

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**NÁVRH A REALIZACE MĚŘÍCÍHO KONTROLÉRU  
PRO ŠIROKOPÁSMOVOU KYSLÍKOVOU SONDU**

## **Abstrakt**

Tento dokument popisuje návrh, realizaci a kalibraci hardwaru a softwaru pro řídicí systém širokopásmové kyslíkové sondy. Navrhovaný systém je určen pro měření součinitele přebytku vzduchu při kalibrování, testování a ověřování funkcí řídicích systémů pístových spalovacích motorů. Při návrhu byl kladen důraz zejména na přesnost měření, rychlost odezvy, odolnost proti rušení a připojitelnost k záznamovým, zobrazovacím a vyhodnocovacím systémům. Cena navrhovaného řešení zde naopak nebyla hlavní prioritou. Na rozdíl od běžně vyráběných kontrolérů, byly veškeré řídicí a regulační funkce, zhotoveny v digitální podobě. Vzhledem k vysokým nárokům na rychlost zpracování signálů v reálném čase, byl použit digitální signálový kontrolér.

## **Klíčová slova**

Řízení širokopásmové kyslíkové sondy, digitální zpracování signálu v reálném čase, dsPIC33EP, WBO2, UEGO, LSU 4.9.

## **Abstract**

This document describes the design, realisation and calibration of hardware and software for wideband oxygen sensor control system. The controller is designed for measurement of air-to-fuel ratio during calibration, testing and verification of internal combustion engine control systems. Therefore the main emphasize was put on the measurement accuracy, fast response, interference immunity and connectivity to recording, imaging and evaluation systems. Unlike conventional controllers, all control functions and algorithms were made in digital form. Due to high demands on speed and accuracy of signal processing in real time, a digital signal controller has been used.

## **Keywords**

Wideband oxygen sensor control system, real-time digital signal processing, dsPIC33EP, WBO2, LSU 4.9.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

Podpis:

V Plzni 10. 7. 2020

Bc. Martin Dosedla, DiS.

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu práce, Ing. Petrovi Weissarovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky, které pomohly k vyřešení mnohých problémů při tvorbě této práce.

Děkuji Doc. Dr. Ing. Vjačeslavu Georgievovi za zapůjčení laboratoře a analyzátoru složení výfukových plynů.

## Obsah

1	Seznam symbolů a zkratk.....	8
2	Úvod.....	9
2.1	Význam kyslíkových sond v systémech řízení pístových zážehových motorů.....	9
2.2	Konstrukce a princip činnosti úzkopásmové kyslíkové sondy.....	9
2.3	Konstrukce a princip činnosti širokopásmové kyslíkové sondy.....	13
3	Požadavky na navrhovaný kontrolér.....	16
4	Návrh architektury kontroléru.....	17
5	Návrh hardwarové části kontroléru.....	18
5.1	Měření napětí a vnitřního odporu Nernstova článku.....	18
5.2	Generování a měření čerpacího proudu.....	21
5.3	Výkonové spínače.....	23
5.4	Analogový výstup.....	24
5.5	Příprava napájení systémů kontroléru.....	25
5.6	Mikrokontrolér a CAN transceiver.....	26
6	Návrh softwaru nízké vrstvy.....	27
6.1	Inicializace hardwaru mikrokontroléru.....	27
6.2	Vstupně-výstupní funkce softwaru nízké vrstvy.....	29
7	Návrh softwaru vyšší vrstvy.....	33
7.1	Inicializace softwaru vyšší vrstvy.....	33
7.2	Operační systém.....	33
7.3	Měření a výpočet vnitřního odporu Nernstova článku.....	36
7.4	Výpočet teploty substrátu kyslíkové sondy.....	38
7.5	Řízení ohřevu a regulace teploty substrátu kyslíkové sondy.....	38
7.6	Regulace čerpacího proudu.....	41
7.7	Implementace PID regulátorů v softwaru vyšší vrstvy.....	42
7.8	Nastavení PID regulátorů.....	43
7.9	Výpočet AFR a $\lambda$ .....	44
7.10	Ovladač sériové komunikace.....	45
8	Kalibrace kontroléru.....	46
8.1	Kalibrace hardwaru kontroléru.....	46
8.2	Kalibrace sondy na čistém vzduchu.....	47

9	Laboratorní ověření přesnosti měření.....	48
10	Grafické zobrazovací rozhraní pro PC.....	49
11	Závěr.....	52
12	Seznam použitých zdrojů.....	52

## 1 Seznam symbolů a zkratek

<i>AFR</i>	„Air to fuel ratio“ – Hmotnostní poměr paliva a vzduchu v palivové směsi, podrobně viz. příloha [A].
<i>DID</i>	„Data identifier“, používáno v terminologii UDS podle ISO 14229-1.
<i>DMA</i>	„Direct memory access“ - přímý přenos dat mezi periferiemi a pamětí MCU.
<i>DSC</i>	„Digital signal controller“ - číslicový signálový kontrolér.
<i>DSP</i>	„Digital signal processing“ - číslicové zpracování signálu.
<i>FPU</i>	„Floating point unit“ – Hardwarová jednotka pro výpočetní operace ve formátu s posuvnou desetinnou tečkou.
<i>HWD</i>	„Hardware driver“ – Zkratka pro software nízké vrstvy.
<i>ICSP</i>	„In circuit serial programming“ – rozhraní pro sériové programování mikrokontroléru již zapájeného v cílové aplikaci.
<i>IOCB</i>	„Input/Output control by identifier“, UDS servis podle ISO 14229-1.
<i>LSU 4.9</i>	Typ širokopásmové kyslíkové sondy od výrobce Robert Bosch GmbH.
<i>MCU</i>	„Microcontroller unit“ – mikrokontrolér.
<i>OC/IC</i>	„Output Capture/Input Compare“ – hardwarové periferie mikrokontroléru pro generování/měření diskretních signálů.
<i>PPS</i>	„Peripheral pin select“ – systém, umožňující přiřazení libovolných pinů bran k periferiím mikrokontroléru.
<i>RC</i>	„Routine control“, UDS servis podle ISO 14229-1.
<i>RDBI</i>	„Read data by identifier“, UDS servis podle ISO 14229-1.
<i>RID</i>	„Routine identifier“, používáno v terminologii UDS podle ISO 14229-1.
<i>OS</i>	Operační systém.
<i>PWM</i>	„Pulse-width modulation“ – Pulzně šířková modulace.
<i>UDS</i>	„Unified diagnostic services“ – Komunikační protokol používaný pro diagnostické a komunikační účely v automobilovém průmyslu.
<i>UEGO</i>	„Universal Exhaust Gas Oxygen Sensor“ – Mezinárodně používané označení pro širokopásmovou kyslíkovou sondu.
<i>S&amp;H</i>	„Sample and hold“ – Vzorkovací obvod.
<i>WBO2</i>	„Wideband oxygen sensor“ – širokopásmová kyslíková sonda.
$\lambda$	Součinitel přebytku vzduchu, viz. příloha [A].



## 2 Úvod

### 2.1 Význam kyslíkových sond v systémech řízení pístových zážehových motorů

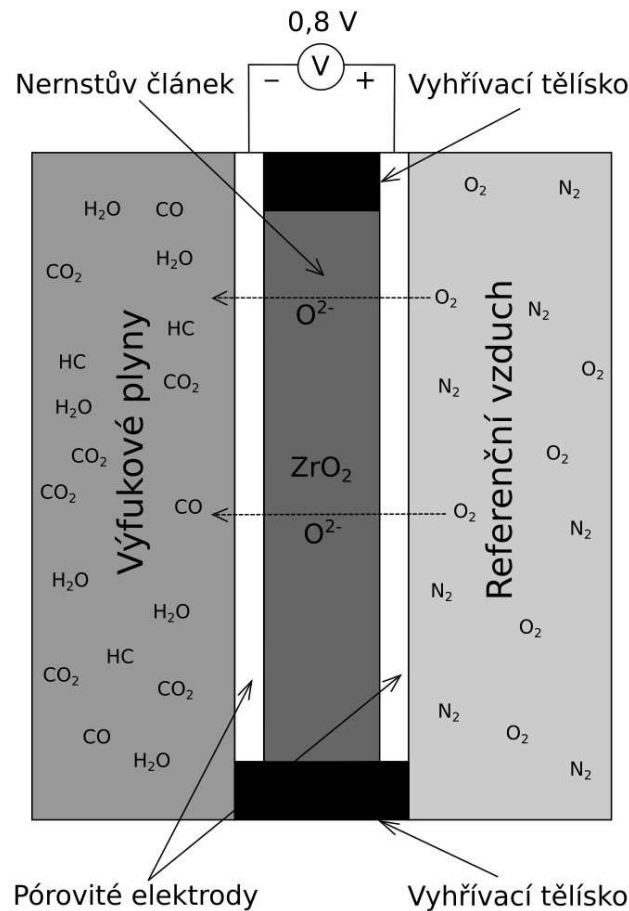
Kyslíkové sondy jsou důležitým prvkem systémů řízení pístových motorů již padesát let. Zastávají úlohu senzoru ve zpětnovazebním systému řízení dodávky paliva motoru. Využití nacházejí rovněž při kalibrování a ověřování funkcí řídicích systémů pístových motorů během jejich vývoje. Pro bližší objasnění významu kyslíkových sond je nutné uvést základní teorii, pojmy a principy řízení pístových spalovacích motorů. K tomuto účelu slouží příloha diplomové práce „Základní principy řízení zážehových motorů“ [A].

### 2.2 Konstrukce a princip činnosti úzkopásmové kyslíkové sondy

Základní částí úzkopásmové kyslíkové sondy je Nernstův elektrochemický článek. Konstrukce Nernstova článku je naznačena na obr. 1 a 2. Tvoří jej substrát, vyrobený z oxidu zirkoničitého, na němž jsou napařeny dvě pórovité elektrody, sloužící pro odvedení vznikajícího elektrochemického napětí. V úzkopásmových kyslíkových sondách pro pístové motory je Nernstův článek z jedné strany exponován výfukovými plyny, z druhé strany je vystaven referenčnímu (čistému) vzduchu, uloženému v referenční komoře kyslíkové sondy. Při teplotách nad 350°C se stává oxid zirkoničitý vodivý pro kyslíkové ionty.

Při spalování palivové směsi s přebytkem paliva ( $\lambda < 1$ , obr. 1), výfukové plyny obsahují pouze malé množství kyslíku. Kyslíkové ionty migrují z referenční komory s vysokým obsahem kyslíku, přes substrát Nernstova článku, do výfukových plynů. Migrující ionty vytvoří na elektrodách článku napětí o velikosti přibližně 0,8 V.

