

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Možnosti optimalizace homologační měřicí sestavy spalovacích motorů
Bakalářská práce

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Jiří Říha**
Osobní číslo: **D20436**
Studijní program: **B3709 Dopravní technologie a spoje**
Studijní obor: **Elektrotechnické a elektronické systémy v dopravě**
Téma práce: **Možnosti optimalizace homologační měřicí sestavy spalovacích motorů**
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě**

Zásady pro vypracování

Úkolem bakaláře bude popsat homologační proces zážehového motoru, včetně realizace vzorových homologačních zkoušek s původní měřicí sestavou a optimalizovanou. Součástí práce bude též vyhodnocení vlivu úprav, popis a princip činnosti potřebných snímačů fyzikálních veličin a jejich vyhodnocovací systém.

Úkoly bakaláře:

- *Popis elektroniky moderního spalovacího motoru*
- *Seznámení se snímači fyzikálních veličin*
- *Popis homologačního měření včetně měřicí sestavy*
- *Popis možností optimalizace měřicí sestavy*
- *Realizace homologačního měření a ověření vlivu optimalizace měřicího řetězce*

Rozsah pracovní zprávy:

Rozsah grafických prací:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- VLK, František. Automobilová elektronika. Brno: František Vlk, 2006. ISBN 80-239-7063-1.
- ZABLER, Erich. Snímače v motorových vozidlech. Přeložil Tomáš KAMPÁN. Praha: Robert Bosch, 2003. Technické vzdělávání. ISBN 80-903132-5-6.
- VLK, František. Elektronické systémy motorových vozidel. Brno: František Vlk, 2002. ISBN 80-238-7282-6.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Ondřej Sadílek, Ph.D.

Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě

Datum zadání bakalářské práce:

30. listopadu 2022

Termín odevzdání bakalářské práce:

9. května 2023

L.S.

doc. Ing. Libor Švadlenka, Ph.D.
děkan

Ing. Dušan Čermák, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlašuji:

Práci s názvem Možnosti optimalizace homologační měřicí sestavy spalovacích motorů jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne

Jiří Říha v. r.

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat panu Ing. Ondřeji Sadílkovi, Ph.D. za odborné vedení, za pomoc a rady při výběru tématu a věcné připomínky při psaní této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat firmě ŠKODA AUTO a. s. za poskytnutí podkladů a dat k této práci. Největší poděkování patří mé rodině za trpělivost, kterou se mnou měla nejen při psaní této bakalářské práce, ale i po celou dobu studia.

ANOTACE

Bakalářská práce se zabývá optimalizací homologačního měření spalovacího motoru. Popisuje nejdůležitější části zážehového motoru, které jsou potřebné k jeho správné funkci. Dále probírá různé druhy snímačů používaných při procesu zkoušek motorů. Zabývá se jednotlivými elektrickými signály a jejich převody. Popisuje proces kalibrace, vliv nejistot měření a možnosti optimalizace měření při homologacích. Dále se zabývá porovnáním způsobů kalibrací a jejich vlivu na odchylky a nejistoty měření.

KLÍČOVÁ SLOVA

spalovací motory, snímače, převodníky, kalibrace, homologace, nejistoty měření

TITLE

Optimization possibilities of the internal combustion engines homologation measuring set

ANNOTATION

This bachelor's thesis deals with the optimization of homologation measurement of an internal combustion engine. It describes the most important parts of a spark-ignition engine that are needed for its proper functioning. It also discusses the different types of sensors used in the engine testing process. It discusses the different electrical signals and their transmissions. Describes the calibration process, the effect of measurement uncertainties, and how to optimize measurements during homologation. It also compares calibration methods and their effect on measurement deviations and uncertainties.

KEYWORDS

internal combustion engines, converters, sensors, calibration, homologation, measurement uncertainties

OBSAH

SEZNAM ILUSTRACÍ	9
SEZNAM TABULEK	10
ÚVOD	11
1 Zážehový spalovací motor	12
2 Elektronika spalovacího motoru	16
2.1 Zdrojová soustava	16
2.2 Zapalovací soustava	16
2.3 Startovací zařízení	17
3 Snímače využívané pro řízení spalovacího motoru	18
3.1 Vlastnosti snímačů	18
3.2 Tlakové snímače	19
3.2.1 Technologie	20
3.3 Vlhkoměry	21
3.3.1 Technologie	21
3.4 Průtokoměry	22
3.4.1 Technologie	22
3.5 Snímače teploty	24
3.5.1 Odporové snímače	24
3.5.2 Termočlánky	25
3.5.3 Termistory	26
3.6 Otáčkoměry	26
3.6.1 Tachometry	27
3.6.2 Stroboskopy	27
3.6.3 Indukční snímače	27
3.6.4 Hallův snímač	28
3.7 Snímače točivého momentu	28
4 Převodníky	30
4.1 A/D převodníky	31
4.1.1 Komparační A/D převodníky	31
4.1.2 Integrovaní A/D převodníky	32
4.2 D/A převodníky	32
5 Možnosti optimalizace homologační měřicí sestavy	34

5.1 Kalibrace	35
5.2 Nejistoty měření	37
5.3 Homologace	38
5.4 Homologační měření	39
5.5 Porovnání kalibrací	42
ZÁVĚR	52
POUŽITÁ LITERATURA	60
PŘÍLOHA	61

SEZNAM ILUSTRACÍ

Obrázek 1.1	Čtyřdobý cyklus	12
Obrázek 3.1	Tlakové snímače relativní a absolutní	20
Obrázek 3.2	Coriolisův průtokoměr	23
Obrázek 3.3	Odporový snímač	24
Obrázek 3.4	Termočlánek	25
Obrázek 3.5	Typy ukončení termočláнку	26
Obrázek 3.6	Ruční tachometry	27
Obrázek 3.7	Umístění tenzometrů	29
Obrázek 3.8	Porovnání snímačů momentu	29
Obrázek 4.1	Porovnání signálů	30
Obrázek 5.1	Motorová zkušebna	34
Obrázek 5.2	Motorová zkušebna při provozu	35
Obrázek 5.3	Nejistoty měření	37
Graf 5.1	Teplota plnicího vzduchu	40
Graf 5.2	Teplota oleje	40
Graf 5.3	Teplota před katalyzátorem	41
Graf 5.4	Plnicí tlak turbodmyhadla	41
Graf 5.5	Tlak ve výfuku	42
Graf 5.6	Spotřeba paliva	42
Obrázek 5.4	Blokové schéma kalibrace termočláнку	44
Obrázek 5.5	Blokové schéma kalibrace CSM modulu	44
Obrázek 5.6	Blokové schéma kalibrace řetězce	44
Obrázek 5.7	Umístění čidel v klimatizační komoře	44
Obrázek 5.8	Umístění čidel v kalibrační píce	45
Obrázek 5.9	Měřící CSM modul se zapojeným termočláńkem	45
Obrázek 5.10	Použitá zařízení pro generování požadované teploty	46
Obrázek 5.11	Použití multifunkčního kalibrátoru GE Sensing	46
Obrázek 5.12	Kalibrace CSM modulu	47
Graf 5.7	Průměrné odchylky při kalibraci jednotlivých prvků zvlášť	47
Graf 5.8	Průměrná odchylka při kalibraci řetězce	48
Graf 5.9	Porovnání kalibrací	49

Graf 5.10 Průměrná odchylka při kalibraci řetězce po justáži	50
Graf 5.11 Porovnání odchylek kalibrací	51

SEZNAM TABULEK

5.1 Použitá zařízení	43
5.2 Hodnoty z kalibrace jednotlivých částí	48
5.3 Hodnoty z kalibrace řetězce	48
5.4 Hodnoty z kalibrace řetězce po justáži	50
5.5 Hodnoty rozšířených nejistot	50
6.1 Naměřené hodnoty při kalibraci termočlátku	61
6.2 Naměřené hodnoty při kalibraci CSM modulu	61
6.3 Naměřené hodnoty při kalibraci řetězce	61
6.4 Naměřené hodnoty při kalibraci řetězce po justování	62
6.5 Zdroje nejistot při kalibraci termočlátku	62
6.6 Zdroje nejistot při kalibraci CSM modulu	62
6.7 Zdroje nejistot při kalibraci řetězce	62
6.8 Zdroje nejistot při kalibraci řetězce po justáži	63

ÚVOD

Spalovací motor zatím patří mezi nejrozšířenější pohonné jednotky v automobilech. Pro zjištění vlastností spalovacích motorů a povolení používat konkrétní motor při výrobě automobilu slouží proces homologace, zaštitěný státními orgány. Homologační měření nespočívá pouze v měření výkonnostních charakteristik a emisí, ale i měření průběhů teplot, tlaků a jiných fyzikálních veličin na důležitých místech motoru.

Vzhledem ke stále se zpřísňujícím požadavkům na výrobu nových automobilů se spalovacími motory lze očekávat i větší důraz na přesnost homologačních měření. To je důvod, proč jsem si vybral téma možnosti optimalizace homologační měřicí sestavy spalovacích motorů. Příprava homologačních měření je zčásti i náplní mého zaměstnání, a proto jsem se chtěl na toto téma zaměřit, prohloubit své znalosti a případně přijít s novými poznatky a aplikovat je v praxi.

Byť poslední dobou zaznívají často diskuze o konci spalovacích motorů, je důležité si uvědomit, že se to v blízké době pravděpodobně nestane na celém světě. Stále budou existovat trhy, kde naleznou spalovací motory své uplatnění. Proto je nutné i nadále pracovat na jejich vývoji.

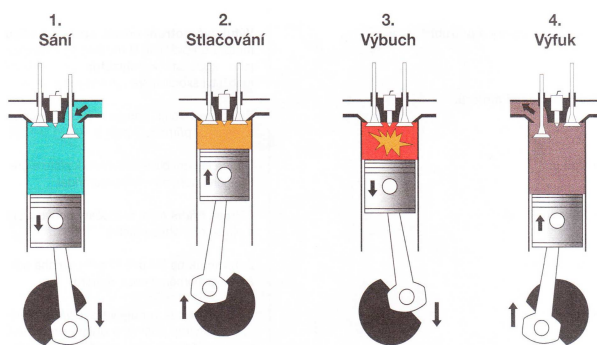
Cílem bakalářské práce je nalézt řešení možnosti zpřesnění měření s možností aplikace v praxi. Součástí bakalářské práce by měl být popis jednotlivých druhů snímačů používaných ve spalovacích motorech a při samotných homologačních měřeních a dále popis elektrických signálů a možnosti jejich zpracování. Následovat by mělo představení možnosti optimalizace měřicího procesu spolu s důležitými podrobnostmi k pochopení dané problematiky. Součástí by měla být i data z již provedené homologace.

Hlavním zdrojem informací pro tuto práci byly webové stránky výrobců snímačů a odborné webové stránky zabývající se touto problematikou.

1. Zážehový spalovací motor

Spalovací motor je mechanické zařízení sloužící zpravidla pro pohon vozidel. Dochází zde k přeměně chemické energie paliva na rotační mechanickou energii, která se přenáší na kola vozidla. Většina motorů je v dnešní době pístová, kde posuvný pohyb pístů je přes ojnici a klikovou hřídel převáděn na rotační pohyb [1]. Existuje i Wankelův motor, kde samotný píst vykonává rotační pohyb. Tento typ motoru se ale využívá velmi málo.

V dnešní době se nejvíce využívá čtyřdobý cyklus motoru. V první fázi - při pohybu pístu směrem z horní úvrati do dolní se otevře sací ventil a je nasáván vzduch, případně směs vzduchu a paliva. Následně pohybem pístu z dolní do horní úvrati dochází ke stlačování, a tedy kompresi směsi paliva a vzduchu, která je ve vhodný okamžik zapálena a dochází k výbuchu, který tlačí píst zpět k dolní úvrati. Poté se při pohybu směrem z dolní do horní úvrati otevírá výfukový ventil a dochází k výfuku spalin do výfukového potrubí. Tyto čtyři cykly se stále dokola opakují.



Obrázek 1.1: Čtyřdobý cyklus [2]

Vstřikování paliva se dělí na přímé a nepřímé. Před vynalezením přímého vstřikování se používalo pouze vstřikování nepřímé. To se používá i dnes, ovšem ve velké míře je nahrazováno přímým vstřikováním. Nepřímé vstřikování může být jednobodové, kde se do sacího potrubí v jednom bodě před škrtkicí klapku vstřikuje požadované množství paliva. To je poté ve formě směsi se vzduchem dopraveno do válců motoru. Nevýhodou je nestejněměrné plnění válců. Druhou možností je vstřikování vícebodové, kde dochází ke vstřiku do sacího potrubí před každým válcem. Tím je dosaženo rovnoměrného plnění [3].

Při přímém vstřikování se sacím ventilem nasává pouze čistý vzduch a samotné palivo se vstřikuje pomocí vysokotlakých vstřikovacích ventilů přímo do válců. Tím je možné dosáhnout dokonalejšího spalování, což vede ke zvýšení účinnosti, vyššímu výkonu a nižším emisím. Přímé vstřikování umožňuje provozovat motor v několika režimech. Homogenní provoz, kde je palivo rovnoměrně rozprostřeno v celém objemu válce se používá při potřebě vyššího výkonu.

Nehomogenní provoz neboli provoz s vrstveným plněním, kde většinu válce vyplňuje vzduch a palivo se vstříkuje pouze pod svíčku, se používá při potřebě nízkého výkonu pro snížení spotřeby paliva. Další možností je kombinace předchozích dvou režimů, tedy homogenní provoz s vrstveným plněním. V tomto případě se většina paliva vstříkne při sacím cyklu a tím dojde k vytvoření chudé homogenní směsi a následně při kompresi se pod svíčku vstříkne zbytek paliva, což vytvoří bohatou směs v prostoru svíčky, která je snáze zapalitelná, a ta následně zapálí i homogenní chudou směs. Tohoto režimu se využívá pro plynulejší přechod mezi hlavními režimy [3].

Ke vstřikování paliva se využívají elektromagnetické ventily, které mohou být buď nízkotlaké, nebo vysokotlaké. Hlavním požadavkem je rychlé otevření a následné uzavření, což zabezpečí správné množství vstříknutého paliva. Množství vstříknutého paliva se řídí časem otevření elektromagnetického ventilu. Požadované množství závisí na požadované bohatosti směsi a na množství nasátého vzduchu. Otevírání ventilů ovládá řídicí jednotka řídicími signály. Těmi spíná koncový tranzistor, který řídí proud cívkou. Ten vytvoří elektromagnetické pole, jež přitáhne kotvu s jehlou, díky tomu začne protékat palivo ventilem [3].

Aktuální bohatost spalované směsi měří lambda sonda. To je zařízení umístěné ve výfukovém potrubí měřící zbytkový kyslík ve spalinách. Lambda sonda se skládá ze dvou platinových elektrod pokrytých ochrannou keramickou vrstvou, kde jedna je vystavena proudu spalin a druhá okolnímu vzduchu jakožto referenční hodnotě. Mezi elektrodami je umístěn keramický materiál na bázi oxidu zirkoničitého, díky kterému vznikne při rozdílu koncentrace vzduchu na jednotlivých elektrodách elektrické napětí. Toto napětí se skokově mění v okolí $\lambda = 1$. Součinitel λ udává poměr nasátého vzduchu ku teoretickému množství vzduchu potřebného pro dokonalé spálení paliva. Pro čistý benzín je potřeba 14,7 kg vzduchu pro spálení 1 kg paliva. Při hodnotách λ nižších než 1 se jedná o bohatou směs, tedy přebytek paliva, což je vhodné při potřebě vyššího výkonu. Při hodnotě λ vyšších než jedna se jedná o chudou směs, což znamená přebytek vzduchu, a tedy nižší spotřebu a výkon. Sondy se skokovou změnou kolem $\lambda = 1$ se nazývají dvoubodové. Pro plynulé měření změny hodnoty λ existují širokopásmové lambda sondy, které spojitě měří hodnotu λ od cca 0,7 až do nekonečna [3].

Zapálení směsi paliva a vzduchu zajišťuje svíčka. Ta prostupuje hlavou motoru do spalovacího prostoru. Na jejím konci jsou dvě elektrody, mezi kterými musí ve správném okamžiku přeskočit elektrický oblouk - jiskra. Elektrický oblouk musí hořet dostatečně dlouhou dobu a musí mít dostatečnou energii, aby bezpečně zapálil směs paliva [3]. Na svíčky jsou kladeny vy-

soké nároky, jelikož na ně působí široký rozsah teplot, tlaků a elektrického napětí. Teploty se při startování v zimě pohybují i pod bodem mrazu, kdežto při plném výkonu přesahují i přes 2000 °C. Tlak se mění od podtlaku při sání až po desítky bar při výbuchu paliva. Dále musí svíčka odolávat agresivnímu prostředí ve spalovacím prostoru. Svíčky se mohou lišit vzdáleností elektrod a také jejich tvarem.

Hořením palivové směsi dochází kromě působení požadovaného tlaku na píst také ke vzniku velkého množství odpadního tepla. To je nutné z motoru odvést, jinak by došlo k jeho zničení. Většinu motorů chladí voda, respektive chladicí kapalina, což je směs destilované vody a speciální látky, jejímž úkolem je zlepšit vlastnosti čisté vody. Chladicí kapalina obsahuje látky působící jako antikorozi ochrana, dále snižují teplotu tuhnutí, ale naopak zvyšují teplotu varu. Chladicí kapalina prochází kanálky vytvořenými v motoru a odvádí z něj přebytečné teplo. Kapalina dále prochází chladičem, kde předává své teplo proudícímu vzduchu [4], tak aby mohla dále ochlazovat motor. Chladicí kapalinu pohání vodní pumpa, tedy čerpadlo poháněné řemenem od motoru. Do potrubí se umísťuje termostat, který má za úkol přemostění chladiče v případě, že je nízká teplota chladicí kapaliny. Na potrubí je paralelně připojen další výměník, který zajišťuje ohřev teplého vzduchu pro kabinu v případě potřeby topení.

