

UNIVERZITA PARDUBICE  
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Mikroprocesorová regulace tlaku turbodmychadla spalovacího motoru  
Bakalářská práce

2023

Vojtěch Mlateček

Univerzita Pardubice  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Akademický rok: 2022/2023

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: Vojtěch Mlateček  
Osobní číslo: I20054  
Studijní program: B0714P060001 Aplikovaná elektrotechnika  
Téma práce: Mikroprocesorová regulace tlaku turbodmychadla spalovacího motoru  
Zadávající katedra: Katedra elektrotechniky

## Zásady pro vypracování

Vytvořte procesorovou jednotku řízení tlaku turbodmychadla spalovacího motoru. Jednotka bude měřit aktuální tlak v sací části a pomocí PWM aktuátoru regulovat naklápění regulačních lopatek turbodmychadla. Systém doplňte PD případně PID regulátorem s regulací na požadovanou hodnotu provozního tlaku. Řídící jednotka bude zobrazovat hodnotu tlaku, otáček motoru na displeji v kabině vozidla. Uživatel bude mít možnost hodnotu tlaku nastavit. Pro komfort obsluhy implementujte možnost zapsání nastavených parametrů/profilů do paměti pro opětovné použití.

V první části práce proveďte rešerši existujících řešení a porovnejte jejich vlastnosti. Snažte se ve své práci maximálně využít již existující moduly, vývojové kity a silové prvky.

Seznamte se do práce uveďte principy regulace přepíňovaných Dieslových motorů se vstřikovacími čerpadly.

Rozsah pracovní zprávy: **30-40**

Rozsah grafických prací:

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

**Seznam doporučené literatury:**

- [1] Fajkus M., Úprava atmosférického motoru na motor přepínaný, VUT Brno 2011
- [2] Matoušek D., Práce s mikrokontroléry Atmel AVR, BEN technická literatura, Praha 2006, ISBN: 80-7300-209-4
- [3] Joseph Yiu., The Definitive Guide to the ARM Cortex-M3 (Embedded Technology) 1st Edition, ISBN-13: 978-0750685344
- [4] Herout Pavel., Učebnice jazyka C1. díl, Kopp, ISBN-13: 978-80-7232-383-8

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Martin Dobrovolný, Ph.D.**

**Katedra elektrotechniky**

Datum zadání bakalářské práce:

**15. listopadu 2022**

Termín odevzdání bakalářské práce:

**12. května 2023**

**Ing. Zdeněk Němec, Ph.D. v.r.**

Děkan

L.S.

**Ing. Jan Pidanič, Ph.D. v.r.**

vedoucí katedry

V Pardubicích dne 31. ledna 2023

Prohlašuji:

Práci s názvem Mikroprocesorová regulace tlaku turbodmychadla spalovacího motoru 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 12. 5. 2023

Vojtěch Mlateček

## **Poděkování**

Tímto děkuji Ing. Martinu Dobrovolnému Ph.D. za vedení mé bakalářské práce a cenné rady při její tvorbě.

## **Anotace**

Cílem této práce je návrh řídicí jednotky pro řízení turbodmychadla s variabilní geometrií lopatek. Teoretická část se zabývá základy fungování vznětových motorů, mechanických vstřikovacích čerpadel Bosch VE a elektronicky řízených čerpadel Bosch VP. Dále jsou uvedeny základy přepínání spalovacích motorů pomocí turbodmychadel. V praktické části práce je popsán postup montáže turbodmychadla a jeho připojení. Dále je popsáno schéma zapojení mikrokontroleru se senzory a softwarové řešení. Výsledky jsou zhodnoceny na konci práce.

## **Klíčová slova**

Turbodmychadlo, spalovací motor, mikroprocesorové řízení

## **Title**

Microprocessor regulation of a variable geometry turbocharger

## **Annotation**

The aim of this work is to design a control unit for controlling a turbocharger with variable vane geometry. The theoretical part deals with the basics of diesel engines, Bosch VE mechanical injection pumps and electronically controlled Bosch VP pumps. The basics of turbocharging of internal combustion engines are also covered. In the practical part of the thesis, the turbocharger installation and connection procedures are described. Furthermore, the wiring diagram of the microcontroller with sensors and the software solution is described. The results are evaluated at the end of the thesis.

## **Keywords**

Turbocharger, combustion engine, microprocessor regulation

# Obsah

Seznam ilustrací.....	9
Seznam tabulek a rovnic .....	10
Seznam zkratk a značek .....	11
Úvod.....	12
1.0 Teoretická část .....	13
1.1 Řízení naftových spalovacích motorů.....	13
1.1.1 Vznětové motory.....	13
1.1.2 Systémy vstřikování paliva.....	14
1.2 Bosch VE.....	14
1.2.1 Dávkování paliva .....	15
1.2.2 Časování vstřiku .....	15
1.2.3 Mechanismus pro kompenzaci plnicího tlaku .....	16
1.3 Elektronické řízení vstřikovacích čerpadel , Bosch EDC.....	18
1.3.1 Bosch VP .....	18
1.3.2 Architektura řídicího systému Bosch EDC.....	19
2.0 Přepřňování spalovacích motorů turbodmychadly .....	21
2.1 Princip činnosti turbodmychadla .....	21
2.2 Konstrukce turbodmychadel .....	22
2.3 Regulace turbodmychadel.....	22
2.3.1 Regulace pomocí obtokového ventilu.....	22
2.3.2 Regulace pomocí variabilní geometrie lopatek turbíny .....	23
2.4 Charakteristiky .....	24
2.4.1 Kompresorová mapa .....	24
2.4.2 Turbínová mapa .....	25
3.0 Praktická Část .....	26
3.1. Výpočet parametrů turbodmychadla.....	26
3.2 Instalace turbodmychadla .....	31
3.3 Elektronická část.....	31

3.3.1 Schéma zapojení experimentální řídicí jednotky.....	32
3.3.2 Senzorická část .....	33
3.3.3 Výkonová část.....	35
3.3.4 Uživatelské rozhraní .....	36
3.4 Software .....	37
3.4.1 Chování v nestandardních situacích .....	37
3.4.2 Popis programu v Arduino IDE .....	37
3.4.2 PID regulace .....	39
3.5 Testování řídicí jednotky .....	41
Závěr .....	43
Použitá literatura .....	44
SEZNAM PŘÍLOH.....	45



## Seznam ilustrací

Obr. 1 Cykly čtyřdobého motoru [2] .....	13
Obr. 2 Řez čerpadlem Bosch VE s vyznačenými důležitými prvky [2] .....	15
Obr. 3 Průběhy tlaků [2] .....	16
Obr. 4 Řez kompenzačním mechanismem [1] .....	17
Obr. 5 Řez čerpadlem VP 37 [3] .....	18
Obr. 6 Architektura řídicího systému EDC .....	19
Obr. 7 Charakteristika MAP senzoru [3] .....	20
Obr. 8 Řez turbodmyčadlem, turbínová a kompresorová část [6] .....	21
Obr. 9 A/R poměr [5] .....	22
Obr. 10 Schéma turbodmyčadla s wastegate regulací [5] .....	23
Obr. 11 Lopatky v pozici pro vysoký průtok plynů [7] .....	24
Obr. 12 Lopatky v pozici pro nízký průtok plynů [7] .....	24
Obr. 13 Kompresorová mapa Garrett [5] .....	25
Obr. 14 Turbínová mapa Borg-Warner [5] .....	25
Obr. 15 Architektura navrhovaného řešení .....	26
Obr. 16 Motor XUD7/TE umístěný na testovacím stojanu .....	27
Obr. 17 Garrett GT1749V, předpokládaný průběh plnicího tlaku .....	29
Obr. 18 Garrett GT2056, předpokládaný průběh plnicího tlaku .....	30
Obr. 19 Detail výfukových svodů a přívodu oleje .....	31
Obr. 20 Detail kompresorové strany s el. Regulací .....	31
Obr. 21 Podrobné schéma experimentální řídicí jednotky .....	32
Obr. 22 Snímač MPX5700AP .....	33
Obr. 23 Snímače BMP085 a MAX6675 .....	33
Obr. 24 Detail upevnění snímače na motoru .....	34
Obr. 25 Snímač otáček motoru .....	34
Obr. 26 Schéma zapojení aktuátoru turbodmyčadla .....	35
Obr. 27 Hlavní strana .....	36
Obr. 28 Strana MENU .....	36
Obr. 29 Strana DIAG .....	37
Obr. 30 Blokové schéma běhu programu .....	38
Obr. 31 Schéma PID regulátoru .....	39
Obr. 32 výpočet PID regulace .....	40
Obr. 33 Hodnoty snímané během testu .....	41
Obr. 34 Stav při poruše senzoru .....	42
Obr. 35 Spalovací motor během testu .....	42

## **Seznam tabulek a rovnic**

Tab.1 Vypočtené hodnoty .....	29
Rovnice 3.1 Objemový průtok .....	28
Rovnice 3.2 Hmotnostní tok .....	28
Rovnice 3.3 Ziegler-Nicholsonova metoda .....	39

## **Seznam zkratek a značek**

DÚ – dolní úvrat'

HÚ – horní úvrat'

MAF – Mass Airflow Sensor (Senzor objemu protékajícího vzduchu)

MAP – Manifold Absolute Pressure Sensor (Sensor absolutního tlaku sání)

EDC – Electronic Diesel Control (Elektronické řízení dieselu)

ADC – Analog/Digital Converter (převodník digitálního signálu na analogový)

DAC – Digital/Analog Converter (převodník analogového signálu na digitální)

I2C – Internal-Integrated-Circuit Bus (interní integrovaná sběrnice)

SPI – Serial Peripheral Interface (sériové periferní rozhraní)

UART – Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (univerzální asynchronní přijímač-vysílač)

PWM – Pulse Width Modulation (Pulsní šířková modulace)

TFT – Thin Film Transistor (tenkovrstvý transistor)

## Úvod

V této bakalářské práci se zabývám vytvořením experimentální řídicí jednotky pro turbodmychadlo s variabilní geometrií lopatek. Bude umístěno na starším dieslovém motoru z 90. let s mechanickým vstřikovacím čerpadlem Bosch VE. Motivací pro modifikaci takto starého, v podstatě již zastaralého motoru je snaha o zvýšení výkonu a zároveň vylepšení křivky točivého momentu.

V dnešní době moderních vozidel s motory se vstřikováním common rail, vysokým výkonem i točivým momentem se může tato snaha zdát jako zbytečná. Přesto však tyto motory stále nachází uplatnění pro svoji jednoduchou konstrukci a vysokou spolehlivost. Pomyslnou vadou na kráse těchto motorů je absence řízení regulace tlaku továrního turbodmychadla. To vede v dnešní době již k neuspokojivým průběhům točivého momentu, zvláště ve spektru nižších otáček.

Cílem této práce je tedy vytvoření řídicí jednotky, kterou lze jednoduše implementovat a povede k vylepšení vlastností točivého momentu motoru při zachování co největší jednoduchosti a spolehlivosti celého systému. Takto upravený motor by mohl být použit pro pohon různých vozidel. Například menších traktorů, ale i některých stavebních strojů.

Při zástavbě do osobního automobilu by mohl být použit při různých sportovních, či tuningových akcích mimo pozemní komunikace. Použití na pozemních komunikacích by bylo možné, pokud by vozidlo splňovalo emisní a další předpisy dané platnou legislativou.

Výsledná experimentální řídicí jednotka by měla jít bez větších obtíží namontovat do motorového prostoru libovolného vozidla. Jednotka by měla být schopna řídit plnicí tlak turbodmychadla pomocí PID regulátoru, a to na základě dat přijímaných ze senzorů. Součástí jednotky bude i uživatelské rozhraní, které zobrazí důležité hodnoty a umožní uživateli nastavení hodnoty plnicího tlaku. Pro komfort uživatele bude tato hodnota uložena v paměti jednotky, a to i v případě restartu systému. Jako uživatelské rozhraní bude sloužit dotykový displej, který bude umístěn v dosahu uživatele.

Jednotka bude vybavena jednoduchou diagnostikou, která bude monitorovat stav senzorů nutných pro provoz systému. Pokud hodnoty senzorů nebudou v přijatelných mezích, spustí se nouzový režim, který omezí plnicí tlak a tím i výkon motoru. Stav senzorů se zobrazí na displeji.

Jednotka nebude nijak zasahovat do řízení vstřikování paliva. Motor je vybaven mechanickým čerpadlem Bosch VE, které nelze elektronicky řídit. Pokud bychom chtěli řídit i vstřikování paliva, bylo by nutné implementovat do systému čerpadlo Bosch VP. To je však náročná činnost, na kterou v této situaci nemám finanční a časové prostředky.

V případě úspěšné implementace systému do vozidla by bylo vstřikovací čerpadlo Bosch VE nastaveno a přizpůsobeno k dané aplikaci. Konkrétně by se nastavila maximální dávka vstřikovaného paliva a kompenzace plnicího tlaku. Stručný popis těchto nastavení je uveden v kapitole popisující samotné čerpadlo Bosch VE.

## 1.0 Teoretická část

V teoretické části práce se věnuji popisu základních principů činnosti vznětových spalovacích motorů, dále popisu důležitých součástí čerpadla Bosch VE a VP, které jsou nutné pro pochopení principu jejich fungování.

### 1.1 Řízení naftových spalovacích motorů

#### 1.1.1 Vznětové motory

Vznětový motor funguje na principu samozápalu paliva, kdy se do válců pod velkým tlakem vstříkuje atomizovaná nafta, která je smíchána se vzduchem a stlačena na kritickou mez, kdy dojde k samozápalu vlivem vysoké teploty způsobené tlakem ve spalovacím prostoru. Většina dnes komerčně využívaných vznětových motorů má čtyři pracovní cykly. A to sací, kompresní, expanzní a výfukový. [1]

#### Sací cyklus

V sacím cyklu se píst pohybuje směrem z horní úvratí (HÚ) k dolní úvratí (DÚ), sací ventil je otevřený a proudí do něj čerstvý vzduch ze sání. [1]

#### Kompresní cyklus

V tomto cyklu se píst pohybuje z DÚ do HÚ, sací i výfukový ventil je uzavřen a vzduch se stlačuje. Na konci kompresního cyklu je do válce pod tlakem vstříkována nafta. Vhodné načasování vstříkování kolem HÚ je zásadní pro dobrý chod motoru. [1]

#### Expanzní cyklus

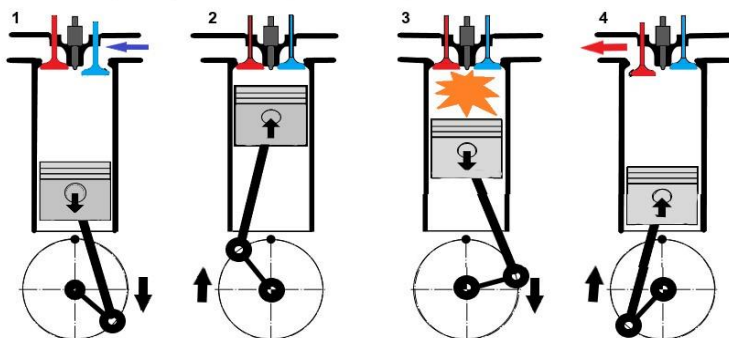
Po dosažení HÚ se směs horkého stlačeného vzduchu s palivem vznítí a píst se pohybuje směrem k DÚ a předává svoji mechanickou energii na klikový hřídel. [1]

#### Výfukový cyklus

Poslední cyklus je výfukový, kdy se píst pohybuje směrem k HÚ a vytlačuje z válce výfukové plyny skrze výfukový ventil. [1]

Při instalaci vstřikovacího čerpadla musíme dodržet jeho správnou orientaci vzhledem k pozici klikového hřídele. Pokud ho umístíme špatně, bude vstříkovat dávku paliva ve špatný okamžik a motor nebude fungovat správně. Pro správnou funkčnost motoru musí čerpadlo vstříkovat dávku přesně na konci kompresního cyklu.