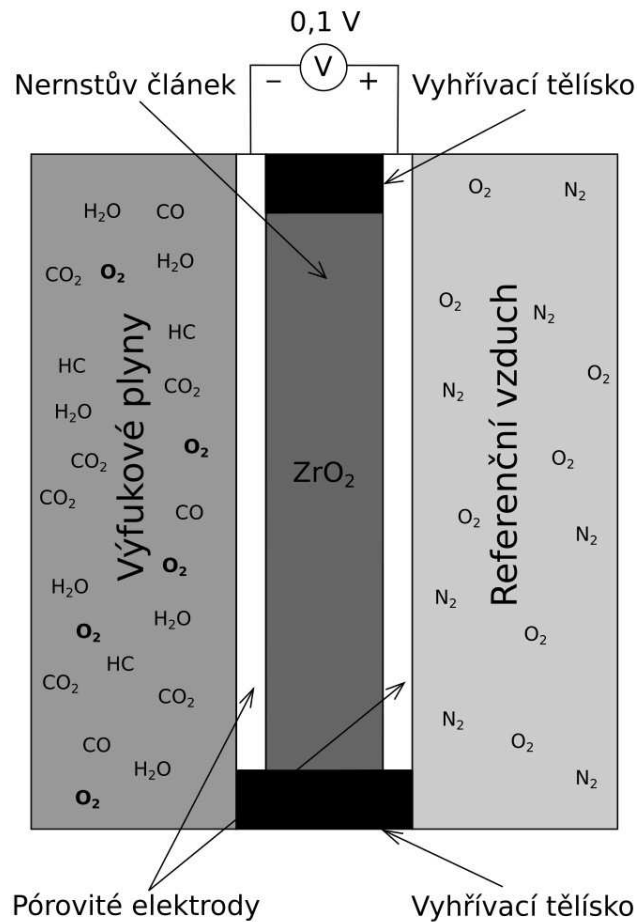
Během spalování palivové směsi s přebytkem vzduchu ( $\lambda > 1$ , obr. 2), výfukové plyny obsahují nespálený kyslík. Kyslíkové ionty jsou přítomny na obou stranách Nernstova článku a k jejich migraci substrátem nedochází. Elektrochemické napětí na elektrodách článku klesá na hodnotu přibližně 0,1 V. Zbytkové napětí generují slabé oxidační reakce, probíhající na povrchu elektrody článku.



Obr. 1: Konstrukce a princip činnosti Nernstova článku při  $\lambda < 1$ .

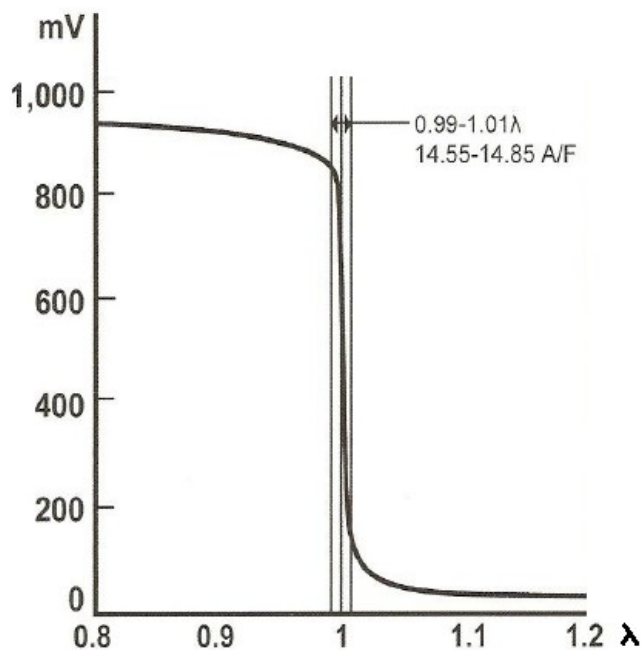
Výstupnímu napětí o velikosti 450 mV odpovídá  $\lambda = 1,016$ . Z důvodu velmi strmé převodní charakteristiky Nernstova článku okolo  $\lambda = 1$  (viz. obr. 3) lze z jeho výstupního napětí v praxi určit pouze dva stavy:  $\lambda < 1$  a  $\lambda > 1$ . Sonda je tedy použitelná pouze pro regulaci součinitele přebytku vzduchu na hodnotu  $\lambda = 1$ , odtud plyne její název „úzkopásmová“.

V minulosti byly kyslíkové sondy ohřívány na pracovní teplotu pouze teplem výfukových plynů. Po startu motoru trvalo ohřátí sondy až několik minut. Po tuto dobu musel řídicí systém motoru pracovat v otevřené smyčce a způsoboval tak zvýšenou tvorbu škodlivin ve výfukových plynech. Dobu ohřívání i zpoždění měření sondy lze zkrátit umístěním sondy blíže k motoru. Při vysokých výkonech motoru je však teplota výfukových plynů příliš vysoká a hrozí zde riziko zničení sondy vysokou teplotou. Dnes jsou planární kyslíkové sondy téměř vždy vybaveny odporovým vyhřívacím tělískem, které umožňuje jejich rychlé ohřátí na požadovanou pracovní teplotu.



Obr. 2: Princip činnosti Nernstova článku při  $\lambda > 1$ .

Během vývoje řídicích systémů pístových motorů vzešel požadavek měřit součinitel přebytku vzduchu  $\lambda$  spojitě a v širokém rozsahu. Takové měření umožní přímo získat odchylku skutečné hodnoty  $\lambda$  od požadované hodnoty a tím podstatně vylepšit vlastnosti regulátorů, zejména rychlost odezvy. Širokopásmové měření také umožní regulaci přechodových jevů a zpětnovazební řízení AFR v oblastech chudých i bohatých směsí. V roce 1992 byl vyvinut první typ širokopásmové kyslíkové sondy. Pro její přesnost, rychlost odezvy a univerzálnost prodělala další vývoj a našla široké uplatnění i pro kalibrační a ověřovací účely.



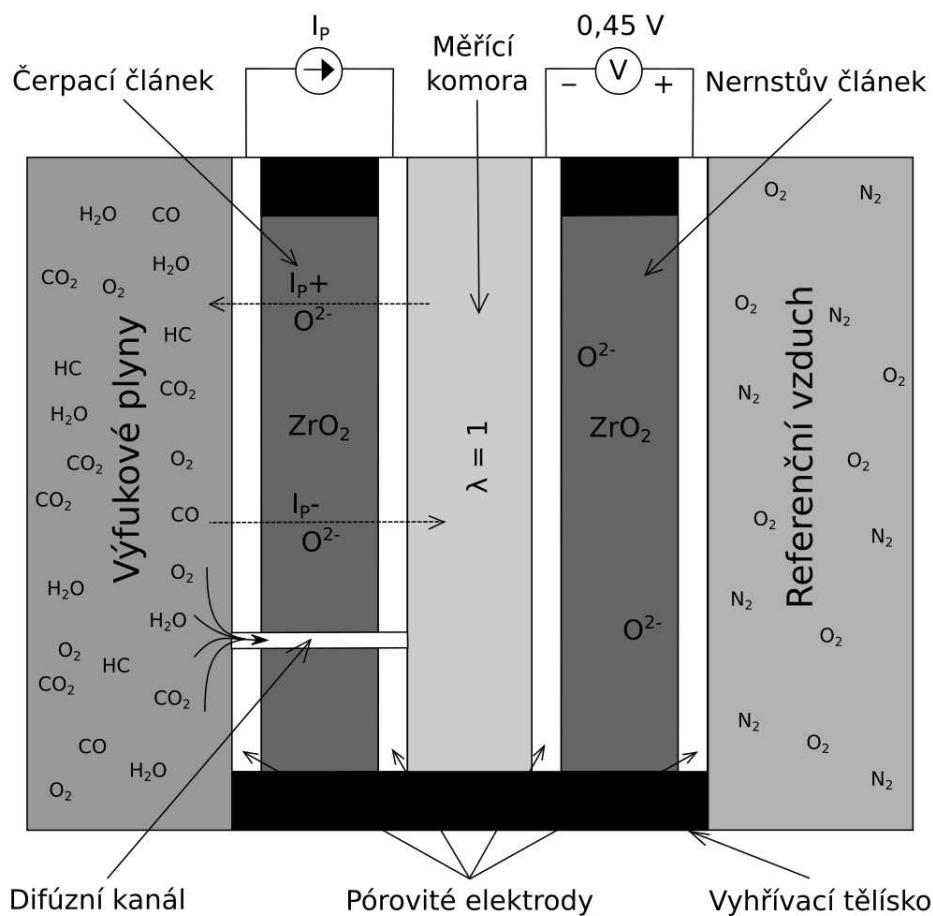
Obr. 3: Převodní charakteristika Nernstova článku.



Obr. 4: Příklad pouzdra kyslíkové sondy.