Ovládání výkonu motoru je prováděno pomocí škrticí klapky. Ta se nachází ve vzduchovém potrubí před vstupem do motoru. Jejím natáčením se mění průřez potrubí a tím i množství vzduchu, které je motorem nasáto. Úhel natočení se pohybuje v rozsahu od 0° do 90° a řídí se elektronicky pomocí řídicí jednotky [3]. Pro potřeby volnoběhu je vedle klapky umístěn ventil, který opět řídí řídicí jednotka, a s jeho pomocí jsou nastavovány volnoběžné otáčky, které se mohou lišit podle teploty, nebo zatížení vyvolaného např. klimatizací nebo alternátorem. Úhel natočení je snímán a odeslán zpět do řídicí jednotky.

Pro určení správného množství paliva vstříknutého do válce je nutné znát hmotnostní množství nasátého vzduchu. Ideální hmotnostní poměr vzduchu a čistého benzínu je 14,7. K měření hmotnosti nasátého vzduchu slouží zařízení nazývané váha vzduchu, umístěné mezi vzduchový filtr a škrticí klapku. V dnešní době se používají váhy vzduchu na principu vyhřívání drátu nebo s vyhříváním filmem. Drát nebo film jsou vyhřívány na určitou teplotu, což znamená, že při průchodu vzduchu kolem snímače je z něj odebíráno teplo. Snímač má v sobě obvody, jejichž úkolem je udržet teplotu snímače na požadované hodnotě. Při průchodu vzduchu se tak musí zvýšit protékající proud a jeho velikost je úměrná hmotnostnímu průtoku vzduchu [3].

Výkon běžného motoru je omezen jeho objemem, jelikož tím je omezeno maximální množ-

ství vzduchu, které se může za jeden cyklus nasát. Většího množství nasátého vzduchu lze dosáhnout jeho stlačením, tedy zvýšením tlaku. Toho lze u motorů dosáhnout dvěma způsoby. Jedním je použití kompresoru [5]. Kompresor poháněný řemenem má stálý poměr otáček s motorem. Výhodou je okamžitá reakce při změně polohy plynového pedálu, nižší cena a menší údržba. Oproti tomu kompresor zatěžuje motor, a má tedy i nižší účinnost. Druhou možností je turbodmychadlo. To se pohání výfukovými plyny, přivedenými na lopatky kola turbíny. Její hřídel je přímo spojena s kolem kompresoru, které tak stlačuje nasávaný vzduch a vytváří větší tlak [5]. Nevýhodou je zde prodleva, která vznikne díky nutnosti roztočení kola turbíny výfukovými plyny při sešlápnutí plynového pedálu. Doba prodlevy závisí na velikosti turbodmychadla. Malá turbodmychadla mají prodlevu menší a naopak. Prodlevu ale není možné zcela odstranit bez použití jiných přídatných systémů.

2. Elektronika spalovacího motoru

2.1. Zdrojová soustava

Zdrojová soustava se skládá ze dvou částí. Akumulátor tvoří zdroj proudu v době, kdy motor stojí nebo je potřeba ho nastartovat [6]. Oproti tomu alternátor napájí zařízení automobilu a dobíjí akumulátor při nastartovaném motoru.

Akumulátor vytváří elektrickou energii vlivem chemické změny uvnitř akumulátoru. Tyto změny jsou vratné, a lze tedy opakovaně akumulátor nabíjet a vybit. Tím se odlišují od galvanických článků, které je možné po výrobě vybit pouze jednou, jelikož chemická reakce není vratná. Hlavním požadavkem na akumulátory pro automobily je nízký vnitřní odpor, který umožní dodávat vysoké vybíjecí proudy potřebné zejména při startování motoru. Při startování se krátkodobě odebírají proudy v řádu stovek ampérů. Dalším důležitým faktorem je rychlost samovybití, které vybití akumulátor i při nulovém zatížení vlivem svodového odporu. Tento vliv se projevuje při jeho dlouhém nepoužívání, kdy se postupně snižuje stupeň nabití akumulátoru. Tento stav může zapříčinit nemožnost startu vozidla a nevratnou degradaci akumuláčnických schopností - sulfataci.

Alternátor je točivý elektrický stroj, který má na rotoru umístěnou budicí cívkou, nebo případně permanentní magnety. Budicí cívka rotoru může být cize buzená z akumulátoru, anebo se napájí usměrněným napětím ze statoru. Na statoru se ve třech vinutích otočených vůči sobě o 120° indukuje střídavé napětí, které se následně pomocí diod usměrňuje. Stator musí být z důvodu ztrát vířivými proudy složen z plechů, které jsou od sebe elektricky izolovány. Alternátor je poháněn přes řemen od klikové hřídele, tím pádem se v širokém rozsahu mění jeho otáčky a tím i indukované napětí. Napětí je nutné snímat a pomocí regulátoru napětí upravovat tak, aby se pohybovalo v určitém rozmezí. Regulace probíhá změnou budicího proudu rotoru [3]. Pro 12 V systém je výstupní napětí alternátoru regulováno na napětí kolem 14 V.

2.2. Zapalovací soustava

Zapálení směsi, jak bylo popsáno výše, je prováděno pomocí svíčky. Proto aby mohl vzniknout oblouk, jsou nutné obvody zajišťující vznik vysokého napětí. Existují dvě různé možnosti, jak dosáhnout vzniku vysokého napětí na elektrodách svíčky.

Indukční zapalovací soustava využívá transformátor, kdy primárním vinutím protéká stejnosměrný proud a tím se vytváří magnetické pole. Energie magnetického pole uložená v cívce odpovídá $W = 1/2LI^2$ [J]. Při rozpojení obvodu primárního vinutí dochází ke skokové změně proudu, tím se skokově mění magnetický tok a vlivem této změny se na sekundárním vinutí

indukuje vysoké napětí [3]. Toto napětí ionizuje prostor mezi elektrodami svíčky a následně přeskóčí oblouk. Po přeskóčení oblouku dojde vlivem protékajícího proudu k poklesu napětí na sekundárním vinutí. Oblouk hoří tak dlouho, dokud je na sekundárním vinutí dostatečné napětí pro jeho udržení, tedy dokud se nevyčerpá veškerá uložená energie. Pro rozepnutí obvodu primárního vinutí se používají polovodičové součástky řízené řídicí jednotkou.

Druhou možností jsou kondenzátorové zapalovací soustavy, kde se energie ukládá ve formě elektrického pole kondenzátoru $W = 1/2CU^2$ [J]. Aby nebylo nutné používat kondenzátory s obrovskou kapacitou, nejsou kondenzátory nabíjeny přímo napětím ze zdrojové soustavy, ale mají před sebou zařazený zvyšovací DC/DC měnič, jehož výstupem může být napětí o velikosti až 400 V. Stejně jako u indukční soustavy používá i kondenzátorová soustava transformátor, přes jehož primární vinutí se kondenzátor ve vhodnou chvíli zkratuje. Vlivem prudkého nárůstu proudu, a tedy i magnetického toku se v sekundárním vinutí indukuje vysoké napětí, které způsobí přeskóčení oblouku mezi elektrodami svíčky [3]. Pro zkratování kondenzátoru se používají opět polovodičové součástky.

2.3. Startovací zařízení

Proto aby mohl zážehový motor pracovat, je nutné ho nejprve externě roztočit na startovací otáčky, kde si už následně přebere funkci samotný spalovací motor. Pro roztočení motoru se používá zařízení nazývané startér. Jde zpravidla o stejnosměrný sériový motor, tvořený sériovou kombinací statorového a rotorového vinutí. Důležitou část točivého stroje představuje komutátor (ve své podstatě mechanický usměrňovač), přes který teče proud do rotorové části. Hřídel rotoru je pohyblivá a na jejím konci se nachází pastorek, tedy malé ozubené kolo, jehož zuby při vysunutí hřídele zapadnou mezi zuby setrvačnicku motoru a startér tak může roztočit spalovací motor [3]. Po roztočení motoru se hřídel rotoru zasune zpět a spalovací motor se točí sám. Posun hřídele probíhá pomocí elektromagnetu a páky, které sílu od elektromagnetu přenesou na hřídel.

3. Snímače využívané pro řízení spalovacího motoru

V českém jazyce existuje mnoho synonym pro snímač, a to například: čidlo, senzor nebo detektor. Snímačem zpravidla rozumíme technické prostředky pro měření fyzikálních veličin a zjišťování jejich přesné velikosti [7]. Mohou sloužit také pro měření polohy nebo například ke zjištění přítomnosti určité chemické látky a její koncentrace. Principem snímačů je převod jedné fyzikální veličiny na jinou s určitými parametry tak, aby bylo možné správně odečíst její hodnotu, případně dále zpracovat její výstupní signál. Typů snímačů existuje celá řada a vždy záleží na tom, co chce konkrétní uživatel měřit. Tato kapitola bude omezena na snímače, které se používají v průmyslu a automobilech.

3.1. Vlastnosti snímačů

Snímače se rozdělují podle mnoha kritérií. Za základní rozdělení je možné považovat rozdělení na snímače s neelektrickým nebo elektrickým výstupním signálem. Neelektrickým výstupem může být například výchylka ručičky na stupnici. To má obrovskou nevýhodu, jelikož obsluha musí vizuálně odečíst hodnotu, a tedy není možné tuto hodnotu zaznamenávat kontinuálně. Následné zpracování dat je také dosti omezené a komplikované. Zato snímače s elektrickým výstupem mají mnohdy větší využití, jelikož jejich výstupní signál je možné pomocí různých převodníků¹ zpracovat a buď přímo zobrazit na displeji, což umožňuje jednodušší odečtení správné hodnoty, anebo s ním následně dále pracovat v měřicím systému.

Elektrický výstupní signál lze dále rozdělit na analogový a digitální. Analogový signál je v čase i amplitudě spojitý a bývá jím elektrické napětí nebo proud. Digitální signály jsou v čase a amplitudě nespojité a konkrétní hodnota bývá často reprezentována kódem. Pokud má čidlo digitální výstup, zpravidla obsahuje analogově-digitální převodník, který zpracovává vnitřní analogový signál a převádí ho do požadované digitální podoby pro další zpracování. Elektrický výstupní signál má oproti neelektrickému nevýhodu v náchylnosti na elektromagnetické rušení, které je téměř všudypřítomné a s nímž se musí počítat a zabránit tak jeho vlivu na přesnost měření.

Každý uživatel má různé nároky na vlastnosti konkrétních snímačů. Jedním z hlavních požadavků může být požadovaná přesnost měření. Ta se u analogových měřidel udává ve formě třídy přesnosti, která v procentech vyjadřuje maximální možnou chybu z maximálního rozsahu. U číslicových měřidel se stanovuje chyba čtení a rozsahu, přičemž tyto chyby se sčítají [8].

Další důležitou vlastností je citlivost snímače. Ta udává, jak se změní výstup snímače při

¹Téma převodníků bude popsáno v následující kapitole.

jednotkové změně vstupní veličiny. Citlivost se často zaměňuje s rozlišením, což je vlastnost, jež udává nejmenší změnu vstupní veličiny, kterou lze detekovat s dostatečnou přesností [9].

Linearita výstupu je další vlastností, která by měla uživatele zajímat. Linearita definuje, jak se mění odchylka výstupu od správné hodnoty v celém rozsahu čidla. Tato vlastnost vychází z kalibrační křivky a záleží na tom, v kolika bodech se snímač kalibruje. V ideálním případě by měla být odchylka od správné hodnoty v celém rozsahu stejná.

Všechny výše vyjmenované vlastnosti by bylo možné zařadit do kategorie statických. Druhou kategorií jsou vlastnosti dynamické, jež se dají popsat jako rychlost reakce výstupního signálu na změnu vstupní veličiny. Každý snímač disponuje určitým zpožděním a požadavkem je, aby toto zpoždění bylo pokud možno co nejmenší. Velmi znatelné je toto zpoždění například u teploměrů, kde může trvat i několik sekund, než se výstupní hodnota ustálí. Rychlost ustálení v tomto případě závisí primárně na geometrických dispozicích daného čidla.

Při výběru správného snímače je nutné brát v potaz všechny požadované vlastnosti, které mají ovšem vliv na cenu produktu. Dále se při výběru musí myslet na prostředí, ve kterém bude čidlo provozované, tak aby byla zaručena přesnost měření a provozuschopnost samotného snímače. Dobré je také myslet na zvolený rozsah měřidla, tak aby byl pokryt celý rozsah očekávaných hodnot.

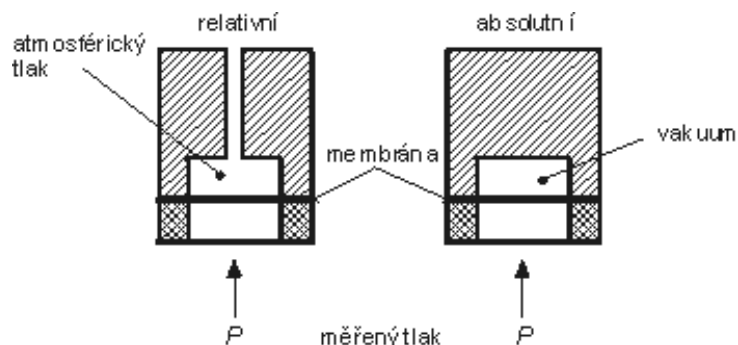
3.2. Tlakové snímače

Tlakový snímač převádí tlak přivedený na membránu na výstupní signál, jehož hodnota odpovídá velikosti přivedeného tlaku [10]. Tlak je definován jako síla, která působí na plochu. Základní jednotkou je pascal [Pa], kdy jeden pascal odpovídá síle jednoho newtonu na plochu jednoho metru čtverečního. Výstupní signál samotného snímače bývá typicky pouze pár milivoltů, což je extrémně nízká hodnota, která má za následek velkou náchylnost na případné elektromagnetické rušení. Proto se za snímač připojuje zpravidla převodník, který signál zesílí a zpracuje tak, aby měl požadované vlastnosti a bylo s ním možné dále pracovat.

Při měření tlaku rozlišujeme hned několik různých typů tlaku, kdy pro každý se liší provedení samotného snímače. Veškeré tlakové snímače fungují na principu porovnávání dvou různých tlaků. Jedním typem je tlak absolutní, který se měří od absolutní nuly, tedy dokonalého vakua, které je ale v praxi nedosažitelné. V tomto případě se měřený tlak porovnává s vakuem, které tvoří vnitřek snímače. Velmi důležitým a často měřeným absolutním tlakem je tlak atmosférický, který vytvoří sloupec vzduchu v atmosféře, na nějž působí gravitační síla Země. Nejvyšší atmosférický tlak se nachází u hladiny moře a se zvyšující se nadmořskou výškou se

sníží. Zařízení pro měření atmosférického tlaku se nazývá barometr.

Dalším typem tlaku je tlak relativní, který se vztahuje k aktuálnímu atmosférickému tlaku v bezprostředním okolí [11]. Na jednu stranu membrány snímače přivádí požadovaný měřený tlak a na druhou pomocí volného průchodu do okolí aktuální atmosférický tlak. Relativní tlak se dá dále rozdělit na podtlak a přetlak, přičemž podtlak je tlak nižší než atmosférický, přetlak je naopak vyšší. Při volbě použitého snímače se musí brát v potaz předpokládaný rozsah měřeného tlaku, tak aby se dramaticky nepřekročil rozsah samotného snímače a nedošlo tak k jeho zničení.



Obrázek 3.1: Tlakové snímače relativní a absolutní [12]

Posledním typem je tlak diferenční, který představuje rozdíl mezi dvěma různými tlaky. Každá strana membrány má zvlášť vyvedený přívod. Toho se dá využít například v potrubích vzduchotechniky pro kontrolu propustnosti filtru, zavření klapky a tak podobně.

3.2.1. Technologie

U mechanických tlakoměrů se pro pohyb ručičky používají různé deformační členy. Velmi často se používá Bourdonova trubice, která se při přivedení tlaku mírně rozmotává a tím vychyluje ručičku tlakoměru. Další možností je membrána mechanicky spojená s ručičkou [13]. Tento princip se využívá při měření velmi malých tlaků.

U elektrických snímačů existuje hned několik technologií pro převod tlaku na elektrický signál. Často používanou technologií jsou tenzometry nalepené na membránu, které vlivem ohybu membrány mění svůj odpor. Dále existují indukční snímače, jež využívají lineární variabilní diferenciální transformátor (LVDT), kde se mění induktivní vazba primárního a sekundárního vinutí, posouváním jádra mezi vinutími, čímž se na sekundárním vinutí indukují napětí, jehož velikost je úměrná velikosti vychýlení jádra. Kapacitní snímače využívají membránu jako jednu z desek kondenzátoru, kdy se při deformaci vlivem vnějšího tlaku mění kapacita tohoto kondenzátoru. Další technologie využívá piezoelektrického jevu u určitých materiálů, kde při působení tlaku na krystal a následnou deformaci vzniká na elektrodách krystalu elektrické napětí. Jiná technologie využívá piezorezistivní jev, což je vlastnost například křemíku s různými

příměsemi měnit svůj elektrický odpor s působícím tlakem. Poslední technologií je reluktanční snímač, který využívá membránu jako součást magnetického obvodu. Při deformaci membrány se mění reluktance, tedy magnetický odpor obvodu, což je možné převést na elektrický signál, jehož parametry odpovídají měřenému tlaku.

3.3. Vlhkoměry

Vlhkoměry jsou zařízení, která slouží k měření vlhkosti vzduchu. Vlhkost je vlastnost vzduchu vázat na sebe vodní páru. Vlhkoměry tedy měří množství vody ve vzduchu. Maximální množství vodních par ve vzduchu je závislé na teplotě. Čím je vyšší teplota vzduchu, tím více vody může být vzduchem absorbováno.

