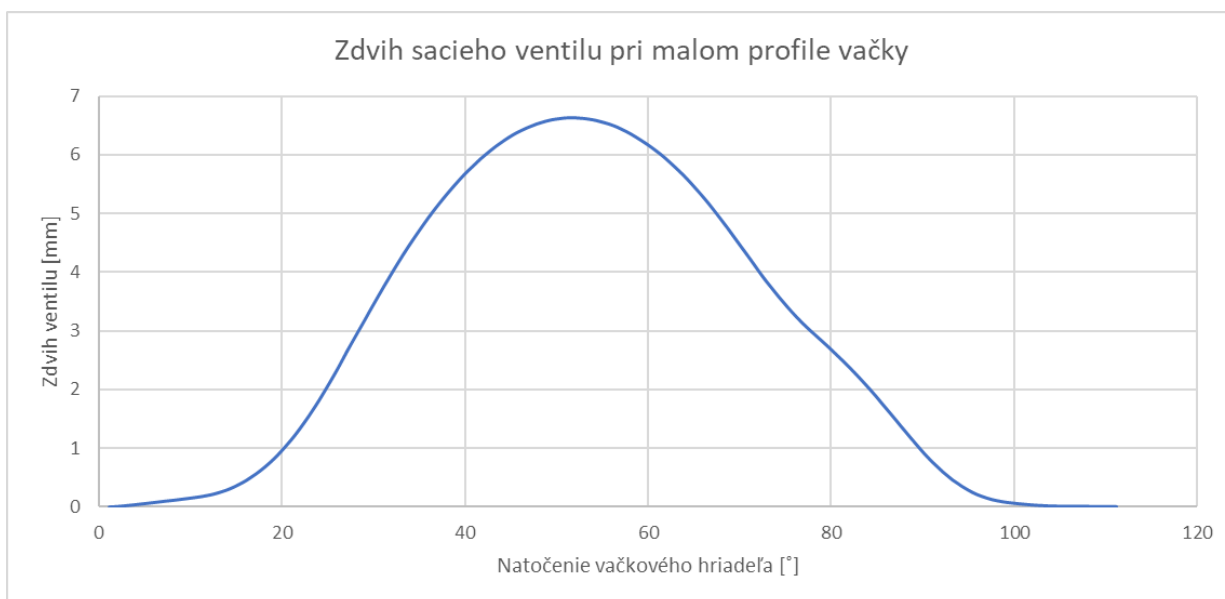
Konektor snímača obsahuje tri vývody. Jeden je na napájanie, kde je potrebné priviesť napätie veľkosti 5V, druhý prenáša hallove napätie a tretí je uzemnenie. Tieto vývody sa následne pripojili do meracej karty USB-6009 od spoločnosti National Instruments. Po pripojení karty k PC sa skontrolovala komunikácia v softvéri NI-Max. Po úspešnom verifikovaní sa pridal snímač do slučky blokového diagramu na obr.45. Následne sa začalo merať a meranie prebiehalo rovnako ako pri meraní zdvihu ventilu v závislosti na natočení vačkového hriadeľa. Výstupom bol digitálny signál, ktorý nadobúdval hodnoty 0 až 1 v závislosti na natočení vačkového hriadeľa a teda na polohe segmentov nachádzajúcich sa na ňom .



Obr. 54 Meracia karta USB-6009 naľavo, vývod od snímača polohy vačkového hriadeľa napravo

