



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

ANALÝZA VARIABILITY SNÍMAČŮ POLOHY KLIKOVÉHO A VAČKOVÉHO HŘÍDELE

ANALYSIS OF CRANK AND CAM SHAFT POSITION SENSOR VARIABILITY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Samuel Riečica

VEDOUČÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Kamil Šebela

BRNO 2024

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	Samuel Riečica
Studijní program:	Základy strojního inženýrství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Kamil Šebela
Akademický rok:	2023/24

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:

Analýza variability snímačů polohy klikového a vačkového hřídele

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Spalovací motor je řízený motorovou jednotkou (ECU) na základě různých signálů ze snímačů. Dva hlavní signály jsou poloha klikového a vačkového hřídele. Cílem této práce je měření variability vybraných snímačů a zhodnocení možnosti výběru nebo překalibrování snímačů pro zlepšení řízení spalovacího motoru.

Cíle bakalářské práce:

Rešerše používaných snímačů polohy klikového a vačkového hřídele.

Sestavení měřicího řetězce pro měření charakteristik snímačů.

Naměření a zpracování charakteristiky snímačů.

Vyhodnocení naměřených charakteristik.

Seznam doporučené literatury:

BOSCH GMBH, Robert. Automotive Handbook. 11th edition. John Wiley and Sons, 2022, 2048 s. ISBN 978-1-119-91191-3.

PicoScope® 6: PC Oscilloscope Software [on-line]. Pico Technology, 2020, 239 s. [cit. 2023-09-15]. Dostupné z: <https://www.picotech.com/download/manuals/picoscope-6-users-guide.pdf>.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

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

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Táto bakalárska práca sa zaoberá pracovnými charakteristikami snímačov polohy kľukového a vačkového hriadeľa využívaných v pohonnej jednotke pre zabezpečenie správneho vstrekovania paliva a zapalovania palivovej zmesi. Experimentálnym porovnaním charakteristík snímačov bola zisťovaná ich variabilita. V prvej fáze bola vykonaná rešerš používaných typov a prevedení senzorov. Následne bolo navrhnuté a skonštruované meracie zariadenie, ktoré predstavovalo zjednodušený model hriadeľa pre snímanie charakteristík. Experiment bol zrealizovaný na štatistickej vzorke 100 kusov snímačov využívajúcich Hallov efekt. Charakteristiky senzorov boli zaznamenávané a vyhodnocované pomocou osciloskopu s príslušným digitálnym softvérom. V závere práce bolo vykonané štatistické spracovanie nameraných dát. Z výsledkov vyplýva, že variabilita snímačov polohy kľukového a vačkového hriadeľa môže mať vplyv na výkonové charakteristiky motora a produkované emisie výfukových plynov.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

snímač polohy, kľukový hriadeľ, vačkový hriadeľ, variabilita

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the working characteristics of crankshaft and camshaft position sensors used in the power unit to ensure correct injection and ignition of the fuel mixture. Their variability was determined by experimental comparison of sensor characteristics. Search of the types and designs of sensors used was carried out in the first phase. Measuring device, which represented a simplified shaft model for sensing characteristics, was designed and constructed in the next step. The experiment was conducted on a statistical sample of 100 pieces of sensors using the Hall effect. The characteristics of the sensors were recorded and evaluated using an oscilloscope with appropriate digital software. Statistical processing of the measured data was performed at the end of the thesis. The results show that the variability of the crankshaft and camshaft position sensors can have an impact on engine performance characteristics and exhaust emissions produced.

KEYWORDS

position sensor, crankshaft, camshaft, variability

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

RIEČICA, Samuel. *Analýza variability snímačů polohy klikového a vačkového hřídele* [online]. Brno, 2024 [cit. 2023-12-26]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157286>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Kamil Šebela.



ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že táto práca je mojím pôvodným dielom, vypracoval som ju samostatne pod vedením Ing. Kamila Šebelu a s využitím informačných zdrojov uvedených v zozname.

V Brne dňa 24. mája 2024

.....

Samuel Riečica

POĎAKOVANIE

Týmto by som rád poďakoval vedúcemu práce Ing. Kamilovi Šebelovi, za jeho cenné rady, poskytnuté informácie a materiál, cenné pripomienky a za jeho trpezlivosť, ochotu a odborné vedenie počas celého spracovania bakalárskej práce. Ďalej by som chcel poďakovať mojej rodine a priateľom za neustálu podporu v priebehu celého štúdia.

OBSAH

Úvod	11
1 Zážihový spaľovací motor	12
1.1 Princíp činnosti	12
1.2 Vstrekovanie paliva	13
1.3 Zapalovanie	14
2 Snímač polohy kľukového hriadeľa	15
2.1 Kľukový hriadeľ	15
2.2 Funkcia snímača polohy kľukového hriadeľa	16
2.3 Typy snímačov	17
2.3.1 Indukčný snímač polohy kľukového hriadeľa	17
2.3.2 Snímač s Hallovým efektom	17
2.3.3 Optický snímač polohy kľukového hriadeľa	18
2.4 Výpočet polohy kľukového hriadeľa	18
2.5 Výpočet segmentovaného času a otáčok	18
3 Snímač polohy vačkového hriadeľa	19
3.1 Vačkový hriadeľ	19
3.2 Funkcia snímača polohy vačkového hriadeľa	20
3.3 Typy snímačov	20
3.3.1 Magnetický snímač polohy vačkového hriadeľa	20
3.3.2 Snímač s Hallovým efektom	21
3.3.3 Snímač striedavého prúdu	22
3.4 Výpočet uhlu natočenia vačkového hriadeľa pri využití Hallovho snímača	22
4 Návrh a konštrukcia meracieho zariadenia	23
4.1 Pohon a uchytenie	24
4.2 Uloženie snímačov	24
4.3 Model hriadeľa a jeho uloženie	25
4.4 Regulácia otáčok	26
4.5 Zostavenie meracieho zariadenia	27
5 Meranie charakteristík snímačov	28
5.1 Merací prístroj	28
5.2 Typy analyzovaných snímačov polohy kľukového a vačkového hriadeľa	28
5.3 Postup merania	30
5.4 Referenčný signál	32
5.5 Vyhodnocovanie dát	33
6 Výsledky merania	35
6.1 Výsledky 1. časti experimentu	35
6.2 Výsledky 2. časti experimentu	37
6.3 Opakovateľnosť merania	38
6.4 Zhodnotenie výsledkov experimentu	39

Záver	41
Použité informačné zdroje.....	42
Zoznam použitých skratiek a symbolov	45
Zoznam príloh	46

ÚVOD

Napriek tomu, že sa automobilový priemysel v súčasnosti ubera cestou elektromobility a alternatívnych pohonov, stále väčšina produkovaných vozidiel disponuje spaľovacím motorom, či už zážihovým alebo vznetrovým. Ani snaha o ukončenie výroby vozidiel so spaľovacími motormi však nezastavila vývoj a technický pokrok v tejto oblasti. Nezmenila na tom nič ani Európskym parlamentom schválená nová legislatíva - norma Euro 7, ktorá je oproti pôvodnému návrhu menej prísna a pravidlá pre emisné limity výfukových plynov tak zostávajú na úrovni normy Euro 6.

Hodnoty emisií výfukových plynov sa výrobcovia vozidiel snažia znižovať konštrukčnými úpravami motora (variabilné časovanie ventilov, variabilný kompresný pomer, viacventilové hlavy valcov, priame vstrekovanie paliva), úpravami prevádzkových podmienok motora (zrýchlené zahrievanie, optimalizácia vstrekovania paliva) alebo využitím prídavných zariadení a elektronických systémov (katalyzátory, riadená recirkulácia výfukových plynov, regulácia vypínaním valcov).

Zosúladenie optimálnej spolupráce jednotlivých častí hnacieho agregátu je úlohou riadiaceho systému. Riadiace a regulačné obvody vo vozidlách sú väčšinou realizované prostredníctvom snímačov, výkonových členov, prepojených s elektronickými riadiacimi jednotkami a konkrétnym softvérom pre danú verziu vozidla. Riadiaci systém spaľovacieho motora je veľmi komplikovaný a zabezpečuje množstvo funkcií. Medzi najdôležitejšie funkcie možno zaradiť riadenie vstrekovania a zapalovania, t. j. optimalizáciu veľkosti dávky paliva a predstihu zážihu. Dôležitú úlohu v tomto procese zohrávajú snímače polohy kľukového a vačkového hriadeľa, ktoré odosielať signály do riadiacej jednotky motora a tým zabezpečujú správne načasovanie vstrekovania paliva a následné zapálenie palivovej zmesi.

Hlavným atribútom pri výbere témy bakalárskej práce bolo konkrétne využitie výsledkov v praxi. Cieľom tejto bakalárske práce je vykonať analýzu variability snímačov polohy kľukového a vačkového hriadeľa a posúdiť na základe nameraných hodnôt, či zistená variabilita môže mať vplyv na výkonové a emisné charakteristiky motora. V prípade potvrdenia tejto hypotézy, budú môcť byť výsledky tejto bakalárskej práce využité na ďalšiu analýzu vplyvu ich charakteristík na výkon motora, spotrebu paliva či produkciu emisií výfukových plynov.

1 ZÁŽIHOVÝ SPALŮVACÍ MOTOR

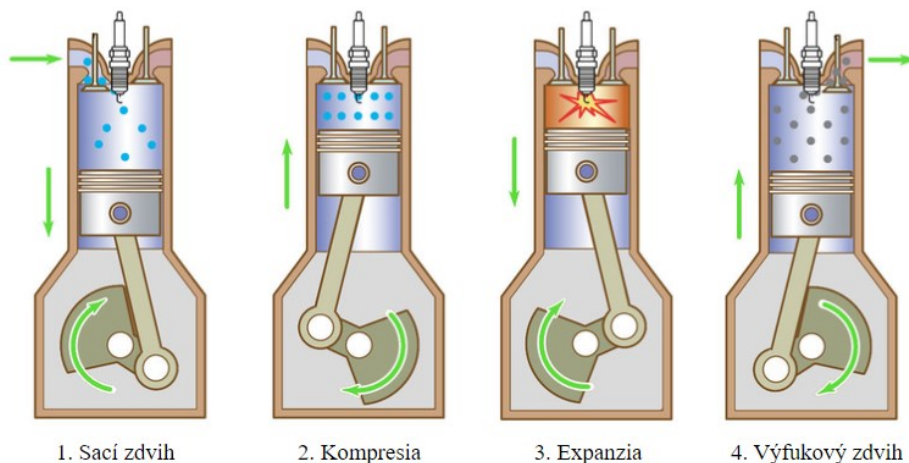
Zážihový spalovací motor, vid' obrázok 1, je tepelný stroj, ktorý zabezpečuje spaľovaním palivovej zmesi premenu chemickej energie na mechanickú energiu. Pri spaľovaní paliva dochádza v motore k uvoľneniu tepla, zvýšeniu teploty a taktiež k nárastu tlaku a merného objemu. V dôsledku zmien týchto veličín nastáva pohyb piestov vo valcoch motora, vďaka čomu sa získava mechanická práca. Spaľovacie motory preto nachádzajú uplatnenie v mnohých odvetviach, ale najvýznamnejším miestom pre ich použitie je automobilový priemysel.



Obrázok 1 Zážihový spalovací motor [1]

1.1 PRINCÍP ČINNOSTI

Základnými časťami spaľovacieho motora sú valec a pohyblivý piest. Expandujúce plyny vzniknuté vo valci pri spaľovaní palivovej zmesi tlačia na piest, ktorý prostredníctvom ojnice otáča kľukový hriadeľ. Následne dochádza k prenosu energie na kolesá vozidla využitím prevodového systému hnacieho ústrojenstva. Väčšina spaľovacích motorov používa štvortaktný cyklus, vid' obrázok 2, ktorého názov vyplýva z faktu, že na dokončenie jedného cyklu motora sú potrebné štyri úplné zdvihy piestu. Činnosť motora so štvortaktným cyklom sa rozdeľuje do štyroch častí: sací zdvih, kompresný zdvih, expanzný zdvih a výfukový zdvih [2].

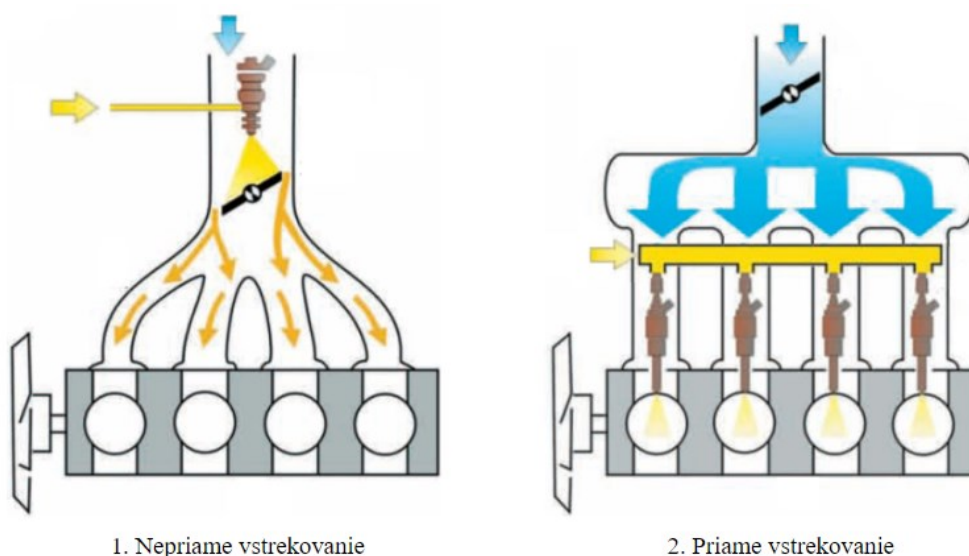


Obrázok 2 Pracovný cyklus štvortaktného motora [3]

V priebehu sacieho zdvihu dochádza k nasávaniu zmesi vzduchu a paliva do valca. Pohyb piesta smerom nadol zabezpečuje vytvorenie čiastočného vákua vo valci, vďaka čomu zmes vzduchu a paliva prúdi do valca okolo otvoreného sacieho ventilu [2]. Nasleduje kompresný zdvih, ktorý začína v momente, keď je piest v dolnej úvratí. Pri pohybe piesta smerom nahor dochádza k stláčaniu palivovej zmesi. Aby došlo ku kompresii, sacie aj výfukové ventily sú zatvorené. Následne piest dosiahne hornú úvrat' a dochádza k expanzii. Zapal'ovacia sviečka zapáli stlačenú palivovú zmes. Plyny vzniknuté pri horení zmesi tlačia piest nadol, čím vytvárajú mechanickú prácu. Ventily zostávajú zatvorené tak, aby všetka sila pôsobila na piest. Po spálení zmesi vzduchu a paliva nasleduje výfukový zdvih, pri ktorom piest vytláča spálené plyny z valca okolo otvoreného výfukového ventilu.