Měření a následná regulace vlhkosti vzduchu je potřebná v mnoha odvětvích. Pro člověka je vhodná vlhkost vzduchu přibližně kolem 50 %RH². Při velmi nízkých hodnotách relativní vlhkosti dochází k vysoušení sliznic dýchacích cest [14]. Naopak při vysoké vlhkosti se snižují přírodní termoregulační schopnosti člověka. Velmi důležitým prostředím pro kontrolu a regulaci vlhkosti vzduchu jsou sklady materiálů, kde je potřeba udržovat vlhkost na co možná nejnižších hodnotách, jelikož při nízké vlhkosti téměř nedochází ke korozi, kdežto se zvyšující se vlhkostí se rychlost koroze exponenciálně zvyšuje. Vlhkost vzduchu může ovlivnit i výkon spalovacího motoru, kdy se zvyšující vlhkostí se výkon nepatrně snižuje. Na to je nutné myslet při testování a homologačních měřeních motorů.

Rozdělujeme několik rozdílných typů vlhkostí. První z nich je absolutní vlhkost, která udává váhové množství vody na objem vzduchu, a to bez vlivu teploty. Při teplotě 0 °C je maximální absolutní vlhkost 5 g/m³, kdežto při 30 °C dokonce 30 g/m³. Čím větší je tedy hodnota absolutní vlhkosti, tím více vodních par je v daném množství vzduchu.

Relativní vlhkost (zkráceně RH) udává v procentech poměr vlhkosti měřeného vzduchu vůči maximální vlhkosti při dané teplotě. Tato hodnota tedy závisí na teplotě. Při relativní vlhkosti 100 % je vzduch nasycen vodními parami a voda se tak dále nemůže vázat na vzduch.

Posledním typem je rosný bod. Ten udává, při jaké teplotě by měl měřený vzduch relativní vlhkost 100 %. Pokud by se tento vzduch ochladil pod teplotu rosného bodu, vodní pára by se vysrážela ve formě malých kapiček a vytvořila by mlhu [15].

3.3.1. Technologie

První technologií jsou snímače kapacitní. Ty tvoří kondenzátor, který mění svoji kapacitu s měnící se vzdušnou vlhkostí. Kondenzátor tvoří dvě elektrody, mezi nimiž je umístěn hygrosko-

²RH – zkratka z anglického jazyka "relative humidity" - relativní vlhkost vzduchu

pický materiál, který tvoří dielektrikum kondenzátoru [16]. Dielektrikem bývá často speciální plast nebo polymery. Se zvyšující se vlhkostí dielektrikum více absorbuje vodní páru ze vzduchu a tím se zvyšuje kapacita kondenzátoru. Nevýhodou tohoto snímače je nízká přesnost při vlhkosti nižší než 5 %RH [17].

Druhou technologií je odporový snímač. Ten pracuje na principu měření elektrického odporu mezi dvěma elektrodami, mezi nimiž je vodivý hygroskopický materiál. Ten zvyšuje svoji vodivost s množstvím absorbované vody, a tedy se zvyšující se vlhkostí vzduchu. Přesnost tohoto snímače je teplotně závislá, a proto bývá často se snímačem instalována i teplotní kompenzace [18].

Snímačem, který měří absolutní vlhkost, je teplotně vodivostní snímač. Ten využívá dva oddělené NTC termistory. Jeden je umístěn v uzavřeném prostoru naplněném dusíkem, který má tu vlastnost, že na sebe neváže vodu. Druhý termistor se nachází v prostoru vzduchu, jehož vlhkost chceme měřit. Oběma termistory teče stejný proud, ale jelikož suchý vzduch má menší tepelnou kapacitu než vlhký, budou se oba termistory ohřívat rozdílně [19]. Rozdíl odporů termistorů je úměrný absolutní vlhkosti měřeného vzduchu.

3.4. Průtokoměry

Průtokoměry slouží pro měření velikosti průtoku kapalin a plynů. Rozdělujeme dva druhy průtoků. Objemový průtok se při známém průřezu potrubí vypočítá vynásobením daného průřezu rychlostí průtoku. Objemový průtok tedy udává, jak velký objem protéká potrubím za daný čas. Oproti tomu se hmotnostní průtok vypočítá vynásobením objemového průtoku hustotou protékaného média. Hmotnostní průtok tedy udává hmotnost média, jež protéká potrubím za daný čas [20]. Toho se například využívá u spalovacích motorů pro měření hmotnosti vzduchu, který byl nasátý do válců, podle níž se upraví množství vstříknutého paliva pro dosažení správného stechiometrického poměru.

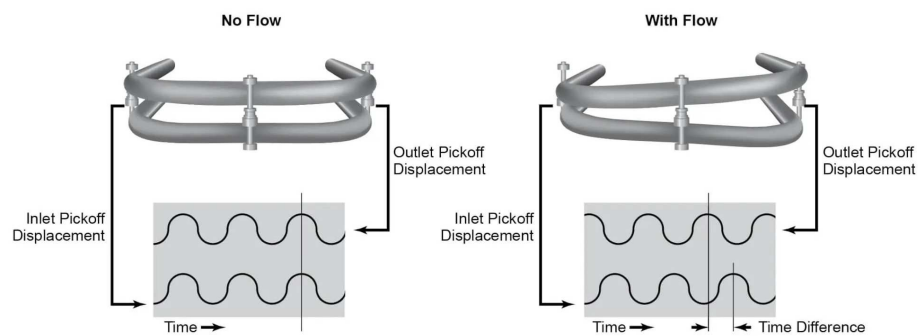
3.4.1. Technologie

Technologie se dělí podle druhu výše zmíněných průtoků, kdy pro každý existuje několik možných variant provedení snímače.

Objemový průtok je možné měřit mechanicky pomocí rotačních turbín, vrtulí a podobných zařízení umístěných v proudu média. Protékáním média se rotační zařízení roztáčí a jeho rychlost odpovídá objemu, který protéká potrubím. Další možností je indukční průtokoměr, který využívá Faradayův zákon elektromagnetické indukce. Pomocí cívky se vytváří v prostoru potrubí magnetické pole a pomocí elektrod se v potrubí měří indukované napětí, jehož velikost je úměrná

rychlosti proudění kapaliny. Pro fungování snímače musí být kapalina alespoň mírně vodivá, proto není možné pomocí tohoto snímače měřit průtok například vzduchu a jiných plynů. Jednou z posledních možností objemových průtokoměrů jsou průtokoměry ultrazvukové. Ty mají dvě různé možnosti konstrukce. První z nich používá dva vysílače ultrazvukových vln, které se pomocí zrcadel odráží do přijímačů. Jeden vysílač vysílá ve směru toku kapaliny a druhý naopak. Ultrazvukový signál, který putuje ve směru toku, je rychlejší než ten, který putuje proti. Rozdíl časů putování těchto dvou signálů je úměrný rychlosti proudění kapaliny. Druhý typ ultrazvukového snímače využívá Dopplerův jev. Vysílač a přijímač jsou umístěny ve stejném místě a signál je do kapaliny vysílán pod úhlem. Signál se od kapaliny odráží zpět do vysílače a podle směru a rychlosti průtoku se mění jeho frekvence. Její změna je tedy úměrná rychlosti průtoku, z čehož lze následně vypočítat protékající objem [20].

Pro měření hmotnostního průtoku slouží speciální Coriolisův průtokoměr. Ten má zpravidla jednu nebo dvě trubičky ve tvaru „U”, které jsou přesně ve středu buzeny elektromagnetem. To způsobí, že se trubičky rozvibrují. Frekvence vibrací je nepřímo úměrná hustotě měřeného média. Dále jsou na koncích trubiček umístěny snímače, jež snímají kmity trubiček. V případě, že je průtok průtokoměrem nulový, signály z obou snímačů se shodují. Pokud ovšem průtokoměrem protéká médium určitou rychlostí, trubičky se začnou kroutit vlivem Coriolisovy síly. To způsobí, že mezi signály snímačů vznikne fázový posuv, jehož velikost je úměrná rychlosti průtoku [20].



Obrázek 3.2: Coriolisův průtokoměr [21]

Další možností měření průtoku jsou dávkovací průtokoměry. Ty používají většinou oválný tvar kol, jež se otáčejí vlivem protékajícího média. Veškeré médium musí protéct těmito koly. Počet otáček kol tedy odpovídá velikosti průtoku média.

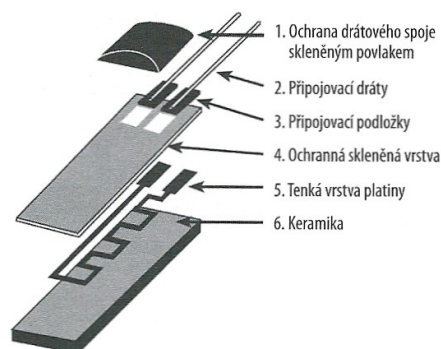
Další nepřímou metodou měření je umístění clonky do potrubí a následné měření rozdílu tlaků před a za clonkou. Tvar a velikost clonky může být různý. Nevýhodou těchto snímačů je pokles tlaku média.

3.5. Snímače teploty

Snímače teploty slouží k měření teploty předmětů nebo médií. Většina snímačů musí být v přímém kontaktu s předmětem, jehož teplota je měřena. Jedinou výjimku tvoří infračervené snímače, které bezkontaktně měří teplotu předmětu pomocí měření množství emitovaného infračerveného záření. Typů teplotních čidel existuje celá řada, od sebe se jednotlivá čidla liší možným rozsahem měřených teplot, přesností, linearitou a hlavně také cenou.

3.5.1. Odporové snímače

Vodiče zvyšují hodnotu svého elektrického odporu při zvyšování jejich teploty. Měřením odporu speciálně upraveného vodiče můžeme zjistit teplotu daného vodiče. Pro potřeby teplotních snímačů se využívá buď tenký film kovu nanesený na keramickém jádře, nebo drát natočený na keramickém jádře [22]. Nejčastěji se používá platina, jelikož je chemicky stabilní a nijak nemění své vlastnosti v průběhu času. Další možností je použití mědi nebo niklu. Nejčastěji používaným typem je snímač s označením Pt100 případně Pt1000, kde číslo udává základní odpor v ohmech při teplotě 0 °C. Odporové snímače jsou jedny z nejpřesnějších teplotních snímačů, ovšem jejich teplotní rozsah je omezený.



Obrázek 3.3: Odporový snímač [23]

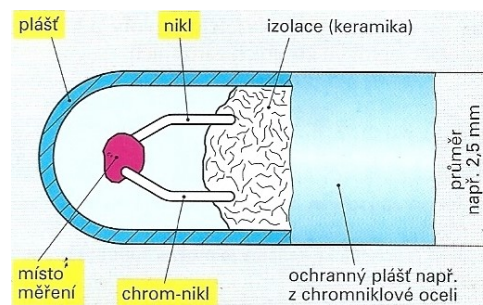
Měření probíhá na principu průtoku malého proudu snímačem a následném měření úbytku napětí na odporu. Proud protékající snímačem bývá v řádu jednotek miliampérů. Maximální rozsah těchto čidel bývá -200 až 600 °C. Maximální použitelná teplota závisí na geometrických vlastnostech konkrétního čidla. Čím má čidlo větší průměr a čím je delší, tím větší maximální teplotu snese. Ovšem s tím se zároveň prodlužuje doba odezvy.

Přesnost měření odporu závisí na zapojení snímače, které je dáno již z výroby. Možnosti jsou tři: dvou-, tří- nebo čtyřvodičové. Nejpresnějším zapojením je čtyřvodičové, kdežto dvouvodičové je nejméně přesné. U dvouvodičového zapojení nelze eliminovat odpor přívodních vodičů. Ten se tedy sčítá s odporem samotného snímače a vzniká určitá nepřesnost. Toto zapojení lze

použit tam, kde nepožadujeme vysokou přesnost měření. Třívodičové zapojení je kompromisem. Díky třetímu vodiči lze odstranit vliv odporu přívodních vodičů, ale jen za předpokladu, že všechny vodiče mají stejný odpor, a tedy i délku. Toto zapojení se používá velmi často, zvláště při potřebě dlouhých přívodních vodičů. Nejpřesnějším zapojením je čtyřvodičové, které úplně odstraní vliv přívodních vodičů a jejich odporu. Toto zapojení se používá v laboratořích a tam, kde se vyžaduje vysoká přesnost.

3.5.2. Termočlánky

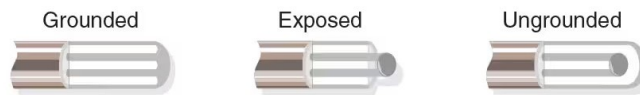
Termočlánky využívají pro měření teploty termoelektrický jev. Termočlánek se skládá ze dvou různých kovů, které se na jednom konci svaří. Tento konec se nazývá horký konec. Druhý konec se nazývá studený nebo referenční. Při rozdílu teplot vzniká na obou koncích termoelektrické napětí, které je úměrné velikosti rozdílu teplot těchto konců [24]. Existuje velké množství různých typů termočlánků, kdy každý se liší použitými materiály. Termočlánky většinou nevykazují tak vysokou přesnost jako odporové snímače, ovšem některé typy mají maximální možné měřené teploty přesahující 1000°C, což je vhodné pro mnoho aplikací.



Obrázek 3.4: Termočlánek [25]

Termočlánky se dělí jednak podle použitého materiálu, ale také podle umístění samotného svařeného konce v ochranném plášti. Uzemněný termočlánek má horký konec přivařený přímo k ochrannému plášti. To má za následek velmi rychlou odezvu na změnu teploty, ovšem nevýhodou je vysoká citlivost na vnější elektromagnetické rušení, které může mít vliv na přesnost měření. Druhou možností je izolovaný konec, který od pláště dělí prášek oxidu hořečnatého. To má za následek velmi dobrou odolnost proti rušení, ale bohužel také delší dobu odezvy. Další možností je otevřený termočlánek, který má samotný spoj přímo vystavený okolnímu prostředí bez jakékoliv ochrany [24]. Toto provedení má nejlepší dobu odezvy, je ho ale možné použít pouze v nekorozivním prostředí a tam, kde nevzniká rozdíl tlaku oproti okolí.

Pro co nejpřesnější měření je nutné přesně měřit teplotu studeného neboli referenčního konce a tu přičíst k celkové naměřené teplotě. Další velmi přesnou možností, která se ale používá při-



Obrázek 3.5: Typy ukončení termočláňku [26]

márně v laboratorních podmínkách, je ponoření studeného (referenčního) konce do lázně vody a ledu, která by měla mít teplotu přesně 0 °C. Tím se odstraní chyba měření studeného konce a dosáhne se vyšší přesnosti.

3.5.3. Termistory

Termistory jsou svým způsobem zvláštním druhem odporových snímačů teploty. Jsou vyrobeny z polovodičů a mohou být ve dvou různých provedeních. Prvním a nejčastěji používaným je termistor s negativním teplotním koeficientem, známý pod zkratkou NTC. Tyto termistory zvyšující se teplotou snižují svůj elektrický odpor a naopak. Druhou možností jsou termistory s kladným teplotním koeficientem (PTC). Ty svůj odpor se vzrůstající teplotou zvyšují [27].

Termistory na rozdíl od ostatních snímačů nemají lineární průběh výstupního signálu. Při potřebě dosažení vysoké přesnosti se termistory využívají pouze na intervalu teplot, kde se křivka blíží lineární charakteristice. Tento interval bývá přibližně ± 50 °C od středové teploty, maximální rozsah tedy je kolem 100 °C [28]. Přesnost v tomto rozsahu se může pohybovat od $\pm 0,05$ °C do $\pm 1,5$ °C

Výhodou termistorů je vysoká citlivost, jelikož podle typu se může elektrický odpor při změně pouze o 50 °C změnit o celý řád. Velmi používanými jsou termistory také díky své velmi nízké ceně a velmi dobré výdrži. Termistory se vyrábí v celé řadě tvarů a velikostí. Vždy je dobré volit takový tvar, aby bylo dosaženo co největšího kontaktu s plochou měřeného předmětu, případně lze použít teplovodivou pastu pro dosažení co největšího přenosu tepla a tím co nejrychlejší odezvy.

Termistory se často používají v jednoduchých regulačních soustavách, jelikož u nich není nutná dokonalá přesnost. Požadavkem bývá spíše robustnost a rychlá odezva. Používají se například v automobilech pro měření teploty oleje a chladicí kapaliny. PTC termistory se většinou používají jako samoregulační ochrana před vysokým proudem, jelikož při vysokém proudu se začnou ohřívat, čímž zvýší svůj odpor a sníží proud obvodem [29].

3.6. Otáčkoměry

Otáčkoměry slouží k měření rychlosti otáčení hřídelí a předmětů k nim uchycených. Otáčky se zpravidla udávají v počtu otáček za jednu minutu. Znalost této hodnoty je důležitá v regulovaných soustavách pro správnou regulaci výstupní veličiny, například pro správnou regulaci

teploty předmětu, který je chlazen ventilátorem, je dobré znát jeho otáčky, případně u spalovacího motoru pro správné dávkování paliva a správné zapálení směsi. Často se také používají k detekci překročení maximálních otáček dané hřídele vlivem poruchy a k následné reakci bezpečnostních systémů.

3.6.1. Tachometry

Tachometry se řadí mezi nejzákladnější snímače otáček. Mechanické tachometry jsou přes vlastní hřídel připojeny přímo k měřené hřídeli. Existují i ruční tachometry, které se přiloží k měřené hřídeli a na displeji ukazují aktuální hodnotu otáček. U těchto tachometrů je důležité působit dostatečně velkou silou na měřicí zařízení, aby nedošlo k prokluzu, a tedy k chybě měření.

Druhou možností jsou optické tachometry, které pracují bez kontaktu s měřeným předmětem. Ty nejčastěji využívají laserový paprsek, který se odráží od speciální reflexní odrazky zpět do přijímače. Snímač poté počítá počet odražených paprsků v čase, kdy jejich frekvence odpovídá rychlosti otáčení [30].