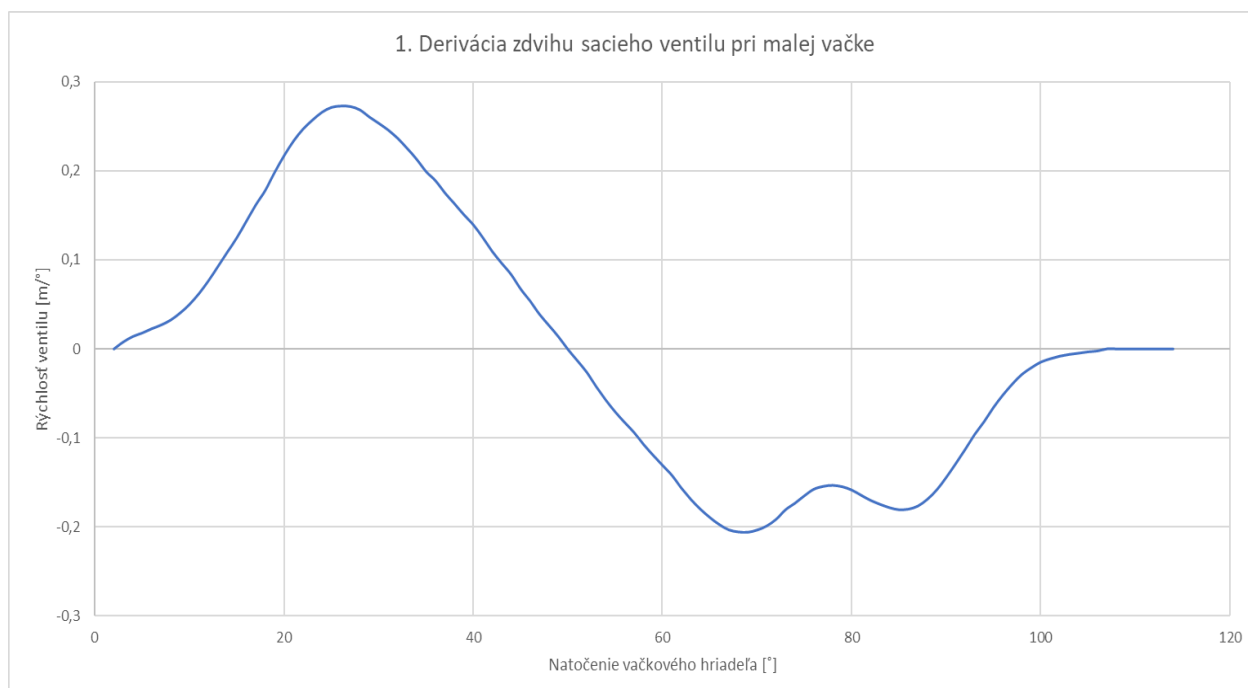
7 VÝSLEDKY MERANIA

7.1 ZDVIH SACIEHO VENTILU PRI MALOM PROFILE VAČKY



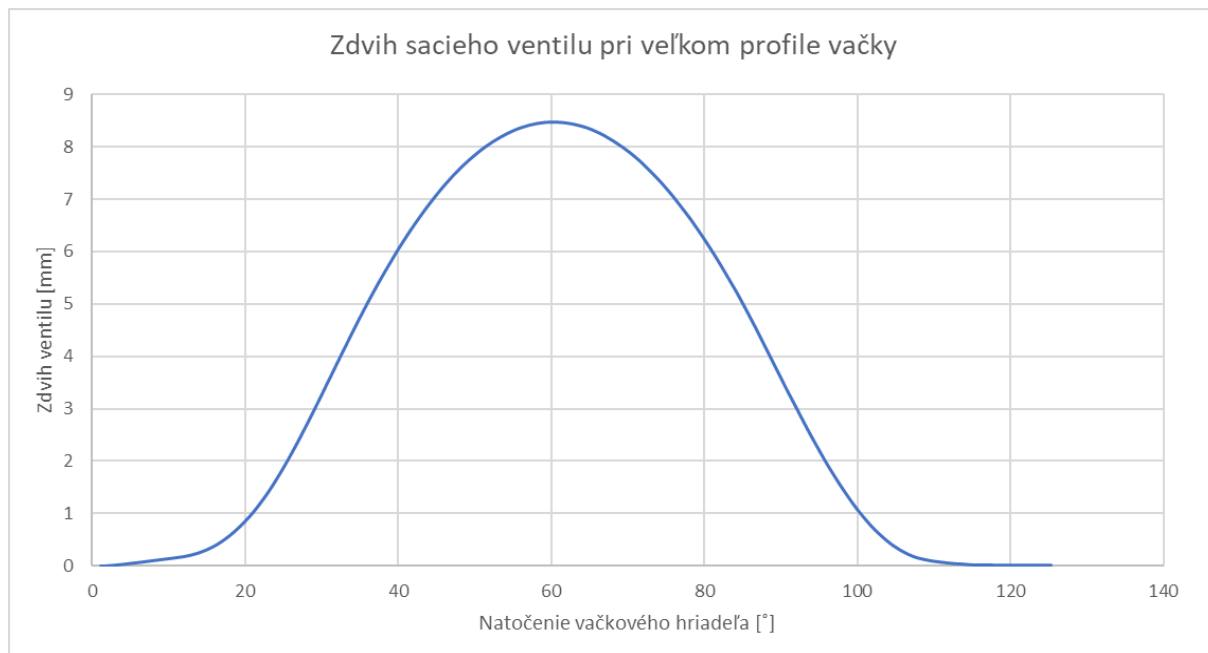
Obr. 55 Zdvih sacieho ventilu pri malom profile vačky v závislosti na natočení vačkového hriadeľa

Maximálny zdvih ventilu pri malom profile vačky bol okolo 6,75 mm. Maximálna hodnota derivácie priebehu sacieho ventilu pri malom profile vačky je 0,27 m/°.