1.2 VSTREKOVANIE PALIVA

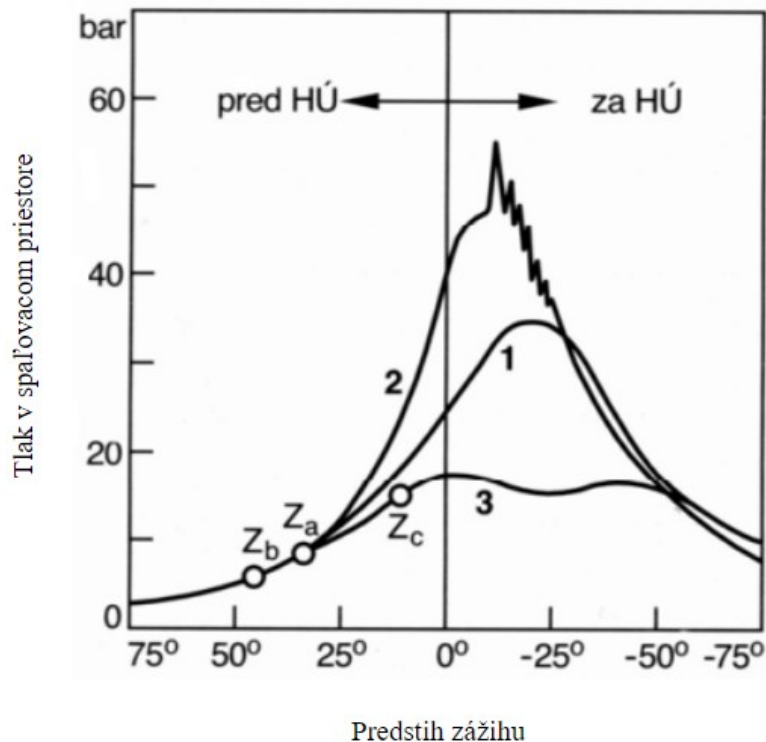
Vstrekovací systém pohonnej jednotky zabezpečuje vytvorenie zmesi paliva so vzduchom v presne definovanom pomere. Vstrekované palivo je prostredníctvom tlaku palivového čerpadla rozprášené do nasávaného vzduchu pomocou vstrekovacích ventilov. Pre zážihový motor rozlišujeme dva typy vstrekovania: priame a nepriame, vid' *obrázok 3*. Pri nepriamom vstrekovaní dochádza k vstreku paliva do sacieho potrubia, sacieho kanálu alebo do komory škrtiacej klapky, a preto sa palivová zmes vytvára mimo spaľovacieho priestoru. Priame vstrekovanie je založené na vstreku presného množstva paliva priamo do valcov motora, t. j. spaľovacieho priestoru. Vnútna tvorba zmesi obmedzuje kondenzačné straty paliva na stenách nasávacieho potrubia [2]. Priame vstrekovanie benzínu so správnym načasovaním vstrelu a reguláciou množstva paliva zabezpečí zníženie spotreby paliva a nižšie emisie výfukových plynov pri súčasnej maximalizácii výkonu motora.



Obrázok 3 Typy vstrekovania paliva [4]

1.3 ZAPALOVANIE

V zážihových spalovacích motoroch zohráva hlavnú úlohu v procese zapalovania zapalovacia sviečka produkujúca iskru, ktorá slúži k zapáleniu palivovej zmesi tvorenej vzduchom a palivom. Doba trvania medzi zapálením palivovej zmesi a jej úplným spálením je približne 2 ms [2]. Pre dosiahnutie optimálnych charakteristík motora musí zapalovacia iskra preskočiť v takom predstihu, aby bol dosiahnutý správny spaľovací tlak pri akýchkoľvek prevádzkových podmienkach. Správna regulácia zapalovania vedie k optimalizácii krútiaceho momentu a výkonu pri minimalizácii spotreby paliva a podielu škodlivín vo výfukových plynach [2]. Moment zapálenia paliva závisí na rýchlosti otáčania motora a jeho zaťažení. Predstih zážihu je uhol, vyjadrený v stupňoch pootočenia kľukového hriadeľa, o ktorý predchádza okamih zážihu bod pri ktorom dosiahne piest hornú úvrať [2]. Zmena okamihu zážihu v závislosti na otáčkach motora vedie k optimalizácii činnosti zapalovania, vid' *obrázok 4*. V moderných elektronických zapalovacích systémoch závisí predstih zážihu aj na signáloch z rôznych snímačov odosielaných do riadiacej jednotky, ako sú napríklad snímače teploty alebo senzory zloženia palivovej zmesi. Pre privedenie zapalovacej iskry na správny valec a v optimálnom čase sú dôležité informácie zo snímačov polohy kľukového a vačkového hriadeľa.



Obrázok 4 Predstih zážihu, 1 – optimálny predstih; 2 – príliš veľký predstih (detonačné spaľovanie); 3 – príliš malý predstih [2]

2 SNÍMAČ POLOHY KL'UKOVÉHO HRIADEĽA

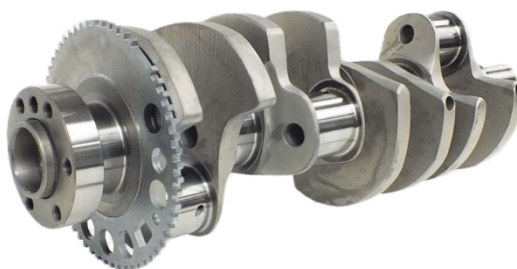
Snímače polohy kl'ukového hriadeľa sú elektronické zariadenia, ktoré monitorujú polohu a rýchlosť otáčania kl'ukového hriadeľa v spaľovacom motore. Informácie získané prostredníctvom týchto senzorov využíva riadiaca jednotka pohonného ústrojenstva vozidla k správne načasovaniu zapalovania, vstrekovania paliva a iných charakteristík motora [5]. V spolupráci so snímačom polohy vačkového hriadeľa tento senzor monitoruje polohu kl'ukového mechanizmu v čase, čo je dôležité z hľadiska správneho variabilného časovania ventilov. Snímač polohy kl'ukového hriadeľa, vid' *obrázok 5*, je primárny zdroj dát pre určenie počtu otáčok motora za jednotku času. Pre optimálnu účinnosť a fungovanie moderných spaľovacích motorov je správna činnosť tohto snímača nevyhnutná. V súčasných modeloch automobilov sa stretávame so snímačmi s dvojkolíkovými alebo trojkolíkovými konektormi [6].



Obrázok 5 Snímač polohy kl'ukového hriadeľa [18]

2.1 KL'UKOVÝ HRIADEĽ

Kl'ukový hriadeľ je základný mechanický komponent piestového spaľovacieho motora. Jeho hlavnou úlohou je transformácia vratného priamočiareho pohybu piestov na rotačný pohyb. Je zložený z krátkych valcových čapov, ktoré sú navzájom prepojené ramenami, vid' *obrázok 6* [7]. Podľa funkcie jednotlivých čapov ich rozdelíme na čapy kl'ukové a čapy ojnicné. Piesty sú s kl'ukovým hriadeľom prepojené prostredníctvom ojnic. Pre zníženie vibrácií a torzných kmitov pri chode motora je kl'ukový hriadeľ spojený so zotrvačníkom a tlmičom vibrácií.



Obrázok 6 Kl'ukový hriadeľ [19]

2.2 FUNKCIA SNÍMAČA POLOHY KL'UKOVÉHO HRIADEĽA

Snímač polohy kl'ukového hriadeľa je umiestnený v bloku motora, tak aby bol v správnej polohe voči impulznému kolesu umiestnenému na kl'ukovom hriadeľi. Jeho poloha je vyznačená na obrázku, vid' *obrázok 7*. Impulzné koleso má na svojom povrchu určitý počet výstupkov, vďaka ktorým sa pri prechode jednotlivých zubov okolo snímača generuje signál. Ten je odosielaný do riadiacej jednotky motora, ktorej poskytuje informácie o polohe kl'ukového hriadeľa. Počet výstupkov sa líši v závislosti na konkrétnej aplikácii. V praxi sa zvyčajne využíva impulzné koleso s 58 zubami, pretože dva výstupky sú zámerne vynechané [8]. Pre určenie počiatočného referenčného bodu pri otáčaní kl'ukového hriadeľa slúži medzera medzi zubami na impulznom kolese, ktorá je viditeľná aj na grafe napät'ovej odozvy a určuje presnú polohu prvého valca. Geometria zubov a snímača musí byť navzájom prepojená, aby dochádzalo k tvorbe čo najpresnejšej napät'ovej odozvy. Medzi špičkou snímača a výstupkami je udržiavaná tenká vzduchová medzera. Na vytvorenie adekvátnej amplitúdovej charakteristiky je v prípade indukčných snímačov potrebných najmenej 30 otáčok za minútu [8]. Na základe týchto signálov riadiaca jednotka vypočítava rýchlosť otáčania motora. Senzor produkuje napät'ový signál, v ktorom každý impulz zodpovedá jednému výstupku. Riadiaca jednotka využíva signál zo snímača polohy kl'ukového hriadeľa na určenie presného času vzniku zapal'ovacej iskry a vstrekovania paliva a taktiež určuje aj valec, v ktorom má zapálenie paliva nastať. Napät'ová odozva senzora slúži taktiež na kontrolu správnej činnosti všetkých valcov motora.



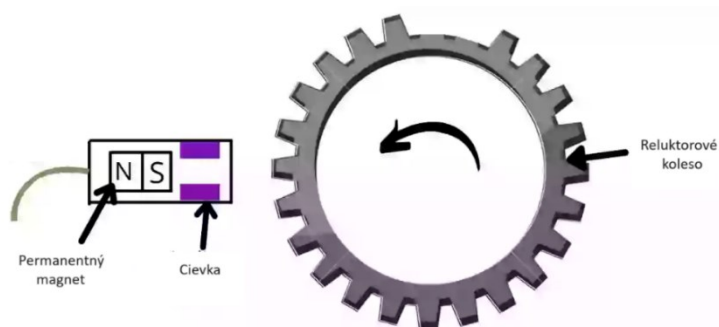
Obrázok 7 Umiestnenie snímača polohy kl'ukového hriadeľa [20]

2.3 TYPY SNÍMAČOV

Na určovanie polohy kl'ukového hriadeľa sa v praxi využívajú senzory založené na rôznych princípoch snímania a generovania signálov. V súčasnosti medzi najpoužívanéjšie typy snímačov patria indukčné snímače, snímače využívajúce Hallov efekt a optické snímače polohy kl'ukového hriadeľa.

2.3.1 INDUKČNÝ SNÍMAČ POLOHY KL'UKOVÉHO HRIADEĽA

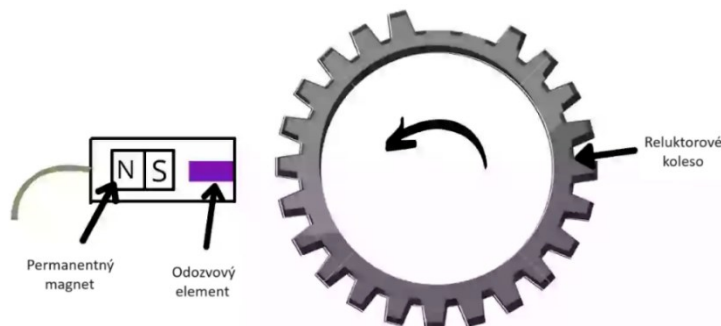
Tento typ senzoru je tvorený permanentným magnetom a cievkou, ako je zobrazené v schéme, vid' *obrázok 8*. V prípade, keď sa kl'ukový hriadeľ neotáča, na cievku pôsobí konštantné magnetické pole. Pri rotácii impulzného kolesa dochádza k prerušeniu pôsobenia magnetického poľa v dôsledku prechodu jednotlivých zubov okolo senzora. Táto zmena magnetického poľa umožňuje vytvárať napät'ový signál, ktorý je odosielaný do riadiacej jednotky [5].



Obrázok 8 Indukčný snímač polohy kl'ukového hriadeľa [21]

2.3.2 SNÍMAČ S HALLOVÝM EFEKTOM

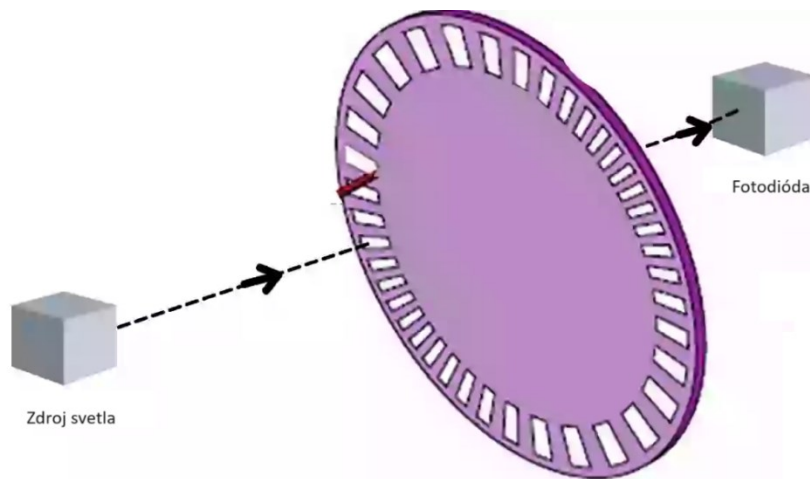
Snímač obsahuje permanentný magnet generujúci magnetické pole, v ktorom sa nachádza odozvoový element, vid' *obrázok 9*. Pri prechode zubov okolo snímača, dochádza k prerušeniu magnetického poľa, v dôsledku čoho sa zmení aj odpor odozvového elementu, čo umožňuje generovať impulzný napät'ový signál. Na rozdiel od indukčného snímača, ktorý generuje analógový signál, tento senzor produkuje digitálnu odozvu [5]. Hlavnou výhodou tohto druhu senzora je odolnosť voči vibráciám a taktiež fakt, že snímač nevyžaduje fyzický kontakt a neprodukuje teplo. Medzi nevýhody patrí citlivosť na teplotné zmeny [6].



Obrázok 9 Senzor s Hallovým efektom [21]

2.3.3 OPTICKÝ SNÍMAČ POLOHY KL'UKOVÉHO HRIADEĽA

Súčasťou kl'ukového hriadeľa je disk, v ktorom na nachádza určitý počet medzier. Toto koleso je umiestnené medzi zdrojom svetelného žiarenia a fotodiódou, vid' *obrázok 10*. Pri rotácii kl'ukového hriadeľa dochádza prostredníctvom otvorov v kolese k pravidelnému prerušovaniu svetelného lúča, čo umožňuje senzoru generovať impulzný napät'ový signál.