1. Sací cyklus 2. kompresní cyklus 3. expanzní cyklus. 4. výfukový cyklus



Obr. 1 Cykly čtyřdobého motoru [2]

### 1.1.2 Systémy vstřikování paliva

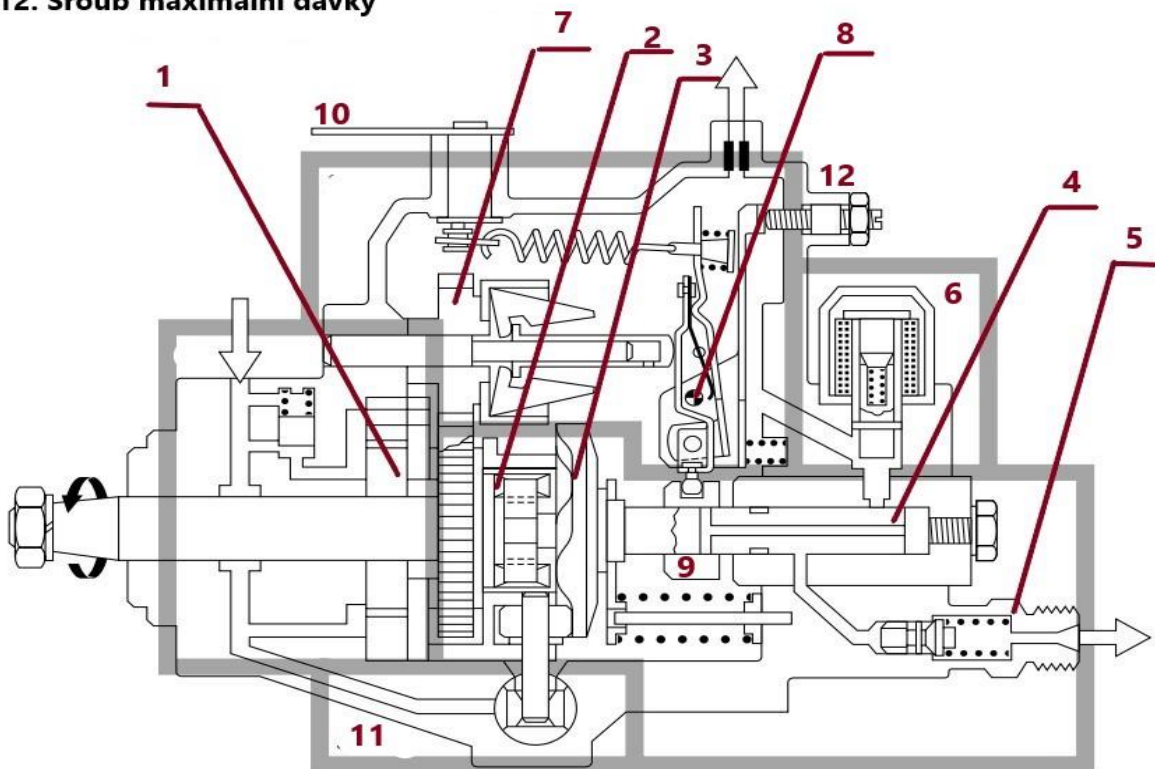
Tyto systémy jsou zodpovědné za dodávání potřebného množství paliva pro chod naftového motoru v celém spektru otáček. Vstřikovací čerpadlo stlačuje palivo na požadovaný tlak a skrze vysokotlaké potrubí ho dodává ke vstřikovačům. Správné nastavení vstřikovacího systému je základním předpokladem pro správný chod motoru. Existuje mnoho typů vstřikovacích systémů a čerpadel. Ale pro účely této práce se budu věnovat pouze rotačním čerpadlům typu VE a VP. Mechanické čerpadlo VE se nachází na motoru, ke kterému vyrábím řídicí jednotku turbodmyhadla a typ VP (VP37) je evolucí tohoto čerpadla, které už je elektronicky řízené.

Cílem této kapitoly je popsat základní principy činnosti čerpadla VE. S těmito znalostmi lze poté teoreticky provést přenastavení čerpadla pro jeho optimalizaci k namontovanému turbodmyhadlu. Musíme však mít na paměti, že přesné nastavení lze provést pouze na nastavovací stolici v servisu! Bez ní nebude nastavení nikdy zcela přesné, což může vést např. k mírně zvýšeným emisím vlivem nepřesného stechiometrického poměru (zvýšená kouřivost).

## 1.2 Bosch VE

Naftové vstřikovací čerpadlo Bosch VE je mechanicky řízené rotační vstřikovací čerpadlo, které funguje na principu jediného axiálního výtlačného pístku. Konstrukce je viditelná na obr.2. Skládá se z těla a distribuční hlavy. V těle čerpadla je na hřídeli, poháněné od motoru, umístěno podávací lamelové čerpadlo (1) generující tlak v těle čerpadla. Tento tlak je řízen regulačním ventilem a proporcionálně stoupá spolu s otáčkami čerpadla. Za ním je na hřídeli umístěn unášecí koš s rolnami (2), na kterém je unášena axiální vačka (3). Ta generuje samotný pohyb axiálního pístku vysokotlakého čerpadla (4). Stlačená dávka poté proudí skrz distribuční ventil (5) k příslušnému vstřikovači. Přívod paliva k pístku řídí elektromagnetický ventil (6). Řízení otáček a tím i vstřikované dávky zaručuje odstředivý regulátor se závažím (7) působící na soustavu pák(8). Ty pohybují regulační objímkou (9) a tím regulují množství vstřikované dávky v závislosti na vstupních podmínkách. Např. poloha akcelerační páky (10), či otáčky motoru. Čas počátku vstřiku reguluje časovací zařízení (11) umístěné ve spodní části těla čerpadla. Pro nastavení maximálního množství vstřikovaného paliva slouží nastavovací šroub (12). [2] [3]

1. Lamelové podávací čerpadlo
2. Unášecí koš
3. Axiální vačka
4. Výtlačný pístek
5. Distribuční ventil
6. Ventil přívodu paliva
7. Odstředivý regulátor
8. Soustava ovládacích pák
9. Regulační objímka
10. Akcelerační páka
11. Časovací zařízení
12. Šroub maximální dávky



UIMK0317Y

Obr. 2 Řez čerpadlem Bosch VE s vyznačenými důležitými prvky [2]

### 1.2.1 Dávkování paliva

Dávkování paliva se skládá z několika fází závislých na pozici pístku, který vykonává tolik pracovních zdvihů, kolik má motor válců. Výtlačný pístek se pohybuje mezi horní a dolní úvratí, vykonává rotační pohyb, který otevírá kanály k jednotlivým distribučním ventilům a lineární pohyb, který stlačuje palivo. Množství vstřikované dávky je určeno pozicí regulační objímky, čím více je objímka posunuta směrem k distribuční hlavě, tím déle trvá samotný vstřik a tím více paliva je vstřikováno do válce. A naopak čím více je objímka posunutá opačným směrem, tím kratší dobu trvá vstřik dávky a tím méně paliva je dodáno. V extrémním případě může být množství až nulové, třeba při jízdě z kopce. Množství maximální dávky udává nastavovací šroub, který reguluje maximální posunutí regulační objímky a tím i maximální množství dávky. Je důležité si tyto vzájemné vztahy uvědomovat při případných zásazích do nastavení čerpadla. [2]

### 1.2.2 Časování vstřiku

U dieselového motoru je nutné kompenzovat časovou prodlevu vstřiku dávky. Vstřik dávky trvá stejnou dobu nehlédě na otáčky motoru. Tlaková vlna vytvořená čerpadlem se šíří rychlostí zvuku (1500 m/s), avšak se zvyšujícími se otáčkami je čas pro vstřik menší.

Pokud by nebyl kompenzován, byla by dávka ve vyšších otáčkách vstřikována později a docházelo by nedokonalému spalování. [2]

Ke kompenzaci slouží zařízení pro korekci předvstříku čerpadla, které mění čas počátku vstříku dávky v závislosti na poloze klikového hřídele. Na *obr.3* je znázorněn průběh tlaků ve spalovacím prostoru s vyznačenými body. FB znázorňuje začátek dodávky, SB začátek vstříku dávky a VB začátek expanze. Čas mezi body FB a SB je značen jako SV a jedná se čas nutný k vytvoření vstřikovacího tlaku v čerpadle. ZV poté značí čas mezi body SB a VB, tedy čas nutný ke smíšení atomizované dávky se vzduchem ve válci a následnému samovznícení této směsi. Bod SE krátce za horní úvratí (TDC) poté značí konec vstříku a krátce poté následuje konec expanze (SE). [2]

### Konstrukce zařízení pro časování vstříku

Skládá se z hydraulického pístku, na který z jedné působí pružina a z druhé vnitřní tlak paliva, regulovaný ventilem proporcionálně k otáčkám motoru. Lineární pohyb toho pístku se poté přenáší skrze spojovací kolík na unašeč vačkového kola, kterým otáčí o určitý úhel a tím řídí změnu počátku vstříku. [2]

Z konstrukce tohoto zařízení vyplývá, že do regulace počátku vstříku nelze vstupovat a řídit ho. Lze však alespoň nastavit základní pozici čerpadla v držáku na motoru tak, aby výsledná proporcionální korekce byla uspokojivá. Taktéž je důležité se ujistit, že je regulační ventil vnitřního tlaku funkční, jelikož na něm závisí funkčnost celého systému.

### 1.2.3 Mechanismus pro kompenzaci plnicího tlaku

Jedná se o přídatné zařízení čerpadla, které kompenzuje maximální dávku paliva v závislosti na plnicím tlaku v sacím potrubí motoru. Respektive snižuje maximální dávku paliva, pokud není v sacím potrubí tlak z turbodmyhadla. [2]

Curve of a working stroke at full load and at low speed (not drawn to scale).

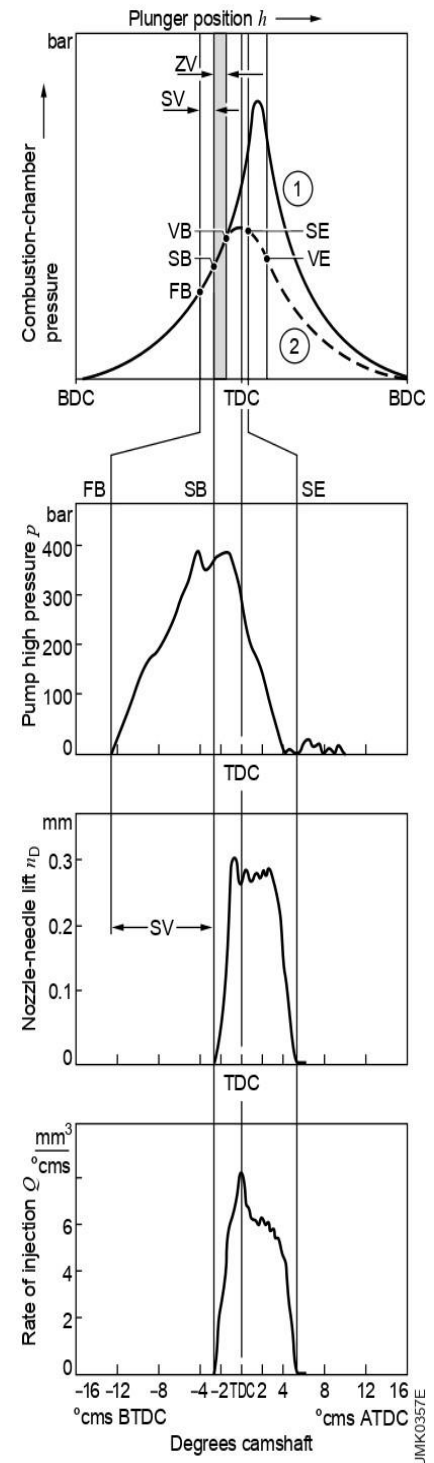
FB Start of delivery, SB Start of injection, SV Injection lag, VB Start of combustion, ZV Ignition lag, SE End of injection, VE End of combustion.

① Combustion pressure,

② Compression pressure,

UT BDC,

OT TDC.

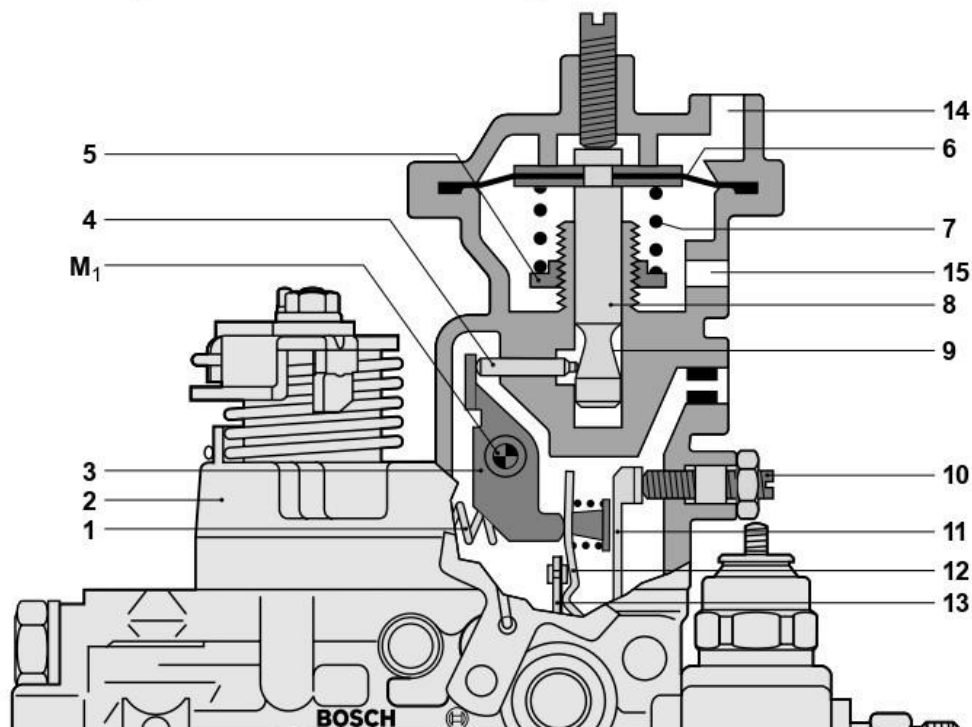


Obr. 3 Průběhy tlaků [2]



### Distributor injection pump with manifold-pressure compensator (LDA)

1 Governor spring, 2 Governor cover, 3 Reverse lever, 4 Guide pin, 5 Adjusting nut, 6 Diaphragm, 7 Compression spring, 8 Sliding pin, 9 Control cone, 10 Full-load adjusting screw, 11 Adjusting lever, 12 Tensioning lever, 13 Starting lever, 14 Connection for the charge-air, 15 Vent bore.  
M<sub>1</sub> pivot for 3.