Obrázek 3.6: Ruční tachometry [31]

3.6.2. Stroboskopy

Stroboskopy jsou zařízení, která vysílají silné záblesky viditelného spektra v přesně určených intervalech. Pokud se stroboskopem namíří na měřenou hřídel a otáčky se budou shodovat s nastavenou frekvencí záblesků stroboskopu, tak bude hřídel pro pozorovatele vypadat, jako by stála na jednom místě. To se ovšem stane, i pokud se nastaví celočíselný násobek frekvence záblesků oproti počtu otáček. Na to je nutné myslet, aby se zabránilo špatnému měření [30].

3.6.3. Indukční snímače

Indukční snímače se skládají z jádra, na kterém je natočená cívka, a permanentního magnetu, jehož siločáry magnetického toku se uzavírají přes jádro cívky. Pokud se snímač přiloží ke kovové hřídeli, která má v daném místě proměnný tvar například ozubeného kola, magnetický tok se tak vlivem rozdílného magnetického odporu při otáčení hřídele mění. To způsobí, že se v

cívce bude indukovat sinusový signál, odpovídající rychlosti otáčení. Tyto snímače nepotřebují externí napájení, jelikož se v nich vlivem Faradayova zákona indukuje potřebný signál.

3.6.4. Hallův snímač

Hallův snímač pracuje na principu detekce magnetického pole, na jehož přítomnost reaguje vznikem elektrického napětí na jeho elektrodách. Toto napětí se nazývá Hallovo napětí. Při průchodu elektrického proudu polovodičem, na který kolmo působí siločáry magnetické indukce, vzniká vlivem vychylování proudu elektronů k jedné straně polovodiče, ve směru vektorového součinu vektoru elektrického proudu a magnetické indukce elektrické napětí.

U spalovacích motorů nejčastěji měří otáčky vačkové nebo klikové hřídele. Zde může být použit aktivní, nebo pasivní snímaný rotor. Aktivní rotor tvoří po obvodu umístěné permanentní magnety. Pasivní rotor je tvořen zubovými výstupky z feromagnetického materiálu. Při použití pasivních rotorů se k Hallovo snímači přidává permanentní magnet. Snímač tak zaznamená změny magnetické indukce vlivem proměnného magnetického odporu při otáčení rotoru.

3.7. Snímače točivého momentu

Snímače točivého momentu měří velikost točivého momentu, kterým působí určitý typ pohonu na hřídel. Ve většině případů se jako snímací prvek používají tenzometry. Při deformaci tenzometru se mění jeho elektrický odpor. Toho se využívá nalepením tenzometrů zpravidla pod úhlem 45° na měřenou hřídel. Přitom se použije zapojení do Wheastoneova můstku pro odstranění vlivu změny teploty a působení jiných sil. Dalším možným zapojením je tzv. čtyřmost nebo polomost. Při působení síly na hřídel ve formě točivého momentu dochází na hřídeli k mírné deformaci vlivem zkrutu, což způsobí i deformaci tenzometrů, které následně změní hodnotu svého odporu. Změna odporu vede k nevyváženému můstkovému zapojení, jehož následkem je změna výstupního signálu. Tento signál je následně bezdrátově přenášen do statorové části, kde se dále zpracovává [32].

Existují dva druhy provedení snímačů, které se liší primárně svým uchycením ke zbytku zařízení. Jedním je snímač ve formě měřicí příruby. Ta má na obou koncích příruby pro spojení pomocí šroubů k přírubám zařízení. Výhodou je snadná demontáž, a tedy případná výměna měřicího zařízení.

Druhou možností je měřicí hřídel. Tato hřídel má měřicí část umístěnou v uzavřené části mezi dvěma ložisky. Přenos signálu zde může být prováděn i přes sběrací kroužky.



Obrázek 3.7: Umístění tenzometrů [33]



(a) Měřící příruba



(b) Měřící hřídel

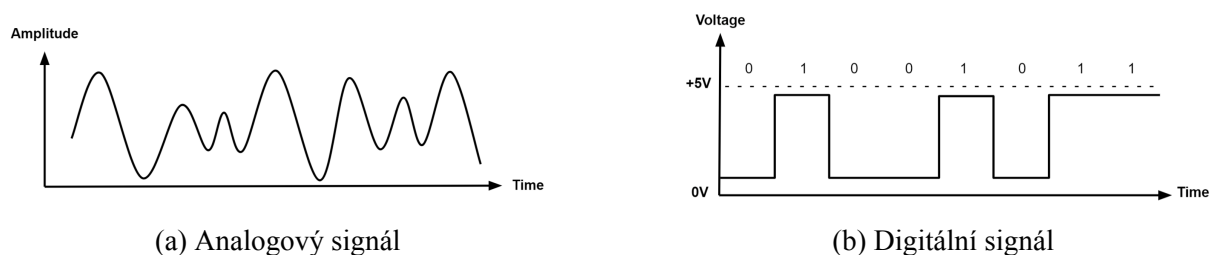
Obrázek 3.8: Porovnání snímačů momentu [34] [35]

4. Převodníky

Převodníky jsou zařízení měnící vlastnosti a parametry signálů, které slouží pro přenos dat, tak aby je bylo možné vhodně ukládat a dále zpracovávat. Každá forma signálu má své výhody a nevýhody. Rozlišují se analogové a digitální signály [36].

Analogové signály se vyznačují spojitým průběhem v čase i amplitudě. Je to tedy nekonečně mnoho hodnot ve sledu za sebou [37]. Zařízení používající tento druh signálu bývají poměrně levná, ale dnes se už nepoužívají v takové míře jako dříve, jelikož je nahradila zařízení digitální. Nevýhodou analogového signálu je ukládání a následné čtení dat. Ukládání dat je možné například magnetováním speciální magnetické pásky, nebo v případě fotografií osvětlením filmu viditelným zářením a uložením fotografie na něj. V případě čtení nebo vytváření kopie uložených dat vždy vzniká nepřesnost od původně uložených dat. Čím více kopií původních dat budeme vytvářet, tím větší chyba bude vznikat až v krajních případech přijdeme o data úplně. Data v analogovém signálu mohou být reprezentována několika způsoby. Jednak velikostí napětí, případně proudu, anebo frekvencí signálu.

Digitální signály jsou v čase a amplitudě nespojitě a jejich hodnota se tedy mění skokově [37]. Jsou ukládány ve formě 1 a 0, kdy každé hodnotě odpovídá napěťová úroveň s určitým rozsahem. Mezi jednotlivými úrovněmi se nachází zakázané pásmo, kde není definovaná úroveň a kterému je nutné se vyhnout. Vytvářet kopie jde v podstatě do nekonečna bez ztráty kvality dat. Stejně tak přenášení dat na velké vzdálenosti je možné při vhodném kódování a ochraně dat bezztrátově. Ukládání velkého množství digitálních dat je v dnešní době dosti jednoduché a ve výsledku levné. Postupem času jsou dostupná čím dál větší úložiště a ve výsledku dochází i ke zlevnění daných zařízení.



Obrázek 4.1: Porovnání signálů [38] [39]

Pro převod mezi digitálními a analogovými signály slouží převodníky. U každého existuje několik možností, jak daný převod provést, kdy každý se liší kvalitou a rychlostí převodu a také cenou a složitostí samotného zařízení.

Výstupem většiny senzorů je analogový signál, který se případně až dále převádí na digitální.

4.1. A/D převodníky

A/D převodníky se dají rozdělit na dva základní typy. Jedním jsou komparační převodníky, které využívají princip porovnávání signálu s referenční hodnotou [40]. Druhým typem jsou převodníky integrační neboli nepřímé, které mají meziobvody pro převod analogového signálu na frekvenci a až poté dochází k převodu na digitální signál.

4.1.1. Komparační A/D převodníky

Komparační převodníky se dále dělí na 3 druhy, které se liší rychlostí převodu a technickou náročností.

Sériový převodník využívá komparátor, čítač, hodiny, D/A převodník a řídicí logické obvody. Řídicí logické obvody resetují čítač před začátkem každého převodu. Hodiny vytvářejí impulsy pro čítač, který s každým impulsem přičte svou hodnotu o 1. D/A převodník převádí digitální hodnotu z čítače na analogovou a ta je dále porovnávána se vstupní hodnotou v komparátoru. Ve chvíli kdy bude hodnota vytvářená D/A převodníkem větší než vstupní hodnota, tak se čítač zastaví a výstup čítače bude odpovídat digitální hodnotě vstupního signálu [41]. Tu lze následně uložit a dále s ní pracovat. Jelikož čítač čítá postupně od 0 a s každým impulsem přičítá hodnotu o 1, tedy o hodnotu nejméně významného bitu, tak je převod časově velmi náročný. Pevod trvá 2^n kroků, což u 8bitového převodníku je 2^8 , tedy 256 kroků. Výhodou je konstrukční jednoduchost, ovšem nevýhodou dlouhá doba převodu.

Převodník s postupnou aproximací je obdobou sériového převodníku. Má i stejnou konstrukci, pouze čítač nahradí aproximační registr. Funkce je také totožná s tím rozdílem, že při každém hodinovém impulsu se hodnota registru mění postupně od nejvýznamnějšího bitu až po ten nejméně významný. Při každém impulsu se porovnává, zda je hodnota vytvářená D/A převodníkem větší, nebo menší než vstupní signál. Pokud je hodnota vstupního signálu větší, řídicí logické obvody ponechají v aproximačním registru hodnotu posledního změněného bitu na logické 1, pokud je tomu naopak, hodnota tohoto bitu se změní zpět na logickou 0. Následně se pokračuje na další bit [42]. V tomto případě trvá převod n kroků, tedy v případě 8bitového převodníku 8 kroků. Tento převodník je podobně jednoduchý jako sériový převodník s rozdílem zřetelně vyšší rychlosti převodu.

Poslední možností je paralelní převodník. Tento převodník se skládá ze sítě rezistorů, které fungují jako napěťové děliče, dále z komparátorů a nakonec z dekodéru. Pro každou úroveň je potřeba jeden napěťový dělič a jeden komparátor. Za komparátory se nachází dekodér, který převádí aktuální výstup komparátorů na digitální hodnotu. Výhodou tohoto převodníku je to, že

převádí hodnotu v jednom jediném kroku [41]. Potřebuje k tomu ale $2^n - 1$ komparátorů, což je dost drahé a technicky náročné. Pro 8bitový převodník by to bylo $2^8 - 1$ tedy 255 komparátorů.

4.1.2. Integrovní A/D převodníky

Převodník s dvojitou integrací má na vstupu přepínač, který přepíná mezi vstupním a referenčním napětím, které má ovšem zápornou polaritu. Dále navazuje integrační operační zesilovač, na který se připojuje komparátor. Dále je umístěn čítač, řídicí logické obvody, a generátor hodinových impulsů. V první části převodu se přepínač přepne na vstupní napětí a kondenzátor integračního zesilovače se začne nabíjet. Zároveň čítač začne od 0 postupně přičítat s příchodem každého hodinového impulsu, a to do doby, než přeteče. Ve chvíli, kdy čítač přeteče, vyšlou řídicí logické obvody povel přepínači a ten se přepne na zápornou referenční úroveň. Zároveň čítač začne znovu od 0 postupně přičítat. Po přepnutí přepínače se kondenzátor integračního zesilovače začne vybíjet, dokud nedosáhne nulového napětí. V tu chvíli výstup komparátoru zastaví čítač a výstup čítače bude odpovídat vstupní analogové hodnotě. Doba vybíjení kondenzátoru je přímo úměrná velikosti vstupního napětí [43]. Výhodou je vysoká přesnost převodu, ovšem za cenu dlouhého času potřebného pro převod.

Sigma-delta převodník obsahuje rozdílový operační zesilovač, na který je přiveden vstupní analogový signál a zpětná vazba v podobě 1bitového D/A převodníku. Poté následuje integrační zesilovač, jehož výstup vede na klopný obvod typu D. Ten překlápá s každým impulsem na výstup logickou úroveň, která se nachází na jeho vstupu. Výstupem je tedy obdoba PWM signálu.

4.2. D/A převodníky

D/A převodníky jsou přesným opakem A/D převodníků, tedy z digitálního signálu vytváří odpovídající analogový signál. Opět existuje několik různých typů, které se liší složitostí a kvalitou výstupu.

D/A převodník s váhovou odporovou sítí využívá invertující operační zesilovač a odporovou síť. Neinvertující vstup operačního zesilovače je připojen na zem, tedy nulový potenciál. Na invertující vstup se připojí síť rezistorů, kde jsou k sobě paralelně vždy připojeny rezistor a přepínač. Přepínač je připojen buď na zem, nebo na záporné referenční napětí. Polohu přepínače určuje vždy hodnota konkrétního bitu digitálního kódu. Pokud je hodnota bitu 1, přepínač se připojí na záporné referenční napětí. Rezistor, který je připojen na přepínač nejvýznamnějšího bitu, by měl mít poloviční hodnotu oproti rezistoru v záporné zpětné vazbě. Hodnota každého dalšího rezistoru následujících bitů až po nejméně významný bit se musí pokaždé snížit o polovinu oproti předcházejícímu. Napětí všech bitů se ve výsledku sečtou a přes zesilovač invertují

[44]. Nevýhodou tohoto zapojení je potřeba velkého množství různých hodnot odporů s vysokou přesností.

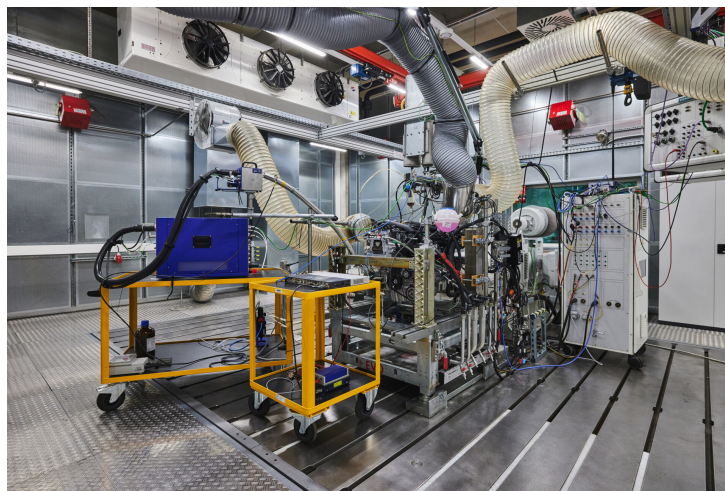
Převodník s žebříčkovou R-2R odporovou sítí je zapojený podobně jako předchozí typ, má ale tu výhodu, že používá pouze dvě hodnoty rezistorů. Opět se zde nachází invertující operační zesilovač, jehož neinvertující vstup je připojen na zem. Na invertující vstup je přes rezistor s hodnotou R připojena první z větví z celé sítě, které jsou dále paralelně připojovány přes rezistor s hodnotou R. Každá z větví má rezistor s hodnotou 2R a přepínač ovládaný logickou úrovní konkrétního bitu. Přepínač je opět připojen buď na zem, anebo na záporné referenční napětí. Napětí se sčítají a přes operační zesilovač se invertují. Zpětná vazba operačního zesilovače má hodnotu 2R [45].

Sigma-delta D/A převodník je velice přesný a rychlý. Prvně prochází digitální signál interpolčním filtrem, kde dojde k převzorkování a dosáhne se tak vyšší vzorkovací frekvence. Následuje sigma-delta modulátor, jehož výstupem je 1bitová sekvence původního signálu. Dále 1bitový D/A převodník vytvoří z jednotlivých bitů analogový signál, který je v dolní propusti složený z rezistoru a kondenzátoru zbaven vysokých frekvencí [46].

5. Možnosti optimalizace homologační měřicí sestavy

Možnosti optimalizace homologační měřicí sestavy jakožto cíle mé bakalářské práce bude zaměřená na zpřesnění samotného měření. To znamená snížení odchylek měřených hodnot od hodnot správných a snížení nejistot měření.

Pro potřeby mé bakalářské práce budou použita data z Motorového centra firmy ŠKODA AUTO a.s. umístěného v části vývojového centra v Mladé Boleslavi. Motorové centrum disponuje celkem 15 zkušebními stavy o výkonu testovaných motorů až 400 kW s točivým momentem až 750 Nm. Kromě homologačních zkoušek se zde provádí funkční a dlouhodobé zkoušky pro zajištění správné funkce a životnosti motorů.



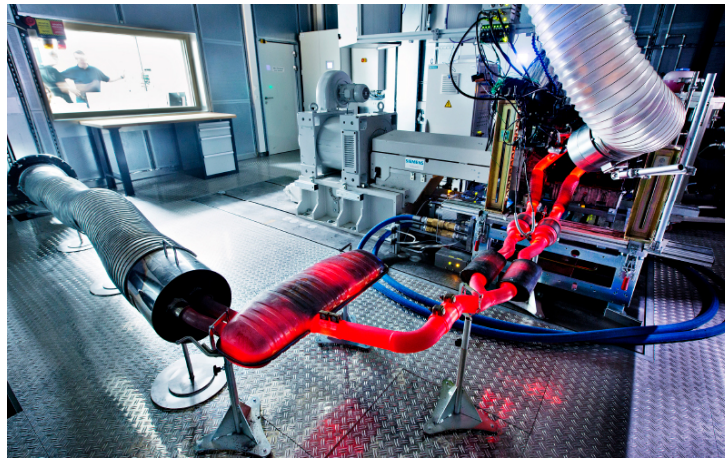
Obrázek 5.1: Motorová zkušebna [47]

Vzhledem k vysokému počtu měřicích bodů pro měření teplot a zkušenostem z minulosti s možností zlepšit přesnost měření, bylo nakonec vybráno měření teplot, kde se používají termočlánky nebo odporová měřidla ve spojení s měřicími moduly, které jejich signály zpracovávají a posílají přes CAN sběrnici do řídicího a záznamového systému zkušebny.

Ve stávajícím stavu se kalibrace jednotlivých částí provádí zvlášť bez jakékoliv spojitosti. To znamená, že teplotní čidlo se odešle na kalibraci do kalibrační laboratoře, kde pracovníci laboratoře provedou kalibraci a vyhotoví kalibrační list. To samé se stane i s měřicím modulem, ovšem v jiné laboratoři. Výstupem tedy budou dva kalibrační listy, na nichž je uvedena odchylka měření a nejistota. V tomto případě budou odchylky i nejistoty ve výsledku dvě.