Obrázok 10 Optický snímač polohy kl'ukového hriadeľa [21]

2.4 VÝPOČET POLOHY KL'UKOVÉHO HRIADEĽA

Napät'ová odozva odoslaná zo snímača polohy kl'ukového hriadeľa musí byť riadiacou jednotkou prevedená zo sínusového signálu s veľmi rozdielnou amplitúdou na pravouhlý napät'ový priebeh s konštantnou amplitúdou. Riadiaca jednotka sníma odstup medzi jednotlivými hranami signálu a v prípade, keď je odstup predchádzajúcej a nasledujúcej hrany dvojnásobný, dôjde k detekcii zubovej medzery, čo signalizuje presnú polohu prvého valca. Pri zaznamenaní každej nasledujúcej pozitívnej alebo negatívnej hrany signálu, riadiaca jednotka počítá s pootočením kl'ukového hriadeľa o ďalšie 3° [9]. Pre ešte presnejšie určenie polohy hriadeľa je čas medzi pravouhlými hranami signálu rozdelený na štyri rovnaké časti.

2.5 VÝPOČET SEGMENTOVANÉHO ČASU A OTÁČOK

V štvordobom spaľovacom motore je iba každá druhá otáčka motora pracovná, a preto sa pracovný cyklus vo valcoch koná vždy po dvoch otočeniach kl'ukového hriadeľa (720°). Z tohto dôvodu musí byť čas zapalovania pohonnej zmesi vo valcoch vypočítaný s vysokou presnosťou. Doba medzi jednotlivými zapáleniami paliva sa nazýva segmentovaný čas T_S [9].

3 SNÍMAČ POLOHY VAČKOVÉHO HRIADEĽA

Snímače polohy vačkového hriadeľa sú elektronické zariadenia, ktoré monitorujú polohu a rýchlosť otáčania vačkového hriadeľa v spaľovacom motore. Informácie získané prostredníctvom týchto senzorov sú odosielané priamo do riadiacej jednotky motora, ktorá ich využíva pre dosiahnutie čo najefektívnejšieho zapalovania palivovej zmesi vo valcoch [10]. Správny čas zapálenia zmesi prispieva k zvýšeniu účinnosti spaľovacieho motora a taktiež k zníženiu spotreby paliva. Tento senzor úzko spolupracuje so snímačom polohy kľukového hriadeľa, čo umožňuje zabezpečiť správne nastavenie variabilného časovania ventilov. Senzory, napojené prostredníctvom elektrických konektorov, sú uchytené v blízkosti vačkového hriadeľa, zvyčajne na hlave valcov alebo rozvodovom kryte motora, vid' *obrázok 11*. Funkcia týchto snímačov je nevyhnutná pre správne fungovanie moderných spaľovacích motorov a taktiež prispieva k znižovaniu emisií, vďaka správne načasovaniu zapalovania pohonnej zmesi [10].



Obrázok 11 Umiestnenie snímača polohy vačkového hriadeľa [22]

3.1 VAČKOVÝ HRIADEĽ

Vačkový hriadeľ je jedným zo základných komponentov spaľovacieho piestového motora. Hlavnou funkciou je ovládanie sacích a výfukových ventilov, čo umožňuje plnenie alebo vyprázdňovanie valcov motora. Vačkový hriadeľ, vid' *obrázok 12*, je tvorený jednotlivými vačkami, ktoré majú vajíčkový tvar a sú voči sebe natočené o určitý uhol [11]. Konštrukcia vačkového hriadeľa a počet vačiek sú závislé od počtu valcov a ventilov motora. Vačkový hriadeľ sa otáča dvakrát pomalšie ako kľukový hriadeľ, pretože pri štvortaktných motoroch je iba každá druhá otáčka motora pracovná.



Obrázok 12 Vačkový hriadeľ [23]

3.2 FUNKCIA SNÍMAČA POLOHY VAČKOVÉHO HRIADEĽA

Snímač polohy vačkového hriadeľa, vid' *obrázok 13*, sprostredkúva riadiacej jednotke motora informácie, vďaka ktorým dokáže rozhodnúť, v ktorom valci bude nasledovať najbližšie zapálenie palivovej zmesi. Signál zo snímača je odoslaný do riadiacej jednotky v prípade, keď sa piest prvého valca nachádza v hornej úvrati [10]. Z napät'ovej odozvy je následne možné vypočítať presný čas ďalšieho vstreku paliva. Keďže snímač vačkového hriadeľa neposkytuje riadiacej jednotke informáciu o valci, musí úzko spolupracovať so snímačom kľukového hriadeľa, ktorý zabezpečí identifikáciu presného valca.



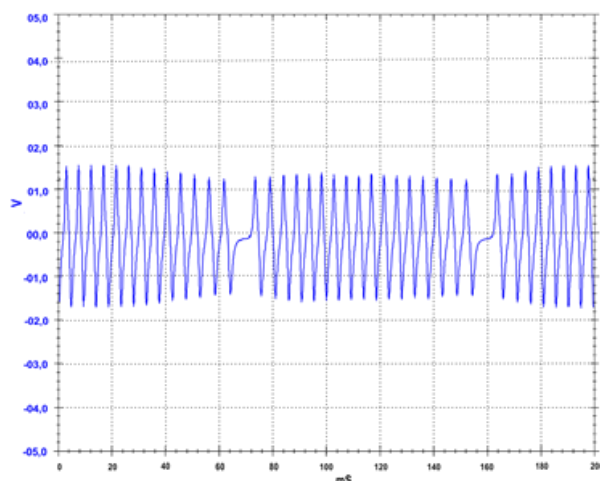
Obrázok 13 Snímač polohy vačkového hriadeľa [24]

3.3 TYPY SNÍMAČOV

Riadiaca jednotka využíva pre výpočet polohy vačkového hriadeľa signály, ktorých zdrojom sú senzory založené na rôznych princípoch generovania napät'ovej odozvy. V súčasnosti medzi najpoužívanejšie typy snímačov patria snímače využívajúce Hallov efekt, snímače striedavého prúdu a magnetické snímače polohy vačkového hriadeľa.

3.3.1 MAGNETICKÝ SNÍMAČ POLOHY VAČKOVÉHO HRIADEĽA

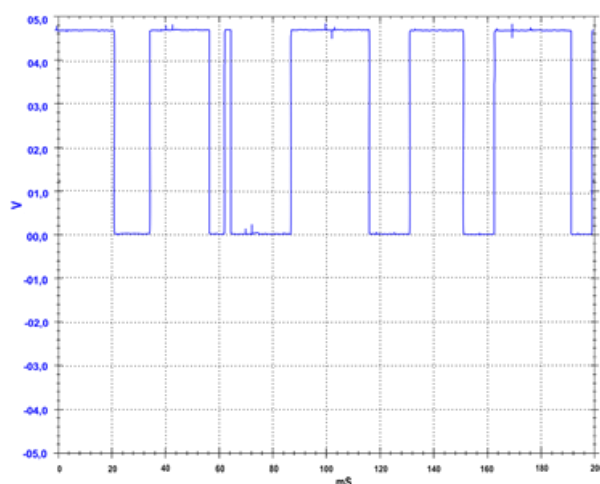
Tento typ senzoru je tvorený dvomi vodičmi, v ktorých je generovaný nezávislý signál sínusových vln striedavého prúdu. Snímač je umiestnený v blízkosti vačkového hriadeľa alebo v rozdeľovači. Na vačkovom hriadeľi je umiestnený permanentný magnet. Pri otáčaní hriadeľa dochádza k vzniku magnetického poľa pri prechode magnetu v tesnej blízkosti senzora. Táto zmena magnetického poľa umožňuje vytvárať impulzný napät'ový signál, vid' *obrázok 14*, ktorý je odosielaný do riadiacej jednotky [10].



Obrázok 14 Napät'ová odozva z magnetického snímača [25]

3.3.2 SNÍMAČ S HALLOVÝM EFEKTOM

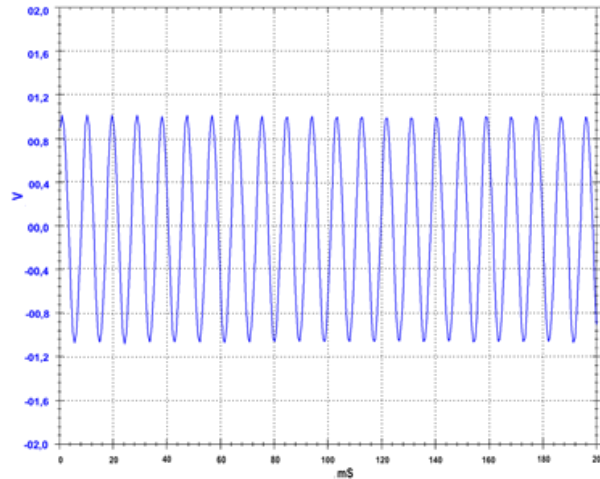
Snímač obsahuje tri elektrické vodiče. Prvý vodič slúži pre prívod elektrickej energie, druhý vodič je uzemňovací a funkciou tretieho vodiča je prenos signálu do riadiacej jednotky. Snímač je rovnako umiestnený v blízkosti vačkového hriadeľa alebo v rozdeľovači. „Senzor je tvorený prvkom, ktorého polovodičovou doštičkou preteká elektrický prúd. Tento prvok je ovládaný membránou, ktorá sa otáča spolu s vačkovým hriadeľom. Clona je vyrobená z feromagnetického materiálu a počas jej otáčania sa prerušuje permanentné magnetické pole, čím sa vytvára napätie v Hallovom prvku, ktoré je kolmé na smer magnetického toku.“ [9] Signál je do riadiacej jednotky odosielaný vo forme napät'ového signálu v tvare pravouhlých vln, vid' obrázok 15.



Obrázok 15 Napät'ová odozva zo snímača s Hallovým efektom [25]

3.3.3 SNÍMAČ STRIEDAVÉHO PRÚDU

Princíp funkcie týchto špecializovaných snímačov polohy vačkového hriadeľa je založený na produkcii napät'ovej odozvy vo forme signálov striedavého napätia, vid' *obrázok 16*. Riadiaca jednotka motora generuje vysokofrekvenčný signál pre budiacu cievku umiestnenú v blízkosti rotujúceho kotúča [10]. Tento disk je umiestnený priamo na konci vačkového hriadeľa a obsahuje otvor. Pri prechode štrbiny cievkou, dochádza k vzniku vzájomnej indukcie, vďaka čomu riadiaca jednotka dokáže indikovať polohu prvého valca.



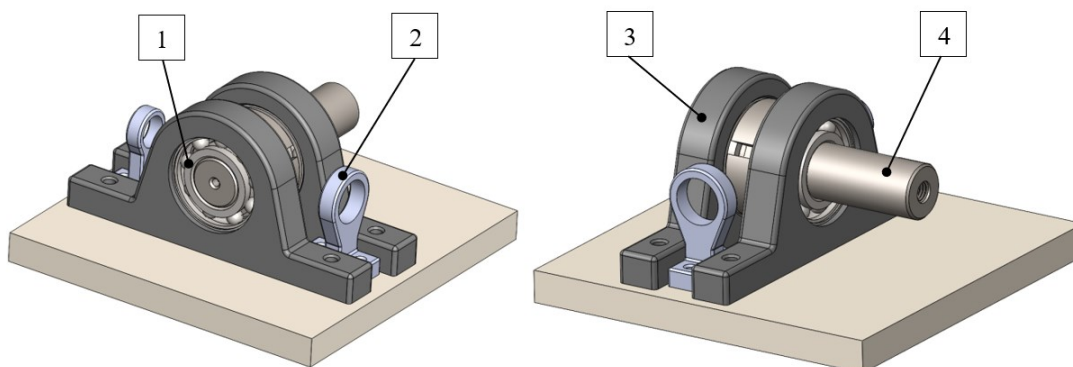
Obrázok 16 Napät'ová odozva zo snímača striedavého prúdu [25]

3.4 VÝPOČET UHLU NATOČENIA VAČKOVÉHO HRIADEĽA PRI VYUŽITÍ HALLOVHO SNÍMAČA

Signál získaný pomocou snímača polohy vačkového hriadeľa musí byť priamo v senzore prevedený na pravouhlú napät'ovú odozvu, ktorá je následne odoslaná do riadiacej jednotky. Táto skutočnosť je spôsobená veľkosťou Hallovho napätia, ktoré dosahuje hodnôt v oblasti milivoltov [9]. Riadiaca jednotka na základe napät'ovej odozvy vyhodnocuje, či sa na snímači nachádza napätie. Pomocou týchto údajov následne vyhodnocuje, či je prvý valec v pracovnej fáze.

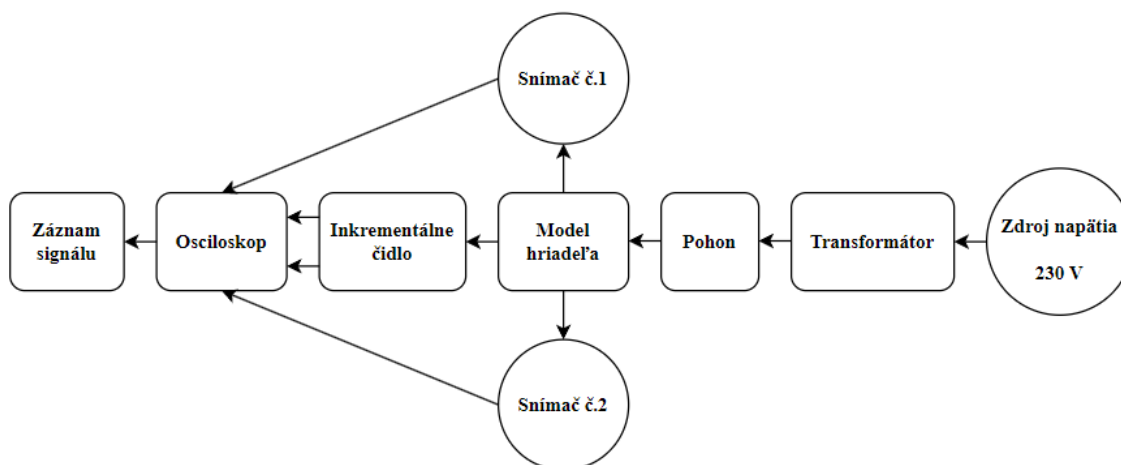
4 NÁVRH A KONŠTRUKCIA MERACIEHO ZARIADENIA

Pre vykonanie analýzy variability snímačov polohy kľukového a vačkového hriadeľa bolo potrebné navrhnuť a skonštruovať meracie zariadenie, vid' *obrázok 17*, ktoré by simulovalo chod motora pri rôznych otáčkach.