### 2.3 Konstrukce a princip činnosti širokopásmové kyslíkové sondy

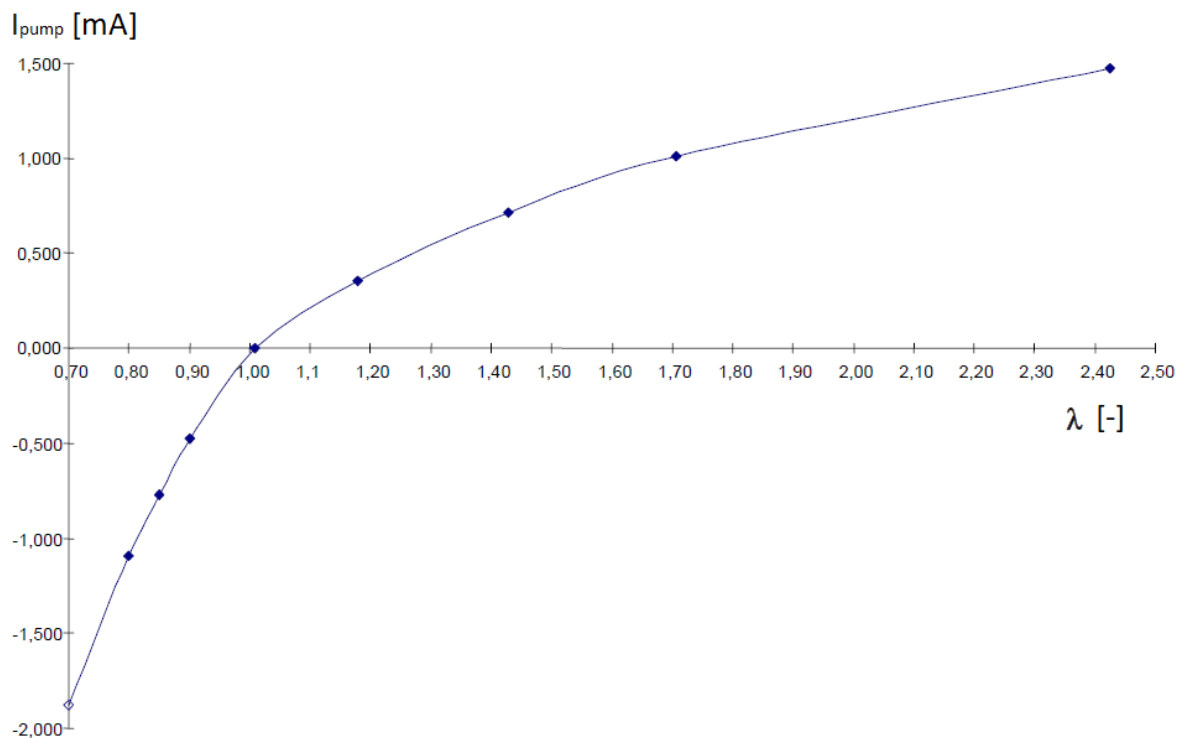
Konstrukce širokopásmové kyslíkové sondy je rozšířenou konstrukcí sondy úzkopásmové. Základním prvkem širokopásmové kyslíkové sondy je Nernstův článek. Pro spojité měření součinitele přebytku vzduchu v širokém rozsahu je Nernstův článek doplněn o oddělenou měřicí komoru s difúzním kanálem a elektrochemický iontový čerpací článek.



Obr.4: Konstrukce a princip činnosti širokopásmové kyslíkové sondy.

Pro svoji činnost vyžaduje širokopásmová kyslíková sonda zpětnovazební regulátor elektrického proudu čerpacím článkem. Vstupní veličinou regulátoru je napětí Nernstova článku, akční veličinou je čerpací proud, přiváděný regulátorem do čerpacího článku. Úkolem regulátoru je udržovat napětí Nernstova článku na rovnovážné hodnotě  $V_N = 450\text{ mV}$ .

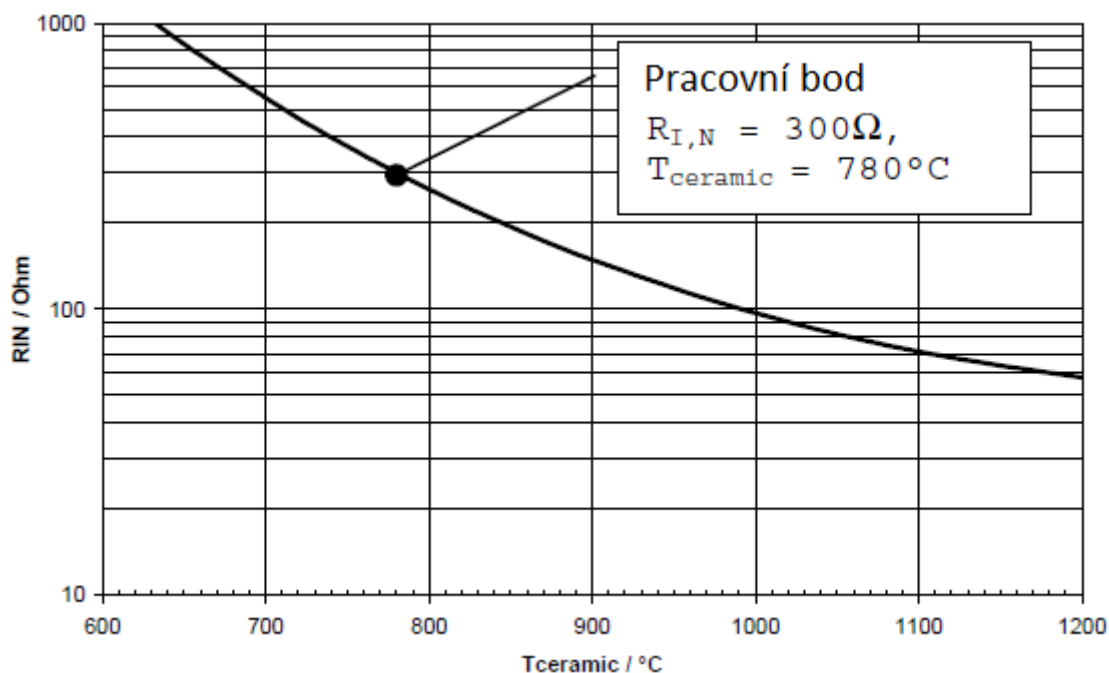
Kyslíkové ionty difundují z měřených výfukových plynů difúzním kanálem do měřicí komory. Mají – li měřené výfukové plyny součinitel přebytku vzduchu  $\lambda = 1,016$ ; generuje Nernstův článek napětí o velikosti 450 mV. Regulátor čerpacího proudu má vstupní veličinu rovnu požadované velikosti, nekoná tak žádný akční zásah a čerpací proud je roven nule. Zvýší-li se součinitel přebytku vzduchu výfukových plynů, migrují do měřicí komory další kyslíkové ionty,  $\lambda$  v měřicí komoře roste.  $V_N$  klesá. Elektronický regulátor reaguje zvyšováním čerpacího proudu, který odčerpává kyslíkové ionty z měřicí komory zpět do výfukových plynů. Regulátor zvyšuje čerpací proud tak dlouho, dokud není v měřicí komoře opět  $\lambda = 1,016$  ( $V_N = 450$  mV). Čerpací proud, potřebný k udržení rovnovážného stavu, odpovídá velikosti přebytku vzduchu ve výfukových plynech. Sníží-li se součinitel přebytku vzduchu výfukových plynů pod hodnotu  $\lambda = 1$ , migrují kyslíkové ionty z měřicí komory zpět do výfukových plynů a  $\lambda$  v měřicí komoře klesá.  $V_N$  roste, elektronický regulátor reaguje a snižuje čerpací proud až do záporných hodnot. Záporný čerpací proud čerpá kyslíkové ionty z výfukových plynů zpět do měřicí komory. Regulátor snižuje čerpací proud tak dlouho, dokud nedosáhne rovnovážného stavu. Čerpací proud odpovídá součiniteli přebytku vzduchu výfukových plynů podle charakteristiky, zobrazené na obr. 5:



Obr. 5: Závislost čerpacího proudu na součiniteli přebytku vzduchu  $\lambda$  pro sondu typu LSU 4.9.

Z důvodu odchylek v sérové výrobě je sonda vybavena laserem trimovaným bočnickem pro měření skutečného čerpacího proudu. Bočník je umístěn v tělese konektoru sondy a jeho trimování je prováděno ve výrobě při výstupním testování.

Převodní charakteristika širokopásmové kyslíkové sondy je silně závislá na teplotě jejího substrátu. Teplota měřených výfukových plynů je proměnná v závislosti na aktuálním provozním režimu motoru, proto musí být teplota substrátu sondy řízena zpětnovazebním regulátorem. K dosažení a udržení pracovní teploty sondy slouží interní, planární odporové vyhřívací tělísko. Kyslíková sonda není vybavena přímým snímačem teploty. Výrobce doporučuje teplotu měřit nepřímo pomocí měření vnitřního odporu Nernstova článku, na němž je teplota závislá dle charakteristiky na obr. 6:



Obr. 6: Závislost vnitřního odporu Nernstova článku na teplotě substrátu pro sondu typu LSU 4.9.

Výrobce kyslíkové sondy LSU 4.9 také předepisuje trvalé injektování kladného referenčního čerpacího proudu o velikosti 20  $\mu\text{A}$  do Nernstova článku pro zajištění stálého přebytku kyslíku v referenční komoře sondy.

### 3 Požadavky na navrhovaný kontrolér

- Vysoká přesnost měření, nejlépe  $\pm 1\%$  v celém rozsahu měření, i za cenu ručního výběru použitých součástek a ruční kalibrace každého vyrobeného kontroléru. <sup>(1)</sup>
- Vysoká rychlost odezvy, do 10 ms při změně hodnoty  $\lambda$  přes celý rozsah měření. <sup>(2)</sup>
- Odolnost proti rušení přicházejícího z napájení i šířícího se vzduchem. <sup>(3)</sup>
- Připojitelnost k počítači PC pomocí sběrnice RS-232.
- Připojitelnost k řídicí jednotce motoru pomocí sběrnice CAN BUS 2.0 B.
- Analogový výstup pro možnost rychlého zjištění velikosti měřené hodnoty pomocí voltmetru.
- Malá velikost kontroléru, <sup>(4)</sup> nízké nároky na zastavěnou plochu plošného spoje. <sup>(5)</sup>

<sup>(1)</sup> Je vyžadována vzhledem k budoucímu použití kontroléru pro kalibrace a ověřování funkcí řídicích systémů pístových motorů.

<sup>(2)</sup> Je vyžadována vzhledem k potřebě měření přechodných dějů na systémech řízení pístových motorů.