Obr. 4 Řez kompenzačním mechanismem [1]

Konstrukčně se skládá z membrány (6), pružiny (7), posuvného (8) a vodícího čepu (4). Posuvný čep má v dolní části kuželovitý tvar, na který doléhá vodící čep. Na vrchní část membrány je přiveden plnicí tlak, který přetlačuje pružinu. Ta je nastavitelná pomocí stavitelné matice (5). V základní poloze je posuvný čep pružinou tlačěn směrem vzhůru a vodící čep se opírá o nejtlustší část kuželovitého výbrusu. Tím je tlačěn na ovládací páku (3), která působí na hlavní přepákování čerpadla (11,12,13) a omezuje maximální dávku paliva. Jakmile plnicí tlak převyší sílu pružiny je posuvný čep zatlačen směrem dolů. Vodící čep nyní doléhá na nejtenčí část kuželovitého výbrusu a ovládací páka umožní zvýšení dávky paliva. [2]

Pro optimální funkčnost a zvýšení výkonu s výkonnějším turbodmychadlem by bylo nutné upravit maximální dávku vstřikovaného paliva pomocí nastavovacího šroubu. To nelze učinit bez znalosti vnitřní konstrukce čerpadla. Pokud bychom zvyšovali plnicí tlak bylo by potřeba upravit nastavení kompenzačního mechanismu, který je nastavený zhruba na hodnotu 0,8 bar plnicího tlaku. Toho též nelze dosáhnout bez znalosti konstrukce a principu činnosti tohoto mechanismu. Jak už jsem ale dříve zmiňoval bez nastavovací stolice by takovéto zásahy do čerpadla vedly k úspěšnému nastavení pouze metodou pokus/omyl. Např. při nastavování maximální dávky bychom se řídili kouřivostí a upravovali nastavení, dokud by nebyla v přijatelných mezích. V extrémních případech by však takové zásahy mohly vést k poškození, či zničení čerpadla i motoru.

### 1.3 Elektronické řízení vstřikovacích čerpadel , Bosch EDC

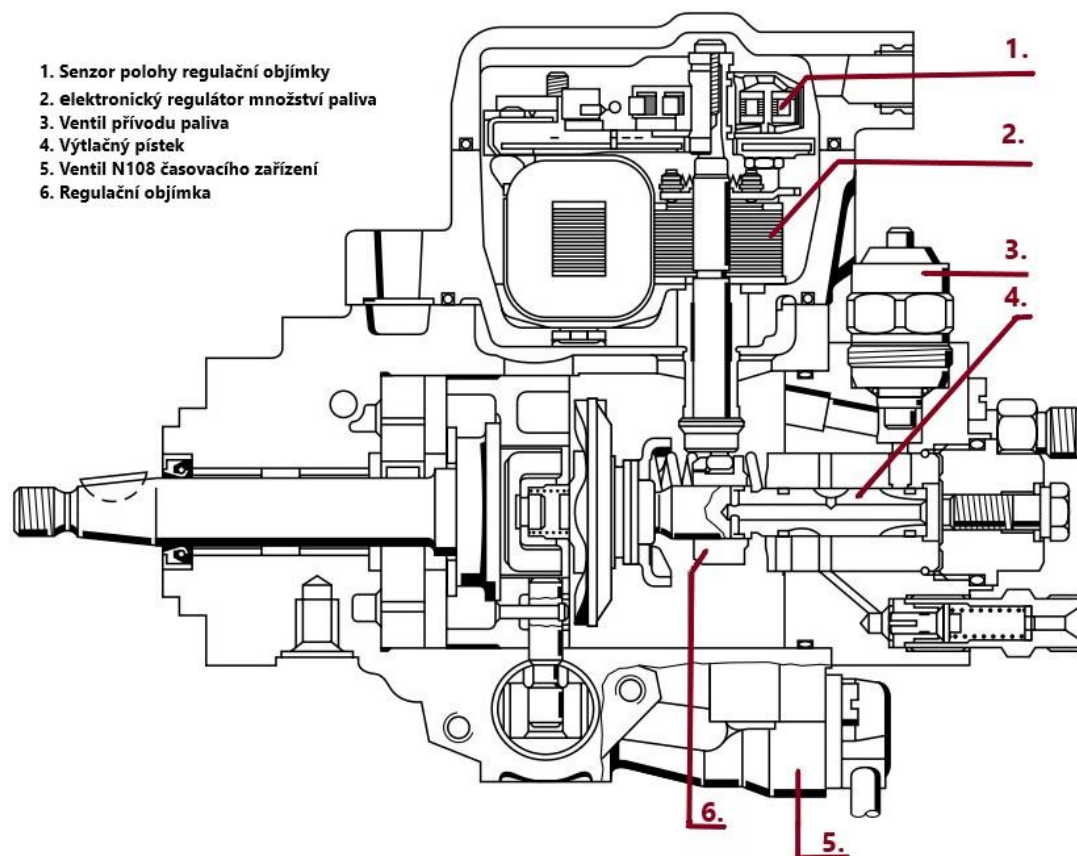
S rozvojem v oblasti mikroprocesorového řízení došlo postupně k nahrazení zastaralých mechanicky řízených čerpadel za čerpadla elektronicky řízená. To přináší řadu výhod, s příchodem senzorů MAP a MAF lze velice přesně určit potřebné množství paliva. I časování dodávky paliva lze pomocí elektroniky řídit mnohem přesněji. To vše spolu s přímým vstřikováním vede ke zlepšení účinnosti, snížení emisí a optimalizaci výkonu motoru.

V této kapitole se tedy budu věnovat konstrukčním rozdílům mezi čerpadly VE a VP .

#### 1.3.1 Bosch VP

Rotační čerpadla Bosch VP 29/30 a 37 můžeme považovat za evoluci mechanického čerpadla Bosch VE. Jedná se o elektronicky řízená čerpadla s axiálním pístkem. Podávací, vysokotlaká a rozvodná jednotka jsou shodné s čerpadlem Bosch VE popsaným v předchozí kapitole, avšak mechanické ovládací prvky jsou nahrazeny elektronickými, které jsou řízené pomocí řídicí jednotky. Pro řízení množství dodávaného paliva je místo pákového mechanismu, který byl použit v případě čerpadla Bosch VE, využitý elektronický regulátor. Je integrován do horní části čerpadla a pohybuje regulační objímkou na výtlačném pístku. Tím určuje množství paliva vstřikované do válců, pohyb objímky je realizován excentrickým čepem, Jeho pohyb je řízen řídicí jednotkou pomocí PWM signálu na základě dat přijímaných ze senzorů. [2] [3]

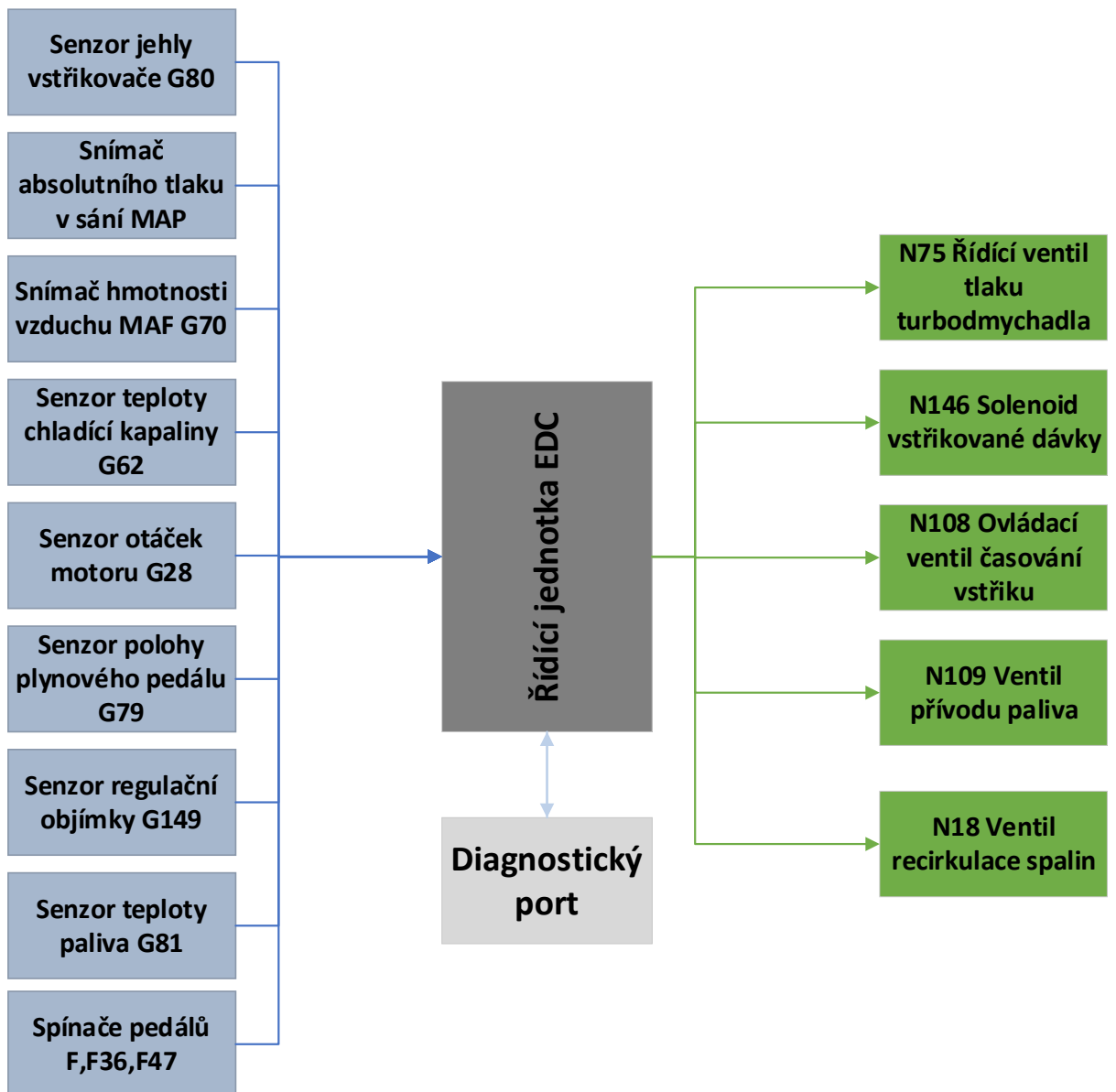
Časovací zařízení je konstrukčně velmi podobné jako u čerpadla VE. Je však doplněno o elektromagnetický ventil N 108, který moduluje sílu působící na pístek pomocí otevírání a zavírání odtokového kanálku, který odvádí část paliva před podávací čerpadlo. [3]



Obr. 5 Řez čerpadlem VP 37 [3]

### 1.3.2 Architektura řídicího systému Bosch EDC

Navrhovaný systém je do značné míry inspirován již používaným systémem pro řízení vstřikování paliva. Příkladem je systém EDC. Pro své vlastnosti se v návrhu svého řešení inspirovali některými bloky systému EDC. Tento systém využívá řadu senzorů pro řízení dodávky paliva, regulaci plnicího tlaku a řízení emisních zařízení (EGR ventil). Tyto senzory vyhodnocují stav motoru a dalších součástí. Výstup ze snímačů je analogový signál, který je přiveden do řídicí jednotky, kde je převeden na digitální a následně je vyhodnocen. Architektura systému je zobrazena na obr.6. [3]



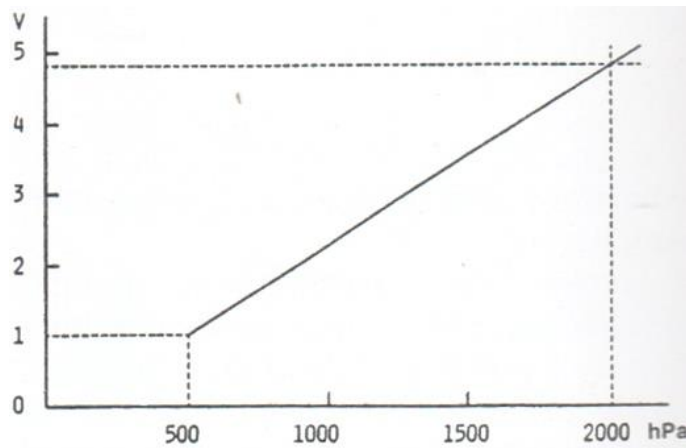
Obr. 6 Architektura řídicího systému EDC

Pro moji aplikaci je stěžejní měření plnicího tlaku v sacím potrubí. Dále je důležitá poloha plynového pedálu, respektive poloha akcelerační páky čerpadla. Senzory, které využívám ve své práci a senzory systému EDC fungují na stejném principu. Proto se jim budu krátce věnovat.

### **Snímač plnicího tlaku (MAP)**

Tento snímač měří absolutní hodnotu tlaku v sacím potrubí za turbodmychadlem. Je tvořen membránou s piezoresistivními odpory zapojenými do můstku. Jejich měrná vodivost se mění spolu s mechanickou deformací. Vychýlení membrány způsobí změnu napětí na můstku, toto napětí pak odpovídá hodnotě tlaku. Je však velmi malé, a proto je vyhodnocovacím obvodem zesíleno. [3]

Tento snímač využiji jako hlavní zpětnou vazbu pro řídicí jednotku. Bude doplněn o snímač atmosférického tlaku pro zjištění skutečné hodnoty plnicího tlaku v systému.



**Obr. 41 Charakteristika snímače plnicího tlaku.**

*Obr. 7 Charakteristika MAP senzoru [3]*

### **Snímač otáček klikového hřídele**

Slouží pro určení polohy klikového hřídele a určení otáček motoru. Skládá se z permanentního magnetu a železného jádra s vinutím. Na setrvačnicku jsou umístěny výřezy, když výřez prochází před snímačem, dojde ke změně magnetického toku a indukci střídavého napětí ve vinutí. [3] Při konstrukci experimentální jednotky využiji tento snímač pro zjištění otáček motoru.

### **Snímač polohy plynového pedálu**

Jedná se o kombinaci potenciometru se dvěma spínači. Je spojen s plynovým pedálem a pomocí měnicího se odporu určuje jeho polohu. Jeden spínač je volnoběžný, sepnutý v základní poloze snímače. Druhý spínač je tzv. kickdown, který se sepne při maximálním vychýlení a u vozidel s automatickou převodovkou slouží jako signál k podřazení. [3]

Tento snímač využiji i ve své práci, avšak spínače zůstanou prozatím nevyužité. Kickdown spínač by však bylo možné použít např. pro krátký „overboost“, kdy by jednotka při plném sešlápnutí plynu krátce zvýšila hodnotu maximálního plnicího tlaku nad standardní hodnotu.