Obrázok 17 Schéma meracieho zariadenia; 1 – ložisko; 2 – uloženie snímača; 3 – uloženie ložiska; 4 – hriadeľ

Meracia aparátúra, vid' *obrázok 18*, pozostávala zo zdroja otáčok (pohon), transformátora, hriadeľa, snímačov polohy a prístrojov na zaznamenávanie signálov pre následné vyhodnocovanie výsledkov experimentu. Na presné uloženie jednotlivých súčastí meracieho zariadenia bolo potrebné vyrobiť komponenty, ktorými boli tieto súčasti upevnené k základovej doske. Návrh všetkých komponentov prebiehal pomocou 3D modelára SOLIDWORKS 2023. Všetky diely vyrobené pomocou 3D tlače, boli vytlačené z materiálu PLA na 3D tlačiarňi Průša MK3S+.



Obrázok 18 Schéma meracej aparátúry

4.1 POHON A UCHYTENIE

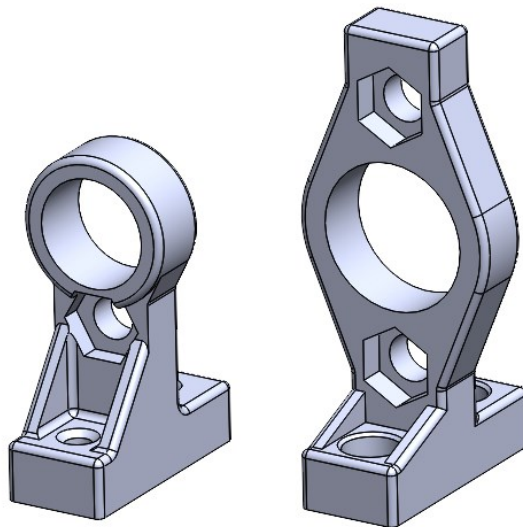
Meranie charakteristík snímačov bolo potrebné vykonať pri rôznych otáčkach, a preto bolo nutné použiť pre pohon meracieho zariadenia pohonnú jednotku s možnosťou regulácie otáčok. Z dostupných možností bol zvolený pohon pomocou elektrickej ručnej brúsky typu Parkside PFBS 160 B2, ktorá disponovala najlepšimi vlastnosťami pre účel merania. Nakoľko išlo o ručnú brúsku, bolo potrebné navrhnuť a vyrobiť stabilné uchytenie k základovej doske meracieho zariadenia, vid' *obrázok 19*.



Obrázok 19 Pohonná jednotka a jej uchytenie [12]

4.2 ULOŽENIE SNÍMAČOV

Senzory polohy kľukového a vačkového hriadeľa musia byť v praxi umiestnené kolmo na smer otáčania hriadeľa. Z tohto dôvodu bolo potrebné navrhnuť uloženia, vid' *obrázok 20*, ktoré by spĺňali danú funkciu a zabezpečili tak objektívne výsledky merania. Na správnosť funkcie snímačov vplýva aj vzdialenosť od impulzného kolesa, ktorá bola pri montáži uchytení senzorov dodržaná vzhľadom na hodnoty udávané ich výrobcom.



Obrázok 20 3D model uloženia snímačov

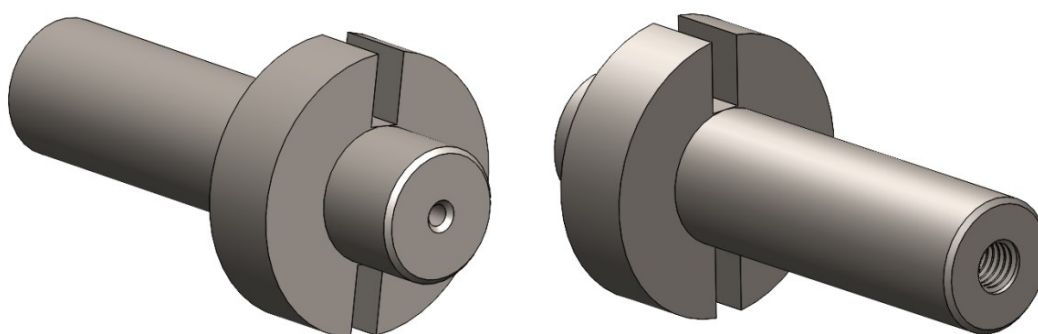
4.3 MODEL HRIADEĽA A JEHO ULOŽENIE

Najbežnejším spôsobom generovania napät'ovej odozvy pomocou senzorov je využitie impulzného kolesa, vid' *obrázok 21*. V praxi väčšinou obsahuje 58 zubov, pričom dva zuby sú zámerne vynechané a táto medzera slúži pre určenie počiatočného referenčného bodu.



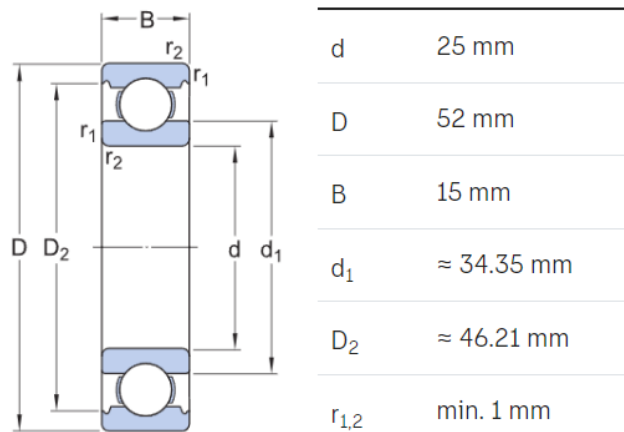
Obrázok 21 Impulzné koleso [13]

Pre vykonanie analýzy variability snímačov postačovalo použiť pri experimentálnom meraní dve zubové medzery. Z tohto dôvodu bol pre simuláciu otáčania kľukového a vačkového hriadeľa vyrobený zjednodušený model hriadeľa, ktorý obsahuje osadenie s dvomi protíahlymi drážkami reprezentujúcimi zubové medzery impulzného kolesa, vid' *obrázok 22*. Hriadeľ bol vysústružený z polotovaru s priemerom 54 mm na výsledný priemer osadenia 52 mm a výsledný priemer uloženia 25 mm. Drážky v osadení boli vyfrézované pomocou frézy s priemerom 6 mm a do oboch koncov hriadeľa bol vyrezaný vnútorný závit M10. Tento závit slúžil na uloženie redukcií pre pripojenie pružnej spojky, cez ktorú bol zabezpečený prenos krútiaceho momentu od pohonu. Pružná spojka bola vyrobená z pevnej gumovej hadičky zabezpečujúcej spojenie hriadeľa a nastavca brúsky.



Obrázok 22 3D model hriadeľa

Pre uloženie hriadeľa boli použité dve guľôčkové ložiská typu 6205 od výrobcu SKF s charakteristickými rozmermi, vid' *obrázok 23*. Ložiská boli nalisované do ložiskových puzdier, ktoré boli vyrobené pomocou 3D tlač. Dôležitou vecou pri konštrukcii uložení ložísk bol fakt, že bolo potrebné zaistiť súososť meracieho hriadeľa a pohonu brúsky, aby nedochádzalo k vzniku kmitania.



Obrázok 23 Rozmery ložiska SKF 6205 [14]

4.4 REGULÁCIA OTÁČOK

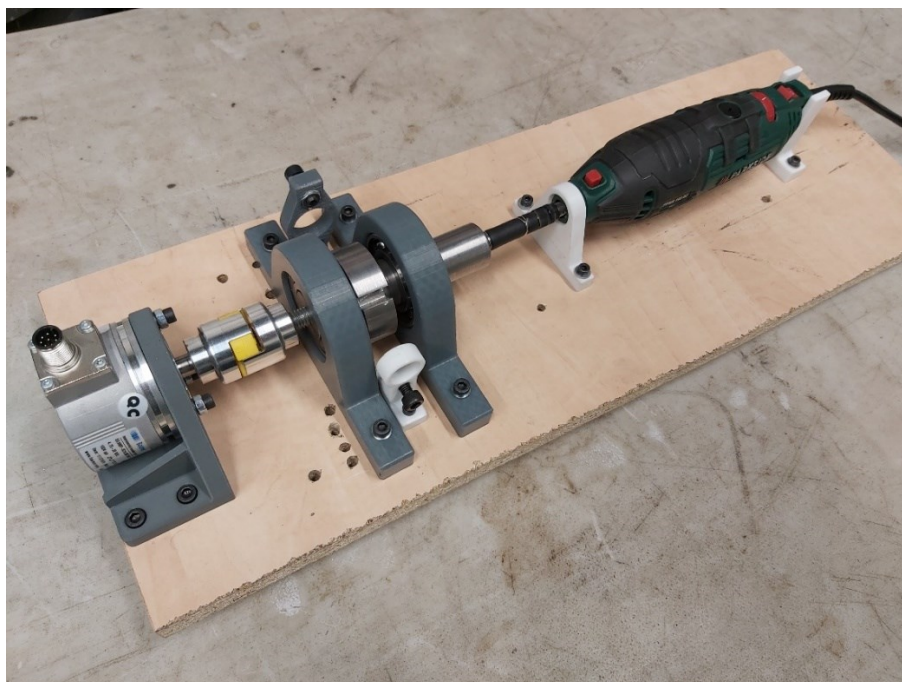
Pracovné otáčky brúsky slúžiacej pre pohon meracieho zariadenia sa pohybovali v rozmedzí 10 000 až 40 000 otáčok za minútu. Pri experimentálnom meraní bolo potrebné dosiahnuť aj nižšie hodnoty otáčok, ako boli minimálne pracovné otáčky brúsky. Zníženie otáčok bolo možné doceliť mechanickým brzdením hriadeľa, využitím mechanického prevodu alebo znížením napájacieho napätia. Najjednoduchším riešením bolo použitie transformátora, vid' *obrázok 24*, ktorý bol zapojený pred brúsku a umožňoval plynulú reguláciu vstupného napätia a tým aj potrebné zníženie otáčok.



Obrázok 24 Transformátor [15]

4.5 ZOSTAVENIE MERACIEHO ZARIADENIA

Všetky komponenty meracieho zariadenia boli po ich výrobe upevnené k OSB doske pomocou skrutiek a matic, vid' *obrázok 25*. Senzory boli následne pripojené prostredníctvom konektorov k elektrickému obvodu, ktorý zabezpečoval prenos signálu zo snímačov. Výhodou meracej aparatury boli jej kompaktné rozmery, ktoré umožňovali dobrú manipuláciu pri práci. Stabilným upevnením komponentov bola zároveň zabezpečená bezpečnosť osôb pri meraní.



Obrázok 25 Meracie zariadenie

5 MERANIE CHARAKTERISTÍK SNÍMAČOV

Po skompletizovaní mechanickej časti meracieho zariadenia nasledovalo odskúšanie jeho činnosti. Všetky komponenty spĺňali svoju funkciu, a preto bolo možné pristúpiť k pripojeniu elektronickej časti meracej aparatury, ktorej komponenty sú popísané v tejto kapitole.

5.1 MERACÍ PRÍSTROJ

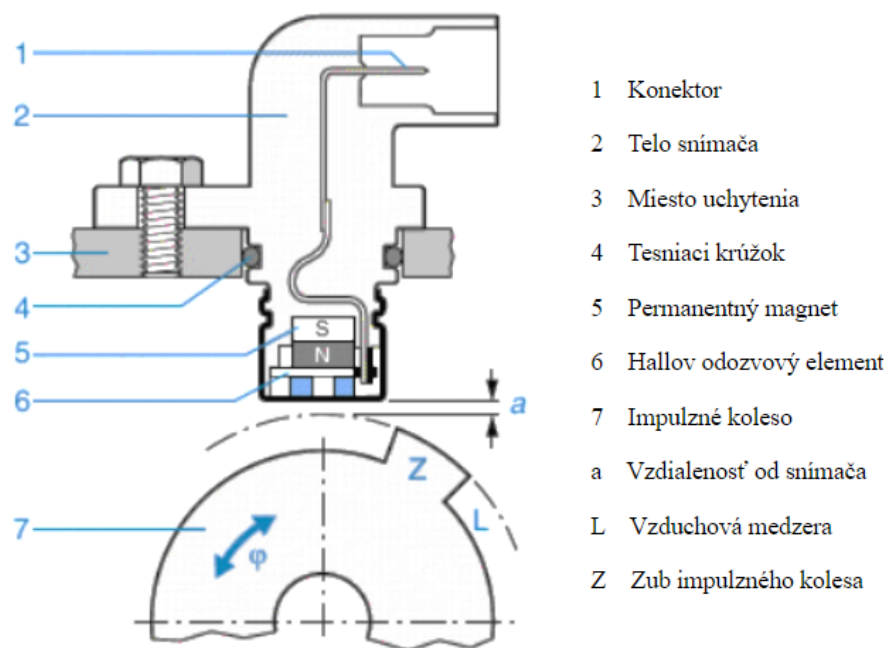
Pre zaznamenávanie napäťovej odozvy zo snímačov polohy kľukového a vačkového hriadeľa pri experimentálnom meraní bol použitý osciloskop typu PICOSCOPE 3406D, vid' *obrázok 26*. Išlo o osciloskop s rozsahom do 200 MHz, vzorkovacou frekvenciou do 1 GS/s a s možnosťou pripojenia štyroch analógových kanálov [16]. Hlavnou výhodou tohto zariadenia bolo jednoduché prepojenie s počítačom vďaka napájaniu cez USB konektor. Komunikácia s počítačom bola zabezpečená prostredníctvom digitálneho softvéru PicoScope 7 T&M.