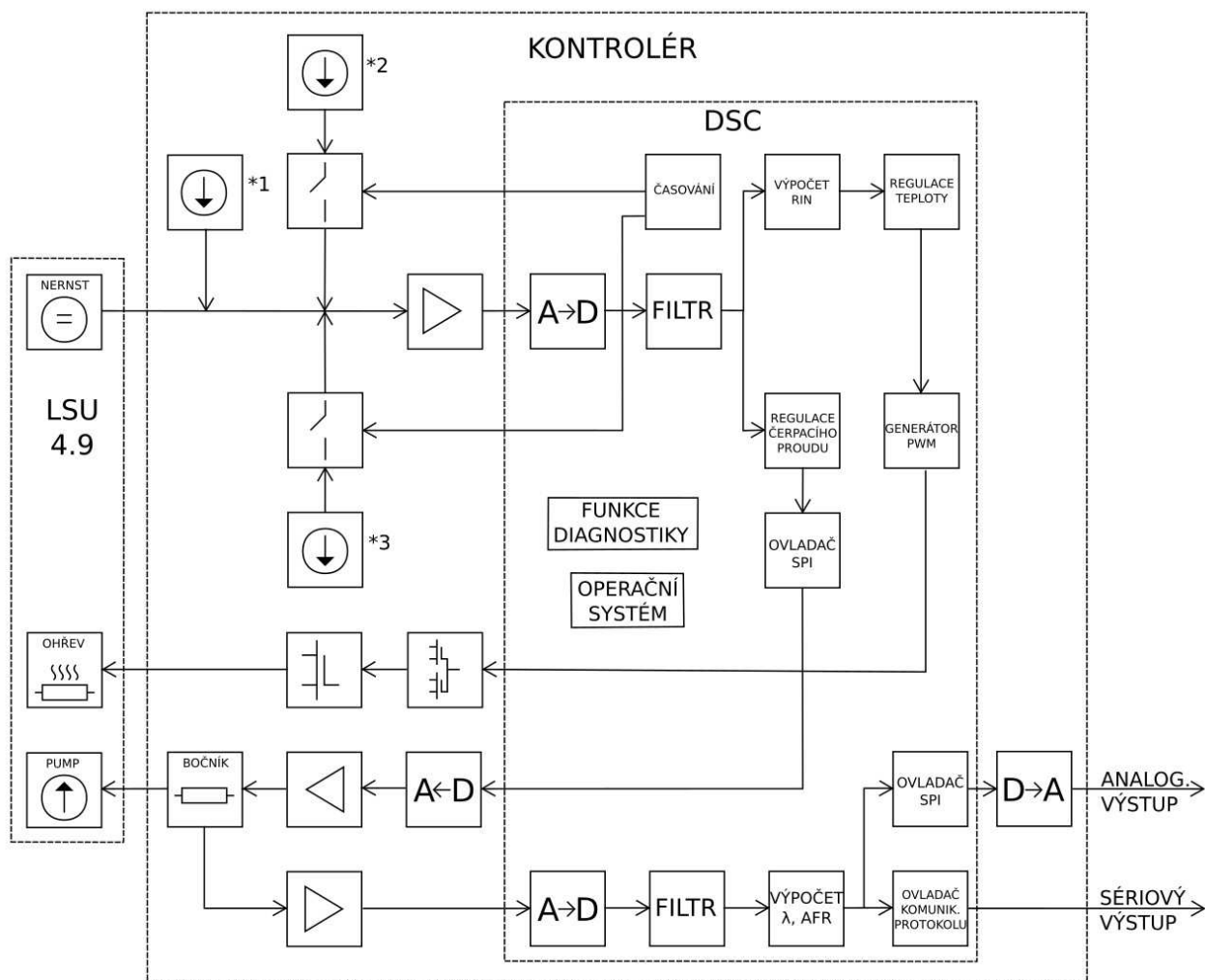
<sup>(3)</sup> Napájecí síť vozidla a okolí vozidla je významným zdrojem rušivých signálů. Nejvýznamnějšími zdroji rušivých signálů jsou zapalovací systémy zážehových motorů, synchronní generátory (alternátory) a jejich usměrňovače, činnost komutátorových motorů a jejich pulzních měničů (ventilátory apod.).

<sup>(4)</sup> Vzhledem k použití při testovacích jízdách motocyklů.

<sup>(5)</sup> Kontroléry širokopásmových kyslíkových sond jsou často součástí řídicích jednotek motoru. V budoucnosti je takovéto použití navrhovaného kontroléru očekáváno a bude s ním počítáno již při návrhu.



### 4 Návrh architektury kontroléru



Obr. 7: Blokové schéma architektury kontroléru pro širokopásmovou kyslíkovou sondu.

\*1 – Zdroj proudu 20  $\mu A$

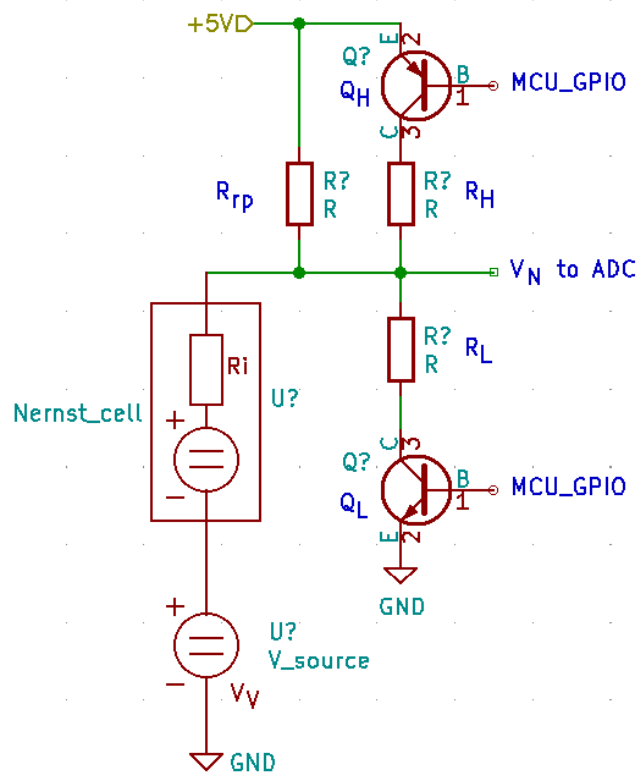
\*2 – Zdroj proudu 180  $\mu A$

\*3 – Zdroj proudu -200  $\mu A$

## 5 Návrh hardwarové části kontroléru

### 5.1 Měření napětí a vnitřního odporu Nernstova článku

Vnitřní odpor Nernstova článku bude měřen přiložením krátkého impulsu o známé velikosti proudu na Nernstův článek. Změna proudu, vyvolaná měřicím impulzem, způsobí změnu napětí na vnitřním odporu článku. Velikost vnitřního odporu je poté možno zjistit podle Ohmova zákona. Injekce náboje měřicím impulsem do Nernstova článku způsobí jeho ovlivnění. Následné měření koncentrace kyslíku v měřicí komoře sondy přinese chybný výsledek. Je tedy zapotřebí, po injekci náboje měřicím impulsem, provést zpětné odsátí náboje stejně dlouhým, opačně orientovaným impulsem o totožné velikosti proudu. Záporný impuls bude také použit pro měření vnitřního odporu článku. Měření tímto způsobem proběhne při dvojnásobné amplitudě napětí a přinese vyšší přesnost měření a vyšší odstup signálu od šumu. Z důvodu potřeby záporných proudů pro Nernstův i čerpací článek bude zemnicí uzel kyslíkové sondy připojen na potenciál +2,5 V. Hardware kontroléru se s tímto opatřením obejde beze zdroje záporného napětí.



Obr. 8: K návrhu obvodového řešení měření napětí a vnitřního odporu Nernstova článku.

Návrh obvodového řešení pro měření vnitřního odporu Nernstova článku je zobrazen na obr. 8. Referenční čerpací proud je do Nernst. článku dodáván přes rezistor  $R_{rp}$ . Kladný impulz pro měření velikosti vnitřního odporu článku  $R_i$  je dodáván přes rezistor  $R_H$  a aktivován tranzistorem  $Q_H$ .  $Q_H$  je otevřen z GPIO portu mikrokontroléru v případě potřeby aplikovat kladný měřicí impulz. Pro generaci záporného měřicího impulsu proudu slouží rezistor  $R_L$  a tranzistor  $Q_L$ . Potenciál zemnicího vývodu Nernst. článku je zvýšen o napětí zdroje  $V_V$ . Za běžných provozních podmínek je napětí Nernstova článku  $V_N$  udržováno PID regulátorem čerpacího proudu na hodnotě 450 mV, vnitřní odpor článku  $R_i$  je udržován PID regulátorem teploty článku na hodnotě 300  $\Omega$ . Z těchto podmínek bude vycházet návrh velikosti rezistorů  $R_H$ ,  $R_L$  a  $R_{rp}$ . Jiné podmínky nastávají pouze při ohřevu sondy a není třeba na ně nyní brát ohled. Úbytky napětí na tranzistorech budou při proudech řádů stovek  $\mu A$  zanedbatelné.

Velikost rezistoru  $R_{rp}$  lze vypočítat dle vztahu:

$$R_{rp} = \frac{V_{cc} - V_V - V_N}{I_{rp}} \quad (1)$$

Pro referenční čerpací proud  $I_{rp} = 20 \mu A$ ,  $V_{cc} = 5 V$ ,  $V_V = 2,5V$  a  $V_N = 0,45 V$  dostane  $R_{rp} = 102,5 k\Omega$ . Velikost proudu kladného měřicího impulsu  $I_H$  je dána součtem proudů rezistory  $R_{rp}$  a  $R_H$  při otevřeném tranzistoru  $Q_H$ :

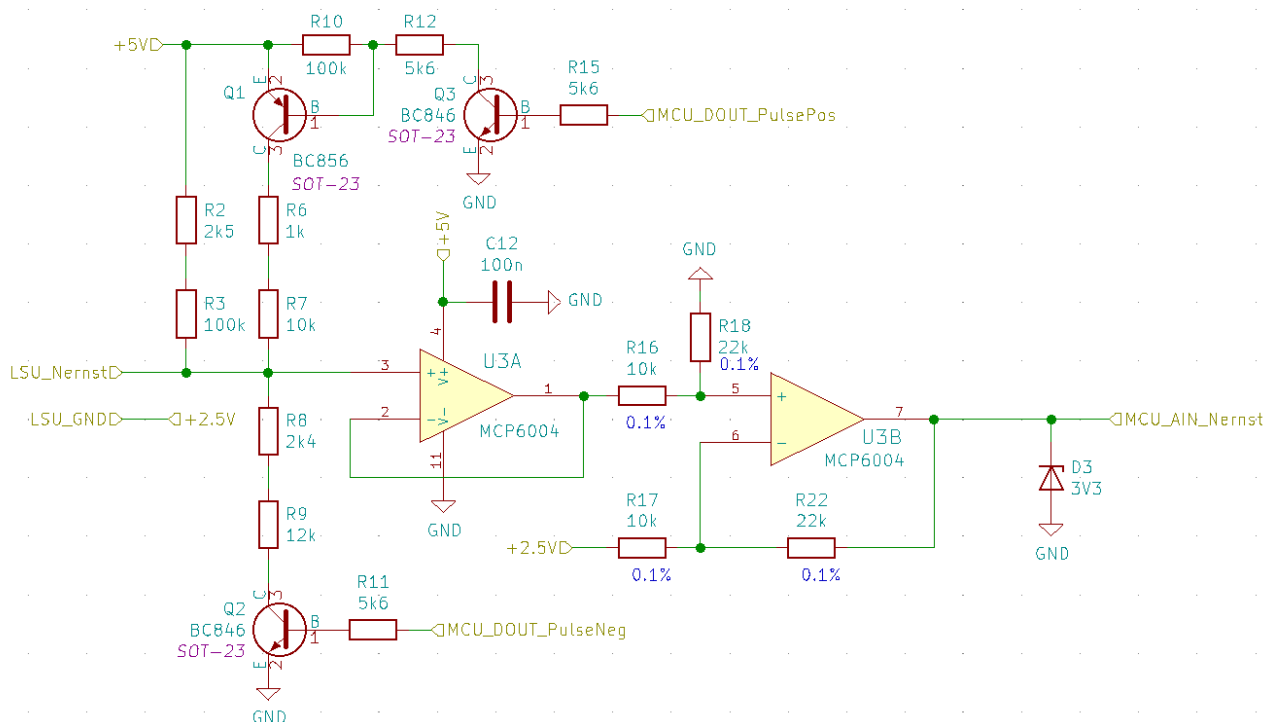
$$I_H = \frac{V_{cc} - V_V - V_N}{R_i + (R_{rp} \parallel R_H)} \quad (2)$$