Druhou možností je kalibrovat tyto dvě části jako jeden celek pouze v jedné laboratoři. Předpokladem je zjednodušení interpretace kalibračních výsledků, jelikož zde bude uvedena pouze jedna odchylka a nejistota měření. Pravděpodobně se zde neprojeví vyšší přesnost měření, jelikož chyby obou částí se pouze sečtou, ovšem nejistota měření by se měla snížit díky menšímu

množství zdrojů nejistot. Nevýhodou tohoto způsobu kalibrace je omezení volnosti použití daného teplotního čidla, jelikož bude nutné ho používat v zapojení s konkrétním měřicím modulem a i jeho konkrétním vstupem, ve kterém byl kalibrován.



Obrázek 5.2: Motorová zkušebna při provozu [48]

5.1. Kalibrace

Kalibrace je proces, při kterém se ověřuje přesnost měření. Měřením se zabývá technický a vědní obor zvaný metrologie. Kalibrace zahrnuje pouze proces zjištění stavu kalibrovaného měřidla, ovšem velká část populace zaměřuje proces kalibrace s procesem justování, přičemž každý znamená něco jiného [49]. Justování by se dalo jinak nazvat jako nastavení, tedy je to proces nastavení daného měřidla tak, aby vyhovovalo daným požadavkům přesnosti měření. Pokud je provedena kalibrace s nevyhovujícím výsledkem, musí se následně nutně provést justáž a poté znovu kalibrovat. Jedině tak je možné provést kalibraci s vyhovujícím výsledkem.

Zařízení používané pro kalibrace se nazývá etalon nebo také často kalibrátor. Jde vždy o zařízení s vyšší přesností, než je přesnost porovnávaného měřidla. Tato přesnost by měla být minimálně čtyřnásobně větší. Základním požadavkem na etalony je jejich stálost a neměnnost v čase. Jednotlivé etalony se liší svojí přesností. Primární etalony slouží pro uchování dané jednotky a jsou skladovány při speciálních podmínkách pod přísným dohledem. Používají se pouze pro kalibraci sekundárních etalonů. Sekundární etalony jsou méně přesné a slouží pro kalibraci státních etalonů. Ty má každý stát a dále je používá pro kalibraci měřidel nižších přesností [50]. Tato kaskáda na sebe musí navazovat. Tento řetězec se nazývá návaznost a ta musí být dodržena, aby byla kalibrace platná a relevantní [51]. „*V České republice je existence státních etalonů zakotvena a definována zákonem č. 505/1990 Sb. ve znění pozdějších předpisů, který definuje, že návazností měřidel se pro účely tohoto zákona rozumí zařazení daných měřidel do nepřerušené posloupnosti přenosu hodnoty veličiny počínající etalonem nejvyšší metrologické kvality*

pro daný účel a že pro příslušný obor měření mají nejvyšší metrologickou kvalitu ve státě státní etalony.” [52] „Dle zákona o metrologii státní etalony uchovává Český metrologický institut, ovšem ve vhodných případech je možné využít existujícího potenciálu a znalostí jiné organizaci než ČMI a pověřit ji uchováváním státních etalonů ČR, přičemž Český metrologický institut koordinuje budování a rozvoj státních etalonů a jejich uchovávání.” [52]

Proces kalibrace je nutný u všech měřidel, u kterých si chce být uživatel jist, že měří přesně, a může tedy brát jeho výsledky jako směrodatné. Každé měřidlo v průběhu času vlivem změn teplot, mechanického namáhání a dalších vlivů okolí, mění své vlastnosti, a proto se mění i jeho výstupní signál. Tato změna by měla být co možná nejmenší. Kalibrací je možné zjistit přesnost výstupu, kdy při porovnání několika kalibrací stejného měřidla v průběhu času můžeme zjistit, jakým způsobem se tento výstup mění. Podle toho, jak se měřidlo mění v průběhu času, si uživatel může zvolit kalibrační lhůty. U běžných měřidel si lhůty mezi kalibracemi určuje vždy uživatel. Ten by přitom měl brát ohledy na doporučení udávané výrobcem měřidla. Při překročení určité hranice chybové tolerance je nutné měřidlo seřídit.

Důvěryhodnost laboratoří je zajišťována akreditacemi. Zde se zkoumá způsob kalibrace, návaznost na mezinárodní etalony, plnění norem a mnoho dalších podmínek. Hlavní normou pro laboratoře je ISO/IEC 17025, která obsahuje požadavky nutné k prokázání způsobilosti v oblasti řízení kvality. V České republice se udělováním akreditací zabývá Český institut pro akreditaci zkráceně ČIA.

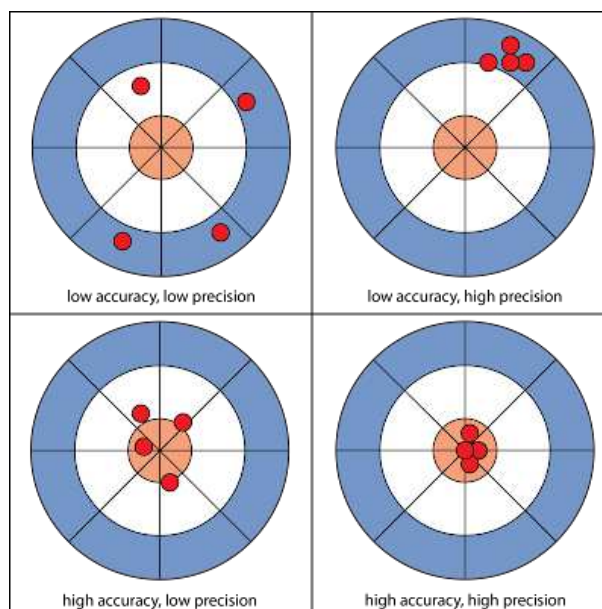
Pracovní měřidla se rozdělují na stanovená a nestanovená. Nestanovená měřidla jsou všechna měřidla, která nejsou etalonem ani stanoveným měřidlem [53]. Stanovená měřidla stanovuje Ministerstvo průmyslu a obchodu vyhláškou k povinnému ověřování podle jejich významu a použití. Mezi stanovená měřidla patří například měřidla určující množství při prodeji různých produktů od průtokoměrů na čerpacích stanicích až po elektroměry měřící dodanou elektrickou energii do domu. Další kategorií jsou měřidla, která mají vliv na stanovení výše poplatků, sankcí a tak podobně. Mezi tato měřidla patří radar měřící překročení maximální povolené rychlosti nebo alkohol tester užívaný policií. V neposlední řadě patří do stanovených měřidel měřidla mající vliv na zdraví. Jde tedy o měřidla tlaku krve, teploměry nebo váhy a další měřidla mající vliv na správnost diagnózy u lékaře. Na stanovených měřidlech musí být uveden štítek s datem platnosti kalibrace. Po uplynutí kalibrační lhůty nesmí být měřidlo používáno a musí být znovu kalibrováno.

Výstupem každé kalibrace musí být kalibrační list se všemi jeho náležitostmi, který musí

obsahovat název a adresu laboratoře, kde byla kalibrace vykonána. Aby bylo možné jednoznačně identifikovat kalibrované měřidlo, musí list obsahovat jeho výrobce, typ a výrobní číslo. List musí být opatřen identifikačním číslem, tak aby ho nebylo možné zaměnit s jiným. Každá strana musí být očíslována a úvodní strana musí obsahovat celkový počet stran. Další důležitou součástí jsou podmínky okolí, za nichž byla kalibrace provedena, tedy například teplota nebo vlhkost okolního vzduchu. Dále se uvádí datum provedení kalibrace a datum vystavení kalibračního listu společně se jménem pracovníka, který kalibraci provedl a odpovědné osoby včetně jejího podpisu. Velmi důležitou součástí listu je uvedení použitých etalonů při kalibraci. V neposlední řadě musí kalibrační list obsahovat výsledky měření včetně rozšířené nejistoty měření [54].

5.2. Nejistoty měření

Nejistota měření udává hodnotu, v jejímž rozsahu se může s určitou pravděpodobností vyskytovat skutečná měřená hodnota. Je to parametr udávající nezáporné číslo, které je vždy spjaté s naměřenou hodnotou. Nejistota ve své podstatě udává kvalitu měřicího procesu, a její hodnota by měla být tedy co možná nejmenší. Po každé kalibraci musí být tato hodnota uvedena na kalibračním listě, jinak by kalibrace byla bezpředmětná [55]. Nejistota měření se počítá ze dvou částí, a to ze standardních nejistot typu A a typu B.



Obrázek 5.3: Nejistoty měření [56]

Standardní nejistota typu A značená u_a udává rozptyl naměřených hodnot v jednom měřicím bodě. Z toho vyplývá, že je nutné měření několikrát opakovat, ovšem všechna musí být provedena za stejných podmínek. Pokud by se provedlo pouze jedno měření, bylo by nesměrodatné. Ideálním počtem je deset měření, což je ale mnohdy časově náročné, a proto se často provádí

pouze tři měření. Při každém měření se naměřené hodnoty téměř vždy liší. Nejistota typu A se vypočítá směrodatnou odchylkou z naměřených hodnot v každém bodě.

Na velikost standardní nejistoty typu B, která se značí u_b , nemají vliv naměřené hodnoty. Nejistota typu B se ve skutečnosti skládá z několika zdrojů, jejichž součet kvadrátů pod odmocninou dá výslednou nejistotu typu B. Na tuto nejistotu má vliv například použitý etalon, rozlišení kalibrovaného měřidla, okolní podmínky, odbornost pracovníka provádějícího kalibraci, postup kalibrace a mnoho dalších okolností. V případě nejistoty etalonu je potřeba mít ho kalibrován a z kalibračního listu vyčíst nejistotu a s ní dále počítat. Většina zdrojů této nejistoty jsou pouze odhady na základě zkušeností.

$$u = \sqrt{u_a^2 + u_b^2} \quad (5.1)$$

Součtem druhých mocnin standardních nejistot typu A a B pod odmocninou získáme kombinovanou nejistotu značenou u . Kombinovaná nejistota vyjadřuje interval pokrytí správné měřené hodnoty s pravděpodobností 68,3 %. Pro rozšíření tohoto intervalu se kombinovaná nejistota násobí koeficientem rozšíření k , čímž vznikne rozšířená nejistota značená U . Ve většině případů se předpokládá Gaussovo rozdělení pravděpodobnosti a pro koeficient rozšíření $k=2$ je interval rozšířen na 95 % a s koeficientem $k=3$ dokonce na 99,97 %. Ve většině případů se používá koeficient rozšíření $k=2$. S rozšířenou nejistotou se na kalibračních listech musí udávat i koeficient rozšíření použitý pro výpočet rozšířené nejistoty.

$$U = k \cdot u \quad (5.2)$$

Postup určování nejistot pro akreditované laboratoře určuje dokument EA-4/02 M:2022. Tento dokument by měl být univerzálním návodem pro určení nejistot, může se ale stát, že pro určité obory bude nutné jej doplnit o další postupy [57].

5.3. Homologace

Homologace je proces schvalování automobilu a jeho součástí organizacemi, které zajišťují splnění všech regulací regulačních orgánů v dané lokalitě. Pro každý trh, na kterém chce výrobce automobilů prodávat své modely, musí splnit místní regulace. Ty se mohou v každém regionu lišit. Homologace zajišťují splnění funkčních, bezpečnostních, emisních a dalších požadavků [58].

Homologace provádí národní autorita, případně nezávislá organizace s povolením a dohle-

dem těchto autorit. V České republice je tímto schvalovacím orgánem zajišťujícím dohled nad homologacemi Ministerstvo dopravy. V ostatních státech Evropské unie to jsou zpravidla subjekty ministerstev dopravy a průmyslu, případně jiné organizace. Tyto subjekty v drtivé většině případů nemají k dispozici vlastní testovací zařízení a kapacity pro provádění homologací, proto využívají služeb nezávislých testovacích firem, jež mají vlastní laboratoře a zkušebny vhodné k tomuto účelu. V České republice jsou těmito testovacími firmami například TÜV SÜD Czech s.r.o, TZV CZ s.r.o. nebo DEKRA CZ a.s. Po homologaci v jednom z členských států Evropské unie je homologace platná v celé Evropské unii [59].

V případě změny určitých komponentů, jejichž změna by mohla mít vliv na bezpečnost nebo jinou důležitou funkci, je potřeba provést homologaci znovu. Proces homologace je finančně náročný a může trvat i několik měsíců.

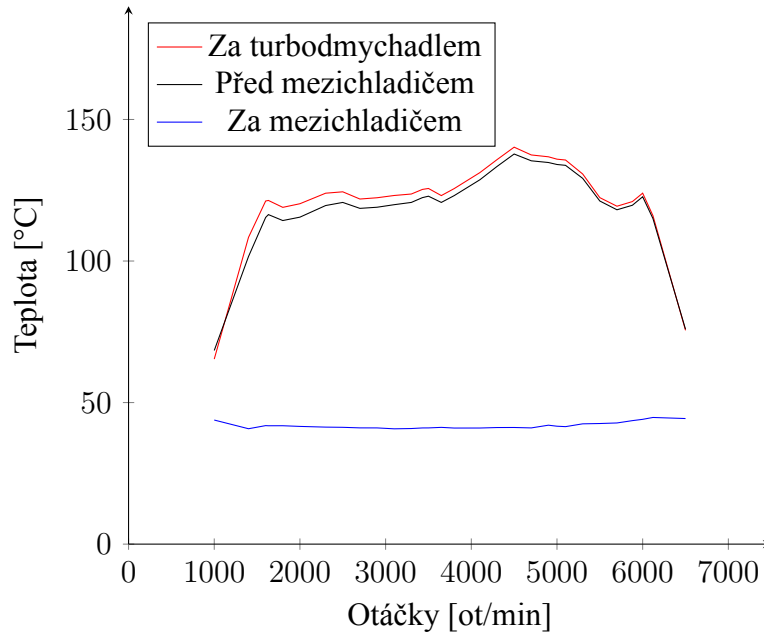
Před homologací celého vozu se homologují jednotlivé komponenty a systémy, přičemž každý musí splnit dané požadavky. Systémem se rozumí řetězec několika komponentů jako celku. Po splnění homologací všech částí je možné homologovat celý vůz. Poté musí výrobce zajistit, aby každé nově vyrobené vozidlo odpovídalo homologovanému vzorku [60].

5.4. Homologační měření

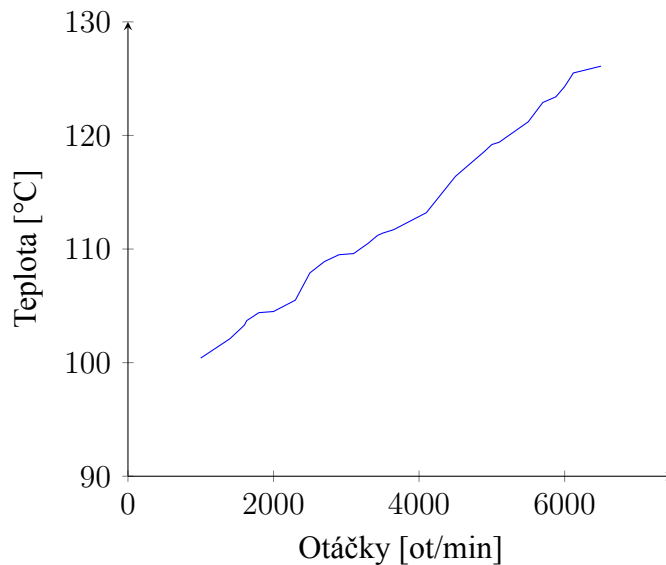
V této kapitole budou zpracována data z provedené homologace přepřínovaného zážehového motoru koncernu Volkswagen Group, určeného pro mimoevropský trh. Vzhledem k jejich citlivosti jsou některá data zaokrouhlená. Na následujících grafech bude možné vidět několik průběhů primárně teplot a tlaků na několika měřicích místech. V průběhu této homologační zkoušky docházelo k postupnému zvyšování otáček od 1000 až do 6500 otáček za minutu. Tento rozsah se nepravidelně rozdělil na 30 bodů. V každém bodě se čekalo na ustálení hodnot, po kterém se uložily do záznamového systému. V celém rozsahu zkoušky byl plynový pedál nastaven na hodnotu 100 %.

Na grafu Graf 5.1 je možné vidět průběh teplot plicního tlaku měřeného ve třech místech. První dvě křivky, které zobrazují teplotu za turbodmychadlem a před mezichladičem, spolu korelují, jelikož tyto dva body dělí od sebe pouze potrubí v délce několika desítek centimetrů. I přesto je teplota vzduchu před mezichladičem vlivem ochlazování v potrubí o pár stupňů Celsia chladnější. Teplota vzduchu za turbodmychadlem dosahuje téměř v celém rozsahu teploty přes 120 °C, kdy kolem 4500 otáček za minutu dosahuje dokonce až 140 °C. Zajímavé je zde porovnání s křivkou teploty vzduchu za mezichladičem, který plicí vzduch ochlazuje v celém rozsahu na poměrně stabilní teploty, jejichž hodnota se pohybuje od 40 do 45 °C.

Graf Graf 5.2 zobrazuje teplotu oleje. Tato teplota se téměř po přímce postupně zvyšuje od hodnoty 100 °C až po hodnotu lehce převyšující 125 °C.