Obrázok 26 Osciloskop PICOSCOPE 3406D [16]

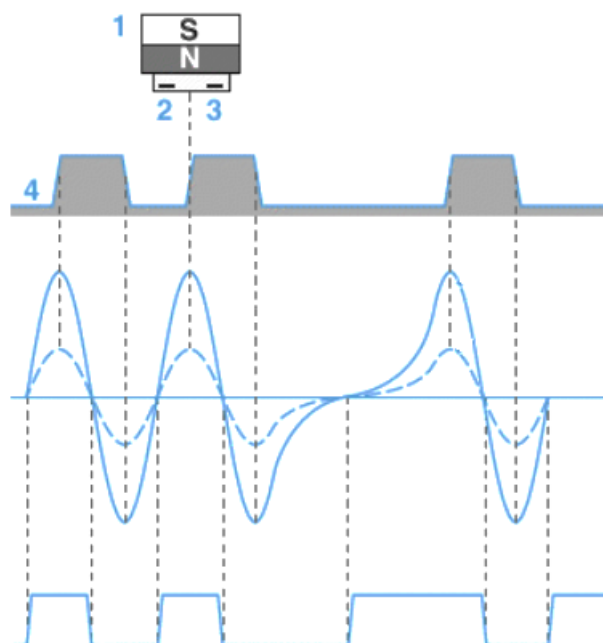
5.2 TYPY ANALYZOVANÝCH SNÍMAČOV POLOHY KLUKOVÉHO A VAČKOVÉHO HRIADEĽA

Variabilita snímačov bola vyhodnocovaná prostredníctvom experimentálneho merania na vzorke 50 kusov snímačov polohy pre kľukový hriadeľ a 50 kusov snímačov polohy pre vačkový hriadeľ. Analýze boli podrobené typy snímačov s konkrétnou konfiguráciou využívajúce princíp Hallovhého efektu, vid' *obrázok 27*, ktoré sú zdrojom informácií pre riadiacu jednotku spaľovacieho motora.



Obrázok 27 Konfigurácia analyzovaných snímačov [8]

Tieto snímače boli pri experimentálnom meraní charakteristík využité z dôvodu ich najčastejšieho výskytu v súčasných pohonných jednotkách. Ďalším dôvodom pre výber senzorov využívajúcich Hallov efekt bol fakt, že medzi signálom zo snímača polohy a presnou polohou hriadeľa vzniká fázový posun, ktorý je spôsobený princípom funkcie tohto typu snímačov, vid' obrázok 28. Fázový posun je závislý taktiež na tvare nábežnej hrany napät'ovej odozvy z dôvodu jej krivkového charakteru.



Obrázok 28 Fázový posun signálu; 1 – permanentný magnet; 2 – Hallov element č.1; 3 – Hallov element č.2; 4 – impulzné koleso [8]



Obrázok 29 Snímač Bosch 04C.907.601.K [26]

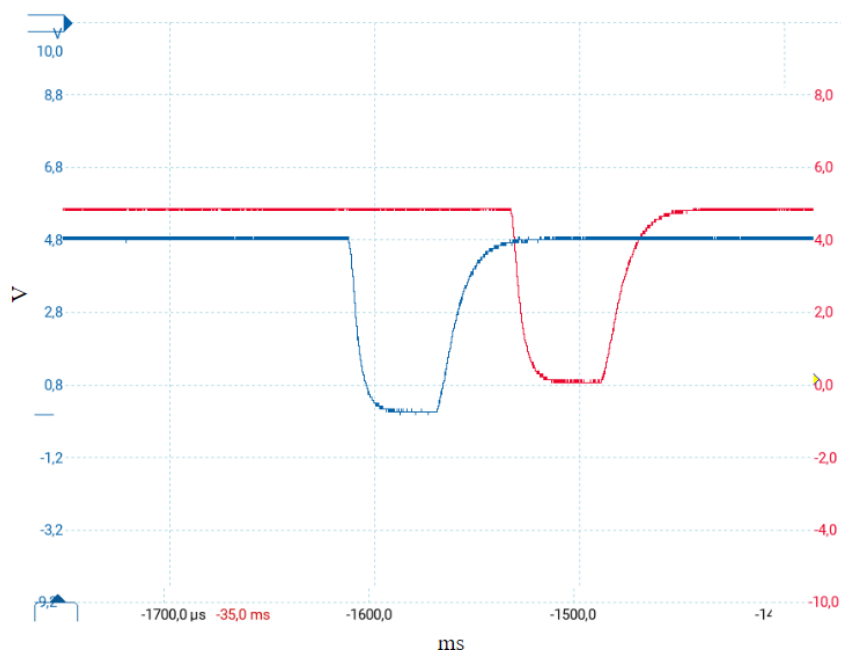
Variabilita bola zisťovaná pre snímače polohy vačkového hriadeľa od výrobcu Bosch typu 04C.907.601.K, vid' obrázok 29. Snímače polohy kľukového hriadeľa, vid' obrázok 30, pochádzali od rovnakého výrobcu s typovým označením 06H.906.433.D. Obidva druhy snímačov sú určené pre sériové použitie vo vozidlách koncernu Volkswagen s motorizáciou 1.8 TSI a 2.0 TSI.



Obrázok 30 Snímač Bosch 06H.906.433.D [27]

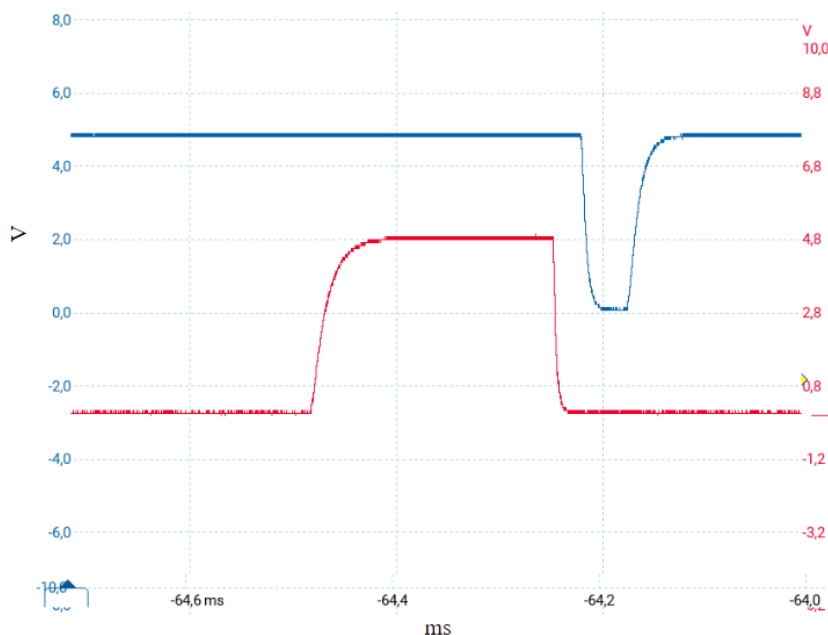
5.3 POSTUP MERANIA

Počas merania charakteristík jednotlivých snímačov bol k meraciemu zariadeniu pripojený vždy jeden senzor. Záznam signálov prebiehal v prvej fáze experimentu pri štyroch rôznych frekvenciách otáčania hriadeľa, konkrétne pri hodnotách otáčok 3000, 4500, 6000 a 7500 min^{-1} . Po overení lineárneho nárastu fázového posunu so zvyšujúcimi sa otáčkami, bolo meranie v druhej časti experimentu vykonané pri jednej hodnote otáčok, ktorá sa líšila v závislosti na type analyzovaného senzoru. Signál zo snímača polohy kľukového hriadeľa v grafe napät'ovej odozvy reprezentujú krivky na obrázku, vid' obrázok 31. Pred samotným meraním bolo potrebné nastaviť vhodný rozsah hodnôt parametrov zaznamenávaných osciloskopom.



Obrázok 31 Napät'ová odozva snímača polohy kľukového hriadeľa

Po spustení meracieho zariadenia a nastavení danej rýchlosti otáčania, bolo pred každým zaznamenaním signálu zo snímačov potrebné počkať do momentu, kým sa ustáli rýchlosť otáčania hriadeľa, aby nedochádzalo k ovplyvneniu výsledkov meraní z dôvodu postupného nábehu otáčok pohonu. Následne bolo spustené zaznamenávanie napät'ovej odozvy a dátové súbory boli ukladané do počítača pre ďalšie spracovanie výsledkov. Postup merania bol zopakovaný pre všetky snímače polohy kľukového hriadeľa a vačkového hriadeľa. Priebehy signálov jednotlivých snímačov zodpovedali predpokladaným priebehom. V grafe napät'ovej odozvy reprezentuje signál zo snímača polohy vačkového hriadeľa červená krivka, vid' obrázok 32.



Obrázok 32 Napät'ová odozva snímača polohy vačkového hriadeľa

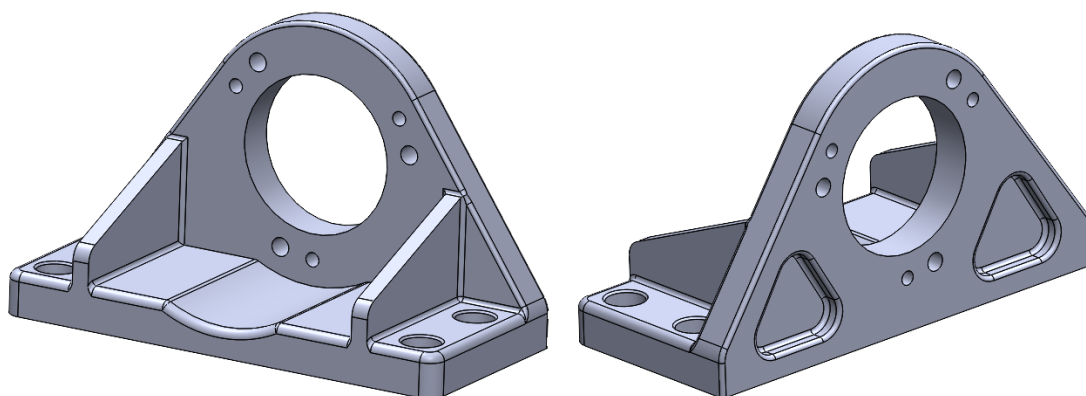
5.4 REFERENČNÝ SIGNÁL

Pre následné vyhodnocovanie nameraných charakteristík bolo k meraciemu zariadeniu pomocou pružnej spojky pripojené inkrementálne čidlo, slúžiace na určenie presnej polohy hriadeľa pri otáčaní. Inkrementálny rotačný snímač zabezpečuje prevod rotačného pohybu na odozvu vo forme elektrických signálov. Táto transformácia prebieha fotoelektrickým bezkontaktným spôsobom. Presnosť a rozlišovacia schopnosť snímača závisí na výrobní presnosti mriežky na kotúčoch snímača. Z časovej postupnosti elektrických signálov je možné veľmi presne zistiť uhol natočenia, smer rotácie a rýchlosť otáčania [17].



Obrázok 33 Inkrementálny snímač EIL580P-SC [28]

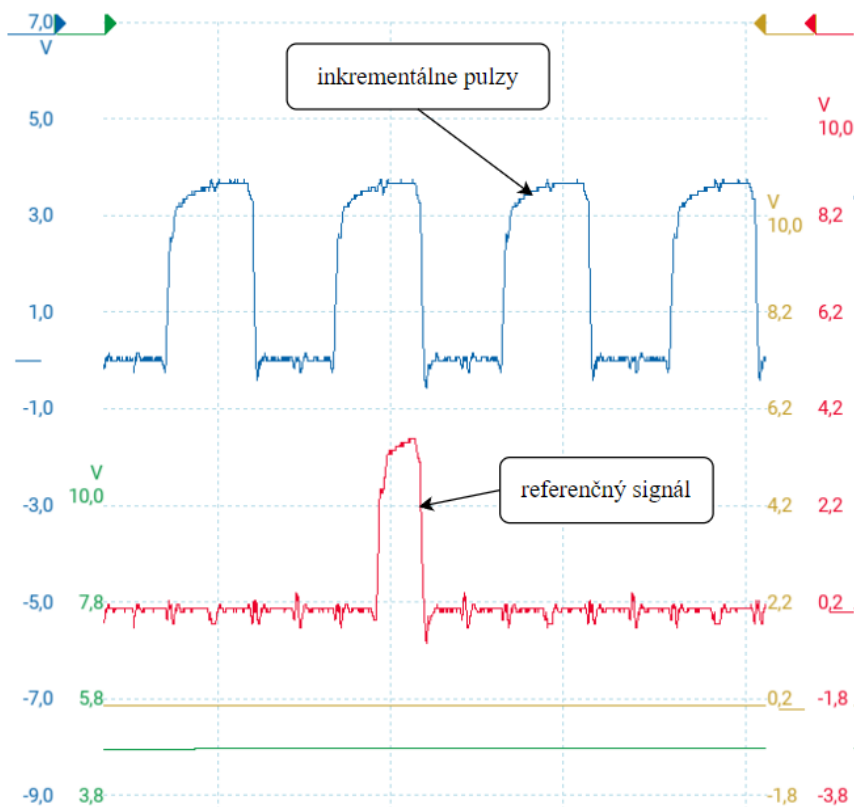
Pri meraní bolo použité zariadenie typu EIL580P-SC, vid' *obrázok 33*, ktoré pri otočení o 360° umožnilo zaznamenať 4096 signálov. Uchytenie čidla k základovej doske meracieho zariadenia bolo realizované prostredníctvom konzoly zhotovenej pomocou 3D tlače, vid' *obrázok 34*.



Obrázok 34 Uchytenie inkrementálneho snímača

5.5 VYHODNOCOVANIE DÁT

Požadovanou hodnotou, ktorú bolo pri experimente potrebné zmerať, bol fázový posun signálu zo snímačov polohy kľukového a vačkového hriadeľa voči referenčnému signálu z inkrementálneho snímača, vid' *obrázok 35*.