Výrobce sondy LSU 4.9 dovoluje nejvyšší možný proud pro měření vnitřního odporu Nernst. článku 250  $\mu A$ . V návrhu použijeme proud o velikosti 200  $\mu A$ . Po vyjádření  $R_H$  ze vztahu (2) a dosazení  $I_H = 200 \mu A$  dostaneme velikost  $R_H = 11,02 k\Omega$ . Velikost proudu záporného měřicího impulsu  $I_L$  je dána součtem proudů rezistory  $R_{rp}$  a  $R_H$  při otevřeném tranzistoru  $Q_L$ :

$$I_L = \frac{\frac{R_L}{R_{rp} + R_L} \cdot V_{cc} - V_N - V_V}{R_i + (R_{rp} \parallel R_L)} \quad (3)$$

Referenční čerpací proud  $I_{rp}$  je nutné zachovat i po dobu měření vnitřního odporu článku, proto volíme velikost proudu záporného měřicího impulsu  $-180 \mu\text{A}$ . Po vyjádření  $R_L$  ze vztahu (3) a dosazení  $I_L = -180 \mu\text{A}$  dostaneme velikost  $R_L = 14,442 \text{ k}\Omega$ .

Velikost napětí  $V_N$  bude dále převedena do číslicového formátu. Rozsah pracovního napětí Nernst. článku je od 0 V do 1 V. K nejvyššímu možnému napětí Nernstova článku je nutné ještě přičíst úbytek napětí na Nernst. článku při přiložení kladného měřicího impulsu. Počítejme tedy s rozsahem měřeného napětí 0 až 1,5 V. Pro plné využití rozsahu A/D převodníku s referenčním napětím 3,3 V jej bude nutné zesílit zesilovačem o zisku 2,2. V uzlu  $V_N$  je k napětí Nernst. článku ještě přičteno napětí  $V_V$  o velikosti 2,5 V. Toto ofsetové napětí bude odstraněno použitím rozdílového zesilovače.



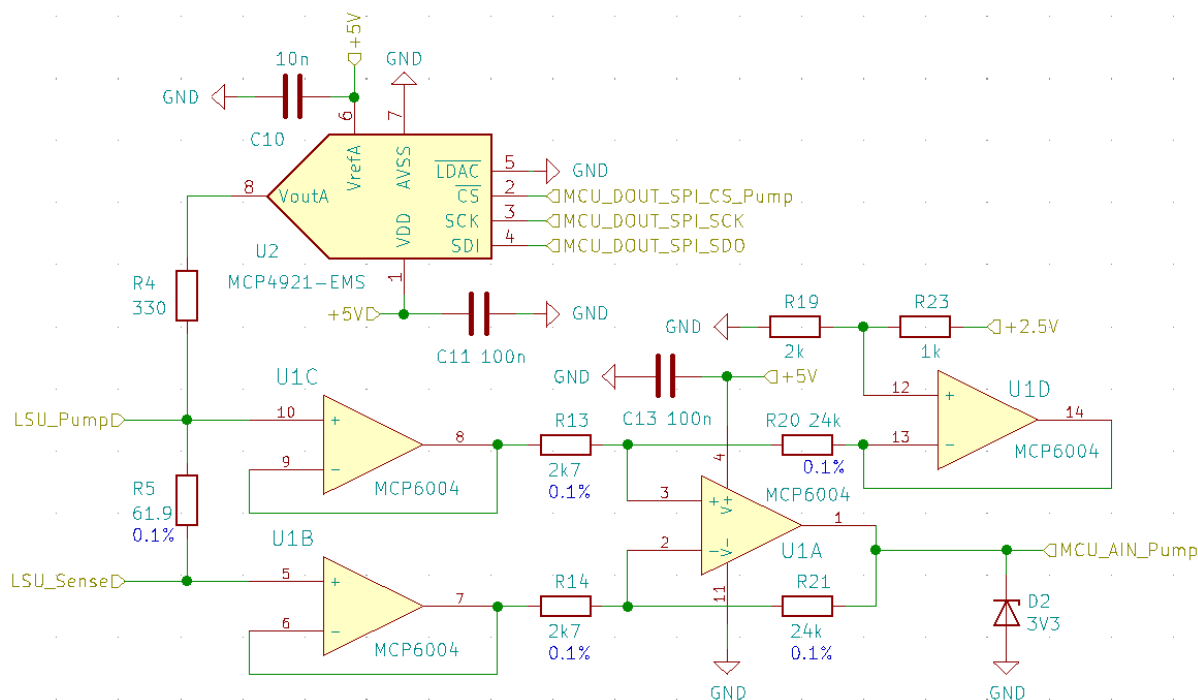
Obr. 9: Konečné řešení obvodů pro měření napětí a vnitřního odporu Nernst. článku.

Na obr. 9 je zobrazeno konečné řešení obvodů pro měření napětí a vnitřního odporu Nernstova článku. Článek je zapojen mezi vývody označené „LSU\_Nernst“ a „LSU\_GND“. Vývody, označené „MCU\_DOUT\_PulsePos/Neg“ budou připojeny na GPIO piny mikrokontroléru a umožňují otevřít tranzistory Q1, popř. Q2, a tím aktivovat kladný, popř. záporný proudový impuls pro měření vnitřního odporu článku. Napětí Nernstova článku je sledováno napětěovým sledovačem

U3A. Rozdílový zesilovač U3B odstraní posun potenciálu Nernst. článku a Nernstovo napětí zesílí na úroveň, odpovídající plnému rozsahu A/D převodníku mikrokontroléru. Rezistory R16, R17, R18 a R22, které určují zesílení rozdílového zesilovače, musí být velmi přesné. Před osazením budou vybrány z dávky měření přesné kusy. Vzhledem k absenci záporného napájecího napětí bude použit rail-to-rail operační zesilovač. OZ nemusí být rychlý (frekvence měření vnitřního odporu článku bude činit 4 kHz, mezní frekvence OZ postačí alespoň 12 kHz), měl by však disponovat nízkými nesymetriemi, ofsety a drifty a také nízkou tvorbou šumu. Zenerova dioda D3 chrání vstup mikrokontroléru proti napětí vyššímu, než 3,3 V. Ke svorce, označené „MCU\_AIN\_Nersnt“ bude připojen analogový vstup mikrokontroléru.

## 5.2 Generování a měření čerpacího proudu

Požadovaná velikost čerpacího proudu v rozsahu 3 mA až  $-3\text{mA}$  bude vypočítána regulátorem v softwaru mikrokontroléru. Čerpací proud je možné generovat interním D/A převodníkem na čipu mikrokontroléru, výstupní napětí je potom nutné z důvodu potřeby záporného proudu zesílit operačním zesilovačem. Konečný návrh, zobrazený na obr. 10, počítá s použitím externího D/A převodníku, jenž má lepší statické i dynamické vlastnosti a výstupní OZ je součástí jeho čipu, není tedy potřeba dodatečného místa na plošném spoji.



Obr. 10: Konečné řešení obvodů pro generování a měření čerpacího proudu.

Čerpací proud je generován D/A převodníkem U2. Rezistor R4 je navržen tak, aby výstup D/A převodníku pracoval v plném rozkmitu napětí při rozkmitu čerpacího proudu 3 mA až -3mA. Jeho velikost je možné vypočítat dle vztahu:

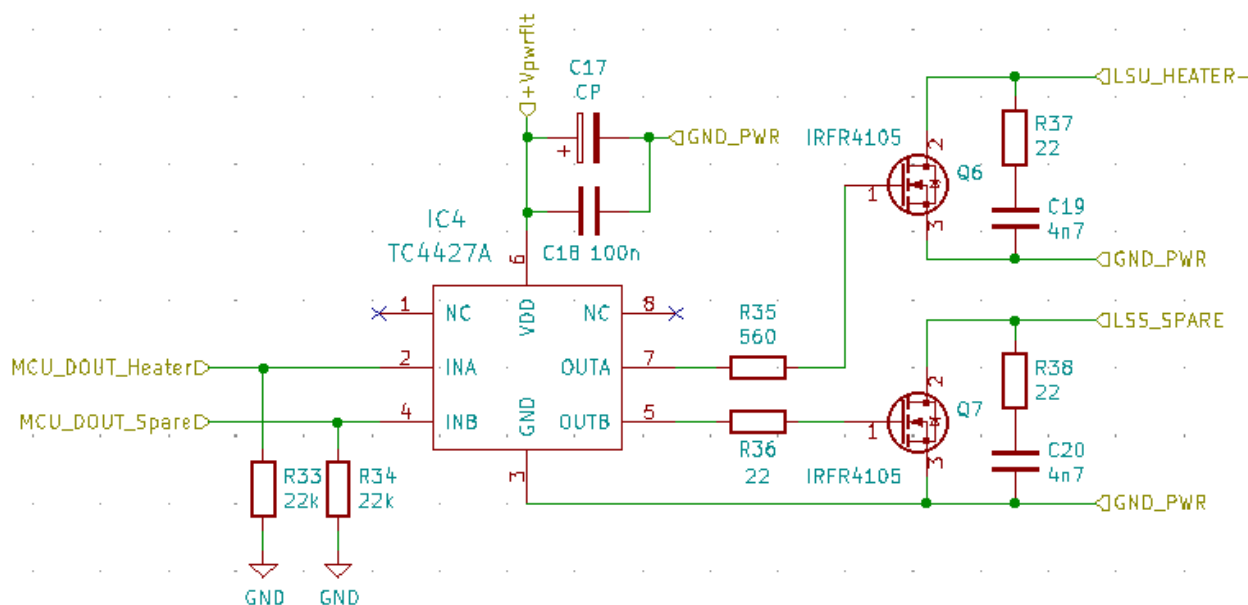
$$R_4 = \frac{V_{ref} - V_V - V_{PM}}{I_{PM}}, \quad (4)$$