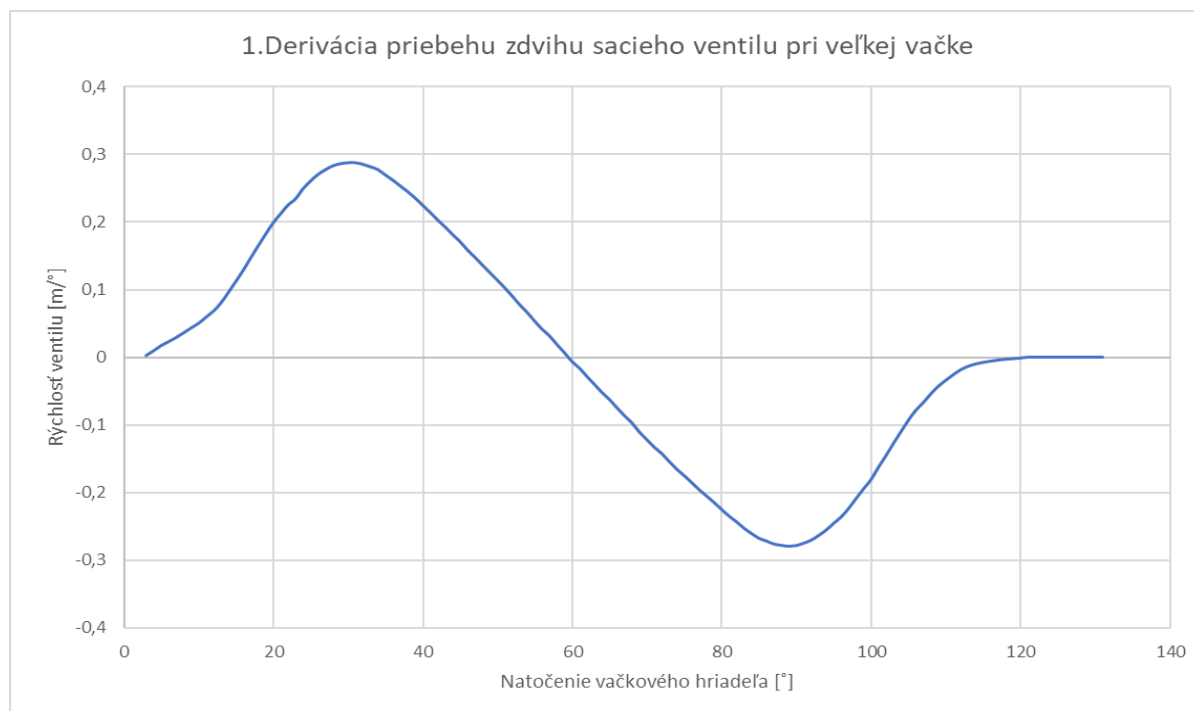
Obr. 56 1. derivácia priebehu sacieho ventilu pri malom profile vačky v závislosti na natočení vačkového hriadeľa

7.2 ZDVIH SACIEHO VENTILU PRI VEĽKOM PROFILE VAČKY



Obr. 57 Zdvih sacieho ventilu pri veľkom profile vačky v závislosti na natočení vačkového hriadeľa

Maximálny zdvih ventilu pri veľkej vačke sacieho ventilu je 8,54 mm. Maximálna hodnota derivácie priebehu sacieho ventilu pri veľkom profile vačky je 0,28 m/°.