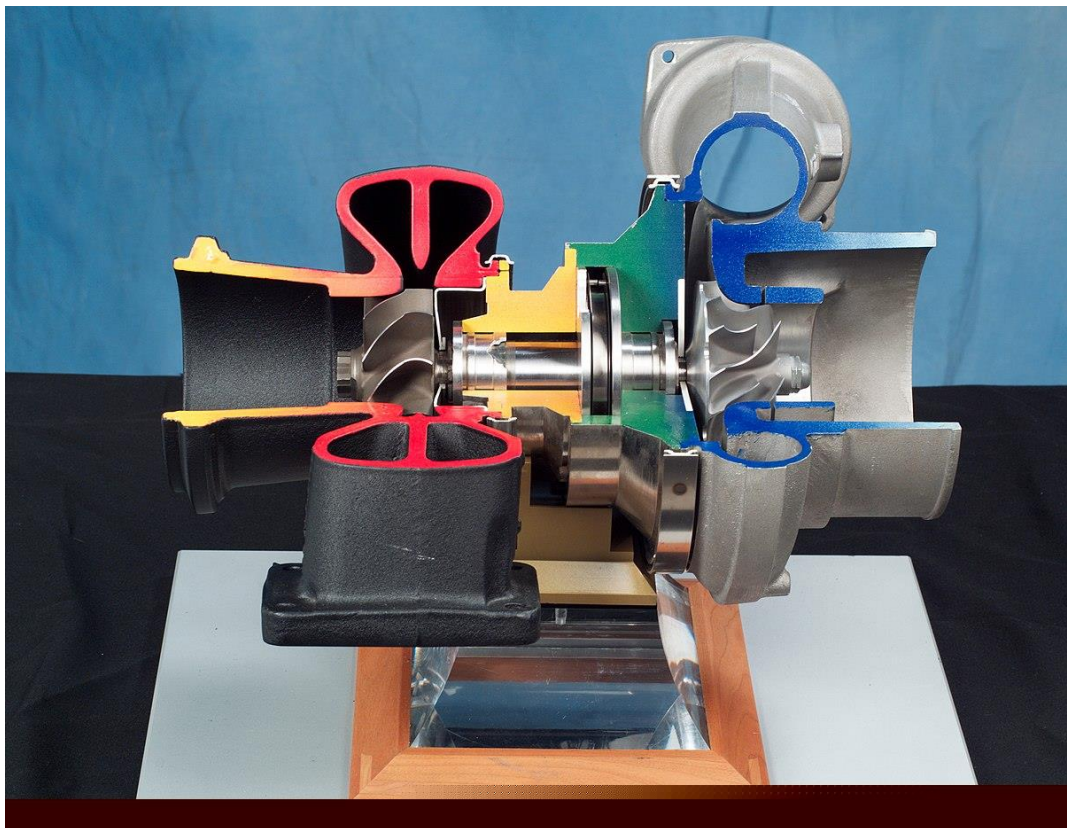
## 2.0 Přeplňování spalovacích motorů turbodmychadly

Výkon motoru je přímo úměrný množství vzduchu, které je k dispozici ve spalovacím prostoru. Účelem přeplňování je zvýšit toto množství a umožnit i následné zvětšení dávky paliva pro zvýšení výkonu a točivého momentu. Přeplňování umožňuje velké zvýšení výkonu s relativně malým zvýšením spotřeby v porovnání se stejným nepřeplňovaným motorem. Například vznětový motor typu XUD se vyrábí v přeplňované, tak i nepřeplňované verzi. V nepřeplňované provedení motor XUD9 produkuje 48 kW. Po přidání turbodmychadla u verze XUD9/SD se výkon zvedl na 55 kW. A po přidání mezichladiče stlačeného vzduchu u verze XUD9/TE se výkon navýšil na 66 kW. To znamená, navýšení výkonu téměř o 40 % po přidání turbodmychadla s mezichladičem. [4]

Cílem této kapitoly je popsat konstrukci turbodmychadel, principy jejich funkce, základní charakteristiky a druhy regulace plnicího tlaku.

### 2.1 Princip činnosti turbodmychadla

Turbodmychadlo využívá tepelnou, tlakovou a kinetickou energii výfukových plynů pro roztočení turbíny. Ta pak přes společný hřídel roztáčí dmychadlo, které stlačuje vzduch proudící do motoru. Takto stlačený vzduch se silně zahřívá, a proto je nutné ho ochladit pomocí mezichladiče. Tento stlačený a ochlazený vzduch má vyšší hustotu, což umožňuje zvýšení vstříkované dávky paliva a tím i navýšení točivého momentu. Toto zvýšení výkonu znamená i vyšší spalovací tlaky, a tím i vyšší zátěž na klikový mechanismus. Je proto potřebné jeho zesílení. Zejména pak ojnic a klikového hřídele. Tyto součásti zpravidla bývají na přeplňovaných motorech kalené pro vyšší odolnost. [1] [5]



Obr. 8 Řez turbodmychadlem, turbínová a kompresorová část [6]

## 2.2 Konstrukce turbodmychadel

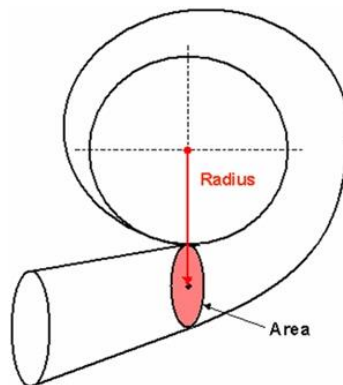
Samotné turbodmychadlo se konstrukčně skládá ze 3 základních částí. Turbínové a kompresorové skříně a ložiskového středu. V ložiskovém středu je uložen hřídel, zpravidla v kluzných ložiskách mazaných z mazacího okruhu motoru. Na koncích hřídele jsou umístěna samotná oběžná kola turbíny a kompresoru. [1] [5] Mnou použité turbodmychadlo je vybaveno kluznými ložisky a zároveň je vybaveno i vodním chlazením středu.

### Oběžná kola

Turbínové oběžné kolo je vyrobeno z žáruvzdorného materiálu, většinou niklové oceli. Je vystaveno vysokým teplotám (cca 600 °C u dieselových motorů), kompresorové kolo je vyrobeno ze slitin hliníku. Turbodmychadla dosahují velmi vysokých otáček v rozsahu 50 000 – 160 000 ot/min, což klade vysoké nároky na jejich vyváženost. [1] [5]

### Statory

Oběžná kola jsou uzavřena do statorů, turbínová část je vyrobena z litiny kvůli teplotnímu namáhání. Kompresorová část je ze slitin hliníku. Hlavní parametru určující vlastnosti u statorů je tzv. A/R poměr. Area (plocha)/ Radius (poloměr). Největší vliv má u turbíny, kde určuje průběh točivého momentu. Čím menší je A/R tím rychlejší bude proudění výfukových plynů, to znamená lepší odezvu v nižších otáčkách, ale zároveň vyšší protitlak a tím i menší výkon ve vysokých otáčkách [5]



Obr. 9 A/R poměr [5]

## 2.3 Regulace turbodmychadel

Regulace turbodmychadel slouží k řízení plnicího tlaku a omezení otáček turbodmychadla. V praxi se nejčastěji využívá regulace na turbínové straně, kde regulujeme buď množství, či rychlost výfukových plynů, které na ni působí. Nejčastěji se používají dvě metody:

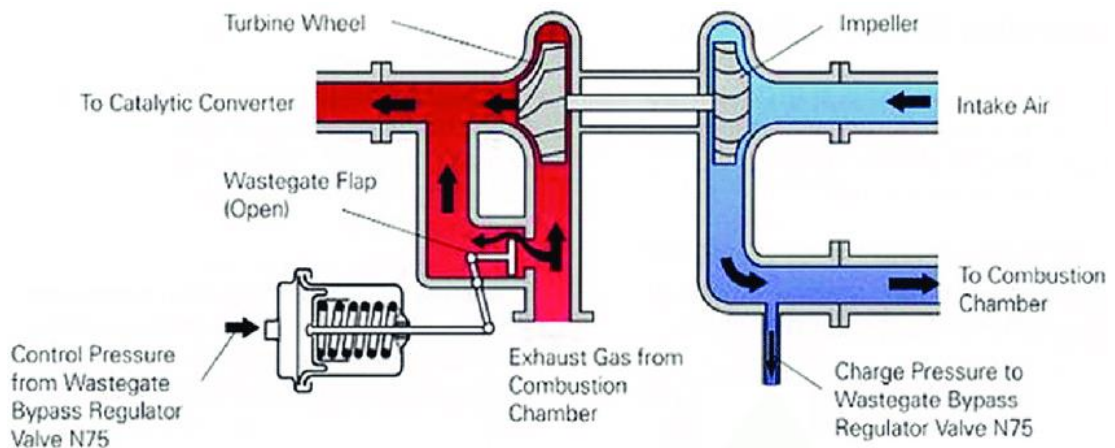
1. Regulace pomocí obtokového ventilu (wastegate)
2. Regulace pomocí variabilní geometrie lopatek turbíny (VNT)

### 2.3.1 Regulace pomocí obtokového ventilu

Regulace pomocí obtokového ventilu, využívá obtokový kanál, který odkloní část výfukových plynů zpřed turbíny do výfuku omezí tak množství plynů, které na ni působí a tím i její rychlost, aby nedocházelo k dalšímu zvýšení otáček a růstu plnicího tlaku. Tato regulace je v nejčastěji

řízena pomocí přetlaku, kdy tlak z kompresorové části přetlačuje pružinu v aktuátoru a při daném tlaku ji plně přetlačí a otevře obtokový ventil. [1] [5]

Jedná se o velmi jednoduchou formu regulace, která sice nepotřebuje žádnou elektroniku, ale není velmi hospodárná, jelikož se obtokový ventil začíná v praxi otevírat už při nižším tlaku a tím snižuje efektivitu turbodmyhadla. Pokud je vozidlo vybavenou řídicí jednotkou, lze mezi aktuátor a kompresor umístit elektromagnetický ventil, který pomocí signálu PWM reguluje, kolik tlaku se dostane do samotného aktuátoru. Tím dosáhneme toho, že se obtokový ventil neotevře předčasně. Výhodou této regulace je její jednoduchost a tím i spolehlivost.

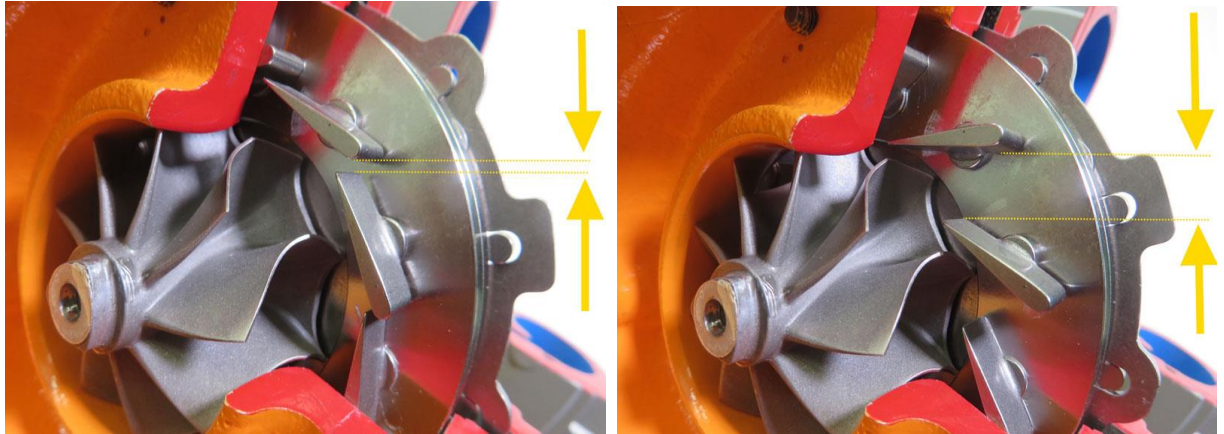


Obr. 10 Schéma turbodmyhadla s wastegate regulací [5]

### 2.3.2 Regulace pomocí variabilní geometrie lopatek turbíny

Tato regulace využívá principu kontinuity toku tekutin a plynů, který říká, že konstantní objem plynů proudí potrubím tím rychleji, čím menší je jeho průřez. Turbinou tedy prochází veškeré množství výfukových plynů a regulujeme jejich rychlost a tím i sílu, kterou působí na turbínu. Při nízkých otáčkách motoru, kdy do turbodmyhadla neproudí dostatečné množství výfukových plynů se lopatky uzavřou, čímž se zmenší prostor pro výfukové plyny. Zvýší se tlak ve výfukovém potrubí a rychlost plynů, které roztáčíjí turbínu, čímž dosáhneme požadovaný tlak i v nižších otáčkách. Spolu s otáčkami motoru roste i objem výfukových plynů a ve vysokých otáčkách je tedy nutné lopatky otevřít, jinak by došlo k překročení požadovaného plnicího tlaku a poškození turbodmyhadla vlivem vysokých otáček. Průřez potrubí se tedy zvětší a dojde ke snížení rychlosti plynů a zpomalení turbíny. Nastavovací lopatky jsou ovládány pomocí rotačního kroužku, který přenáší pohyb aktuátoru na jednotlivé lopatky. Tento aktuátor bývá zpravidla u starších vozidel podtlakový a u novějších elektronický. [1] [5]

Mnou použité turbodmyhadlo využívá této regulace a pro ovládání lopatek využívá elektronický aktuátor. Nevýhodou této regulace je její vyšší složitost, regulační lopatky jsou teplotně namáhány a postupem času se opotřebí, či zanesou karbonovými usazeninami. Dodal bych, že nefunkční regulace je relativně častou závadou na starších motorech s vyšším nájezdem kilometrů.



Obr. 12 Lopatky v pozici pro nízký průtok plynů [7]      Obr. 11 Lopatky v pozici pro vysoký průtok plynů [7]

### **Pneumatický aktuátor**

Funguje na principu pružiny, která je přetlačována podtlakovou silou, jako zdroj podtlaku využíváme podtlakové čerpadlo, které je potřebné pro posilovač brzd. Pro nastavení potřebné pozice je použit elektromagnetický ventil regulující potřebné množství podtlaku. [1] [5]

Nevýhodou je potřeba vyššího množství podtlakových hadic, které mohou časem degradovat a způsobovat netěsnosti v systému a jeho poruchy.

### **Elektronický aktuátor**

U novějších vozidel je zpravidla implementován elektronický aktuátor, jedná se o zařízení, které na základě příkazů ze řídicí jednotky ovládá pozici lopatek turbodmychadla. Je ovládán pomocí PWM signálu, nebo příkazů z CAN sběrnice. [1] [5]

Zřejmě nejrozšířenějším aktuátorem tohoto typu je aktuátor od výrobce HELLA, který se nachází se i na mnou použitým turbodmychadle. Umožňuje precizní nastavení polohy lopatek pomocí PWM signálu, či CAN sběrnici. [7] Jeho velkou výhodou je absence jakýchkoliv podtlakových hadic v motorovém prostoru.

## **2.4 Charakteristiky**

Pro výběr správného turbodmychadla pro specifickou aplikaci je nutné znát jeho charakteristiky. Ty jsou měřeny výrobcem na speciálních zařízeních, ze změřených dat poté vznikají kompresorové a turbínové mapy

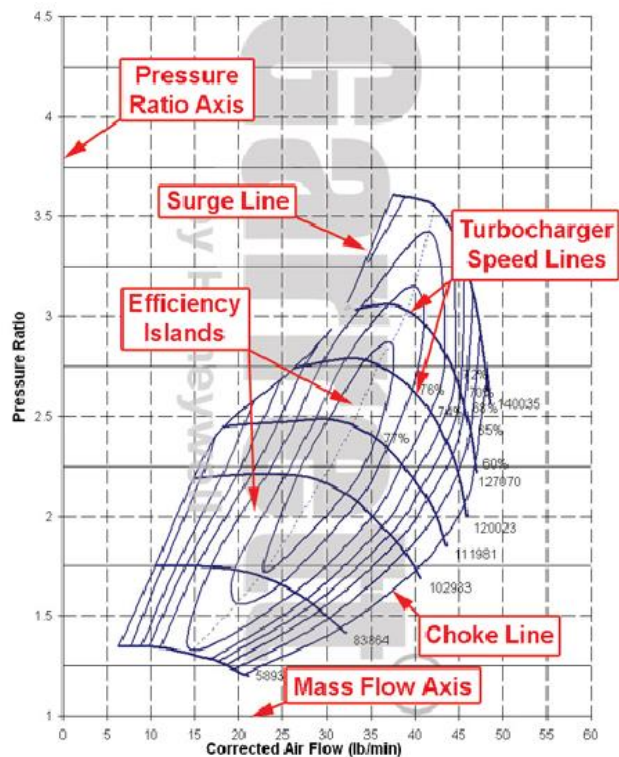
### **2.4.1 Kompresorová mapa**

Popisuje závislost tlakového spádu (pressure ratio) na korigovaném hmotnostním toku (corrected mass flow). Tlakový spád je podíl absolutního tlaku za kompresorem ku tlaku před ním. Hmotnostní tok je množství vzduchu, které proudí kompresorem. [5]

Graf se skládá z ostrovů efektivity (efficiency islands), které jsou označeny procenty. Čím vyšší jsou tato procenta, tím efektivněji kompresor pracuje a méně zahřívá stlačovaný vzduch. V grafu jsou vyznačeny rychlostní křivky (Speed lines), značící počet otáček turbodmychadla. Graf je ohraničen dvěma křivkami, za kterými je provoz turbodmychadla nebezpečný. Zleva je tzv. surge line, v této části grafu se kompresor ocitne, pokud stlačuje vyšší množství vzduchu, než je motor schopný pojmout. Dojde vytlačování přebytečné části vzduchu zpět přes lopatky



kompresoru. Tím je zpomalován, což vytváří velké rázy přenášející se na ložiska. Razantně se tím zkracuje jejich životnost. Druhou křivkou je tzv. Choke line, kde se turbodmychadlo blíží svému limitu, účinnost kompresoru klesá a stlačovaný vzduch se poté nadměrně zahřívá. [5]

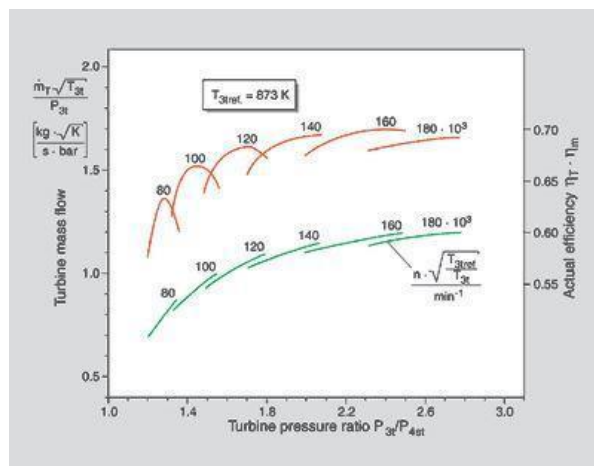


Obr. 13 Kompresorová mapa Garrett [5]

V praxi se kompresorová mapa používá pro zhodnocení vhodnosti turbodmychadla pro danou aplikaci. V praktické části práce do grafu pomocí výpočtu zanesu předpokládanou křivku plnicího tlaku.