kde  $V_{ref}$  je referenční napětí D/A převodníku (5 V),  $V_V$  potenciál uzemnění čerpacího článku (2,5 V),  $V_{PM}$  napětí na čerpacím článku při plném čerpacím proudu  $I_{PM}$  (1,5 V při 3 mA). Po dosazení dostaneme velikost  $R_4 = 330 \Omega$ . Čerpací proud je dále veden na čerpací článek dvěma vodiči označenými „LSU\_Pump“ a „LSU\_Sense“. Mezi těmito vodiči je v konektoru kyslíkové sondy zapojen laserem trimovaný kalibrační bočník. Paralelně s ním je ještě zapojen bočník R5, dle doporučení výrobce. Napětí na bočnicích je sledováno dvěma napěťovými sledovači U1B a U1C. Dále je zesíleno rozdílovým zesilovačem U1A. Potřebný zisk rozdílového zesilovače musí být takový, aby byl využit plný rozsah následujícího A/D převodníku. Vypočítáme jej:

$$A_{U1A} = \frac{V_{refADC}}{R_5 \cdot \Delta I_p}, \quad (5)$$

kde  $V_{refADC}$  je referenční napětí A/D převodníku (3,3 V) a  $\Delta I_p$  je rozkmit čerpacího proudu (6 mA). Po dosazení dostaneme  $A_{U1A} = 8,89$  a dosáhneme jej zvolením hodnoty rezistorů  $R_{13} = R_{14} = 2,7 \text{ k}\Omega$  a  $R_{20} = R_{21} = 24 \text{ k}\Omega$ . Rezistory musí být velmi přesné a budou opět vybrány z dávky měření. Velikost zesílení  $A_{U1A}$  bude zadána v softwaru jako kalibrační parametr a bude ji možné individuálně nastavit podle skutečných hodnot rezistorů. Vzhledem k potřebě měření obou polarit čerpacího proudu musí být k výstupnímu napětí přidán ofset o velikosti jedné poloviny rozsahu A/D převodníku. Ofsetové napětí o velikosti 1,557 V dodává napěťový dělič, sestavený z rezistorů R19 a R23. Rezistory nemusí být výjimečně přesné, kalibrace nuly měření čerpacího proudu bude provedena softwarově. Výstupní napětí, odpovídající čerpacímu proudu, je připojeno vývodem „MCU\_AIN\_Pump“ k analogovému vstupu mikrokontroléru. D/A převodník U2 je řízen z mikrokontroléru po sériové sběrnici SPI.

### 5.3 Výkonové spínače



Obr. 11: Řešení výkonových spínačů.

Vyhřívací odporové tělísko kyslíkové sondy bude řízeno pulzně-šířkovou modulací o frekvenci 2,5 kHz. Nejnižší odpor tělíska ve studeném stavu činí 1,8  $\Omega$ , napájeno bude z palubní sítě vozidla napětím 9 ... 16 V. Nejvyšší okamžitý proud tělískem dosáhne 9 A. Požadavky na koncový spínací tranzistor nejsou vysoké, postačí  $V_{DSmax} = 30$  V,  $I_{Dmax} = 10$  A,  $R_{DS(on)} < 0,5$   $\Omega$ . Z důvodu úspory místa na plošném spoji volíme zmenšené pouzdro typu TO-252 (DPAK). Vzhledem k nízkému pracovnímu napětí periferií mikrokontroléru (3,3 V) nelze použít MOSFET ovládaný logickou úrovní. Bude použit klasický MOSFET ve spolupráci s budičem řídicí elektrody.

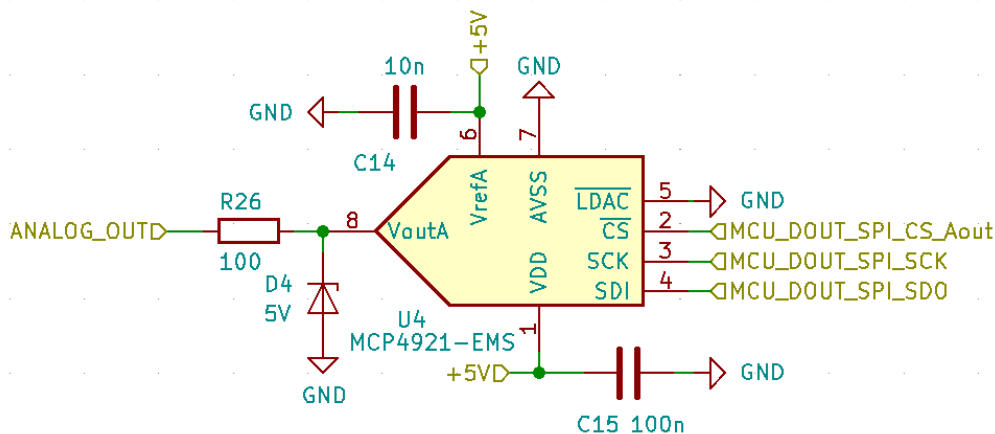
Vodiče k vyhřívacímu článku sondy vedou ve společném svazku s vodiči k Nernstovu a čerpacímu článku. Strmé hrany pulzně-šířkové modulace způsobují přenos rušivých kmitů induktivní a kapacitní vazbou z vodičů vyhřívacího tělesa do měřících vodičů. Z tohoto důvodu je nutné omezit strmost hran pulzně-šířkové modulace topného tělíska. Omezení strmosti je provedeno rezistorem R35, zapojeným do řídicí elektrody spínacího MOSFETu. Rezistor tvoří společně s kapacitou řídicí elektrody tranzistoru integrační článek, který sníží rychlost nárůstu i poklesu napětí na řídicí elektrodě tranzistoru. Spínací tranzistory jsou také vybaveny RC filtry mezi vývody D a S, které tlumí zákmitý vznikající odpojováním induktivních zátěží. Vzhledem k vyšším spínacím

proudům mají výkonové spínače oddělené uzemnění, aby nedocházelo k ovlivňování zemnění měřících obvodů úbytky napětí. Rezistory R33 a R34 zajišťují nízkou logickou úroveň na vstupech budiče MOSFETů v době inicializace hardwaru mikrokontroléru. GPIO piny mikrokontroléru jsou po jeho zapnutí nastaveny ve výchozím stavu jako číslicové vstupy. Bez pull-down rezistorů by po tuto dobu byla úroveň vstupů budiče neurčitá.

Kontrolér bude vybaven jedním univerzálním výkonovým spínacím výstupem („LSS\_SPARE“), ovládaným z mikrokontroléru. Může být použit pro ovládání libovolného akčního členu dle potřeby.

#### 5.4 Analogový výstup

Součástí kontroléru je analogový výstup, ovládaný z mikrokontroléru. V provozu bude používán např. pro simulaci výstupu úzkopásmové kyslíkové sondy. Může být rovněž použit pro jednoduché zobrazení naměřených hodnot obyčejným voltmetrem (např. součiniteli přebytku vzduchu  $\lambda = 1,234$  odpovídá výstupní napětí o velikosti 1234 mV). Pro analogový výstup je použit externí D/A převodník, připojený sběrnici SPI k mikrokontroléru.



Obr. 12: D/A převodník pro univerzální analogový výstup.

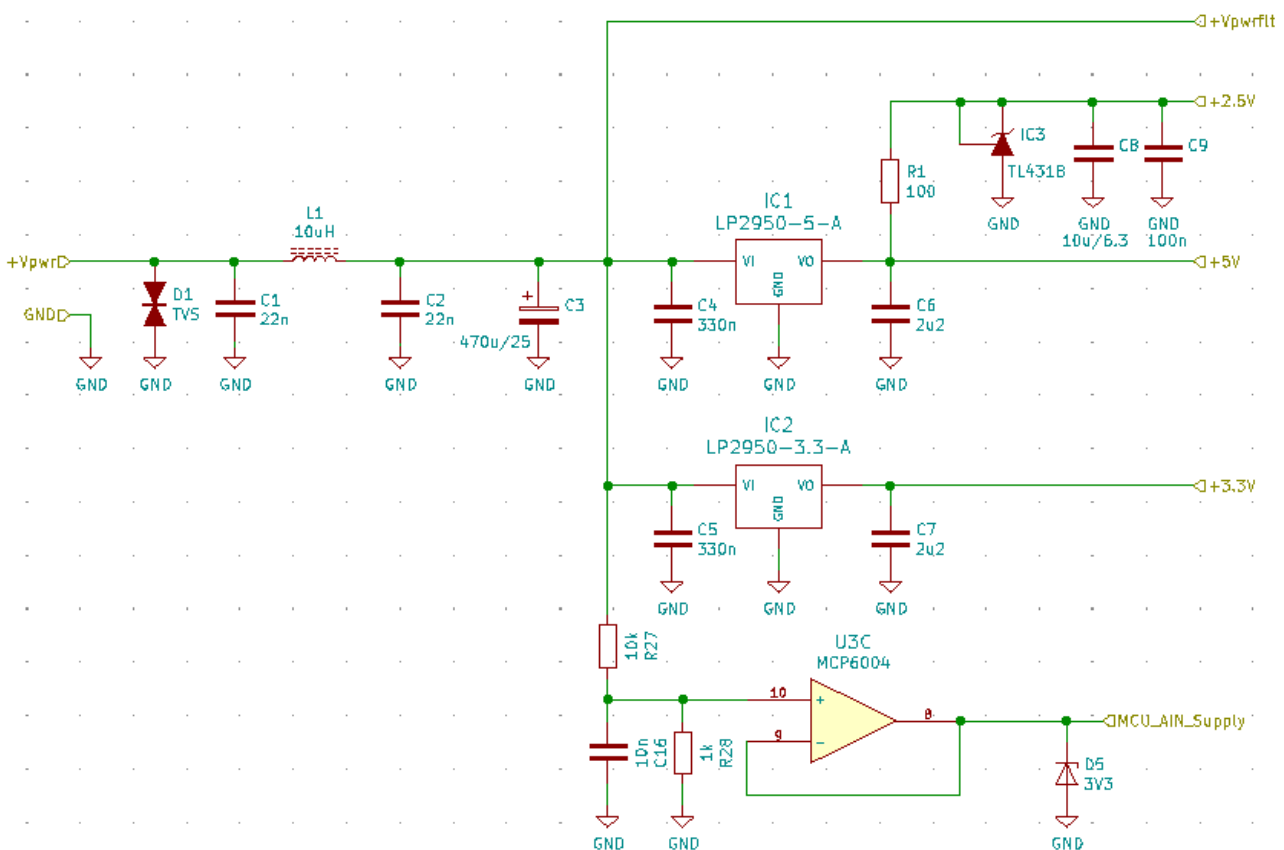


## 5.5 Příprava napájení systémů kontroléru

Elektronické systémy kontroléru vyžadují několik větví napájecího napětí:

- +5 V pro operační zesilovače a D/A převodníky.
- +3,3 V pro mikrokontrolér.
- +2,5 V pro virtuální uzemnění kyslíkové sondy.