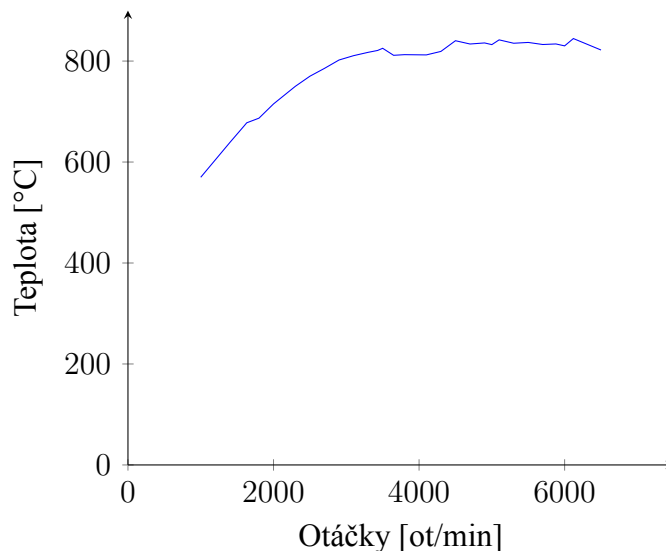


Graf 5.1: Teplota plicího vzduchu



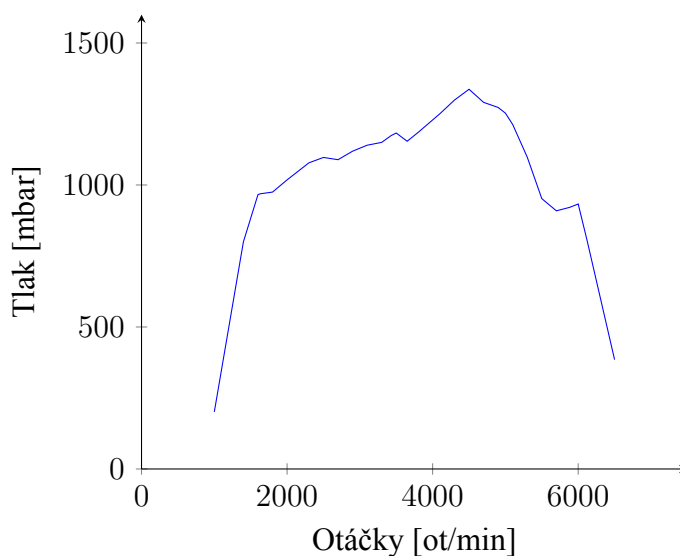
Graf 5.2: Teplota oleje

Teplota výfukových plynů před katalyzátorem znázorněná na grafu Graf 5.3 je nejvyšší měřenou teplotou na spalovacím motoru. Hodnoty zde začínají na přibližně 550 °C a postupně až do 3000 otáček za minutu stoupají k 800 °C. Po této hodnotě se teplota už dramaticky nezvyšuje a pohybuje se od 800 do 850 °C. Takto vysoké teploty jsou měřeny výhradně termočlánky, jelikož maximální možné teploty měřené používanými odporovými snímači Pt100 se pohybují do 600 °C. Takto vysoké teploty způsobují i viditelné zarudnutí předních částí výfukového systému.



Graf 5.3: Teplota před katalyzátorem

U plnicího tlaku turbodmychadla na grafu Graf 5.4 můžeme vidět strmý nárůst tlaku z 200 mbar při 1000 otáčkách za minutu na téměř 1000 mbar při 1600 otáčkách. I poté tlak mírně stoupá až do 4500 otáček na hodnotu přesahující 1300 mbar. Následně tlak opět klesá zpět na hodnotu kolem 1000 mbar. Po 6000 otáčkách za minutu tlak klesá na nízké hodnoty, pohybující se kolem 400 mbar.

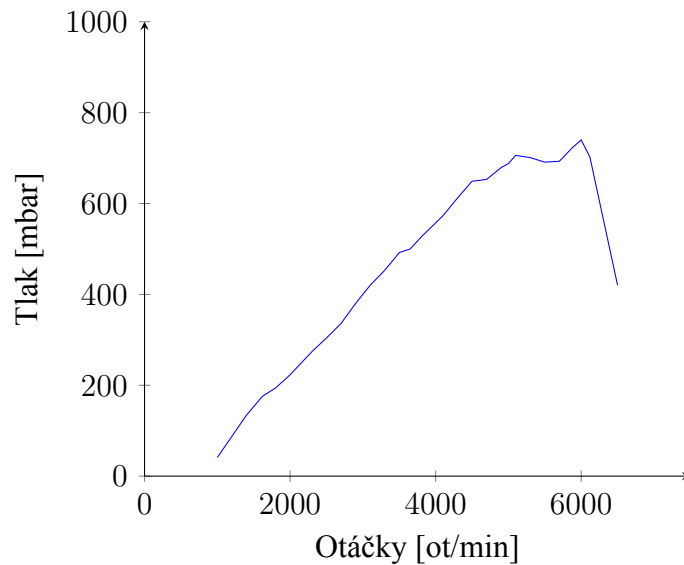


Graf 5.4: Plnicí tlak turbodmychadla

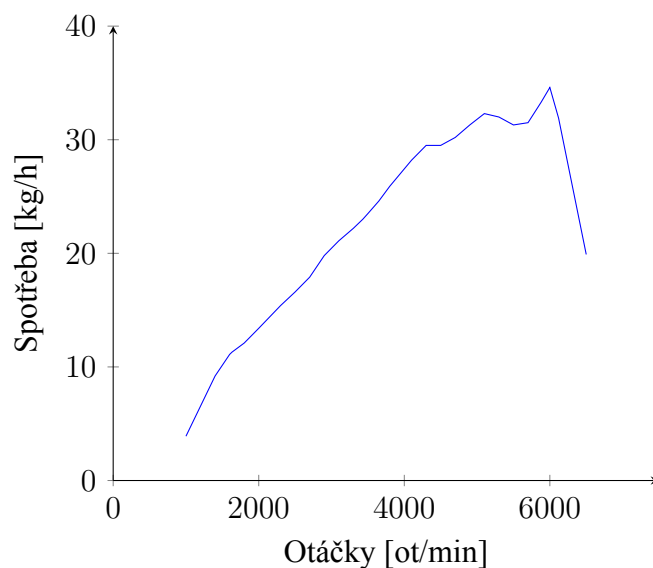
Na grafu Graf 5.5 můžeme vidět průběh tlaku ve výfukovém potrubí před katalyzátorem. Tlak se zde postupně zvyšuje od 40 až do 700 mbar při 5000 otáčkách za minutu. Poté se tlak pohybuje kolem této hodnoty. Nejvyššího tlaku bylo dosaženo při 6000 otáčkách, a to 740 mbar. Od této hodnoty tlak opět prudce klesal až k téměř 400 mbar.

Graf Graf 5.6 zobrazuje spotřebu paliva, která byla měřena v kilogramech za hodinu. Spo-

třeba postupně rostla se zvyšujícími se otáčkami od hodnoty 3,9 až na 34,6 kg/h. Maximální spotřeby bylo dosaženo při 6000 otáčkách za minutu. Poté prudce klesala na hodnotu 20 kg/h.



Graf 5.5: Tlak ve výfuku



Graf 5.6: Spotřeba paliva

5.5. Porovnání kalibrací

Jak již bylo zmíněno, k zajištění vyšší přesnosti měření lze dojít dvěma způsoby. Jedním je snížení samotné odchylky měření a druhým snížení nejistoty měření. V této části budu porovnávat celkem tři různé postupy kalibrací. Jedním bude kalibrace termočlánku a měřicího modulu, a to každého zvlášť. To představuje stav, ve kterém probíhají kalibrace v současné době. Druhým měřením bude kalibrace termočlánku a měřicího modulu jako celku, což by nemělo nutně vést

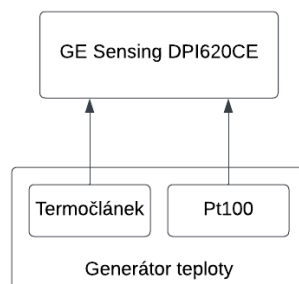
ke snížení odchylky, ale ke snížení nejistoty měření, jelikož se odstraní několik zdrojů nejistot. Třetím způsobem kalibrace bude opět kalibrace celku s tím rozdílem, že tentokrát před samotnou kalibrací dojde k justáži, tedy seřízení odchylky a nastavení parametrů vstupu měřicího modulu tak, aby odchylka následné kalibrace byla co nejnižší. Nejistota měření zde bude pravděpodobně velice podobná jako při druhém způsobu kalibrace.

Kalibrace byla prováděna v rozsahu od -20 do 300 °C celkem v šesti bodech porovnáváním termočlánu s kalibrovaným odporovým měřidlem Pt100. Pro vytvoření teplot jednotlivých bodů kalibrace byla využita klimatizační komora a kalibrační pícka. Body -20 a 0 °C se simulovaly v klimatizační komoře výrobce Weiss Umwelttechnik GmbH typ WKL64/40, která je schopna generovat teploty v rozsahu od -40 do 180 °C. Dále také dokáže simulovat a regulovat relativní vlhkost vzduchu, čehož ale nebylo při této kalibraci využito. Pro simulaci ostatních bodů, tedy 50 , 100 , 200 a 300 °C byla použita kalibrační pícka výrobce AMETEK, Inc. typ CTC-1200 A, která dokáže vytvořit teplotu až 1200 °C. Po ustálení teplot v jednotlivých bodech byly zaznamenány vždy tři hodnoty s pětiminutovými rozestupy.

Tabulka 5.1: Použitá zařízení

Zařízení	Výrobce	Typ	Výrobní číslo
Klimatizační komora	Weiss Umwelttechnik GmbH	WKL64/40	56246001910010
Kalibrační pícka	AMETEK, Inc.	CTC-1200 A	5351162-00064
Termočlánek	JSP, s. r. o.	K/ $\varnothing=3$ mm/l=300 mm	3085008
Termočlánekový měřicí modul	CSM GmbH	THMM 16 classic VP1	21766-THMD
Odporový snímač teploty	JSP, s. r. o.	Pt100/ $\varnothing=3$ mm/l=120 mm	3047856
Multifunkční kalibrátor	GE Sensing	DPI620CE	3555786

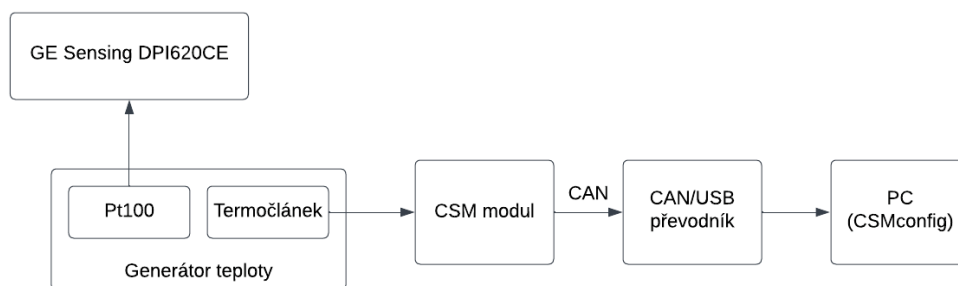
Předmětem kalibrace byl termočlánek typu K výrobce JSP, s. r. o. a termočlánekový měřicí modul výrobce CSM GmbH. Termočlánek byl porovnáván s odporovým čidlem Pt100 výrobce JSP, s. r. o. Oba snímače teploty byly vždy umístěny co možná nejbližší u sebe. Pro kalibraci měřicího CSM modulu byl využit multifunkční kalibrátor výrobce GE Sensing typ DPI620CE. Ten sloužil pro simulaci termočlánu a pomocí propojovacího kabelu byl připojen na první vstup modulu. Hodnoty z měřicího modulu byly přes sběrnici CAN a převodník na USB vyčítány přes počítač a zobrazeny pomocí softwaru CSMconfig. Kalibrátor DPI620CE byl použit i pro měření hodnot odporového snímače a termočlánu. Odporový snímač byl připojen čtyřvodičově.



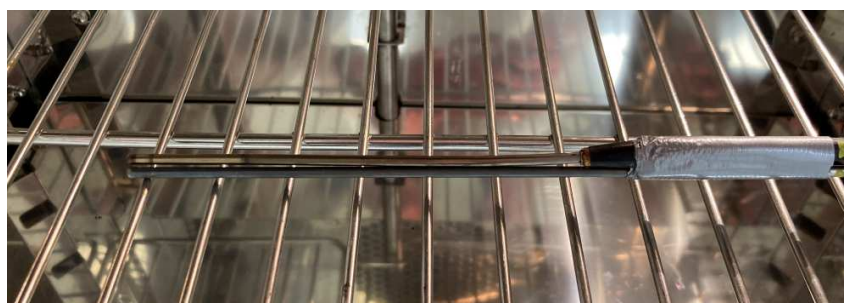
Obrázek 5.4: Blokové schéma kalibrace termočláneku



Obrázek 5.5: Blokové schéma kalibrace CSM modulu



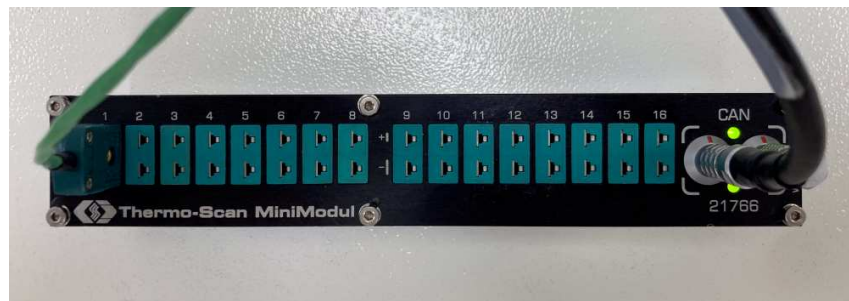
Obrázek 5.6: Blokové schéma kalibrace řetězce



Obrázek 5.7: Umístění čidel v klimatizační komoře



Obrázek 5.8: Umístění čidel v kalibrační píce



Obrázek 5.9: Měřicí CSM modul se zapojeným termočlánkem



(a) Klimatizační komora



(b) Kalibrační pírka

Obrázek 5.10: Použitá zařízení pro generování požadované teploty



(a) Multifunkční kalibrátor se zapojeným odporovým čidlem Pt100



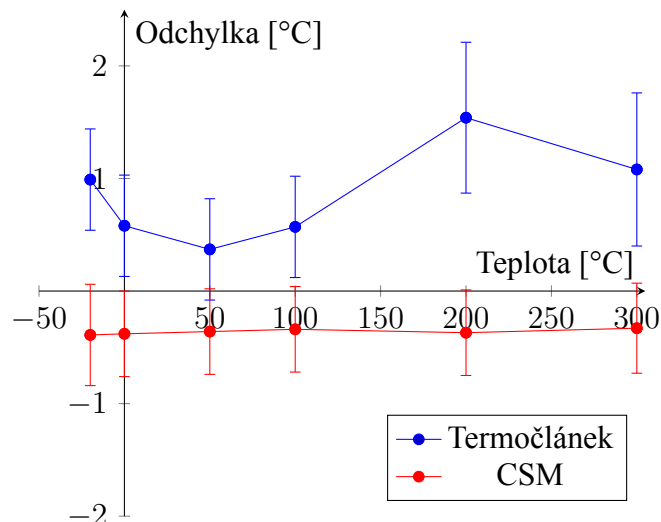
(b) Multifunkční kalibrátor se zapojeným termočlánkem

Obrázek 5.11: Použití multifunkčního kalibrátoru GE Sensing



Obrázek 5.12: Kalibrace CSM modulu

Na grafu Graf 5.7 vycházejícího z tabulky 5.2 lze vidět hodnoty z kalibrace termočlánu a CSM modulu. Průměrná odchylka CSM modulu byla v celém rozsahu stabilní a pohybovala se od $-0,33$ do $-0,39$ °C. To se nedá říct o odchylce termočlánu, jelikož minimální průměrnou odchylku $0,37$ °C a maximální $1,54$ °C dělí $1,17$ °C. Průběh odchylky je ve tvaru W, kdy odchylka nejdříve klesá, poté se postupně zvyšuje, až nakonec začne znovu klesat.



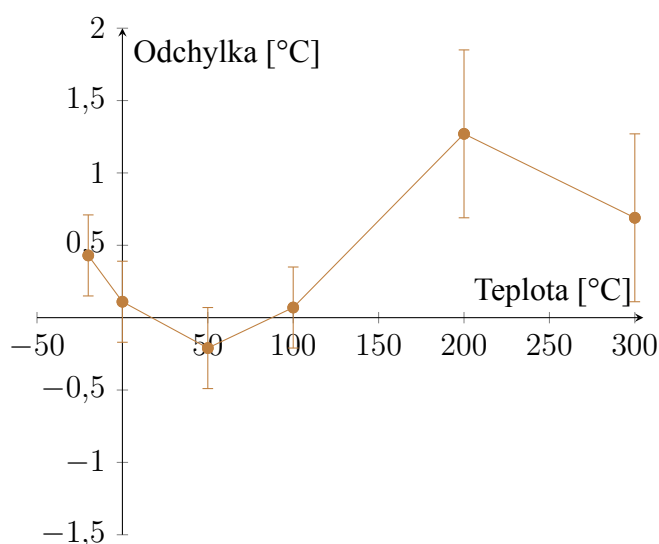
Graf 5.7: Průměrné odchylky při kalibraci jednotlivých prvků zvlášť

Rozšířené nejistoty měření zde máme dvě. Jednu pro kalibraci termočlánu, která se pohybovala od $0,45$ do $0,68$ °C. Nejistota měření pro CSM modul vyšla nižší, a sice na $0,38$ až $0,45$ °C. Pro výpočet rozšířené nejistoty při každé kalibraci byl použit koeficient rozšíření $k = 2$, pro pokrytí intervalu správné měřené hodnoty s pravděpodobností 95%. Jednotlivé zdroje nejis-

Tabulka 5.2: Hodnoty z kalibrace jednotlivých částí

Požadovaná teplota [°C]	-20	0	50	100	200	300
Průměrná teplota Pt100 [°C]	-20,03	-0,02	49,98	99,86	199,98	300,00
Průměrná teplota termočlánek [°C]	-19,04	0,56	50,35	100,44	201,52	301,08
Průměrná teplota CSM modul [°C]	-20,39	-0,38	49,64	99,66	199,63	299,67
Odchylka termočlánek [°C]	0,99	0,58	0,37	0,57	1,54	1,08
Odchylka CSM modul [°C]	-0,39	-0,38	-0,36	-0,34	-0,37	-0,33
Rozšířená nejistota termočlánek [°C]	0,45	0,45	0,45	0,45	0,67	0,68
Rozšířená nejistota CSM modul [°C]	0,45	0,38	0,38	0,38	0,38	0,40

tot a jejich hodnoty při každé kalibraci lze nalézt v příloze. Některé zdroje byly převzaty přímo z kalibračních protokolů jednotlivých zařízení, jiné byly ovlivněny vlastnostmi použitých zařízení, jako například jejich rozlišením. Hodnota parazitního napětí ovlivňující měřené hodnoty, jakožto jednoho ze zdrojů nejistot, byla určena pouze odhadem.