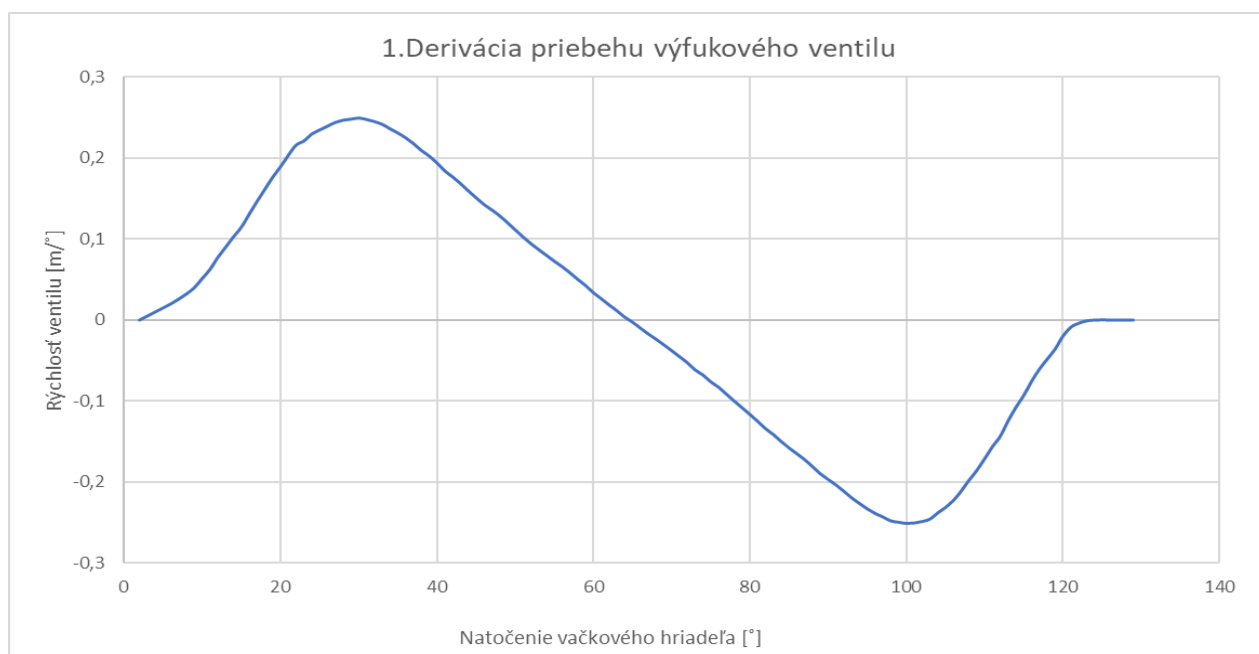
Obr. 58 1. derivácia priebehu sacieho ventilu pri veľkom profile vačky v závislosti na natočení vačkového hriadeľa

7.3 ZDVIH VÝFUKOVÉHO VENTILU



Obr. 59 Zdvih výfukového ventilu v závislosti na natočení vačkového hriadeľa

Maximálny zdvih výfukového ventilu je okolo 8,02 mm. Maximálna hodnota derivácie priebehu výfukového ventilu je 0,25 m/°.