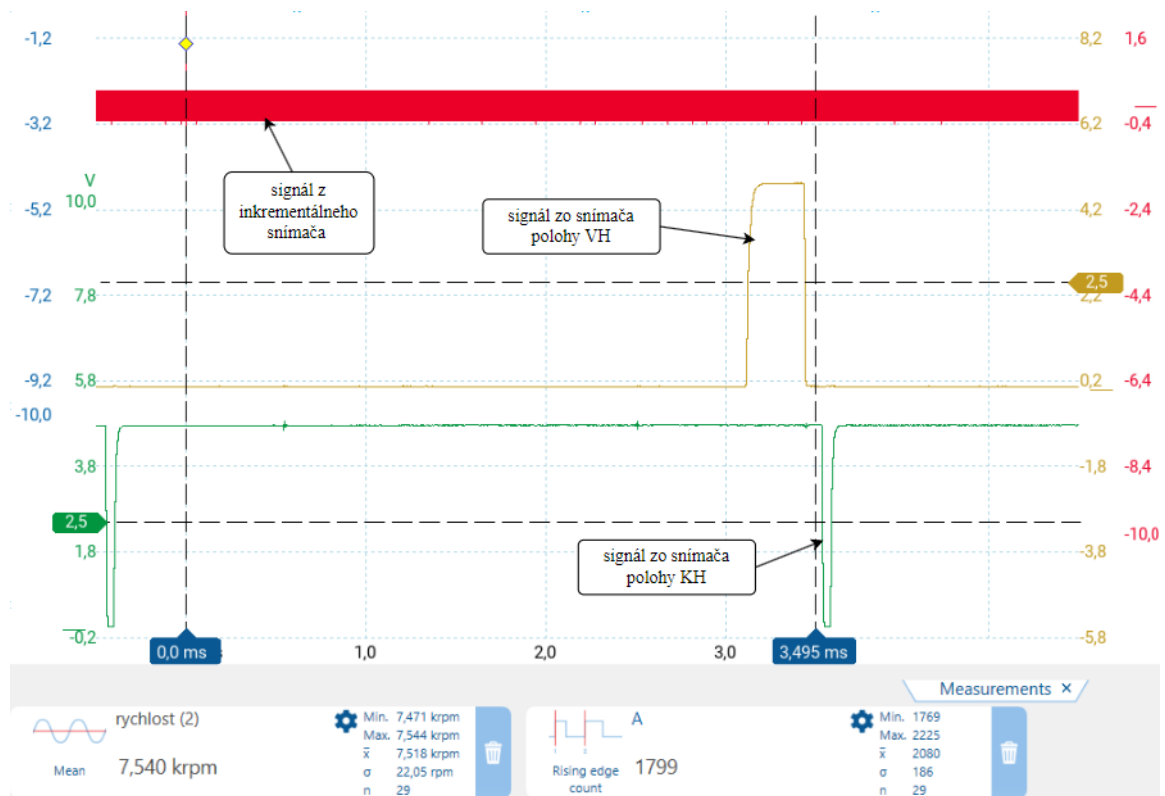


Obrázok 35 Signál z inkrementálneho snímača

Prostredníctvom osciloskopu boli zaznamenané napät'ové odozvy zo snímačov pri rôznych rýchlostiach otáčania, ktoré boli následne vyhodnocované pomocou digitálneho softvéru PicoScope 7 T&M. Využitím modulu „measurements“ bol zistený počet signálov zaznamenaných z inkrementálneho snímača medzi prvou nábežnou hranou referenčného signálu a ostrejšou hranou signálu zo snímača polohy, vid' *obrázok 36*. Následne bolo potrebné vykonať prepočet medzi počtom signálov a fázovým posunom, ktorý prebiehal prostredníctvom programu Microsoft Excel. Jedno otočenie hriadeľa o 360° zodpovedalo 4096 pulzom z inkrementálneho snímača. Aplikovaním tejto informácie boli dopočítané fázové posuny pre všetky snímače využitím jednoduchého prepočtového vzťahu založeného na priamej úmere:

$$\varphi = \frac{n \times 360^\circ}{4096}, \quad (1)$$

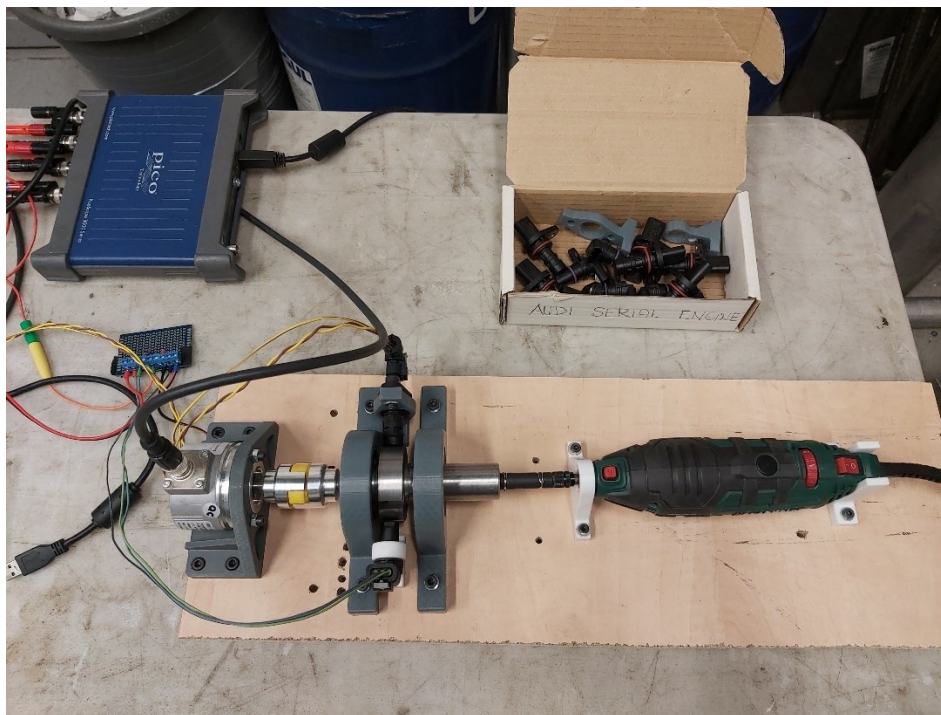
kde n je počet signálov z inkrementálneho čidla a φ je fázový posun. Pre dosiahnutie požadovanej presnosti merania boli potrebné dáta odčítavané vždy pri rovnakej referenčnej hodnote napätia, konkrétne 2,5 V, ktorá zodpovedala strednej hodnote výchylky signálu zo snímača polohy. Z vypočítaných hodnôt fázových posunov boli následne vytvorené grafy, ktoré reprezentujú získané výsledky merania.



Obrázok 36 Vyhodnocovanie dát

6 VÝSLEDKY MERANIA

Po zmeraní charakteristík všetkých snímačov prostredníctvom meracej aparatury, vid' *obrázok 37*, bolo ďalšou úlohou spracovanie nameraných údajov. Táto kapitola popisuje výsledky experimentálneho merania.



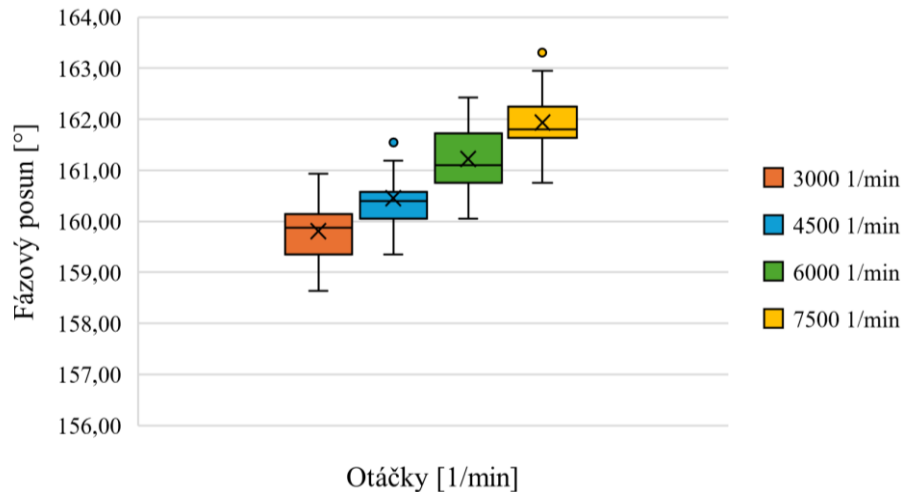
Obrázok 37 Meracia aparatura

6.1 VÝSLEDKY 1. ČASTI EXPERIMENTU

V prvej časti merania boli signály zaznamenávané pri štyroch rôznych frekvenciách otáčania, konkrétne pri hodnotách otáčok 3000, 4500, 6000 a 7500 min^{-1} , pre obidva typy senzorov. Nakoľko cieľom prvej fázy experimentu bolo overenie lineárnej závislosti medzi fázovým posunom a zvyšujúcimi sa otáčkami hriadeľa, rozsah frekvencie otáčania nemusel zodpovedať reálnym pracovným podmienkam snímačov. Výsledné hodnoty pre snímače polohy kľukového hriadeľa potvrdzujú predpoklad nárastu fázového posunu so zvyšujúcimi sa otáčkami a sú zobrazené v nasledujúcej tabuľke, vid' *tabuľka 1*. Grafická interpretácia výsledkov bola vykonaná prostredníctvom krabicového grafu, vid' *graf 1*.

Tabuľka 1 Fázový posun snímača polohy KH

Otáčky [min^{-1}]	3000	4500	6000	7500
Min. fázový posun [$^{\circ}$]	158,64	159,35	160,05	160,75
Max. fázový posun [$^{\circ}$]	160,93	161,63	162,42	163,30
Priemerný fázový posun [$^{\circ}$]	159,81	160,46	161,22	161,94

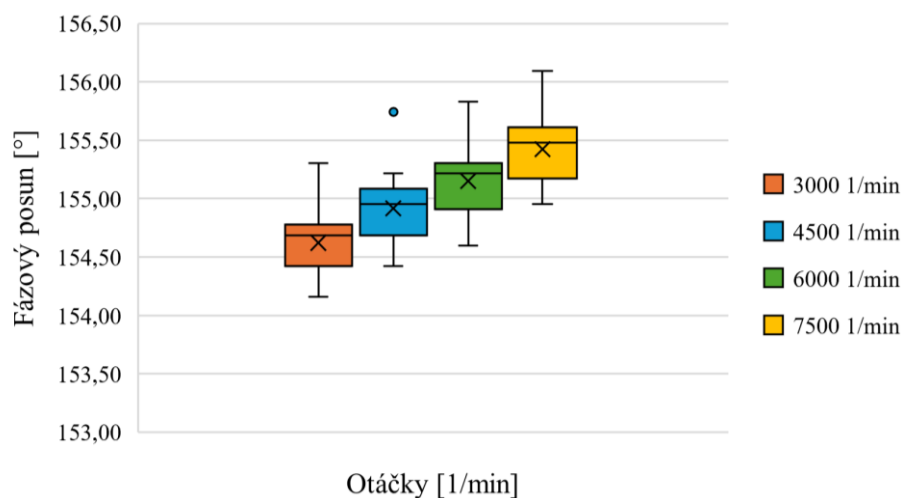


Graf 1 Závislosť fázového posunu na otáčkach pre snímače polohy KH

Obdobným spôsobom bol nárast fázového posunu overený aj pre snímače polohy včkového hriadeľa. Z nameraných hodnôt bol rovnako skonštruovaný krabicový graf, vid' graf 2, z ktorého vyplýva, že závislosť medzi meranými veličinami má taktiež rastúci charakter. Dôležité hodnoty sú pre prehľadnosť uvedené v nasledujúcej tabuľke, vid' tabuľka 2.

Tabuľka 2 Fázový posun snímača polohy VH

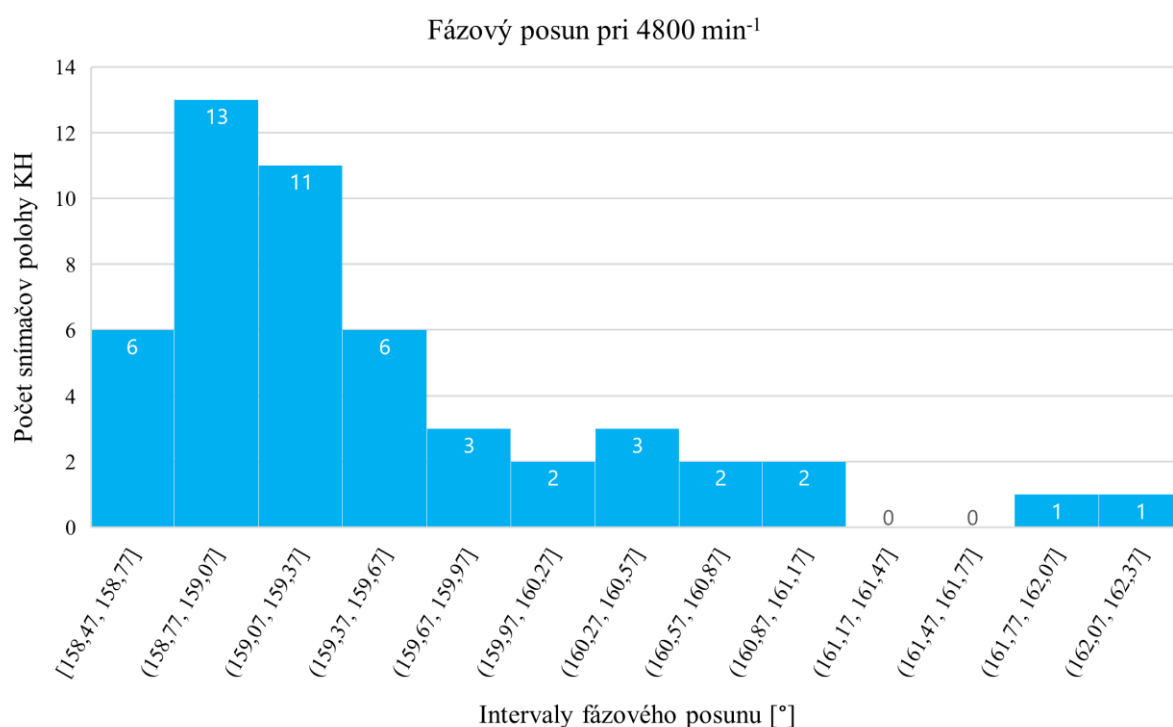
Otáčky [min^{-1}]	3000	4500	6000	7500
Min. fázový posun [°]	154,16	154,42	154,60	154,95
Max. fázový posun [°]	155,30	155,74	155,83	156,09
Priemerný fázový posun [°]	154,62	154,92	155,15	155,42



Graf 2 Závislosť fázového posunu na otáčkach pre snímače polohy VH

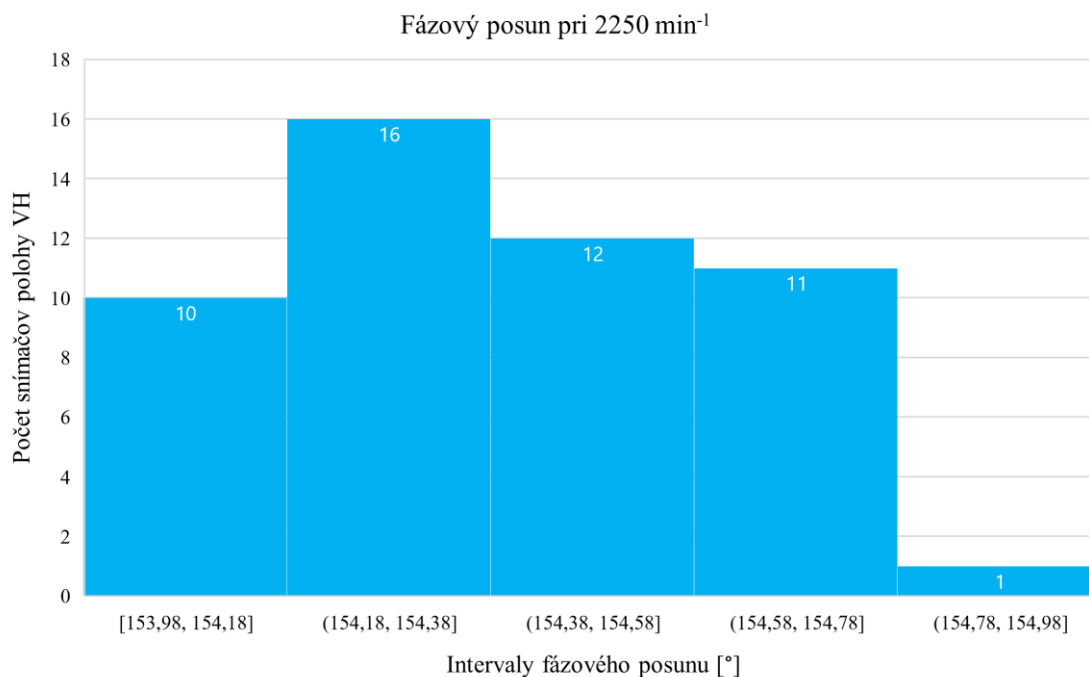
6.2 VÝSLEDKY 2. ČASTI EXPERIMENTU

Vďaka potvrdeniu hypotézy prvou časťou experimentu, mohlo byť meranie charakteristík snímačov v druhej časti realizované pri jednej konkrétnej hodnote otáčok. Tá sa odlišovala v závislosti na type analyzovaného senzoru a zodpovedala strednej hodnote pracovnej frekvencie otáčania. Snímače polohy kľukového hriadeľa boli podrobené meraniu pri hodnote otáčok 4800 min^{-1} . Z nameraných hodnôt, ktoré boli následne spracované a vynesené do histogramu, vid' *graf 3*, vyplýva, že fázový posun najväčšieho počtu analyzovaných snímačov sa pohybuje v intervale $(158,77^\circ; 159,07^\circ]$. Rozdiel medzi maximálnou a minimálnou nameranou hodnotou dosahuje $3,6^\circ$. Priemerná hodnota fázového posunu skúmanej štatistickej vzorky 50 kusov snímačov je $158,49^\circ$.