Všechna napětí musí být stabilizována s odchylkou nejvýše  $\pm 1$  %. Musí být zajištěna minimální teplotní závislost výstupních napětí a nízký šum.



Obr. 13: Zdroj napájení pro systémy kontroléru.

Kontrolér bude připojen k vozidlové napájecí síti svorkami +Vpwr a GND. TVS dioda D1 chrání kontrolér před přepětím. Filtr, tvořený  $\pi$ -článkem C1, L1 a C2 brání průniku vysokofrekvenčního rušení z napájecí sítě vozidla. Napájecí napětí +3,3 V a +5 V je stabilizováno monolitickými stabilizátory typu LP2950-A, které disponují velmi malou tolerancí výstupního napětí ( $\pm 0,5$  %).

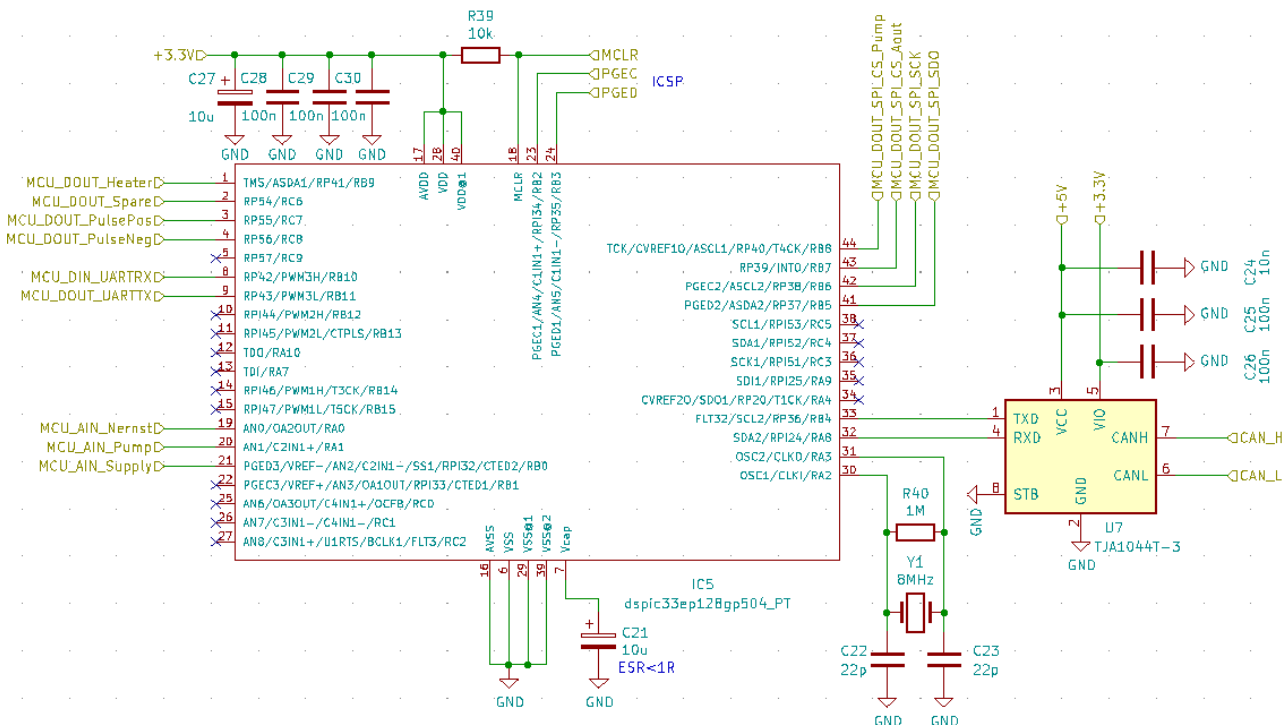
Zdroj napětí +2,5 V musí být schopen proud dodávat i přijímat (kladný a záporný čerpací proud), proto je volen stabilizátor typu TL431B. Vykazuje rovněž nízkou toleranci výstupního napětí ( $\pm 0,5\%$ ), nízký šum i teplotní koeficient změny výstupního napětí. Odporový dělič R28/R27 slouží k měření velikosti napájecího napětí A/D převodníkem mikrokontroléru. Kapacitor C16 tvoří dolní propust, bránící průchodu vysokých frekvencí na vstup operačního zesilovače a A/D převodníku.

## 5.6 Mikrokontrolér a CAN transceiver

Systémové požadavky na použitý mikrokontrolér:

- Přesné a rychlé A/D převodníky s rozlišením alespoň 12 bitů.
- DSP jádro pro implementaci efektivních a rychlých PID regulátorů.
- Alespoň 16-bitové jádro o frekvenci alespoň 100 MHz.
- Hardware pro sběrnici CAN 2.0 B na čipu.
- OC kanály pro automatické generování impulzů.

Byl vybrán digitální signálový kontrolér od firmy Microchip, typu dsPIC33EP128GP504.



Obr. 14: Zapojení mikrokontroléru a CAN transceiveru.

## 6 Návrh softwaru nízké vrstvy

Hlavní úlohy softwaru nízké vrstvy jsou:

- Inicializace hardwaru mikrokontroléru.
- Provedení A/D převodů a číslicové filtrace signálů. Poskytnutí výsledků převodů a filtrace pro software vyšší vrstvy ve fyzikálních jednotkách měřených veličin.
- Zajištění D/A převodů externími D/A převodníky, řízenými pomocí sběrnice SPI.
- Generování impulsů pulzně-šířkového řízení výkonu ohřevu kyslíkové sondy pomocí OC.
- Zajištění sériové komunikace se zobrazovacím, záznamovým a vyhodnocovacím zařízením pomocí sběrnice RS232 a CAN 2.0 B, s použitím DMA. (Sběrnice CAN v současné době ještě nebude implementována, je plánována v rámci budoucího vývoje).

### 6.1 Inicializace hardwaru mikrokontroléru

Je prováděna ve zdrojovém souboru *HWD\_Init.c*. Obsahuje mimo jiné nastavení konfiguračních bitů mikrokontroléru v paměti flash. Konfigurační bity jsou načteny ihned po připojení mikrokontroléru na napájecí napětí a určují nejdůležitější nastavení hardwaru, které je nezbytné ještě před spuštěním běhu softwaru. Nastavení konfiguračních bitů je provedeno následujícím způsobem:

- Jako počáteční zdroj hodinového kmitočtu je nastaven interní RC oscilátor o frekvenci 7,37 MHz bez PLL.
- Je povoleno následné přepnutí zdroje hodinového signálu z vnitřního RC oscilátoru na krystalový oscilátor s PLL za běhu softwaru.
- Je vypnut port JTAG. K programování a připojení debuggeru bude sloužit rozhraní ICSP.
- Je vypnut watchdog.
- Primární oscilátor je aktivován v módu XT (krystal o kmitočtu 3.5 MHz až 10 MHz).

Vlastní inicializaci hardwaru provádí procedura `HWD_Init()`, volaná ihned po vstupu do funkce `main()`. Zde je provedeno nastavení PLL pro výstupní kmitočet 140 MHz a přepnutí generátoru hodinového kmitočtu na krystalový oscilátor s PLL. Dále jsou konfigurovány piny bran

mikrokontroléru. Jsou nastaveny tři analogové vstupy pro měření napětí A/D převodníkem. Pomocí systému PPS jsou přiřazeny vstupní a výstupní piny k periferiím UART, SPI, OC a CAN. Všechny ostatní piny bran, včetně nepoužitých pinů, jsou nastaveny jako digitální výstupy GPIO. Po nastavení konfigurace pinů bran je PPS zamčeno. Tím je znemožněno nechtěné překonfigurování pinů během chodu softwaru.

Následuje inicializace A/D převodníku. Zdrojem hodinového kmitočtu pro A/D převodník je hodinová sběrnice pro periferie o frekvenci 70 MHz. Kmitočet je dále snížen děličem kmitočtu na 7,77 MHz. Rozlišení A/D převodníku je nastaveno na 12 bitů. Doba vzorkování trvá 10 period hodinového kmitočtu a je řízena automaticky vnitřním časovačem.

Kanál DMA0 je použit pro přenos dat o délce 8 bytů z TX bufferu v paměti RAM (`App_DiagComDrv_UART1TXBuf[8]`) do vysílacího registru periferie UART1. Kanál DMA1 je konfigurován pro přenos dat z přijímacího registru UART1 do přijímacího bufferu v RAM (`App_DiagComDrv_UART1RXBuf[8]`).

Rychlost sérového přenosu linky RS232, sloužící pro komunikaci s PC, je nastavena na 9600 baud.s<sup>-1</sup>. Periferní modul SPI2, použitý pro řízení externích D/A převodníků, je nastaven na přenosovou frekvenci 10Mhz. D/A převodníky budou na plošném spoji umístěny v těsné blízkosti mikrokontroléru, parazitní kapacity a indukčnosti vodivých cest budou malé, může tak být použita nejvyšší podporovaná přenosová rychlost.

Dále je konfigurován modul OC1, který bude generovat PWM pulzy pro řízení napětí vyhřívacího tělesa kyslíkové sondy. Hodinový kmitočet OC1 bude odvozen z hodinové sběrnice periferií o frekvenci 70 MHz, bez dělení.

Hardwarový časovač T1 bude sloužit jako časová základna operačního systému. Jeho frekvence bude nastavena na 70 MHz. Časovač bude při přetečení generovat požadavek na přerušení s prioritou 2 (2. nejnížší), ve kterém poběží řízení operačního systému v softwaru vyšší vrstvy. Počáteční čas je nastaven na 20  $\mu$ s a poté je globálně aktivováno přerušení. Za tuto dobu proběhne následná inicializace softwaru vyšší vrstvy a s prvním přerušením T1 bude startovat cyklický operační systém.