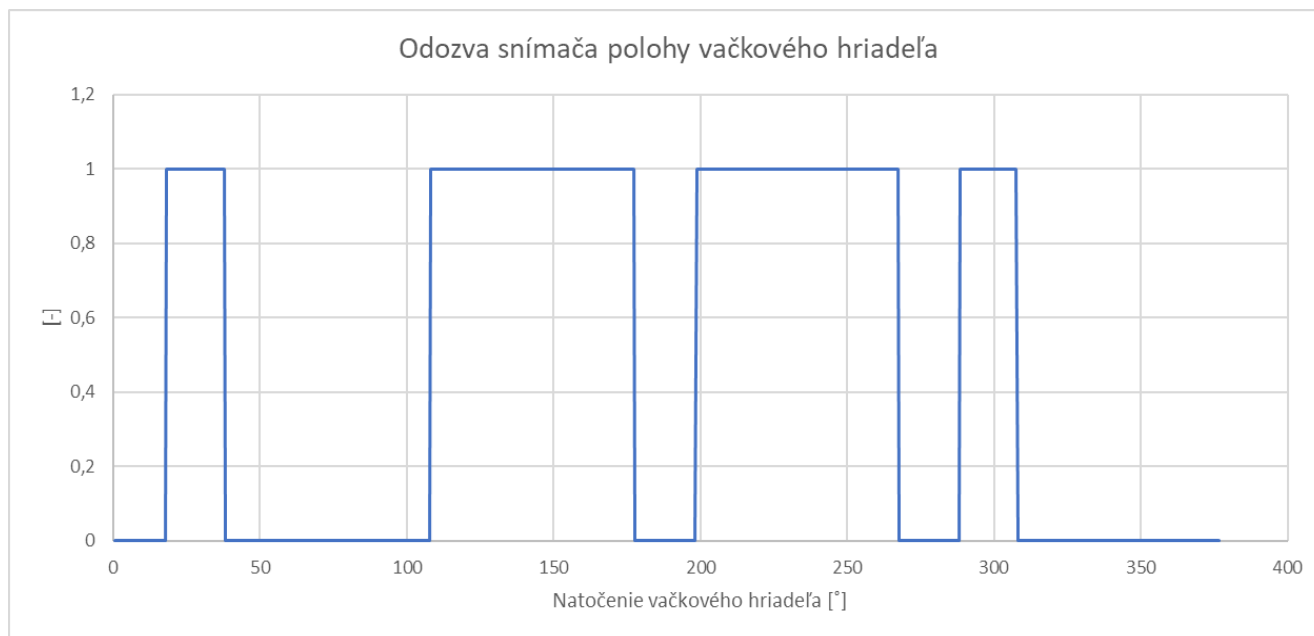


Obr. 60 1. derivácia priebehu výfukového ventilu v závislosti na natočení vačkového hriadeľa

7.4 HALLOV SNÍMAČ POLOHY VAČKOVÉHO HRIADEĽA



Obr. 61 Zdvih výfukového ventilu v závislosti na natočení vačkového hriadeľa



Obr. 62 Odozva Hallovho snímača polohy vačkového hriadeľa v závislosti na natočení vačkového hriadeľa

ZÁVER

Cieľom diplomovej práce bolo vytvoriť univerzálne stanovisko, ktoré umožňuje odmeranie zdvihu ventilu v závislosti na pootočení vačkového hriadeľa. Aby návrh a aj následné zostrojenie stanoviska spĺňalo dané požiadavky, bolo potrebné v teoretickej časti si ozrejmiť typy ventilových rozvodov a vzájomne väzby medzi časťami ventilového rozvodu. Taktiež sa robil prehľad meracích prípravkov, avšak ani jeden z nich nepopisoval priamo zdvih ventilu ale len natočenie vačkového hriadeľa.

Prvým krokom bola vhodná voľba snímačov použitých na meranie. Ako prvá možnosť sa javilo použiť lineárny potenciometer TRS v spolupráci s D/A respektíve A/D prevodníkom OMX na meranie zdvihu ventilu a enkodér ISC3806 s čítačom impulzov od Orbit Merret. Lineárny potenciometer avšak nespĺňal požiadavky na presnosť. Nepresnosť bola zapríčinená hlavne šumom analógového signálu, vďaka ktorému sa s potenciometrom dalo merať iba na stotiny milimetra, čo je v dnešnej dobe nevyhovujúca presnosť. Preto sa prešlo k variante digitálneho úchylkomer značky Mitutoyo, ktorý obsahoval digitálny výstup. Už prvé skúšky ukázali že úchylkomer meria s presnosťou na tisícinu milimetra bez žiadneho šumu, čo bola vyhovujúca alternatíva. So spojením presnosti enkodéra, ktorý dokáže zaznamenať pootočenie o $0,025^\circ$ pri presnosti deklarovanej výrobcom a to $\pm 0,01\%$ z rozsahu merania sa jednalo o solídny základ presnosti merania. Výstupné signály zo snímačov boli spracované v programe LabView.

Následne sa musel vymyslieť spôsob uchytenia snímačov priamo na hlavu valcov. Prvým variantom bolo pripevnenie snímačov na rám vytvorený z hliníkových profilov. Druhým a tretím variantom bolo upevnenie snímačov priamo na hlavu valcov za pomoci hliníkového L profilu a oceľového plechu. Tretí variant sa od druhého odlišoval iba v osadení enkodéra a to tak že sa namiesto oceľového plechu použil taktiež hliník. Všetky tieto varianty boli vytvorené tak, aby boli čo najviac univerzálne a aby sa dali aplikovať na väčšinu hláv valcov. Následne sa v software od Ansys vykonala modálna analýza všetkých variant. Pri tomto hodnotiacom kritériu mal síce najväčšiu vlastnú frekvenciu prvý, avšak pre vyššiu presnosť merania bolo lepšie, aby sa snímače namontovali priamo na hlavu valcov, preto sa s ním už ďalej neuvažovalo. Ďalšie hodnotiace kritérium bolo statická štrukturálna analýza. Výsledkom bola deformácia rádovo v $10^{-5}mm$, čo je pre meranie zanedbateľný údaj. Preto sa zvolil tretí variant z dôvodu jednoduchšej vyrobiteľnosti.