Graf 3 Fázový posun snímačov polohy KH

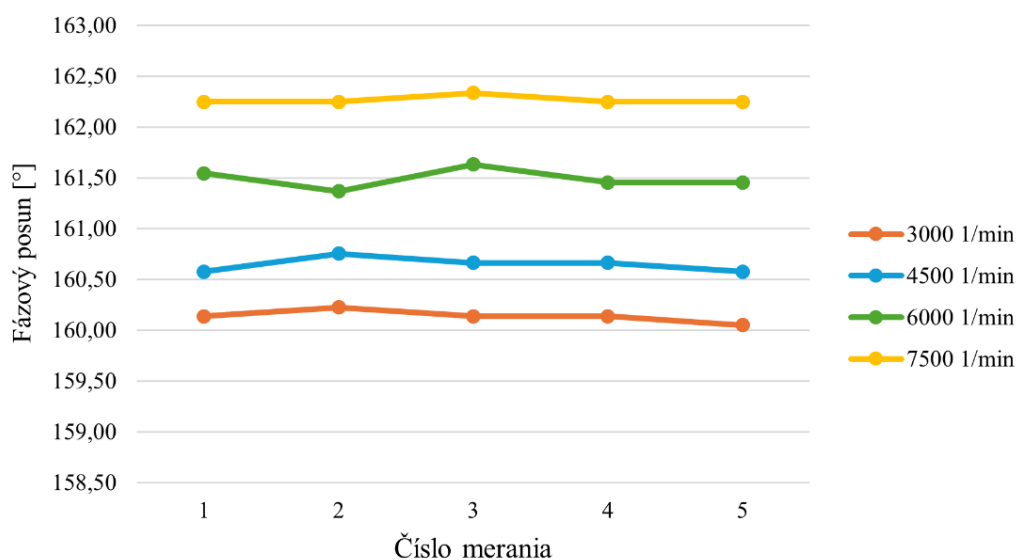
Analýza variability snímačov polohy vačkového hriadeľa bola vykonaná pri hodnote frekvencie otáčania hriadeľa 2250 min^{-1} , nakoľko vačkový hriadeľ sa otáča polovičnou rýchlosťou oproti kľukovému hriadeľu. Experimentálne zmerané hodnoty sú zobrazené v nasledujúcom histograme, vid' *graf 4*. Z výsledkov vyplýva, že fázový posun všetkých snímačov leží v rozmedzí 1 stupňa. Fázový posun najväčšieho počtu senzorov sa pohybuje v intervale $(154,18^\circ; 154,38^\circ]$ a priemerná hodnota je $154,39^\circ$. Kompletný dátový súbor s nameranými hodnotami fázových posunov pre každý snímač polohy kľukového a vačkového hriadeľa je priložený v prílohe P2.



Graf 4 Fázový posun snímačov polohy VH

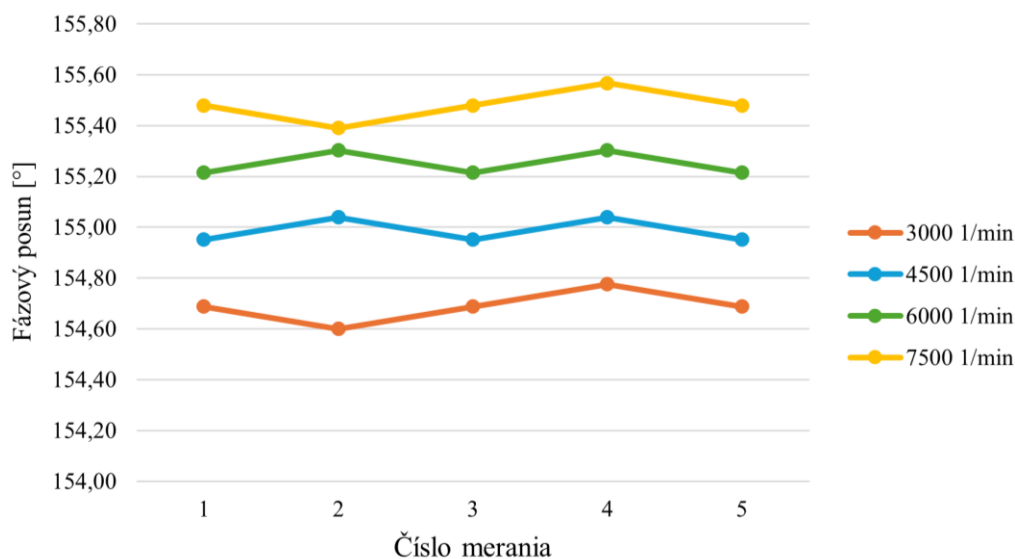
6.3 OPAKOVATEĽNOSŤ MERANIA

Pre overenie správnosti merania bol vykonaný test na opakovateľnosť. Pre jeden konkrétny snímač polohy kľukového hriadeľa prebehlo 5 meraní pre všetky rýchlosti otáčania hriadeľa. Medzi jednotlivými analýzami bol snímač vždy vymontovaný z držiaku a následne znovu namontovaný naspäť. Z nameraných výsledkov zobrazených v grafe, vid' graf 5, vyplýva, že opakovateľnosť merania bolo možné dosiahnuť. Rozdiely medzi jednotlivými meraniami boli spôsobené nepresnosťami meracích prístrojov.



Graf 5 Opakovateľnosť merania fázového posunu snímača polohy KH

Rovnaký postup bol zopakovaný aj pre vybraný snímač polohy vačkového hriadeľa. V grafe, vid' *graf 6*, sú zobrazené namerané hodnoty z ktorých vyplýva, že opakovateľnosť merania bolo taktiež možné zabezpečiť aj pre tento typ snímača.



Graf 6 Opakovateľnosť merania fázového posunu snímača polohy VH

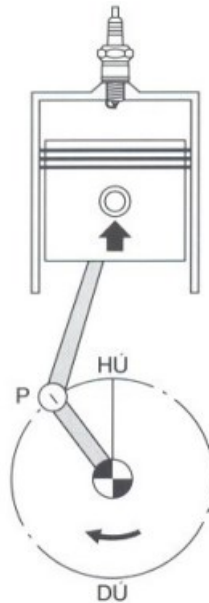
6.4 ZHODNOTENIE VÝSLEDKOV EXPERIMENTU

Podľa dostupných relevantných zdrojov sa žiadna práca nevenovala problematike merania charakteristík nových snímačov polohy kľukového a vačkového hriadeľa a možnosti vplyvu ich variability na výkonové a emisné charakteristiky motora. Z tohto dôvodu preto nebolo možné porovnať dosiahnuté výsledky s už uskutočnenými meraniami v minulosti. Snímačom polohy kľukového a vačkového hriadeľa sa väčšina publikácií venovala najmä z pohľadu ich poruchovosti a životnosti. Vznikol preto priestor na experiment, ktorý by mohol priniesť nové informácie v tejto problematike.

Skonštruované meracie zariadenie a všetky komponenty slúžiace pre záznam napät'ovej odozvy zo snímačov polohy a inkrementálneho čidla fungovali počas celého priebehu merania bez problémov. Hypotéza o náraste fázového posunu signálu zo snímača polohy kľukového resp. vačkového hriadeľa so zvyšujúcimi sa otáčkami hriadeľa bola potvrdená meraním v prvej časti experimentu. Táto časť experimentu prebehla na vzorke 27 snímačov polohy KH a 25 snímačov polohy VH. Detailné grafické znázornenie výsledkov je uvedené v prílohe P1.

Toto zistenie umožnilo nasledujúce merania v druhej fáze experimentu vykonať pri jednotných otáčkach, ktoré zodpovedali reálnym podmienkam v spaľovacom motore pre každý typ senzoru. Rozdiel medzi maximálnou a minimálnou hodnotou fázového posunu snímačov polohy kľukového hriadeľa pri štatistickej vzorke 50 kusov snímačov nadobudol hodnotu $3,6^\circ$. Variabilita snímačov polohy vačkového hriadeľa pri rovnakej štatistickej vzorke snímačov oscillovala v rozmedzí 1° .

Veľkosť fázového posunu signálu zo snímača polohy odosielaného do elektronickej riadiacej jednotky motora je zohľadňovaná pri určení hodnoty predstihu zážihu. Predstih zážihu je vzťahovaný k polohe kľukového hriadeľa a udáva sa v stupňoch pootočenia kľukového hriadeľa pred hornou úvratou, vid' *obrázok 38* [9]. Pokiaľ je veľkosť fázového posunu signálu zo snímača polohy mimo predpokladaný rozsah, môže dôjsť k nepresnostiam pri riadení spaľovacieho procesu a spaľovací motor tak nepracuje v optimálnom režime. Správna voľba uhlu zážihu zabezpečuje maximalizáciu výkonu motora, nižšiu spotrebu paliva a zníženie obsahu škodlivých látok v produkovaných spalinách.



Obrázok 38 Poloha kľukového hriadeľa a piestu pri predstihu (P) pred hornou úvratou (HÚ) [9]

Experimentom zistená variabilita týchto snímačov v podobe rozdielnych hodnôt fázových posunov odosielaných signálov, môže vzhľadom na rýchlosť priebehu pracovných cyklov motora a požiadavku vysokej presnosti okamihu zážihu vplyvať na prípravu palivovej zmesi a jej samotné spaľovanie. Z tohto dôvodu môže dochádzať k odlišnostiam vo výkonových a emisných charakteristikách aj pri totožných pohonných jednotkách, čo sa môže prejaviť rozdielnou spotrebou paliva a dynamikou vozidla, či odlišnosťami v produkovaných emisiách výfukových plynov. S ohľadom na zistené výsledky je možné konštatovať, že ako problematická sa môže javiť najmä variabilita snímačov polohy kľukového hriadeľa.

Pre overenie správnosti merania bola vykonaná kontrola opakovateľnosti experimentu pomocou piatich totožných meraní vykonaných v krátkom časovom slede za sebou. Po zaznamenaní dát zo všetkých snímačov, bolo taktiež zopakované meranie prvého analyzovaného snímača. Z nameraných hodnôt vyplýva, že presnosť merania bola dosahovaná počas celého experimentu. Výsledky je tak možné považovať za relevantné a použiteľné pre nadväzujúci výskum, v ktorom môže meranie vplyvu variability snímačov na výkonové alebo emisné charakteristiky prebiehať na reálnom spaľovacom motore.

ZÁVER

Zážihový spaľovací motor sa skladá z veľkého množstva komponentov, z ktorých každý v určitej miere ovplyvňuje jeho výkonové či emisné charakteristiky. Súčasnú prísne emisné normy vedú k neustálemu znižovaniu povolených hodnôt škodlivých látok produkovaných spaľovaním paliva. Z tohto dôvodu sa výrobcovia automobilov snažia o dosiahnutie čo najnižších emisií výfukových plynov pri maximalizácii výkonu motora. Existuje mnoho spôsobov, ako daný cieľ dosiahnuť. Jedným z nich je optimalizácia vstrekovania paliva a správne načasovanie zapalovania palivovej zmesi. Dôležitú úlohu pri riadení týchto procesov zabezpečujú snímače polohy kľukového a vačkového hriadeľa, ktoré odosielať signály do riadiacej jednotky motora.

Táto bakalárska práca sa zaoberala experimentálnym zistením variability snímačov polohy kľukového a vačkového hriadeľa a posúdením možnosti vplyvu variability týchto snímačov na výkonové charakteristiky motora. S ohľadom na vykonanú rešerš používaných typov a prevedení snímačov bol experiment vykonaný na štatistickej vzorke 100 kusov snímačov využívajúcich Hallov efekt. Nakoľko by meranie charakteristík snímačov na skutočnom spaľovacom motore bolo komplikované, bolo pre experiment navrhnuté a skonštruované meracie zariadenie kompaktných rozmerov, ktoré nahrádzalo reálne komponenty spaľovacieho motora.

Prvá časť experimentu, ktorá pozostávala z merania charakteristík snímačov pri štyroch rôznych frekvenciách otáčania hriadeľa, potvrdila predpoklad rastúcej závislosti medzi fázovým posunom signálu zo snímača polohy kľukového, resp. vačkového hriadeľa a zvyšujúcimi sa otáčkami. V druhej časti experimentu bolo meranie vykonané pri jednej frekvencii otáčania hriadeľa, ktorá sa odlišovala pre každý typ analyzovaného snímača a zodpovedala skutočným pracovným otáčkam hriadeľa pre daný snímač. Po zaznamenaní napät'ovej odozvy zo všetkých snímačov pomocou osciloskopu, boli výsledky následne spracované a vyhodnotené.