### 2.4.2 Turbínová mapa

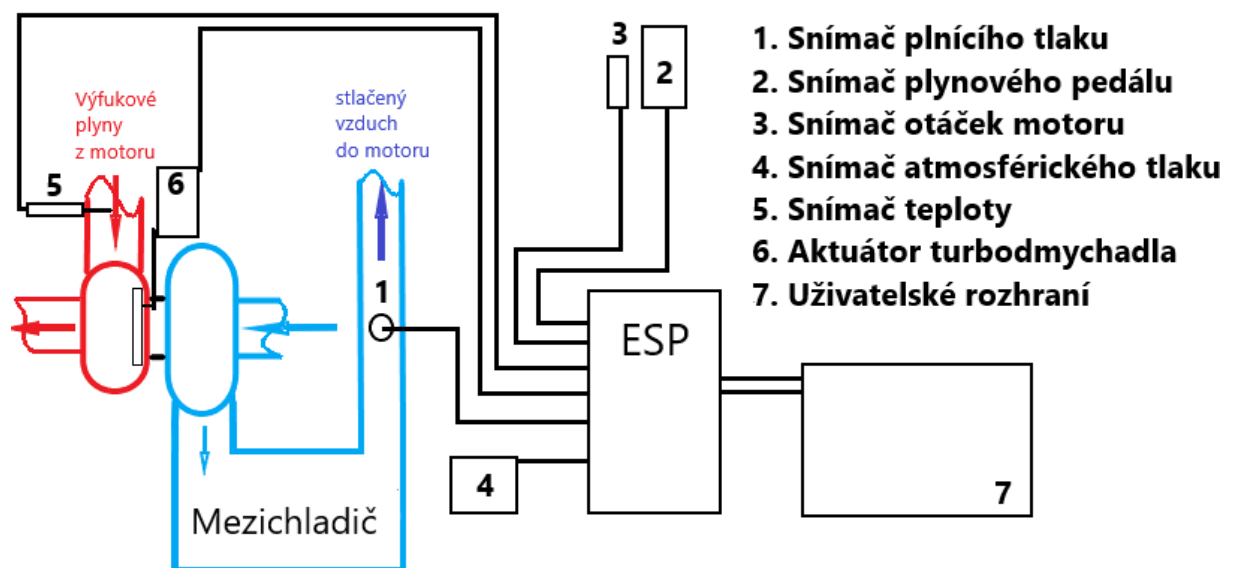
Jedná se o graf charakteristiky turbíny, konkrétně závislosti hmotnostního toku na tlakovém spádu. Křivka je složena ze segmentů jednotlivých účinností při různých konstantních rychlostech turbodmychadla. [5]



Obr. 14 Turbínová mapa Borg-Warner [5]

### 3.0 Praktická Část

Cílem praktické části práce je vytvoření experimentální řídicí jednotky, která bude schopna regulovat plnicí tlak turbodmychadla pomocí instalovaného aktuátoru, a to v závislosti na vstupních datech z instalovaných senzorů. Tyto data budou zobrazeny pomocí uživatelského rozhraní, kde bude také možné navolit a uložit požadovaný plnicí tlak. Pro konstrukci byly použity již hotové senzory z důvodu dobré kompatibility s mikrokontrolerem. Tato část práce taktéž obsahuje popis architektury navrhovaného řešení, jakožto i popis výběru vhodného turbodmychadla pro spalovací motor pomocí výpočtu.



Obr. 15 Architektura navrhovaného řešení

Architektura řídicího systému je do značné míry inspirována řídicí jednotkou Bosch EDC, ale neobsahuje část pro řízení dávkování paliva. Na obr.15 je zobrazeno přehledové schéma systému.

#### 3.1. Výpočet parametrů turbodmychadla

Jako základ tohoto projektu byl použit vznětový spalovací motor s nepřímým vstřikováním. Jedná se o motor typového označení XUD7/TE francouzské výroby. Motory XUD byly v 80. a 90. letech hojně používány v mnoha osobních automobilech značek Peugeot, Citroen, ale i Fiat.

Byly vyráběny ve třech zdvihových objemech, a to: XUD7 se zdvihovým objemem  $1769 \text{ cm}^3$  (vrtání 80 mm, zdvih 88 mm). XUD9 se zdvihovým objemem  $1905 \text{ cm}^3$  (vrtání 83 mm, zdvih 88 mm) a XUD11, který byl vyráběn ve dvou zdvihových objemech,  $2138 \text{ cm}^3$  (vrtání 86 mm, zdvih 92 mm) pro nepřepřehňované veze motoru a  $2088 \text{ cm}^3$  (vrtání 85 mm, zdvih 92 mm) pro přepřehňované verze. Typ XUD7/TE označuje verzi s turbodmychadlem a mezichladičem stlačeného vzduchu. Uváděný tovární výkon je 66 kW a 180 N.m. [4]



*Obr. 16 Motor XUD7/TE umístěný na testovacím stojanu*

Prvním krokem je výměna továrního turbodmychadla s regulací pomocí obtokového ventilu za turbodmychadlo s VNT regulací. Pro dosažení, co nejlepších výsledků je nutné vybrat turbodmychadlo vhodné velikosti vzhledem ke specifikacím motoru.

Pro jeho výběr jsem použil data z kompresorové mapy od výrobce turbodmychadla, v mém případě se jedná o značku Garrett. Vzhledem k limitovaným podmínkám tohoto projektu použiji pro zjištění některých potřebných hodnot odhadující výpočet. Pro jeho provedení potřebujeme vědět následující údaje: zdvihový objem motoru, otáčky motoru, absolutní teplotu, absolutní tlak a objemový průtok. Data uváděné v kompresorové mapě jsou v imperiálních jednotkách, proto v nich provádím i následující výpočty.

Objemový průtok vypočteme podle následujícího vzorce:

$$EVF = \left( \frac{Vm}{1728} \right) * \left( \frac{RPM}{2} \right)$$

Rovnice 3.1 [8]

, kde

EVF – objemový průtok [CFM ]

Vm – zdvihový objem [CUI]

RPM – otáčky motoru [ot./min]

Tuto hodnotu nyní převedeme na hmotnostní tok pomocí následujícího vzorce:

$$N = \frac{P * EVF * 29}{10.73 * T}$$

Rovnice 3.2 [8]

, kde

N – hmotnostní tok v librách za minutu [lb/min]

P – absolutní tlak v sacím potrubí [psi]

T – absolutní teplota [°R]

Absolutní tlak získáme součtem plnicího a atmosférického tlaku. Pro zjednodušení uvažujme atmosférický tlak přesně 1 bar (14.5 psi).

Teplotu uvažujme 30 °C, převedeno na ° Rankina : 545 °R.

Výslednou hodnotu průtoku N musíme nakonec vynásobit objemovou účinností. Objemová účinnost udává v procentech skutečné množství vzduchu, které proudí do motoru. Jestliže je teoretické maximální množství vzduchu, které proudí do motoru 100 l/min, tak při 90 % objemové účinnosti je reálné množství pouze 90 l/min. Tuto hodnotu můžeme změřit pomocí senzoru MAF. Pro starší motor s dvouventilovou hlavou válců je konzervativní hodnota kolem 85 %. [8]

V tabulce jsou uvedeny hodnoty absolutního tlaku (v jednotkách psi a bar), odhadovaný plnicí tlak při určitých otáčkách, tlakový spád a vypočtené hodnoty EVF a N.

Pro zanesení do grafu musíme znát tlakový spád (pressure ratio), ten vypočítáme následujícím

vzorcem  $P_r = \frac{P_p + P_b}{P_b}$ , kde

Pr – tlakový spád

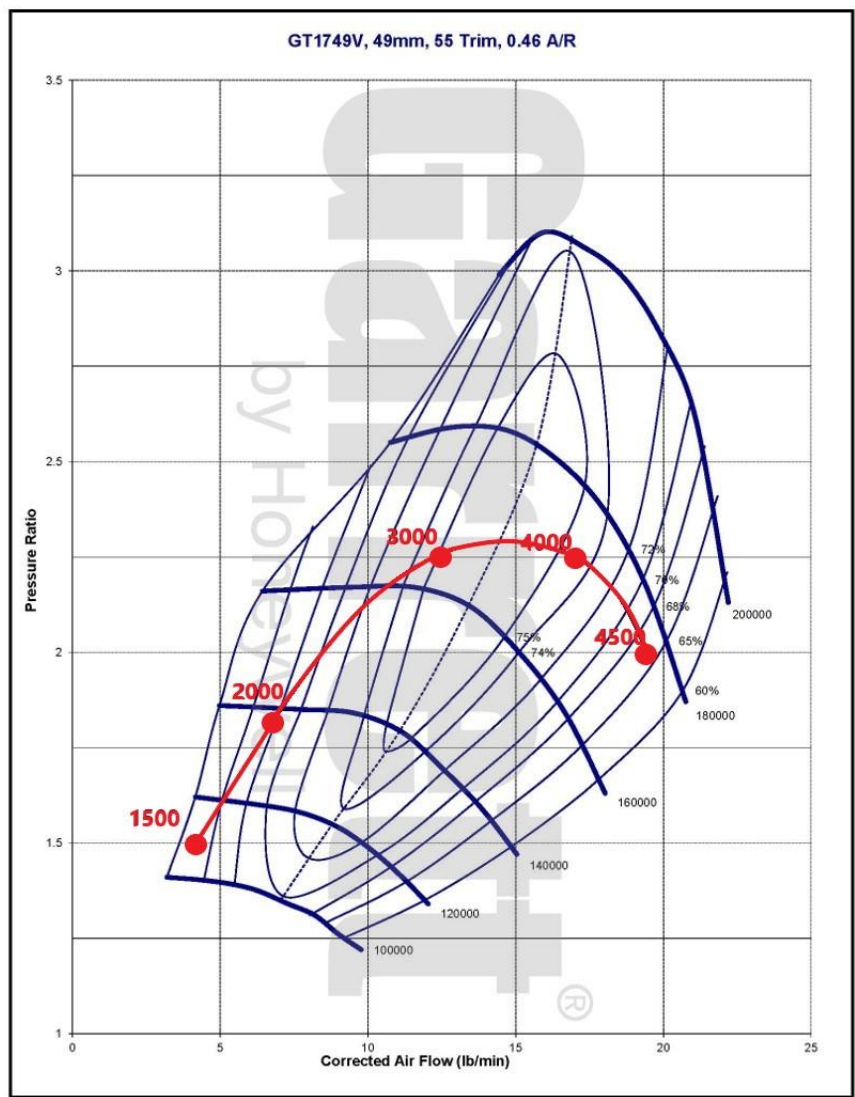
Pp – plnicí tlak (tlak na výstupu kompresoru)

Pb – barometrický tlak (tlak na vstupu kompresoru)

Otáčky motoru [ot/min]	1500	2000	3000	4000	4500
Pabs [psi]	21,7	26,1	32	32	32
Pabs [bar]	1,5	1,8	2,2	2,2	2
Pp[bar]	0,5	0,8	1,2	1,2	1,2
Pr	1,5	1,8	2,2	2,2	2
EVF[cfm]	46,8	62,5	93,75	125	140
N[lb/min]	4,25	6,8	12,85	16,8	18,8

tabulka 1 Tabulka vypočtených hodnot

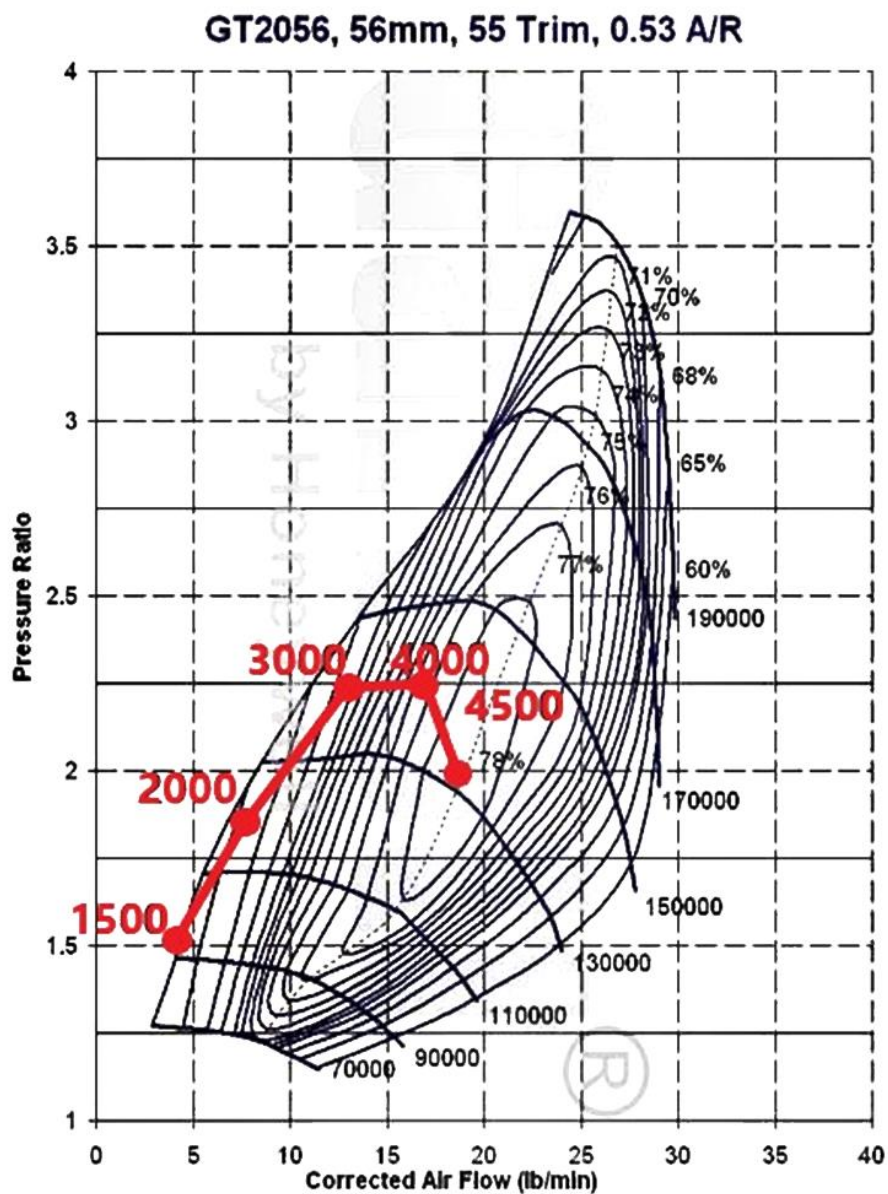
Na obr. 17 je kompresorová mapa turbodmychadla Garrett GT1749 V se zanesenými hodnotami z tabulky 1. Toto turbodmychadlo se svými parametry zdá být ideální. Ve středních otáčkách motoru je turbodmychadlo nejvíce efektivní, nedochází k překročení surge line v nízkých otáčkách, ani k překročení choke line ve vysokých otáčkách.