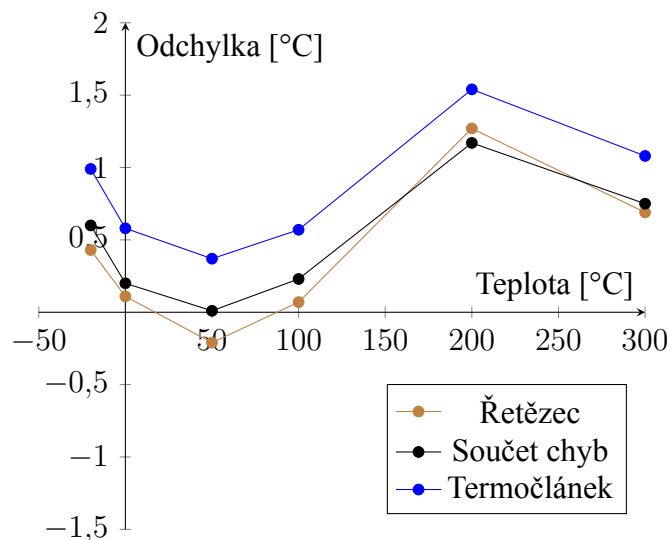
Graf 5.8: Průměrná odchylka při kalibraci řetězce

Tabulka 5.3: Hodnoty z kalibrace řetězce

Požadovaná teplota [°C]	-20	0	50	100	200	300
Průměrná teplota Pt100 [°C]	-19,98	0,01	50,08	99,94	199,97	300,10
Průměrná teplota řetězec [°C]	-19,54	0,12	49,86	100,02	201,24	300,80
Odchylka [°C]	0,43	0,11	-0,21	0,07	1,27	0,69
Rozšířená nejistota řetězec [°C]	0,28	0,28	0,28	0,28	0,58	0,58

Na grafu Graf 5.8 vycházejícího z tabulky 5.3, který zobrazuje kalibraci řetězce, tedy termočlánek a CSM vcelku, lze vidět stejný tvar průběhu průměrné odchylky jako při kalibraci samotného termočlánek. Maximální odchylka se zde ovšem snížila z původních 1,54 °C na 1,27 °C. Minimální průměrná odchylka se také posunula, dostala se až do záporných hodnot a stala se

z ní tak maximální záporná odchylka, která měla hodnotu $-0,21\text{ }^{\circ}\text{C}$. Rozdíl mezi maximální zápornou a maximální kladnou odchylkou se tak zvýšil na $1,48\text{ }^{\circ}\text{C}$. I když se může zdát, že se maximální odchylka díky tomuto způsobu měření snížila, není to tak docela pravda. Pokud bychom sečetli odchylky z prvního způsobu kalibrace, dostali bychom se na velmi podobné hodnoty, jak je ostatně vidět na grafu Graf 5.9. Pokud by odchylka samotného CSM modulu byla teoreticky opačného znaménka, tzn. kladná, vyšla by v tomto případě odchylka při kalibraci řetězce na první pohled znatelně vyšší, než při kalibraci samotného termočláneku.

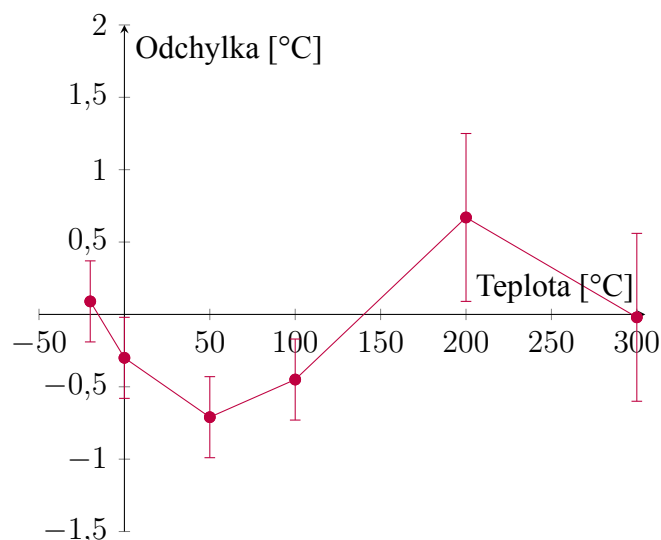


Graf 5.9: Porovnání kalibrací

Rozšířená nejistota měření pro kalibraci řetězce vyšla nižší než při kalibraci samotného termočláneku, a to díky menšímu počtu zdrojů nejistot. Při tomto měření se pohybovala od $0,28$ do $0,58\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Po provedení předchozích měření byla v programu CSMconfig provedena justáž, jež spočívala v nastavení koncových bodů kalibrace. Nejdříve se tedy v klimatizační komoře nastavila teplota $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a po ustálení došlo k převzetí této hodnoty. Poté se termočlánek vložil do kalibrační pícky vyhřáté na $300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Po ustálení opět došlo k převzetí hodnoty programem a ten následně přepočítal parametry vstupu CSM modulu tak, aby zobrazované výstupní hodnoty byly co nejpřesnější.

Graf Graf 5.10 vycházející z tabulky 5.4 zobrazuje průměrnou odchylku při kalibraci řetězce po justování. Zde je vidět, že počáteční a koncový bod má odchylku blízkou $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Maximální záporná průměrná odchylka se posunula na $-0,71$ a maximální kladná na $0,67$. Rozdíl mezi těmito hodnotami byl $1,38\text{ }^{\circ}\text{C}$. Absolutní extrém odchylek se tedy razantně snížil. Tento způsob kalibrace by fungoval nehledě na velikost chyby samotného měřicího modulu. Podstatný je zde



Graf 5.10: Průměrná odchylka při kalibraci řetězce po justáži

průběh chyby termočlánku, díky jehož tvaru není možné odstranit chybu úplně.

Rozšířená nejistota měření zde vyšla stejná jako při předchozí kalibraci, což se dalo předpokládat, jelikož je zde celý proces totožný, a tedy i zdroje nejistot a jejich příspěvky jsou stejné.

Tabulka 5.4: Hodnoty z kalibrace řetězce po justáži

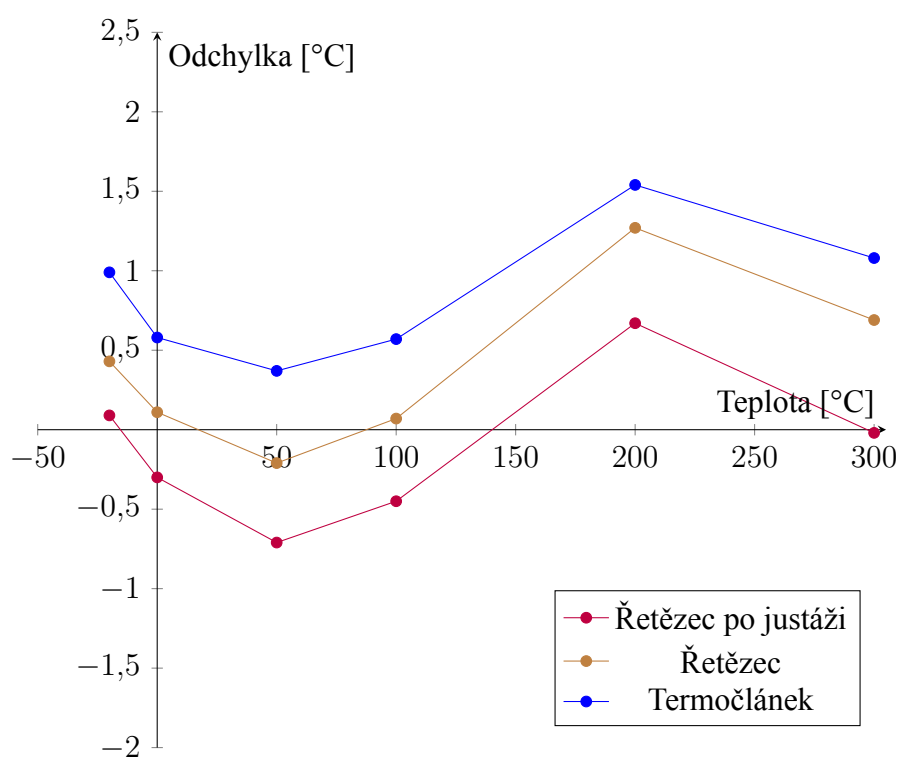
Požadovaná teplota [°C]	-20	0	50	100	200	300
Průměrná teplota Pt100 [°C]	-19,99	0,09	50,32	100,08	200,32	300,05
Průměrná teplota řetězec [°C]	-19,90	-0,21	49,62	99,63	200,99	300,04
Odchylka [°C]	0,09	-0,30	-0,71	-0,45	0,67	-0,02
Rozšířená nejistota řetězec [°C]	0,28	0,28	0,28	0,28	0,58	0,58

Tabulka 5.5 zobrazuje porovnání rozšířených nejistot měření jednotlivých kalibrací. I zde je vidět, že kalibrace řetězce má nižší nejistoty než kalibrace jednotlivých prvků zvlášť.

Na grafu Graf 5.11 je možné porovnat všechny způsoby kalibrace. Z tohoto grafu jednoznačně vyplývá, že nejpřesnějším způsobem kalibrace je kalibrace řetězce po předchozím seřízení.

Tabulka 5.5: Hodnoty rozšířených nejistot

Požadovaná teplota [°C]	-20	0	50	100	200	300
Rozšířená nejistota termočlánek [°C]	0,45	0,45	0,45	0,45	0,67	0,68
Rozšířená CSM modul [°C]	0,45	0,38	0,38	0,38	0,38	0,40
Rozšířená nejistota řetězec [°C]	0,28	0,28	0,28	0,28	0,58	0,58
Rozšířená nejistota řetězec po justáži [°C]	0,28	0,28	0,28	0,28	0,58	0,58



Graf 5.11: Porovnání odchylek kalibrací

ZÁVĚR

Spalovací motory tvoří největší podíl pohonů automobilů na silnicích. To zatím platí i pro nově vyrobené automobily, byť se v posledních letech stávají stále populárnějšími elektromobily. Elektromobily mají spoustu výhod oproti běžným automobilům se spalovacími motory jako například jízdu bez emisí, větší jízdní komfort nebo lepší jízdní dynamiku. Nevýhodou je zde nižší dojezd ve spojení s mnohdy dlouhou dobou nabíjení a hlavně také vyšší pořizovací cena elektromobilu. Problém s dlouhou dobou nabíjení mohou řešit rychlonabíjecí stanice, které dokáží dodávat výkon až 350 kW a zvýšit tak dojezd elektromobilu o 100 km za přibližně 5 minut.

Dokud některá z alternativních technologií nenahradí spalovací motory v nově vyrobených automobilech po celém světě, lze očekávat, že bude i nadále probíhat jejich vývoj a s tím budou vznikat i nové typy motorů, které proto bude nutné v daných zemích homologovat a plnit místní podmínky a regulace. Lze předpokládat, že se v budoucnu budou zpříšňovat různé požadavky, které následně mohou tlačit na zvýšení přesnosti homologačních měření.

Cílem bakalářské práce bylo nalézt možnosti optimalizace homologační měřicí sestavy. Vybral jsem si možnost změny způsobu kalibrace teplotního řetězce, kdy dosavadním způsobem bylo kalibrovat jednotlivé prvky zvlášť. Mnou navržený způsob kalibrace spočíval v kalibrování prvků dohromady. Předpokladem bylo dosažení snížení nejistot měření vlivem menšího počtu zdrojů těchto nejistot. Druhým krokem mělo být nastavení vstupu měřicího modulu tak, aby se snížila odchylka připojeného tepelného čidla na co možná nejnižší úroveň.

Mé předpoklady se naplnily a opravdu došlo ke snížení nejistot měření. Tato metoda vedla i ke zjednodušení interpretace výsledků kalibrace, jelikož zde vzniká pouze jeden kalibrační list, který zahrnuje všechny prvky řetězce. Možnost nastavení vstupu měřicího modulu měla podle předpokladu kladný vliv na snížení odchylky měřicího čidla. Nebylo ale možné přiblížit se s odchylkou k nule, jelikož mnou použitý termočlánek vykazoval nepravidelnou křivku odchylek v průběhu kalibračních bodů.

Nutné je zde zmínit i nevýhodu tohoto procesu. Vzhledem k tomu, že při tomto způsobu kalibrace je konkrétní teplotní čidlo svázáno s konkrétním měřicím modulem a i jeho vstupem, není možné v případě poruchy jedné části vyměnit tuto část za jinou bez provedení kalibrace. To může nasazení tohoto způsobu kalibrace mírně komplikovat.

Možností dalšího výzkumu by mohlo být například zjištění vlivu teplot termočlánekového vedení na přesnost měření, jež je často vedeno v blízkosti spalovacího motoru, a tedy i v blízkosti

horkých částí, které mohou samotné vedení ohřívat, což by potenciálně mohlo mít vliv na měřené hodnoty. Případně by bylo možné se zaměřit na zcela jinou část měřicí techniky a nalézt jiné možné problémy a navrhnout jejich řešení.

POUŽITÁ LITERATURA

1. MECHANICAL EDUCATION. *Spark Ignition Engine, Working and Parts* [online]. 2019-03-31. [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: <https://www.mechanicaleducation.com/spark-ignition-engine-working/>.
2. MAREK BEDNÁŘ. *Jak fungují motory: klíčové součásti a jejich funkce: Čtyřdobý spalovací motor* [online]. 2015-05-03. [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: <https://www.autoforum.cz/technika/jak-funguji-motory-klicove-soucasti-a-jejich-funkce/>.
3. GREGORA STANISLAV A ZDENĚK MAŠEK. *Elektronické a mechatronické systémy v konstrukci silničních vozidel* [online]. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2008. ISBN 978-80-7395-082-8. Dostupné také z: <http://www.digitalniknihovna.cz/mzk/uuid/uuid:b355ce70-9360-11ea-830f-005056827e51>.
4. PATRICIA GIMENO. *Engine cooling system: how it works and main components* [online]. 2021-05-27. [cit. 2023-04-12]. Dostupné z: <https://www.idolz.com/en/2021/05/27/engine-cooling-system-how-it-works-and-main-components/>.
5. ER. AMRIT KUMAR. *Different Parts of the Engine and their Function [Notes & PDF]* [online]. 2021-05-24. [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: <https://themechanicalengineering.com/engine-parts-and-their-function/>.
6. ER. AMRIT KUMAR. *Electronic Ignition System: Definition, Parts, Working, Advantages, Application [Notes & PDF]* [online]. 2021-03-04. [cit. 2023-04-12]. Dostupné z: <https://themechanicalengineering.com/electronic-ignition-system/>.
7. THOMAS PUBLISHING COMPANY. *Types of Sensors - A Complete Guide* [online]. 2006-02-09. [cit. 2023-04-05]. Dostupné z: <https://www.thomasnet.com/articles/instruments-controls/types-of-sensors/>.
8. AMT MĚŘICÍ TECHNIKA. *Chyba měření - nejistota měření* [online]. 2002-09-30. [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: https://www.amt.cz/index.php?id=CL_CHYB.
9. THE HONG KONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY. *LECTURE 2:Sensors* [online]. 2001-01-31. [cit. 2023-04-13]. Dostupné z: <https://ieda.ust.hk/dfaculty/ajay/courses/alp/ieem110/lecs/sensors/sensors.html>.

10. RENKEER. *Types Of Industrial Sensors For Automation* [online]. 2021-09-18. [cit. 2023-04-05]. Dostupné z: <https://www.renkeer.com/types-of-industrial-sensors-for-automation/>.
11. THOMAS PUBLISHING COMPANY. *Common Types of Pressure Sensors* [online]. 2020-01-23. [cit. 2023-04-06]. Dostupné z: <https://www.thomasnet.com/articles/instruments-controls/pressure-sensors/>.
12. MILOŠ KMÍNEK. *Měření tlaku: Snímače s polovodičovými tenzometry* [online]. 2002-01-31. [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/f4/f4k42-tlak.htm>.
13. BM ENGINEERING SUPPLIES LTD. *Pressure Gauge Working Principle* [online]. 2018-06-14. [cit. 2023-04-06]. Dostupné z: <https://www.bmengineering.co.uk/wp-content/uploads/Pressure-Gauge-Working-Principle.pdf>.
14. MICHAL ZÁVACKÝ. *Nízká vlhkost vzduchu v interiéru – co na ni funguje* [online]. 2019-11-06. [cit. 2023-04-08]. Dostupné z: <https://www.proalergiky.cz/clanky/nizka-vlhkost-vzduchu-v-interieru-co-na-ni-funguje>.
15. THOMAS PUBLISHING COMPANY. *All About Humidity Sensors* [online]. 2020-06-02. [cit. 2023-04-07]. Dostupné z: <https://www.thomasnet.com/articles/instruments-controls/all-about-humidity-sensors/>.
16. ROTRONIC INSTRUMENT CORP. *THE CAPACITIVE HUMIDITY SENSOR* [online]. 2016-11-17. [cit. 2023-04-08]. Dostupné z: https://www.rotronic.com/en-us/humidity_measurement-feuchtemessung-mesure_de_l_humidite/capacitive-sensors-technical-notes-mr.
17. PROCESS SENSING TECHNOLOGIES LIMITED. *Humidity Academy Theory 6 - The Capacitive Sensor* [online]. 2021-06-08. [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://www.processsensing.com/en-us/blog/capacitive-sensor-technology.htm>.
18. GUILCOR. *WHAT IS A RESISTIVE HUMIDITY SENSOR?* [Online]. 2021-06-14. [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: <https://www.guilcor.com/content/37-le-capteur-d-humidite-resistif>.
19. DENES K. ROVETI. *CHOOSING A HUMIDITY SENSOR* [online]. 2001-06-01. [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: <https://www.ohmicinstruments.com/article-choosing-a-humidity-sensor>.