Z nameraných hodnôt fázových posunov signálov zo snímačov polohy kľukového hriadeľa vyplýva, že fázové posuny sa pohybovali v rozmedzí $3,6^\circ$. Variabilita snímačov polohy vačkového hriadeľa bola výrazne nižšia. Hodnoty fázových posunov pri týchto snímačoch oscillovali v rozmedzí 1° . Analýza variability snímačov polohy kľukového a vačkového hriadeľa potvrdila hypotézu, že tieto komponenty môžu vplyvať na výkonové a emisné charakteristiky motora. Tým bol dosiahnutý cieľ bakalárskej práce a zistené výsledky môžu slúžiť ako podklad pre nadväzujúci výskum, v ktorom môžu byť konkrétne snímače s konkrétnymi nameranými charakteristikami otestované pri meraní výkonových alebo emisných charakteristík na reálnom spaľovacom motore. V ďalšom kroku budú môcť byť stanovené postupy na dosiahnutie optimalizácie vstrekovania paliva a zapalovania palivovej zmesi elimináciou variability snímačov polohy kľukového a vačkového hriadeľa, ktorá môže byť dosiahnutá napríklad správnym prekalibrovaním snímačov, zosúladením parametrov snímačov so softvérom riadiacej jednotky, prípadne u vozidiel vyrábaných v malých sériách, ako sú napríklad pretekárske špeciály, výberom snímačov po ich otestovaní pred montážou do pohonnej jednotky vozidla.

POUŽITÉ INFORMAČNÉ ZDROJE

- [1] *Spařovací zážihový motor*. Online. In: Auto.cz. Dostupné z: <https://www.auto.cz/galerie/ojetiny/54693/motory-1-8-tsi-a-2-0-tsi-je-uz-obrovsky-motorovy-prusvih-vyleceny?foto=2>. [cit. 2024-05-06].
- [2] *Zážihový motor - SEKA*. Online. SEKA.sk. Dostupné z: https://www.seka.sk/storage/app/media/stranky/technici/skolenia/Ucebne_texty_zaziho_vy_motor.pdf. [cit. 2024-05-06].
- [3] *Zazihovy-motor-princip-fungovania*. Online. In: Cebia. 2023. Dostupné z: <https://sk.cebia.com/detailArticle/zazihovy-motor-princip-fungovania-historia>. [cit. 2024-05-06].
- [4] *Typy vstrekovania paliva*. Online. In: Autolexikon.net. Dostupné z: <https://www.autolexikon.net/sk/articles/mpi-multi-point-injection/>. [cit. 2024-05-06].
- [5] *Crankshaft Position Sensor: Learn Diagram, Location, Working, Functions, and Types*. Online. Testbook. 2023. Dostupné z: <https://testbook.com/mechanical-engineering/crankshaft-position-sensor>. [cit. 2023-12-06].
- [6] DAS, Sangeeta. *Crankshaft-position-sensor-diagram*. Online. Lambda Geeks. 2023. Dostupné z: https://cs.lambdageeks.com/crankshaft-position-sensor-diagram/?utm_content=cmp-true. [cit. 2023-12-23].
- [7] *Kľukový hriadel'*. Online. AUTORIDE. 2017, 18.9.2022. Dostupné z: <https://autoride.sk/klukovy-hriadel-ako-funguje>. [cit. 2023-12-23].
- [8] REIF, Konrad. *Automotive Mechatronics: Automotive Networking, Driving Stability Systems, Electronics*. Bosch Professional Automotive Information. Imprint: Springer Vieweg, 2015. ISBN 9783658039752.
- [9] STEINBRENNER, Ulrich. *Systém řízení motoru Motronic*. Technická příručka (Bosch). Praha: Robert Bosch, 1999. ISBN isbn80-902-5853-0.
- [10] *Camshaft Position Sensor: Learn Diagram, Location, Working, Types, and Symptoms*. Online. Testbook. 2023. Dostupné z: <https://testbook.com/mechanical-engineering/camshaft-position-sensor>. [cit. 2023-12-06].
- [11] *Váčkový hriadel': Ako funguje?* Online. AUTORIDE. 2017, 25.11.2022. Dostupné z: <https://autoride.sk/vackovy-hriadel-jeho-funkcia-dozvi-sa-viac>. [cit. 2023-12-23].
- [12] *PARKSIDE_PFBFS 160 B2*. Online. In: PARKSIDE. 2024. Dostupné z: <https://parksidediy.com/cz/p/100348044/parkside-jemna-vrtaci-bruska-pfbs-160-b2>. [cit. 2024-01-20].
- [13] *58 Tooth Billet Reluctor Wheel*. Online. In: Rocketindustries. 2024. Dostupné z: <https://rocketindustries.com.au/12586768-1-billet-58-tooth-reluctor>. [cit. 2024-01-24].

- [14] *6205_Deep groove ball bearing*. Online. In: SKF. 2020. Dostupné z: <https://www.skf.com/cz/productinfo/productid-6205>. [cit. 2024-01-20].
- [15] *Variabilní transformátor*. Online. In: Cz.rs-online. 2020. Dostupné z: <https://cz.rs-online.com/web/p/variaky-variabilni-transformatory/8902799>. [cit. 2024-02-03].
- [16] *PICOSCOPE 3000*. Online. Meilhaus. 2022. Dostupné z: <https://www.meilhaus.de/en/picoscope-3000.htm>. [cit. 2024-02-01].
- [17] *Inkrementálny snímač*. Online. Sensorwiki. 2014, 2.2.2015. Dostupné z: https://senzor.robotika.sk/sensorwiki/index.php/Inkrement%C3%A1lny_sn%C3%ADma%C4%8D. [cit. 2024-03-17].
- [18] *E-38 7 - Crankshaft Position Sensor*. Online. In: Oembimmerparts. 2023. Dostupné z: https://oembimmerparts.com/cdn/shop/products/ScreenShot2023-02-22at8.28.41AM_419a5e85-cf8a-4c60-bbb8-cebad1e62526_600x.png?v=1677076311. [cit. 2023-12-30].
- [19] *Crankshaft*. Online. In: Banner2.cleanpng. 2018. Dostupné z: <https://banner2.cleanpng.com/20180407/lfw/kisspng-crankshaft-car-ls-based-gm-small-block-engine-stro-engine-5ac9379f462391.8065063615231364152873.jpg>. [cit. 2023-12-30].
- [20] *Crankshaft-Position-Sensor-1*. Online. In: Theengineerspost. 2022. Dostupné z: <https://www.theengineerspost.com/wp-content/uploads/2022/03/Crankshaft-Position-Sensor-1.jpg>. [cit. 2023-12-30].
- [21] *Crankshaft position sensor (CKP): Working, Types, Symptoms*. Online. In: Mechcontent. 2023. Dostupné z: <https://mechcontent.com/what-crankshaft-sensor-do/>. [cit. 2023-12-30].
- [22] *Camshaft-Position-Sensor*. Online. In: Mechanicalboost. 2022. Dostupné z: <https://mechanicalboost.com/wp-content/uploads/2022/10/Camshaft-Position-Sensor.webp>. [cit. 2023-12-30].
- [23] *Intake-Engine-Camshaft-For-SKODA*. Online. In: Alibaba. 2004. Dostupné z: https://www.alibaba.com/product-detail/06H109021J-Intake-Engine-Camshaft-For-SKODA_1600406140267.html. [cit. 2023-12-30].
- [24] *Camshaft-position-sensor-25*. Online. In: Eurosource. 2023. Dostupné z: <https://eurosource.ca/product/camshaft-position-sensor-25/>. [cit. 2023-12-30].
- [25] *Camshaft Position Sensor (CMP)*. Online. In: Autoditex. 2020. Dostupné z: <https://autoditex.com/page/camshaft-position-sensor-cmp-12-1.html>. [cit. 2023-12-30].
- [26] *04C907601K*. Online. In: Ecstuning. 2020. Dostupné z: <https://www.ecstuning.com/b-genuine-volkswagen-audi-parts/sender/04c907601k/>. [cit. 2024-02-01].

- [27] *06H906433D_Crankshaft Position Sensor*. Online. In: Ecstuning. 2020. Dostupné z: <https://www.ecstuning.com/b-genuine-volkswagen-audi-parts/sender/06h906433d/>. [cit. 2024-02-01].
- [28] *EIL580P-SC*. Online. In: Baumer. 2024. Dostupné z: <https://www.baumer.com/ch/en/product-overview/rotary-encoders-angle-sensors/industrial-encoders-incremental/58-mm-precise-optical/eil580-sc-eil580p-sc/eil580p-sc/p/39231>. [cit. 2024-03-17].

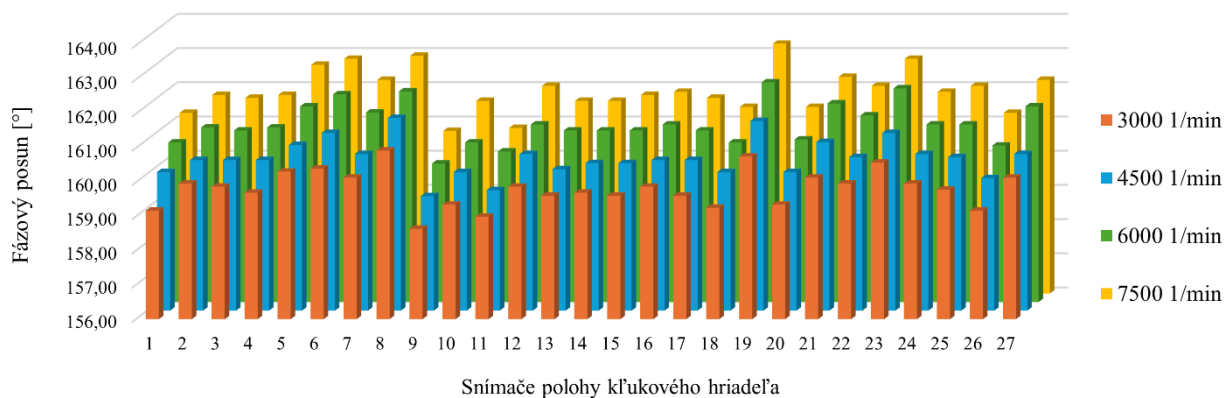
ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV

<i>ECU</i>	[-]	Elektronická riadiaca jednotka
<i>KH</i>	[-]	Kľukový hriadeľ
<i>n</i>	[min ⁻¹]	Počet otáčok za minútu
<i>T_S</i>	[s]	Segmentovaný čas
<i>VH</i>	[-]	Vačkový hriadeľ
φ	[°]	Fázový posun

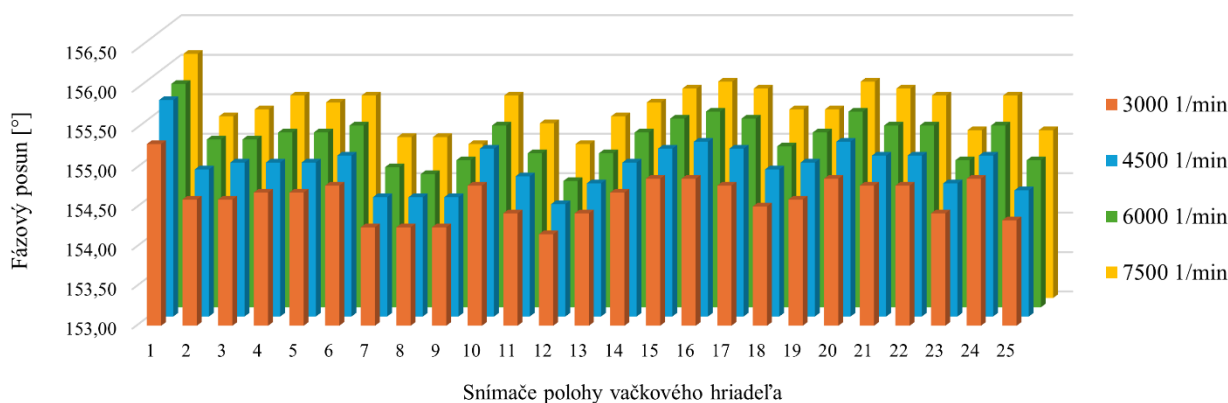
ZOZNAM PRÍLOH

- P1 Grafické znázornenie výsledkov 1. časti experimentu
- P2 Namerané hodnoty jednotlivých snímačov v 2. časti experimentu

Príloha 1: Grafické znázornenie výsledkov 1. časti experimentu



Graf 1 Fázové posuny snímačov polohy KH



Graf 2 Fázové posuny snímačov polohy VH

Príloha 2: Namerané hodnoty jednotlivých snímačov v 2. časti experimentu

Tabuľka 1 Namerané hodnoty

Typ snímača	Snímač polohy VH		Snímač polohy KH		
	Označenie	Dieliky	Fázový posun	Dieliky	Fázový posun
		[-]	[°]	[-]	[°]
1	1753	154,07	1806	158,73	
2	1760	154,69	1807	158,82	
3	1759	154,60	1807	158,82	
4	1755	154,25	1810	159,08	
5	1756	154,34	1809	158,99	
6	1758	154,51	1810	159,08	
7	1756	154,34	1823	160,22	
8	1758	154,51	1814	159,43	
9	1756	154,34	1818	159,79	
10	1762	154,86	1808	158,91	
11	1752	153,98	1807	158,82	
12	1759	154,60	1813	159,35	
13	1760	154,69	1811	159,17	
14	1755	154,25	1815	159,52	
15	1760	154,69	1803	158,47	
16	1757	154,42	1843	161,98	
17	1758	154,51	1844	162,07	
18	1754	154,16	1813	159,35	
19	1759	154,60	1815	159,52	
20	1755	154,25	1807	158,82	
21	1755	154,25	1810	159,08	
22	1757	154,42	1803	158,47	
23	1758	154,51	1807	158,82	
24	1756	154,34	1803	158,47	
25	1758	154,51	1813	159,35	

Označenie	Dieliky	Fázový posun	Dieliky	Fázový posun
	[-]	[°]	[-]	[°]
26	1759	154,60	1806	158,73
27	1761	154,78	1831	160,93
28	1758	154,51	1829	160,75
29	1755	154,25	1807	158,82
30	1759	154,60	1816	159,61
31	1754	154,16	1809	158,99
32	1756	154,34	1812	159,26
33	1758	154,51	1811	159,17
34	1755	154,25	1825	160,40
35	1756	154,34	1833	161,10
36	1757	154,42	1817	159,70
37	1755	154,25	1826	160,49
38	1754	154,16	1822	160,14
39	1753	154,07	1824	160,31
40	1756	154,34	1809	158,99
41	1757	154,42	1809	158,99
42	1760	154,69	1805	158,64
43	1754	154,16	1808	158,91
44	1755	154,25	1828	160,66
45	1752	153,98	1810	159,08
46	1758	154,51	1816	159,61
47	1754	154,16	1817	159,70
48	1756	154,34	1812	159,26
49	1754	154,16	1815	159,52
50	1759	154,60	1809	158,99