Obr. 17 Garrett GT1749V, předpokládaný průběh plnicího tlaku

Tyto turbodmychadla nejčastěji pochází z koncernových motorů 1.9 TDi, většina z nich však není vybavena elektronickou regulací.

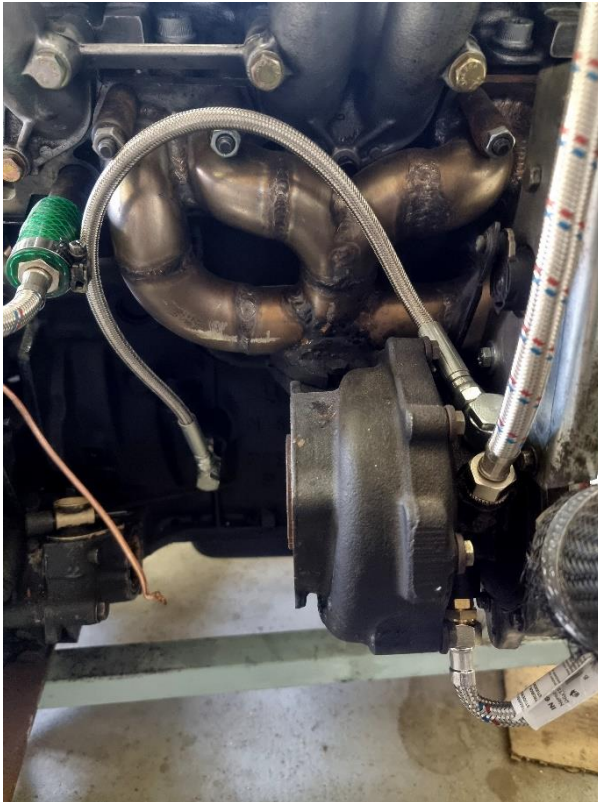
Turbodmychadlo, které jsem použil pro tuto práci je Garrett GT 2056 VL z motoru Volvo 2.4 D, jelikož bylo snadno k dispozici a je osazeno elektronickou regulací. Objektivně se však nejedná o nejlepší volbu. Pokud do kompresorové mapy tohoto turbodmychadla dosadíme hodnoty z *tabulky 1* zjistíme, že v nízkých otáčkách se pohybujeme velmi blízko tzv. surge line a nejefektivnější je až ve vysokých otáčkách motoru. Jedná se tedy o největší turbodmychadlo, které je na tomto motoru ještě použitelné. Při provozu tohoto turbodmychadla v reálných podmínkách bychom se pravděpodobně museli zabývat omezením tlaku v nižších otáčkách, pokud by v nich docházelo k překročení surge line.



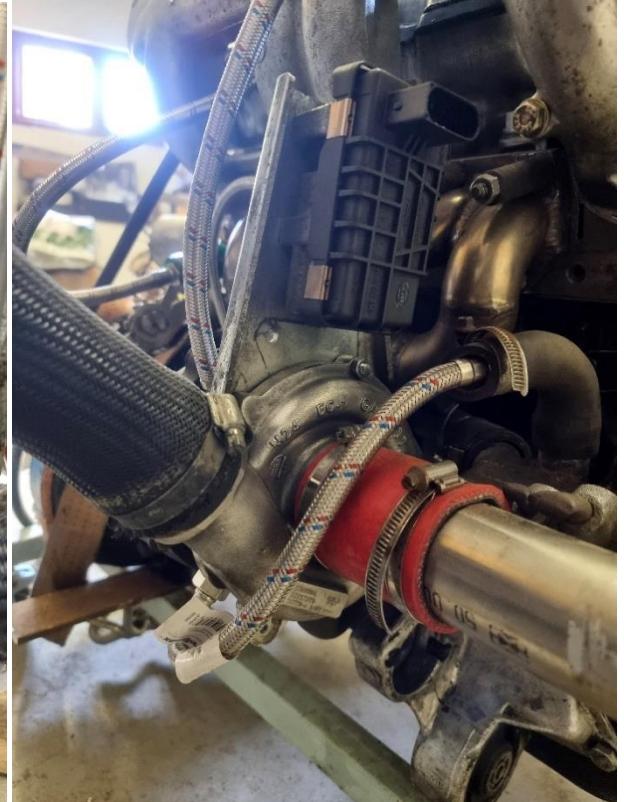
Obr. 18 Garrett GT2056, předpokládaný průběh plnicího tlaku

### 3.2 Instalace turbodmychadla

Turbodmychadlo je k motoru připevněno pomocí výfukových svodů vyrobených z nerezové oceli třídy 1.4301. Mazání je zajištěno pomocí nerezem opletené hadice odolné vůči oleji. Ta přivádí olej z tlakového okruhu mazání motoru k ložiskům turbodmychadla. Olej je poté odváděn zpět do vany motoru. Toto turbodmychadlo je vybaveno i vodním chlazením středových ložisek. Přívod chladicí kapaliny je zajištěn z chladicího okruhu motoru. K turbodmychadlu je kapalina přivedena pomocí teplotně odolných hadic



Obr. 19 Detail výfukových svodů a přívodu oleje



Obr. 20 Detail kompresorové strany s el. Regulací

### 3.3 Elektronická část

Tato kapitola se věnuje architektuře hardwarového řešení, popisuje použité senzory a silové prvky použité pro řízení. Jako základní platformu pro řízení turbodmychadla jsem použil 32.bitovou vývojovou desku s mikrokontrolerem ESP32-WROOM-32.

Jedná se o sérii čipových mikrokontrolerů od výrobce Espressif specificky navržených pro mobilní zařízení, bezdrátovou elektroniku a IoT aplikace. Disponuje jedno, či dvoujádrovým procesorem s frekvencí až 240MHz. Spolu s procesorem je integrována i bezdrátová konektivita pomocí Wi-Fi a Bluetooth v4.2. [9]

#### Vstupní a výstupní periferie

ESP-32 disponuje velkým množstvím vstupně/výstupních periférií mnoha typů, samozřejmě jsou sběrnice I2C a SPI, dále 3 UART kanály a integrovaný 12bitový A/D převodník. [9]

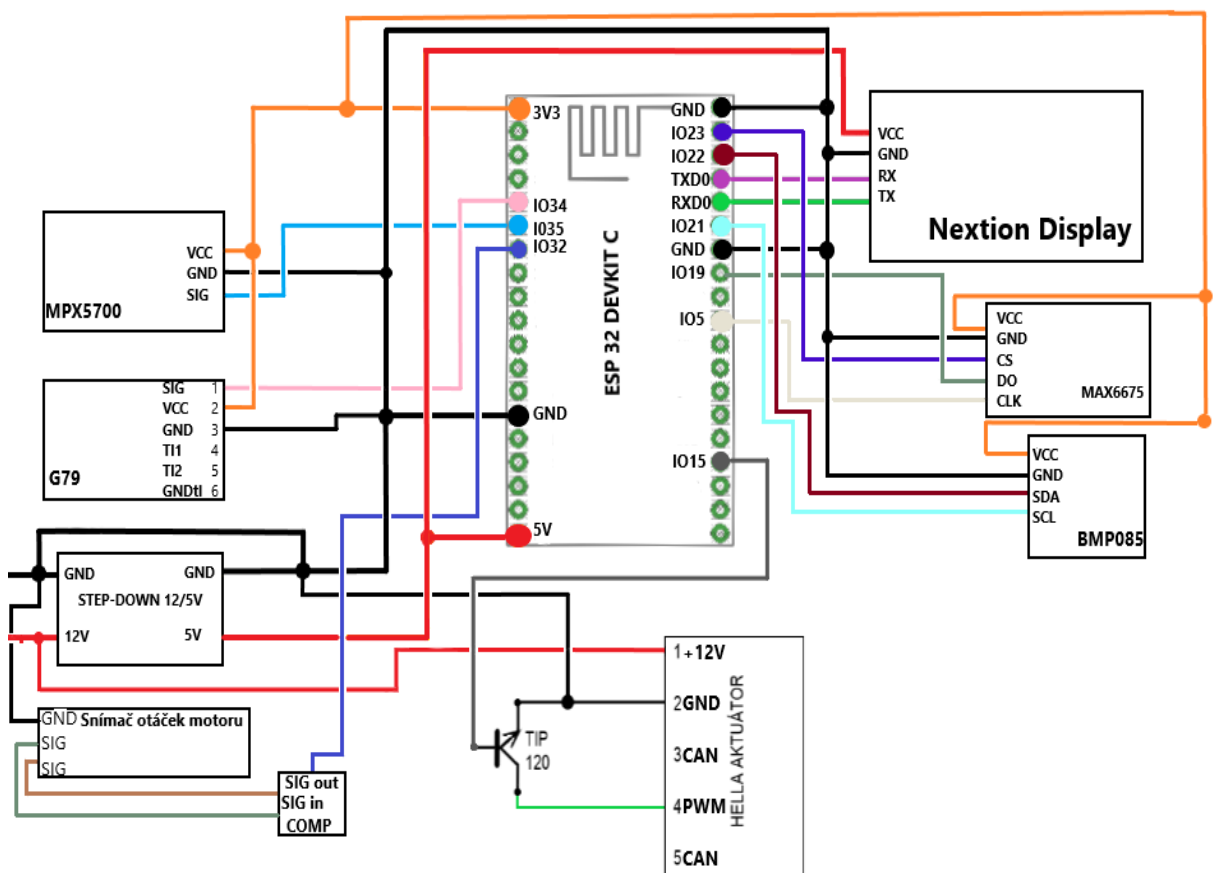
### 3.3.1 Schéma zapojení experimentální řídicí jednotky

Řídicí jednotka se skládá ze čtyř hlavních částí, napájecí, senzorické, výkonové a z uživatelského rozhraní.

Pro napájení je využitý step-down modul, který snižuje napětí automobilového akumulátoru, které se pohybuje v rozmezí 14,3-10 V na stálé napětí 5 V. Toto napětí je přivedeno na vývojovou desku a k zobrazovacímu rozhraní.

Senzorická část se skládá z několika senzorů. Jedná se o již hotové moduly. Výkonová část se skládá z aktuátoru turbodmychadla ovládaného pomocí tranzistoru.

Uživatelské rozhraní zobrazuje hodnoty a komunikuje s uživatelem, skládá se z dotykového displeje Nextion.



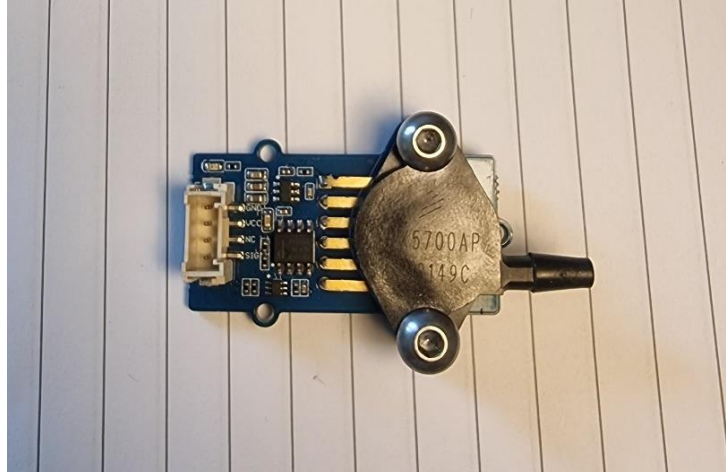
Obr. 21 Podrobné schéma experimentální řídicí jednotky



### 3.3.2 Senzorická část

#### Senzor absolutního tlaku (MAP) MPX5700AP

Slouží k měření absolutního tlaku stlačeného vzduchu v sacím potrubí motoru. Jedná se o analogový snímač s integrovaným zesilovačem, který měří tlak v rozmezí 15-700 kPa



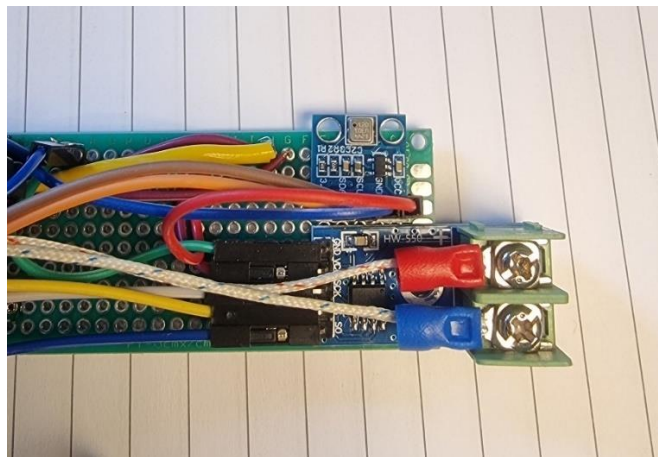
Obr. 22 Snímač MPX5700AP

#### Senzor atmosférického tlaku BMP 085

Tento senzor snímá barometrický tlak a okolní teplotu. V jednotce je využit k získání barometrického tlaku, který slouží k výpočtu relativního plicního tlaku z hodnoty MAP senzoru. Komunikuje přes rozhraní I2C.

#### Snímač teploty MAX 6675

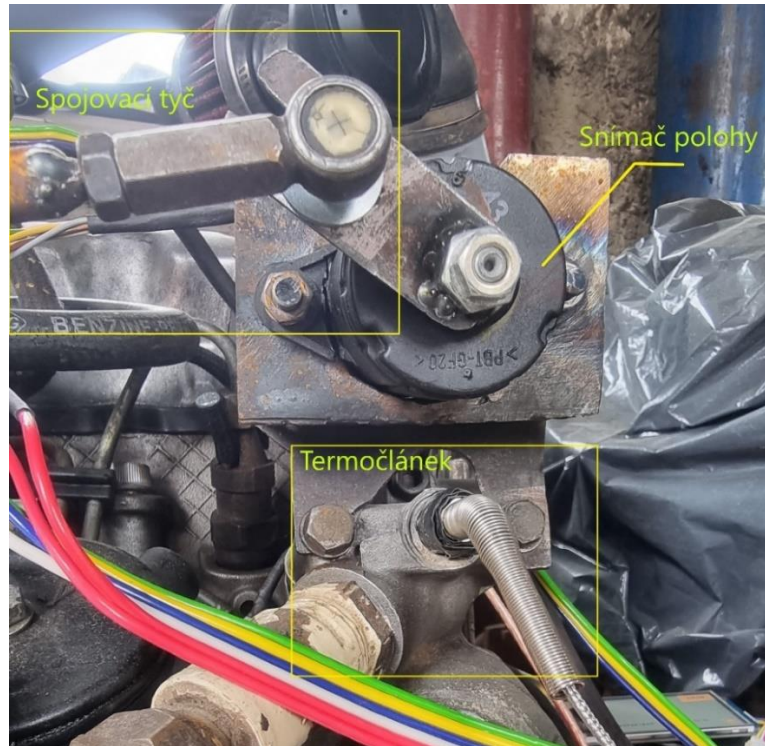
Teplotní snímač není zcela nutný pro funkčnost regulace, ale při běhu motoru je několik teplotních hodnot, které bychom mohli chtít monitorovat. Např. teplota chladicí kapaliny, teplota oleje, či teplota výfukových plynů. Typově se jedná o elektronický převodník pro termočlánek typu K, elektronika je schopna měřit v rozmezí 0–1024 °C s rozlišením 0,25 °C. Při porovnání s termostatem v místnosti měří s přesností cca 2 °C při 20 °C. Využívá komunikační rozhraní SPI. Pokud bychom chtěli měřit více než jednu veličinu, není problém zapojit více snímačů do sběrnice SPI. Umístění měřícího termočlátku je patrné na obr.23



Obr. 23 Snímače BMP085 a MAX6675

## Snímač polohy akcelerační páky čerpadla

Jedná se o originální díl z vozu Škoda Octavia, kde je použitý pro určení polohy pedálu. V mém případě je umístěn v motorovém prostoru a snímá polohu akcelerační páky a tím i přeneseně polohu plynové pedálu. Výsledné hodnoty jsou použité pro výpočet požadovaného tlaku. Je upevněn na přírubě termostatu a spojen s akcelerační pákou čerpadla skrze spojovací tyčku s kulovými čepy. Umístění senzoru je viditelné na *obr. 24*. Z obrázku je patrné i umístění termočláneku pro měření teploty chladicí kapaliny.