20. THOMAS PUBLISHING COMPANY. *All About Flow Sensors* [online]. 2020-06-08. [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: <https://www.thomasnet.com/articles/instruments-controls/all-about-flow-sensors/>.
21. MAGGIE SCHMIDT. *The Basics of Flow Measurement with Coriolis Meters: Part 2* [online]. 2014-09-17. [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://www.emersonautomationexperts.com/2014/measurement-instrumentation/the-basics-of-flow-measurement-with-coriolis-meters-part-2/>.
22. THOMAS PUBLISHING COMPANY. *All About Temperature Sensors* [online]. 2020-05-22. [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: <https://www.thomasnet.com/articles/instruments-controls/all-about-temperature-sensors/>.
23. ELUC. *Snímače teploty: Odporové snímače* [online]. 2020-09-25. [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/959>.
24. OMEGA ENGINEERING, INC. *How to choose a Thermocouple* [online]. 2019-04-18. [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: <https://www.omega.com/en-us/resources/selecting-a-thermocouple>.
25. ELUC. *Snímače teploty: Termočlánky* [online]. 2020-09-25. [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/959>.
26. OMEGA ENGINEERING, INC. *How to choose a Thermocouple: How do I know which junction type to choose?* [Online]. 2019-04-18. [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://www.omega.com/en-us/resources/selecting-a-thermocouple>.
27. OMEGA ENGINEERING, INC. *What Is A Thermistor And How Does It Work?* [Online]. 2022-11-17. [cit. 2023-04-12]. Dostupné z: <https://www.omega.com/en-us/resources/thermistor>.
28. WAVELENGTH ELECTRONICS, INC. *THERMISTOR BASICS* [online]. 2013-05-29. [cit. 2023-04-12]. Dostupné z: <https://www.teamwavelength.com/thermistor-basics/>.
29. EETECH MEDIA, LLC. *NTC Thermistor* [online]. 2012-10-27. [cit. 2023-04-12]. Dostupné z: <https://eepower.com/resistor-guide/resistor-types/ntc-thermistor/>
#.

30. T.K. HAREENDRAN. *RPM Measurement: Sensors and Techniques* [online]. 2017-05-20. [cit. 2023-04-13]. Dostupné z: <https://www.electronicsforu.com/tech-zone/test-measurement-electronics/rpm-measurement-sensors-techniques>.
31. JASON HUGO. #63 – *Which Handheld Digital Tachometer is Right For Me?: Contact and non-contact tachometers measure RPM in slightly different ways* [online]. 2019-02-12. [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://blog.qrfs.com/63-which-hand-held-digital-tachometer-is-right-for-me/>.
32. HOTTINGER BRÜEL & KJÆR. *How Does a Torque Transducer Actually Work?* [Online]. 2023. [cit. 2023-04-13]. Dostupné z: https://www.hbkworld.com/en/knowledge/resource-center/articles/2023/how-does-a-torque-transducer-actually-work#!ref_www.hbm.com.
33. BINSFELD ENGINEERING. *Weldable vs Bondable Strain Gages For Shaft Torque Measurement* [online]. 2020-03-25. [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://binsfeld.com/torque-measurement-weldable-bondable-strain-gage/>.
34. KISTLER GROUP. *Torque measuring flange system KiTorq Rotor, measuring ranges 100 to 10000 Nm / 4550A* [online]. 2022-11-23. [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/INT/en/cp/torque-measuring-flange-system-kitorq-rotor-measuring-ranges-100-to-10000-nm-4550a/P0000244>.
35. KISTLER GROUP. *Shaft torque sensors, dual range torque transducers (measuring ranges 0.2 Nm to 5 kNm) / 4503B* [online]. 2017-11-29. [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/INT/en/cp/shaft-torque-sensors-dual-range-torque-transducers-measuring-ranges-0.2-nm-to-5-knm-4503b/P0000238>.
36. GLOBALSPEC. *Signal Converters Information* [online]. 2018-02-12. [cit. 2023-04-13]. Dostupné z: https://www.globalspec.com/learnmore/data_acquisition_signal_conditioning/signal_converting/signal_converters.
37. DIFFEN. *Analog vs. Digital* [online]. 2020-08-07. [cit. 2023-04-13]. Dostupné z: https://www.diffen.com/difference/Analog_vs_Digital.
38. MONOLITHIC POWER SYSTEMS, INC. *Analog Signals vs. Digital Signals: Analog Signal* [online]. 2020-09-03. [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://www.monolithicpower.com/en/analog-vs-digital-signal>.

39. MONOLITHIC POWER SYSTEMS, INC. *Analog Signals vs. Digital Signals: Digital Signal* [online]. 2020-09-03. [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://www.monolithicpower.com/en/analog-vs-digital-signal>.
40. GRAHAM LAMBERT. *HOW ANALOG TO DIGITAL CONVERTERS WORK* [online]. 2022-01-01. [cit. 2023-04-14]. Dostupné z: <https://www.circuitbasics.com/analog-to-digital-converters/>.
41. TUTORIALS POINT INDIA LIMITED. *Direct Type ADCs* [online]. 2019-11-04. [cit. 2023-04-14]. Dostupné z: https://www.tutorialspoint.com/linear_integrated_circuits_applications/linear_integrated_circuits_applications_direct_type_adcs.htm.
42. ASPENCORE, INC. *Analogue to Digital Converter* [online]. 2020-09-21. [cit. 2023-04-14]. Dostupné z: <https://www.electronics-tutorials.ws/combinational/analogue-to-digital-converter.html>.
43. TUTORIALS POINT INDIA LIMITED. *Indirect Type ADC* [online]. 2018-07-21. [cit. 2023-04-14]. Dostupné z: https://www.tutorialspoint.com/linear_integrated_circuits_applications/linear_integrated_circuits_applications_indirect_type_adc.htm.
44. TUTORIALS POINT INDIA LIMITED. *Digital to Analog Converters* [online]. 2018-07-21. [cit. 2023-04-15]. Dostupné z: https://www.tutorialspoint.com/linear_integrated_circuits_applications/linear_integrated_circuits_applications_digital_to_analog_converters.htm.
45. ELECTRICAL TECHNOLOGY. *Digital to Analog Converter (DAC) – Types, Working & Applications* [online]. 2020-04-29. [cit. 2023-04-15]. Dostupné z: <https://www.electricaltechnology.org/2020/04/digital-to-analog-converter-dac.html>.
46. KIM PYEON. *Delta Sigma DAC starting from scratch* [online]. 2020-07-06. [cit. 2023-04-15]. Dostupné z: http://m.mofi.co.kr/board/brd_mofi_m_view_n10.asp?table=brd_10281&pid=16999&f_lid=19050413101067&lid=100&level=0&ishtml=t&p_f_lid=19050413101106&p_lid=100.

47. ŠKODA AUTO A.S. *Škoda Auto přebírá v rámci koncernu Volkswagen zodpovědnost za vývoj všech motorů řady EA 211* [online]. 2023-03-09. [cit. 2023-05-05]. Dostupné z: <https://www.skoda-storyboard.com/cs/tiskove-zpravy-archiv/skoda-auto-prebira-v-ramci-koncernu-volkswagen-zodpovednost-za-vyvoj-vsech-motoru-rady-ea-211/>.
48. ŠKODA AUTO A.S. *360° prohlídka: Jak se testují motory* [online]. 2018-11-20. [cit. 2023-05-05]. Dostupné z: <https://www.skoda-storyboard.com/cs/skoda-svet-cs/inovace-a-technologie/technologie-cs/360-prohlidka-jak-se-testuji-motory/>.
49. BEAMEX OY AB. *What is Calibration?* [Online]. 2018-11-28. [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: <https://www.beamex.com/resources/what-is-calibration/>.
50. DEBAPRIYA M. *Measurement: Systems and Standards | Metrology* [online]. 2016-12-23. [cit. 2023-04-17]. Dostupné z: <https://www.yourarticlelibrary.com/metrology/measurement-systems-and-standards-metrology/95296>.
51. HEIKKI LAURILA. *Metrological Traceability in Calibration – Are you traceable?* [Online]. 2017-01-18. [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: <https://blog.beamex.com/metrological-traceability-in-calibration-are-you-traceable>.
52. ČESKÝ METROLOGICKÝ INSTITUT. *Systém státních etalonů ČR* [online]. 2014-10-20. [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://www.cmi.cz/system%20statnich%20etalonu%20CR>.
53. ČESKÝ METROLOGICKÝ INSTITUT. *Základní pojmy: Pracovní měřidla stanovená (stanovená měřidla)*: [online]. 2015-01-25. [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://www.cmi.cz/node/537>.
54. ČESKÁ METROLOGICKÁ SPOLEČNOST. *Kalibrační postup: TLAKOVÉ TEPLOMĚRY* [online]. 2013-10. [cit. 2023-04-17]. Dostupné z: http://www.spolky-csvts.cz/cms/sites/default/files/kp_3130213_tlakove_tplomery.pdf.
55. HEIKKI LAURILA. *Calibration uncertainty for dummies* [online]. 2016-11-02. [cit. 2023-04-17]. Dostupné z: <https://blog.beamex.com/calibration-uncertainty-for-dummies-part-1>.

56. NICK DOE. *02. Uncertainty Analysis: Absolute uncertainty (AU)* [online]. 2015-09-28. [cit. 2023-05-05]. Dostupné z: <https://sites.google.com/a/wellesley.edu/chem-105-online-lab-manual/appendix/uncertainty-analysis>.
57. ČESKÝ INSTITUT PRO AKREDITACI, O.P.S. *EA-4/02 M:2022: Výhodnocení nejistoty měření při kalibraci* [online]. 2022-04-25. [cit. 2023-04-17]. Dostupné z: https://www.cai.cz/wp-content/uploads/2022/04/01_08-P001-EA-04_02-M_2022_20220425opr.pdf.
58. TÜV SÜD. *VEHICLE TYPE APPROVAL FOR GLOBAL MARKET ACCESS* [online]. 2019-01-16. [cit. 2023-04-18]. Dostupné z: <https://www.tuvsud.com/en/industries/mobility-and-automotive/automotive-and-oem/homologation-and-global-market-access>.
59. EUROPEAN COMMISSION. *FAQ - Type approval of vehicles* [online]. 2022-07-29. [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/automotive-industry/technical-harmonisation/faq-type-approval-vehicles_en.
60. ACEA. *Type Approval* [online]. 2018-01-13. [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://www.acea.auto/fact/type-approval/>.

PŘÍLOHA

Tabulka 6.1: Naměřené hodnoty při kalibraci termočlánu

Požadovaná teplota [°C]	Naměřené hodnoty Pt100 [°C]			Naměřené hodnoty termočlánek [°C]		
	1. měření	2. měření	3. měření	1. měření	2. měření	3. měření
-20	-19,98	-20,02	-20,08	-18,99	-19,02	-19,1
0	-0,04	-0,03	0,02	0,54	0,58	0,57
50	50,15	49,88	49,91	50,51	50,25	50,29
100	100,07	99,84	99,68	100,66	100,41	100,24
200	199,94	200,03	199,97	201,49	201,56	201,52
300	299,99	299,93	300,09	301,04	300,98	301,22

Tabulka 6.2: Naměřené hodnoty při kalibraci CSM modulu

Požadovaná teplota [°C]	Naměřené hodnoty CSM modul [°C]		
	1. měření	2. měření	3. měření
-20	-20,4	-20,44	-20,33
0	-0,38	-0,43	-0,34
50	49,64	49,59	49,7
100	99,68	99,59	99,7
200	199,61	199,57	199,7
300	299,63	299,59	299,8

Tabulka 6.3: Naměřené hodnoty při kalibraci řetězce

Požadovaná teplota [°C]	Naměřené hodnoty Pt100 [°C]			Naměřené hodnoty řetězec [°C]		
	1. měření	2. měření	3. měření	1. měření	2. měření	3. měření
-20	-19,94	-19,97	-20,02	-19,52	-19,54	-19,57
0	-0,03	0,02	0,04	0,09	0,13	0,15
50	50,28	50,11	49,84	50,06	49,86	49,67
100	100,05	100,04	99,74	100,15	100,11	99,79
200	199,85	200,01	200,05	201,12	201,27	201,32
300	300,24	299,96	300,11	300,93	300,64	300,82

Tabulka 6.4: Naměřené hodnoty při kalibraci řetězce po justování

Požadovaná teplota [°C]	Naměřené hodnoty Pt100 [°C]			Naměřené hodnoty řetězec [°C]		
	1. měření	2. měření	3. měření	1. měření	2. měření	3. měření
-20	-20	-20,03	-19,95	-19,9	-19,94	-19,87
0	0,09	0,1	0,09	-0,19	-0,22	-0,22
50	50,1	50,51	50,36	49,4	49,8	49,65
100	100	99,92	100,32	99,55	99,46	99,87
200	200,53	200,45	199,98	201,2	201,11	200,67
300	299,76	300,3	300,1	299,76	300,28	300,07

Tabulka 6.5: Zdroje nejistot při kalibraci termočlánu

	[°C]	-20	0	50	100	200	300
Ua	Směrodatná odchylka [°C]	0,00577	0,01732	0,00577	0,00882	0,00667	0,02667
Ub	Nejistota Pt100 [°C]	0,04041	0,02309	0,03464	0,03464	0,25403	0,25403
	Nejistota DPI vstup Pt100 [°C]	0,04099	0,04099	0,04099	0,04099	0,04099	0,04099
	Nejistota DPI vstup termočlánek [°C]	0,04099	0,04099	0,04099	0,04099	0,04099	0,04099
	Rozlišení DPI Pt100 [°C]	0,00289	0,00289	0,00289	0,00289	0,00289	0,00289
	Rozlišení DPI termočlánek [°C]	0,00289	0,00289	0,00289	0,00289	0,00289	0,00289
	Nejistota studeného konce [°C]	0,17898	0,17898	0,17898	0,17898	0,17898	0,17898
	Parazitní napětí [°C]	0,11547	0,11547	0,11547	0,11547	0,11547	0,11547
	Kombinovaná nejistota [°C]	0,22452	0,22266	0,22356	0,22366	0,33663	0,33762
	Rozšířená nejistota [°C]	0,44905	0,44532	0,44711	0,44731	0,67327	0,67524

Tabulka 6.6: Zdroje nejistot při kalibraci CSM modulu

	[°C]	-20	0	50	100	200	300
Ua	Směrodatná odchylka [°C]	0,03215	0,02603	0,03180	0,03383	0,03844	0,06438
Ub	Nejistota DPI vstup termočlánek [°C]	0,18146	0,13718	0,13718	0,13718	0,13718	0,13498
	Rozlišení CSM [°C]	0,00289	0,00289	0,00289	0,00289	0,00289	0,00289
	Rozlišení DPI termočlánek [°C]	0,00029	0,00029	0,00029	0,00029	0,00029	0,00029
	Nejistota studeného konce [°C]	0,05774	0,05774	0,05774	0,05774	0,05774	0,05774
	Parazitní napětí [°C]	0,11547	0,11547	0,11547	0,11547	0,11547	0,11547
	Kombinovaná nejistota [°C]	0,22503	0,19019	0,19106	0,19141	0,19228	0,19759
	Rozšířená nejistota [°C]	0,45005	0,38037	0,38212	0,38282	0,38456	0,39517

Tabulka 6.7: Zdroje nejistot při kalibraci řetězce

	[°C]	-20	0	50	100	200	300
Ua	Směrodatná odchylka [°C]	0,00882	0,00333	0,02333	0,01453	0,00333	0,00882
Ub	Nejistota Pt100 [°C]	0,04041	0,02309	0,03464	0,03464	0,25403	0,25403
	Nejistota DPI vstup Pt100 [°C]	0,04099	0,04099	0,04099	0,04099	0,04099	0,04099
	Rozlišení DPI Pt100 [°C]	0,00289	0,00289	0,00289	0,00289	0,00289	0,00289
	Rozlišení CSM [°C]	0,00289	0,00289	0,00289	0,00289	0,00289	0,00289
	Nejistota studeného konce [°C]	0,05774	0,05774	0,05774	0,05774	0,05774	0,05774
	Parazitní napětí [°C]	0,11547	0,11547	0,11547	0,11547	0,11547	0,11547
	Kombinovaná nejistota [°C]	0,14169	0,13751	0,14180	0,14062	0,28794	0,28805
	Rozšířená nejistota [°C]	0,28337	0,27501	0,28361	0,28125	0,57588	0,57611

Tabulka 6.8: Zdroje nejistot při kalibraci řetězce po justáži

	[°C]	-20	0	50	100	200	300
Ua	Směrodatná odchylka [°C]	0,00577	0,01202	0,00333	0,00333	0,00882	0,00882
Ub	Nejistota Pt100 [°C]	0,04041	0,02309	0,03464	0,03464	0,25403	0,25403
	Nejistota DPI vstup Pt100 [°C]	0,04099	0,04099	0,04099	0,04099	0,04099	0,04099
	Rozlišení Pt100 [°C]	0,00289	0,00289	0,00289	0,00289	0,00289	0,00289
	Rozlišení CSM [°C]	0,00289	0,00289	0,00289	0,00289	0,00289	0,00289
	Nejistota studeného konce [°C]	0,05774	0,05774	0,05774	0,05774	0,05774	0,05774
	Parazitní napětí [°C]	0,11547	0,11547	0,11547	0,11547	0,11547	0,11547
	Kombinovaná nejistota [°C]	0,14153	0,13799	0,13991	0,13991	0,28805	0,28805
	Rozšířená nejistota [°C]	0,28306	0,27598	0,27982	0,27982	0,57611	0,57611