Cena stanoviska sa odhaduje na približne 800€. Táto cena reprezentuje snímače, inštalačný softvér k nim a taktiež 1m hliníkového L profilu potrebného na uchytenie snímačov bez spojovacieho materiálu ako takého.

S vyrobeným príslušenstvom a s fungujúcim softvérom sa mohlo pristúpiť k zostaveniu stanoviska. Predtým ešte bolo potrebné prichystať hlavu valcov a to hlavne z hľadiska vymedzenia ventilovej vôle a taktiež aretáciou pootáčania vačky z dôvodu variabilného časovania ventilov. Pre pohon vačkových hriadeľov bol použitý vačkový stôl v laboratóriách Automobilného a dopravného inžinierstva a to hlavne kvôli vysokému prevodovému pomeru.

Meranie prebiehalo na hlave valcov motora 2.0 TFSI poskytnutej od spoločnosti Garrett Motion. Merali sa tri typy zdvihu ventilu a každé meranie sa opakovalo 6krát. Prvý bol sací ventil, ktorý otváral malý profil vačky. Následne sa odmeral zdvih sacieho ventilu ovládaného veľkou vačkou a nakoniec zdvih výfukového ventilu. Krivky zdvihu sú plynulé. Avšak toto tvrdenie bolo treba aj dokázať.

Najjednoduchší spôsob bola derivácia všetkých priebehov. Derivácia funguje ako jednoduchý spôsob overenia tečnosti. Priebehy derivácií ventilov sú plynulé a spojité bez žiadnych nežiadúcich javov.

Stanovisko nemusí slúžiť iba na meranie ventilového zdvihu v závislosti na pootočení vačkového hriadeľa. Univerzálnosť bola dokázaná aj pri meraní odozvy snímača polohy vačkového hriadeľa, ktorý pracuje na základe Hallovhovho efektu. Odozva tohto snímača je dôležitá pre riadiacu jednotku motora.

Z výsledkov je možné konštatovať, že meranie prebehlo úspešne a stanovisko je reálne využiteľné a funkčné, čím boli splnené ciele diplomovej práce.

POUŽITÉ INFORMAČNÉ ZDROJE

- [1] STONE, R. *Introduction to Internal Combustion Engines*. Fourth Edition. Basingstoke: Palgrave Macmillan, 2012. 516 s. ISBN 978-1-137-02829-5.
- [2] DRÁPAL, L., VOPÁŘIL, J. Shape Design of a Piston Ring. In: *Transport Means 2016: Proceedings of the 20th International Scientific Conference*. Kaunas: Kaunas University of Technology, 2016, s. 767-771. ISSN 1822-296 X.
- [3] HEISLER, Heinz. *Advanced engine technology*. 2002. Warrendale: SAE International, 1995. ISBN 1-56091-734-2.
- [4] VLK, František. *Vozidlové spalovací motory*. Brno: František Vlk, 2003. ISBN 80-238-8756-4.
- [5] RAUSCHER, Jaroslav. *Spalovací motory*. 2005. Brno: Vysoké učení technické v Brně.
- [6] NATIONAL RESEARCH COUNCIL. *Cost, Effectiveness, and Deployment of Fuel Economy Technologies for Light-Duty Vehicles*. Washington D.C: THE NATIONAL ACADEMIES PRESS, 2015.
- [7] BMW GROUP UNIVERSITY. *Technical training: N20 Engine*. 2013.
- [8] JAN, Zdeněk a Bronislav ŽDÁNSKÝ. *Automobily 4: příslušenství*. 2. vyd. Brno: AVID, 2001, 305s.
- [9] BASSHUYSEN, Richard van a Fred SCHÄFER. *Internal combustion engine handbook: basics, components, system, and perspectives*. 2nd edition. Warrendale: SAE International, 2016, xix, 1130 stran : ilustrace (převážně černobílé). ISBN 978-0-7680-8024-7.
- [10] PIŠTĚK, Václav. *Přednáška :Obrysy vaček a jejich zdvihové závislosti*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 7.
- [11] CAMSHAFT. <https://www.mantruckandbus.com> [online]. [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: <https://www.mantruckandbus.com/en/company/glossar/camshaft.html>
- [12] DUSIL, Tomáš. Desmodromický rozvod. [Www.auto.cz](http://www.auto.cz) [online]. 2018 [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/galerie/technika/61228/desmodromicky-rozvod-motoru-specialita-ktou-pouziva-jedina-znacka?foto=4>
- [13] Audi valvelift system. <https://www.audi-technology-portal.de> [online]. 2021 [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: https://www.audi-technology-portal.de/en/drivetrain/engine-efficiency-technologies/audi-valvelift-system_en