*Obr. 24 Detail upevnění snímače na motoru*

## Snímač otáček motoru

Pro snímání otáček motoru je využitý originální indukční snímač umístěný na motoru. Snímá zadní plochu setrvačníku, na které jsou umístěny dva výřezy. To znamená, že za každou otáčku setrvačníku vyjde 2 signální pulsy. Pro vyhodnocení signálu je využitý napěťový komparátor, který upraví výstupní signál tak, aby byl kompatibilní s mikrokontrolerem.



*Obr. 25 Snímač otáček motoru*

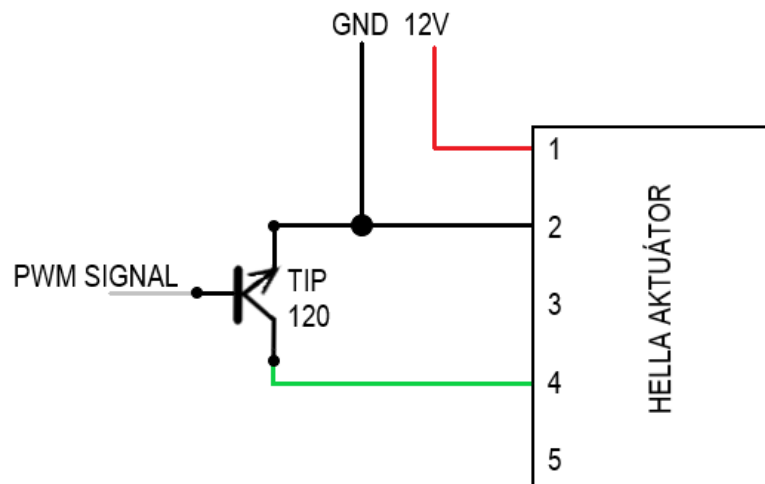
## Vyhodnocovací obvod snímače motoru

Data z indukčního senzoru je potřeba před přivedením do mikrokontroleru upravit převodníkem. Ten převede napěťové pulzy na výstupu snímače na logické stavy 0 a 1 použitelné v mikrokontroleru. K tomu je vhodný napěťový komparátor, který překlápí výstup mezi logickou nulou a jedničkou v závislosti na hodnotách vstupních napětí. Konstrukčně se jedná o zapojení operačního zesilovače, který porovnává napětí na vstupu vůči referenčnímu. Pokud je porovnávané napětí vyšší, než referenční, tak obvod překlápí výstup do logické jedničky. Referenční napětí zvolíme pomocí vhodné kombinace rezistorů v napěťovém děliči. Pro přesné nastavení výstupu umístíme na porovnávaný vstup potenciometr, či trimer s proměnným odporem.

### 3.3.3 Výkonová část

Pro ovládání samotných regulačních lopatek turbodmychadla je použitý elektronický aktuátor HELLA připevněný pomocí příruby na tělo kompresorové skříně, viz. *obr. 20*. Pohyb aktuátoru je na lopatky přenášen pomocí spojovací tyčky viditelné na *obr. 19*.

Aktuátor využívá jako řídicí signál PWM modulaci, potřebné napětí je 12 V a frekvence 300 Hz. PWM signál nastavíme softwarově v mikrokontroleru a přivedeme na bázi tranzistoru, v tomto případě se jedná o tranzistor TIP120. Na kolektor připojíme pin 4 aktuátoru. Na emitor zemníme pin 2. Střídou PWM signálu nyní regulujeme uzemnění pinu č.4, pokud v ESP nastavíme střihu 30 % aktuátor nastaví pozici lopatek do pozice 30 %. Pozici lze regulovat v rozmezí 5-95 %, pokud se dostaneme za tyto meze, dojde k resetování aktuátoru. Na toto nesmíme zapomenout a softwarově omezit rozsah střihy PWM.



*Obr. 26 Schéma zapojení aktuátoru turbodmychadla*

### 3.3.4 Uživatelské rozhraní

Pro zobrazení snímaných a výsledných hodnot jsem použil TFT displej Nextion s rezistivní dotykovou vrstvou. Slouží tak zároveň jako ovládací rozhraní pro zvolení plnicího tlaku. Součástí Displeje Nextion je vlastní mikroprocesor, který řídí zobrazování a dotyky na displeji. S mikrokontrolerem probíhá komunikace po sériové lince UART. Fakt, že je displej samostatně funkčním celkem je velikou výhodou, jelikož ušetříme paměť, kterou bychom jinak museli zabrat v mikrokontroleru pro zobrazování hodnot a řízení dotyků. Také se tím značně zjednoduší samotný kód programu. Displej a grafické rozložení lze v prostředí Nextion editor libovolně upravovat. Samotné vývojové prostředí je velmi intuitivní.

#### Displej Nextion

Displej zobrazuje tři stránky, domovská stránka zobrazuje otáčky motoru, plnicí tlak v jednotkách baru a teplotu ve °C (zde zobrazeno jako teplota chladicí kapaliny). Obsahuje dvě tlačítka, pod kterými jsou přístupné ostatní stránky.



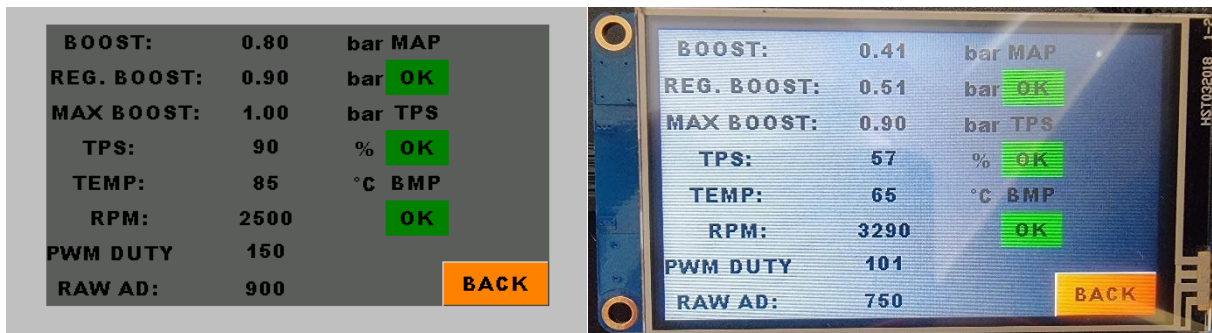
Obr. 27 Hlavní strana

Druhá stránka je přístupná pod tlačítkem MENU a slouží ke zvolení a uložení maximálního tlaku turbodmychadla. Ten je volitelný v rozmezí 0,5 – 1,5 bar. Po stisknutí tlačítka BACK se displej vrátí na domovskou stránku.



Obr. 28 Strana MENU

Třetí stránka je přístupná pod tlačítkem DIAG a zobrazuje všechny důležité snímané a řízené hodnoty. A to: plnicí tlak, požadovaný tlak, maximální tlak, polohu plynového pedálu, teplotu, otáčky motoru, střihu PWM signálu a hodnotu z AD převodníku tlakového senzoru. Taktéž zobrazuje stav důležitých senzorů pro jednodušší diagnostiku případných chyb v systému.



Obr. 29 Strana DIAG

### 3.4 Software

Tato kapitola popisuje softwarové řešení mikroprocesorové regulace. Pomocí diagramu popisuje běh programu. Taktéž je popsán PID regulátor a některé metody pro jeho nastavení. Pro vytvoření kódu jsem využil vývojové prostředí Arduino IDE.

#### 3.4.1 Chování v nestandardních situacích

Pro ochranu spalovacího motoru a turbodmychadla je důležité vyřešit běh systému za případné nestandardní situace. Pro řešení tohoto problému je implementován jednoduchý diagnostický systém, který monitoruje hodnoty ze senzorů. Pokud nejsou v normě aktivuje se nouzový režim, který zcela otevře regulační lopatky, čímž drasticky omezí plnicí tlak. Při aktivovaném nouzovém režimu systém zobrazí chybu na displeji uživatelského rozhraní.

#### 3.4.2 Popis programu v Arduino IDE

Na obr.30 je zobrazeno blokové schéma běhu programu. Z tohoto diagramu je patrné, že program je rozdělen na dvě smyčky. Jedná se o paralelní procesy běžící na oddělených jádrech procesoru. Program je rozdělen z důvodu vyšší plynulosti regulace. Proměnné, ke kterým chceme přistupovat z obou jader musíme definovat globálně. Proměnné definované uvnitř jedné smyčky nejsou pro druhou přístupné.

#### Funkce Setup

Program začíná funkcí Setup(). Ta je volána po spuštění programu a slouží pro inicializaci některých senzorů, nastavení sériové komunikace s uživatelským rozhraním, nastavení PWM a načtení hodnoty plnicího tlaku z nevolatilní paměti. Tato funkce proběhne pouze jednou, a to při každém spuštění mikrokontroleru.

#### Smyčka 1

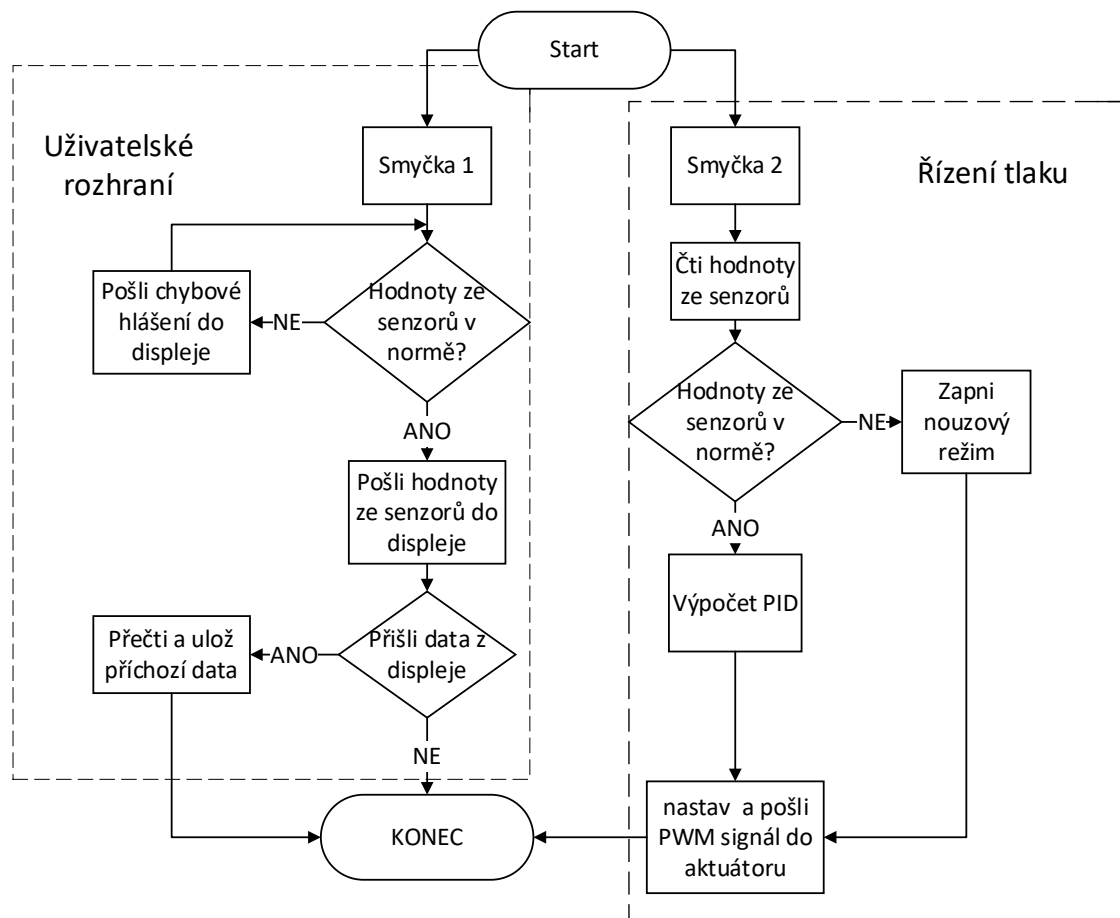
První smyčka má na starost uživatelské rozhraní. To znamená odesílání a přijímání dat z Nextion displeje. Smyčka začíná podmínkou, která zkontroluje hodnoty senzorů, a pokud některá nevyhovuje, vyhodnotí program chybu a pošle chybové hlášení do displeje. Toto trvá, dokud není chyba odstraněna. Hodnoty senzorů jsou čteny z globálních proměnných, kam jsou zapisovány z druhé smyčky programu.

Pokud jsou hodnoty ve správném rozsahu jsou přes sériovou linku odeslány do displeje, kde jsou zobrazeny. V případě příchozí komunikace z displeje dojde k dekodování dat a jejich uložení do paměti.

## Smyčka 2

Druhá smyčka běží paralelně s první a řídí samotnou regulaci tlaku spolu se snímáním hodnot proměnných. Začíná čtením dat ze senzorů, pokud jsou tyto data mimo povolený rozsah dojde k aktivování nouzového režimu, který způsobí omezení plnicího tlaku.

Pokud jsou hodnoty v normě jsou použity pro výpočet v bloku PID. Výstupem je poté PWM signál, který je přiveden na aktuátor turbodmychadla a řídí natočení regulačních lopatek.



Obr. 30 Blokové schéma běhu programu

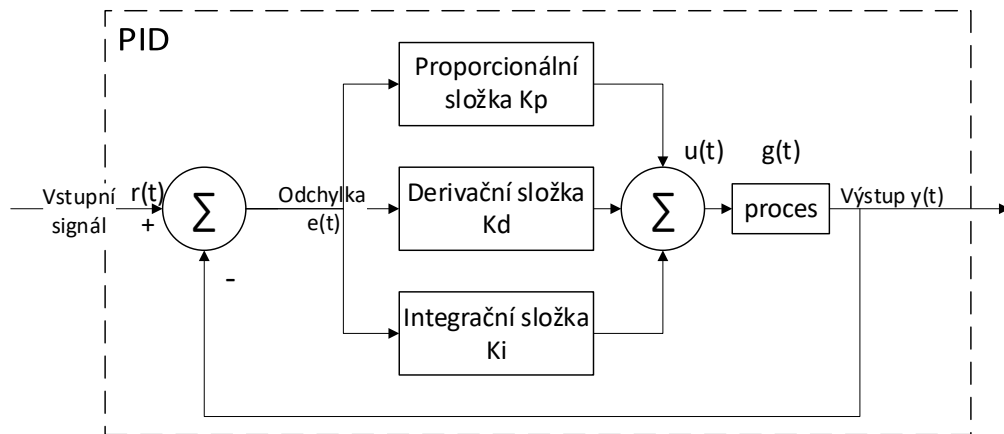
### 3.4.2 PID regulace

Pro regulování plnicího tlaku je v softwarově implementován PID regulátor. PID regulátor je alternativou ke dvoustavovému řízení a skládá se ze tří složek. Proporcionální, derivační a integrační. PID regulátor koriguje odchylku mezi reálnou a žádanou veličinou. Pro správné fungování musí být správně nastaven.

Proporcionální složka je úměrná regulační odchylce  $e(t)$ . Vysoké proporcionální zesílení zaručuje velkou změnu na výstupu při změně odchylky. Příliš velká proporcionální složka však může způsobit nestabilitu. Označuje se zkratkou  $K_p$

Integrační složka je závislá na velikosti odchylky a také na době jejího trvání. Se zvětšováním integrační složky roste i riziko vzniku oscilací. Označuje se zkratkou  $K_i$

Derivační složka ovlivňuje rychlost změny na výstupu regulátoru. Tento efekt je významný v blízkosti žádané hodnoty, jelikož díky němu můžeme zmenšit překmit. Nevýhodou je, že derivaci signálu zesílíme i šum, což může vést až k nestabilitě systému. Označuje se zkratkou  $K_d$



Obr. 31 Schéma PID regulátoru

#### Nastavení PID regulátoru

Pro nastavování PID regulátoru existuje mnoho metod, zmínil bych dvě dobře použitelné pro mnohou aplikaci.

Nejjednodušší metodou je metoda pokus-omyl, kdy měníme hodnoty nastavení v závislosti na průběhu přechodové charakteristiky. Pokud je pomalá, zvedneme  $K_p$ . Pokud se v ustáleném stavu vyskytuje odchylka, zvýšíme hodnotu integrační složky  $K_i$ . Při kmitání výstupu zase zvedneme  $K_d$ . Velikou výhodou této metody je absence matematiky.

#### Ziegler-Nicholsonova metoda

Tato metoda využívá jednoduchých vzorců, pro zjištění jednotlivých zesílení. Nejdříve zvyšujeme proporcionální složku až do okamžiku nestability. Tuto hodnotu pojmenujeme  $K_c$  a spolu s periodou kmitání  $P_c$  vypočteme  $K_p$ ,  $K_i$  a  $K_d$ , dle vzorců v rovnici 3.3 [10]

$$K_p = 0,6 * K_c; K_i = 2 * \frac{K_p}{P_c}; K_d = \frac{K_p * P_c}{8}$$

Rovnice 3.3 [10]

V mém případě proběhlo nastavení metodou pokus omyl. Přesné nastavení nyní není možné, protože chování motoru je odlišné při běhu bez zátěže a při zatížení. Vstříkuje se snížená dávka paliva, a tudíž i turbodmychadlo dodává menší tlak. Po instalaci systému do vozidla by tedy bylo nutné regulátor otestovat a nastavit přesněji.

Výpočet PID v programu probíhá pomocí funkce `pidCalc()`. Vstupem funkce je žádaná hodnota. V našem případě hodnota požadovaného tlaku. Výstupem funkce je hodnota pro PWM.

```
double pidCalc(double inp) {
    currentTime = millis();           //čas nyní
    elapsedTime = (double)(currentTime - previousTime); //vypočítej čas předchozí

    error = Setpoint - inp;           // vypočti chybu
    cumError += error * elapsedTime;  // vypočti integrační složku
    rateError = (error - lastError)/elapsedTime; // vypočti derivační složku

    double pid = Kp*error + Ki*cumError + Kd*rateError; //PID výpočet
    double out = constrain(pid,13,242);
    lastError = error;                //ulož chybu
    previousTime = currentTime;       //ulož nynější čas

    return out;                       //výstup
}
```

*Obr. 32 výpočet PID regulace*

Tato funkce nejdříve vypočte čas, který uběhl od předchozí iterace výpočtu. Proporcionální složku zjistíme odečtením vstupní hodnoty od požadované.

Integrační složka je celková chyba, přičítáme k ní hodnotu chyby násobenou časem od předchozí iterace výpočtu.

Derivační složka je rozdíl chyb za čas mezi nynější a předchozí iterací výpočtu.

Výsledné složky jsou poté násobené příslušným zesílením sečteny a následně upraveny funkcí `constrain()`. Ta upraví výstupní hodnotu tak, aby mohla být zapsána jako hodnota PWM do příslušného PWM kanálu.

Standardní hodnota PWM u ESP je v rozmezí 0-255, zde je však omezena na hodnotu 13-242, což odpovídá střídě 5-95 %. Toto omezení je nutné pro bezchybnou funkčnost aktuátoru turbodmychadla. Tento aktuátor obsahuje elektroniku, která resetuje jeho pozici při překročení těchto hodnot.

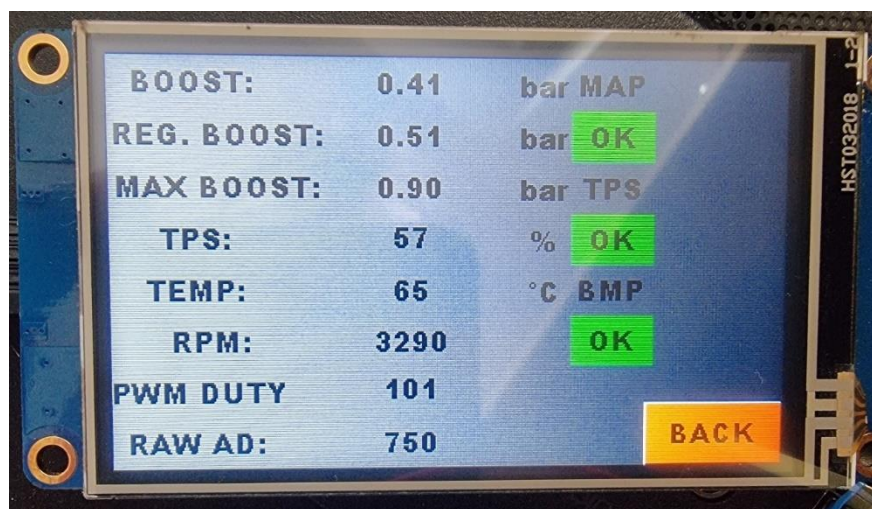


### 3.5 Testování řídicí jednotky

Pro vyzkoušení experimentální jednotky jsem provedl krátký test. Jednotka byla namontována na spalovací motor umístěný na testovacím stojanu mimo vozidlo. Motor byl osazen chladícím systémem a byl namontován mezichladič stlačeného vzduchu s tlakovým vedením. Po nastartování bylo nejdříve nutné udělat korekci časování vstříku. Čerpadlo bylo v držáku mírně pootočené a motor měl nepravidelný chod a vysokou kouřivost. Po této korekci již držel stabilní volnoběžné otáčky a kouřivost se snížila.

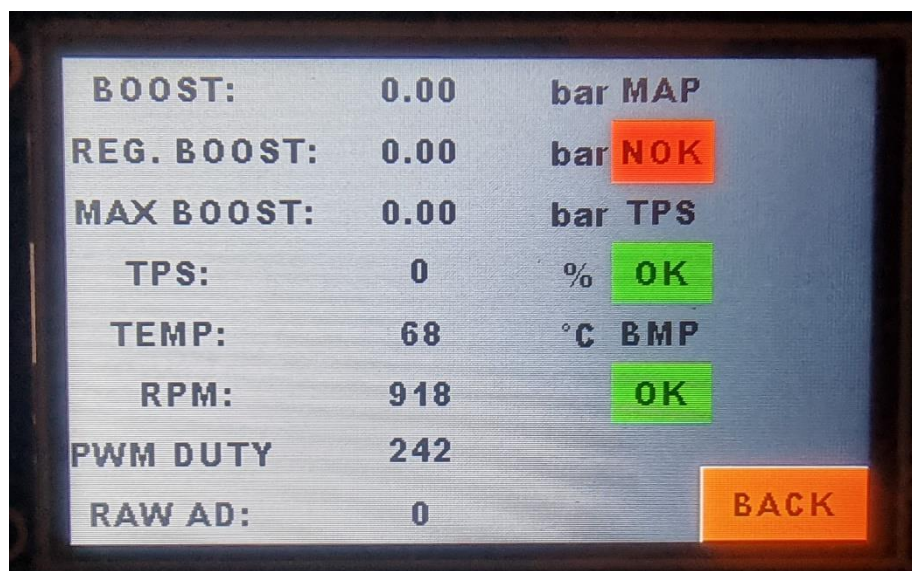
Po zahřátí motoru byl proveden test ve vyšších otáčkách. Akcelerační pákou byly nastaveny vyšší otáčky a sledoval jsem chování systému. Řídicí jednotka natočila regulační lopatky do pozice pro nízké otáčky a turbodmychadlo bylo schopné generovat tlak. Se zvyšujícím se tlakem se lopatky postupně otevíraly do otevřené pozice.

Během testování byly přes uživatelské rozhraní vypisovány hodnoty, které lze též krátce zhodnotit. Turbodmychadlo generovalo plnicí tlak o hodnotě 0,41 bar. Požadovaný tlak při daném natočení akcelerační páky byl 0.51 bar. Lze tedy usuzovat, že systém má regulační odchylku, kterou by bylo potřeba odstranit korekcí nastavení PID regulátoru. Tuto hypotézu by však bylo třeba potvrdit při dalším testu motoru pod zátěží. Spalovací motor má odlišné chování při běhu bez zátěže a při zatížení. Bohužel momentálně nemám prostředky a časové možnosti pro vyzkoušení celého systému pod zátěží.



Obr. 33 Hodnoty snímané během testu

Tento test taktéž prověřil funkčnost uživatelského rozhraní, které správně zobrazovalo hodnoty ze senzorů a umožnilo změnu hodnoty maximálního plnicího tlaku. Při testování jsem rovněž provedl krátký test diagnostického systému, kdy jsem odpojením napájení senzoru plnicího tlaku simuloval poruchu. Systém zareagoval vypsáním chyby na displeji a snížením plnicího tlaku pomocí maximálního otevření regulačních lopatek.



*Obr. 34 Stav při poruše senzoru*



*Obr. 35 Spalovací motor během testu*

## Závěr

V této části práce bych rád zhodnotil její výsledky. Cílem bakalářské práce bylo vytvoření experimentální řídicí jednotky pro řízení turbodmychadla umístěného na dieslovém spalovacím motoru s mechanickým vstřikováním paliva.

V teoretické části se věnuji popisu základních principů fungování vstřikovacích čerpadel Bosch VE. Dále popisuji architekturu systému Bosch EDC, který je komerčně používaným řešením problematiky řízení turbodmychadel. V kapitole věnované turbodmychadlům se věnuji hlavně principům používaných pro jejich řízení.

Výsledkem praktické části práce je funkční experimentální řídicí jednotka, která reguluje hodnotu plnicího tlaku. Maximální hodnotu plnicího tlaku může uživatel nastavit v rozmezí 0,5 – 1,5 bar. Vybraná hodnota je poté uložena do paměti zařízení. Pro interakci s uživatelem je jednotka vybavena uživatelským rozhraním v podobě dotykového displeje. Tento displej zobrazuje všechny důležité hodnoty využívané při řízení tlaku.

Jednotka je vybavena jednoduchým diagnostickým systémem, který je určen pro ochranu turbodmychadla a motoru v případě neočekávaných stavů. Tento systém monitoruje stav senzorů a v případě vyhodnocení chyby aktivuje nouzový režim. Nouzový režim omezuje hodnotu plnicího tlaku, čímž zamezí případnému poškození motoru.

Funkčnost jednotky byla vyzkoušena krátkým testem. Při tomto testu byla umístěna na spalovací motor a byla sledována její činnost. Jednotka byla schopna regulovat tlak s mírnou odchylkou od požadovaného tlaku, kdy reálný tlak byl menší než požadovaný. To může být způsobeno nepřesným nastavením PID regulátoru, ale i skutečností, že motor běžel bez externí zátěže. Motor bez zatížení vstřikuje menší dávku paliva, tudíž i turbodmychadlo generuje menší tlak.

Po korekci na zatíženém motoru by jednotka byla zcela funkční. Aby mohla být umístěna do vozidla, by bylo třeba několika vylepšení. V první řadě je potřeba jednotku umístit do jiného pouzdra, aby byla lépe chráněna proti externím vlivům. Dále by bylo vhodné jednotku umístit na desku plošných spojů a se senzory ji spojit kvalitním konektorem. Nyní jsou použité Dupont konektory, které by v motorovém prostoru nebyly spolehlivé.

Osobně jsem s výsledkem práce spokojen. Jako další krok, již mimo tuto práci, plánuji umístit motor do vozidla, provést korekci řídicí jednotky a upravit nastavení vstřikovacího čerpadla. Pokud by mi výsledek nevyhovoval, lze případně vstřikovací čerpadlo zcela nahradit za elektronicky řízené. Řídicí jednotka by poté fungovala jako komplexní systém regulující veškeré činnosti motoru.

## Použitá literatura

- [1] VLK, František. *Příslušenství vozidlových motorů*. 1. Brno: Prof. Ing. František Vlk DrSc., 2002. ISBN 80-238-8755-6.
- [2] TSCHÖKE, Helmut, Horst BAUER, ed., Peter GIRLING. *Diesel distributor fuel-injection pumps* [online]. 1. Stuttgart: Robert Bosch GmbH, Technical Publications (KH/PDI2), 1999 [cit. 2023-05-13]. ISBN 39-345-8438-1. Dostupné z: [https://injectionpumps.co.uk/pdf/bosch\\_ve\\_pumps.pdf](https://injectionpumps.co.uk/pdf/bosch_ve_pumps.pdf)
- [3] RŮŽIČKA, Antonín a Zdeněk PETRÁS. *Elektronické vstřikování vznětových motorů EDC 1.3.3*. 1. Praha: Robert Bosch, 1998.
- [4] PSA XUD engine. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2023-05-14]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=PSA\\_XUD\\_engine&oldid=1145159262](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=PSA_XUD_engine&oldid=1145159262)
- [5] FAJKUS, Martin. *Úprava atmosférického motoru na motor přepřínovaný*. Brno, 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. David Svída.
- [6] In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Turbodmychadlo#/media/Soubor:Turbocharger.jpg>
- [7] *ELECTRONIC BOOST PRESSURE CONTROL- TURBOCHARGER ACTUATOR TESTING* [online]. Lippstadt: Hella GmbH & Co. KGaA [cit. 2023-05-17]. Dostupné z: <https://www.hella.com/techworld/uk/Technical/Car-electronics-and-electrics/Electronic-boost-pressure-control-turbocharger-actuator-testing-61101/>
- [8] ISAAC-LOWRY, Jacob. Turbo Selection: A Guide to Understanding Flow Maps. *Automotive Articles* [online]. USA: Automotive Network, Inc., 2004, **2004**, 1 [cit. 2023-05-14]. Dostupné z: [http://www.automotivearticles.com/Turbo\\_Selection.shtml](http://www.automotivearticles.com/Turbo_Selection.shtml)
- [9] *ESP32 Series Datasheet* [online]. 69 [cit. 2023-05-14]. Dostupné z: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf)
- [10] CHALUPA, Adam. *Optimální nastavení PID regulátorů*. Praha, 2008. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Petr Hušek Ph.D.

# **SEZNAM PŘÍLOH**

**Příloha A: CD**

## **Příloha A**

Příloha k bakalářské práci

Mikroprocesorová regulace tlaku turbodmychadla spalovacího motoru

Vojtěch Mlateček

**CD**

# Obsah přílohy

- 1 Zdrojový kód programu (Arduino).
- 2 Zdrojový kód programu (NextionEditor).