- [14] Does Vanos control all valves similarly or each cylinders' valves alone?. <https://www.bimmerfest.com> [online]. 2014 [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: <https://www.bimmerfest.com/threads/question-does-vanos-control-all-valves-similarly-or-each-cylinders-valves-alone.438841/page-2>
- [15] Manufacturing Composite Camshafts. *MTZ worldwide*. 2003, (64), 3.
- [16] Degreeing Your Camshaft Made Easy With Crower. <https://www.enginelabs.com> [online]. [cit. 2022-03-31]. Dostupné z: <https://www.enginelabs.com/news/video-degreeing-your-camshaft-made-easy-with-crower/>
- [17] Quick Cam Checker to Measure Cam Lift, Duration, Centerlines, etc. Quickly on Engine [online]. [cit. 2022-03-31]. Dostupné z: <http://performancetrends.com/Quick-Cam-Checker.htm>
- [18] 543-690B 12,7mm, 0,001mm, ploché zadní víčko [online]. [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: [https://shop.mitutoyo.cz/web/mitutoyo/cs_CZ/mitutoyo/01.04.01A/543-690B/\\$catalogue/mitutoyoData/PR/543-790B/index.xhtml](https://shop.mitutoyo.cz/web/mitutoyo/cs_CZ/mitutoyo/01.04.01A/543-690B/$catalogue/mitutoyoData/PR/543-790B/index.xhtml) <http://www.cncshop.cz> [online]. [cit. 2022-03-31]. Dostupné z: <http://www.cncshop.cz/s3806-rotacni-inkrementalni-enkoder>
- [19] OMX 380PM RYCHLÝ IZOLOVANÝ PŘEVODNÍK • U/I > U/I. <https://www.merret.cz> [online]. Praha [cit. 2022-04-07]. Dostupné z: <https://www.merret.cz/omx-380pm>
- [20] Position Transducer with return spring potentiometric up to 100 mm. <https://www.novotechnik.com> [online]. [cit. 2022-04-07]. Dostupné z: <https://www.novotechnik.com/pdfs/TRTRS.pdf>
- [21] DUNDÁLEK, Radim. *Přednáška: Benzínové motory 1,4-16V 55/74kW*. Brno: Vysoké učení technické v Brně.

ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV

h_{max}	[mm]	maximálna výška nosa vačky
r_1	[mm]	polomer krivosti úsečky vačky
r_2	[mm]	polomer krivosti úsečky vačky
<i>A/D</i>		Analóg/Digitálny prenos
<i>COM PORT</i>		Communication Port (Komunikačný port)
<i>Cr-Mn</i>		Chromid- Mangán
<i>Cr-Si</i>		Chromid-Kremík
<i>D/A</i>		Digitál/ Analóg prenos
<i>DOHC</i>		Double Over Head Camshafts (dva vačkové hriadele v hlave valcov)
<i>HÚ</i>		Horná úvrat'
<i>LabView</i>		Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench
<i>NOx</i>		Oxidy dusíka
<i>OHC</i>		Over Head Camshaft (vačkový hriadeľ v hlave valcov)
<i>OHV</i>		Over Head Valves (ventily v hlave valcov)
<i>SOHC</i>		Single Over Head Camshaft (jeden vačkový hriadeľ v hlave valcov)
<i>SV</i>		Side Valves (ventily po strane valca)
<i>SV</i>		Side Valves (ventily na strane valca)
<i>TFSI</i>		Turbo Fuel Stratified Injection
<i>USB HID</i>		USB pre Human Interface Devices
<i>VTEC</i>		Valve Timing Electronic Control (systém variabilného časovania)
<i>VVL</i>		Variable Valve Lift (systém variabilného zdvihu ventilov)
ε	[°]	uhol otvorenia boku vačky
ρ	[mm]	polomer kladivkového zdvihátka