## 6.2 Vstupně-výstupní funkce softwaru nízké vrstvy

Nachází se ve zdrojovém souboru *HWD\_IO.c*.

Funkce `HWD_ADC1_convert_Nernst()` provede pořízení tří vzorků napětí Nernstova článku, jejich A/D převod, filtraci (aritmetický průměr) a přepočítání výsledku na skutečné napětí ve fyzikálních jednotkách. Přepočítání filtrovaného výsledku A/D převodu na fyzikální jednotky je vykonáno dle vztahu:

$$V_N = AD_{RES} \frac{V_{refADC}}{A \cdot (2^n - 1)} + c, \quad (6)$$

kde  $V_N$  je napětí Nernst. článku [V],  $AD_{RES}$  je filtrovaný výsledek A/D převodu,  $V_{refADC}$  je referenční napětí A/D převodníku (3,3 V),  $A$  je zisk předřazeného zesilovače (2,2),  $n$  je rozlišení A/D převodníku (12 bitů),  $c$  je konstanta, kompenzující offset předřazeného zesilovače. Vzhledem k absenci FPU je nutné uvažované veličiny vhodně kódovat a výpočty provádět v celočíselné aritmetice. Po dosazení konstantních veličin do vztahu (6) jej můžeme zjednodušit:

$$V_N = AD_{RES} \cdot 3,663 \cdot 10^{-4} + c \quad (7)$$

Pro veličinu  $V_N$  zvolíme kódování  $0,1 \text{ mV} \cdot \text{bit}^{-1}$  a provedeme úpravu pro výpočet v celočíselné aritmetice:

$$V_N = \frac{AD_{RES} \cdot 3663}{10^3} + c \quad (8)$$

Překladač jazyka C pro mikrokontroléry dsPIC v neplacené verzi používá pro násobení a dělení softwarové smyčky, ačkoliv je mikrokontrolér vybaven strojovými instrukcemi pro znaménkové i neznaménkové násobení i dělení celočíselných datových typů. Výpočet softwarovými smyčkami je z hlediska délky výpočetního času v této aplikaci nepoužitelný. Použití strojových instrukcí pro dělení a násobení je však možné vynutit pomocí „builtin“ direktiv i při použití neplacené verze překladače. Implementace vztahu (8) bude poté vypadat následovně:

```
result = (__builtin_divud((__builtin_muluu(ADRes, 3663)), 1000));
```

Funkce `HWD_ADC1_convert_Supply()` slouží pro měření velikosti napájecího napětí. Její činnost je shodná s činností funkce `HWD_ADC1_convert_Nernst()`, pouze s rozdílem v zisku vstupního zesilovače (0,09091) a kódování výstupní veličiny ( $1\text{mV}\cdot\text{bit}^{-1}$ ).

Funkce `HWD_ADC1_convert_IPump()` slouží pro měření okamžitého čerpacího proudu. Po sejmutí a převedení tří vzorků A/D převodníkem je opět provedena filtrace aritmetickým průměrováním a přepočítání na fyzikální rozměr veličiny podle vztahu:

$$I_p = AD_{RES} \frac{V_{refADC}}{A \cdot R_B \cdot (2^n - 1)} - c, \quad (9)$$

kde  $R_B$  je odpor měřicího bočníku čerpacího proudu ( $61.9 \Omega$ ),  $A$  je zisk předřazeného zesilovače (8.88889) a  $c$  je ofset, který posouvá nulu měřeného proudu (odporový dělič R23/R19 v kap. 5.2). Výsledek je tedy znaménkový a záporné číslo reprezentuje záporný čerpací proud. Kódování výstupu je  $1 \mu\text{A}\cdot\text{bit}^{-1}$ . Výsledný vztah po dosazení konstantních veličin a úpravě pro celočíselné operace bude vypadat:

$$I_p = \frac{AD_{RES} \cdot 14646}{10^4} - c \quad (10)$$

Velikost kalibrační konstanty  $c$  bude zjištěna měřením při kalibraci vyrobeného kontroléru a uložena do paměti flash. Konstanta  $c$  rovněž vykompenzuje ofsety operačních zesilovačů v měřicím řetězci čerpacího proudu. Konstanta 14646 bude zadána v softwaru jako kalibrační parametr a bude ji možné individuálně nastavit podle skutečné hodnoty zesílení rozdílového zesilovače.

Procedura `HWD_PumpDAC_SetUPump()` nastaví na výstupu externího D/A převodníku požadované čerpací napětí. Software vyšší vrstvy jej poskytne přímo v podobě kódu pro D/A převodník, není zde důvod přepočítávat údaj na fyzikální jednotky a zpět. Po sběrnici SPI je do D/A převodníku posláno 16-bitové číslo, které obsahuje 12-bitový kód pro vlastní převod, a čtyři bity řídicí. Řídicí bity určují referenční napětí, umožňují aktivovat / deaktivovat výstup D/A převodníku (deaktivovaný výstup je ve stavu vysoké impedance) a umožňují nastavit zdvojený buffer pro referenční napětí. Řídicí bity jsou nastaveny pro referenční napětí o velikosti 5 V, zdvojený buffer referenčního napětí je vypnutý a výstup D/A převodníku je aktivován.

Procedura `HWD_PumpDAC_ResetUPump()` odpojí čerpací proud od čerpacího článku deaktivováním výstupu externího D/A převodníku. Zároveň do A/D převodníku pošle kód (0x7FF) odpovídající velikosti jedné poloviny referenčního napětí (2,5 V). Při tomto napětí neteče téměř žádný čerpací proud a po opětovném připojení výstupu D/A převodníku nedojde k přechodovému ději, jenž by mohl způsobit např. rozkmitání PID regulátoru čerpacího proudu v softwaru vyšší vrstvy.

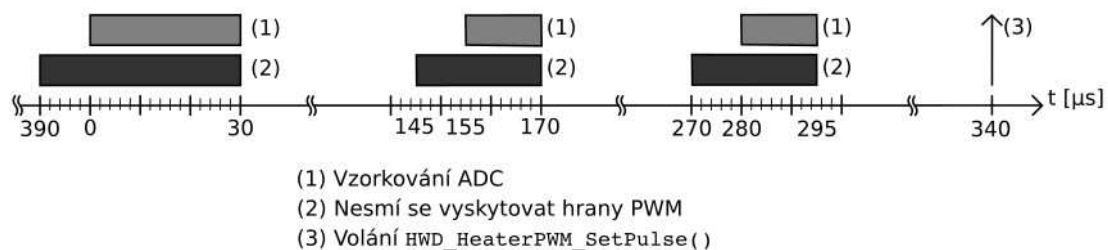
Procedura `HWD_OUTDAC_SetVoltage()` nastaví požadované napětí na analogovém výstupu kontroléru pomocí externího D/A převodníku. Napětí poskytne software vyšší vrstvy s kódováním  $1 \text{ mV.bit}^{-1}$ . Přepočítání napětí na kód pro D/A převodník proběhne podle vztahu:

$$D = \frac{V_{out} \cdot (2^n - 1)}{V_{refDAC}}, \quad (11)$$

kde  $D$  je kód pro D/A převodník,  $V_{out}$  je požadované výstupní napětí,  $n$  je rozlišení D/A převodníku (12 bitů), a  $V_{refDAC}$  referenční napětí D/A převodníku (5 V). Procedura `HWD_OUTDAC_ResetVoltage()` slouží k přepnutí analogového výstupu kontroléru do stavu vysoké impedance.

Procedura `HWD_HeaterPWM_SetPulse()` má za úkol vytvořit impuls pro aktivaci vyhřívacího tělíska kyslíkové sondy. Délka impulsu je vypočítána z poměrné doby otevření (duty cycle), kterou poskytne software vyšší vrstvy. Výkonové vodiče k topnému tělísku vedou ke kyslíkové sondě ve společném kabelovém svazku s měřicími vodiči. Strmé hrany pulzně-šířkové modulace způsobují přenos rušivých signálů kapacitní a induktivní cestou z výkonových vodičů do měřicích vodičů. Proto impuls pro aktivaci vyhřívacího tělíska musí být vygenerován takovým způsobem, aby nedocházelo k překrývání hran impulsu s okamžiky vzorkování měřených signálů A/D převodníkem. Veškeré činnosti řídicího systému kyslíkové sondy se cyklicky opakují s periodou 400  $\mu\text{s}$ . Uvnitř každé této periody operační systém spouští jednotlivé činnosti v definovaném pořadí a čase. Procedura `HWD_HeaterPWM_SetPulse()` bude spouštěna v 340. mikrosekundě cyklu. Frekvence PWM bude synchronní s frekvencí operačního systému, tj. 2,5 kHz. Operační systém bude spouštět rovněž vzorkování měřených signálů, v časech 0 – 30  $\mu\text{s}$ , 155 – 170  $\mu\text{s}$  a 280 – 295  $\mu\text{s}$ . Uvnitř těchto intervalů se nesmí vyskytovat náběžné, ani sestupné hrany PWM vyhřívacího tělíska. Hrany se nesmí vyskytovat rovněž 10  $\mu\text{s}$  před těmito intervaly, aby stačily odeznít

přechodné děje před začátkem vzorkování. Každý impuls pro sepnutí vyhřívacího tělíska je zvlášť analyzován a koliduje-li se vzorkováním A/D převodníku, je posunut (zpožděn) tak, aby se jeho hrany vzorkování vyhnuly. K vytváření jednotlivých impulsů se výborně hodí OC periferie v módu „single-shot“ – generování jednoho impulsu. OC kanálu je nastaveno zpoždění impulsu a délka impulsu. Kanál je spuštěn a impuls poté vygeneruje, bez potřeby softwarového zásahu. Nejsou nutná žádná přerušení. Časový diagram vzorkování A/D převodníku a generování PWM impulsů pro vyhřívací těleso zobrazuje obr. 15:



Obr. 15: Časový diagram vzorkování A/D převodníku a generování PWM impulsů.

Délka impulsu  $L$  (počet taktů OC časovače) je vypočtena z požadované poměrné doby otevření dle vztahu:

$$L = D_C \cdot \frac{T_{PWM}}{100 T_{OC}}, \quad (12)$$

kde  $T_{PWM}$  je perioda PWM (400  $\mu$ s),  $D_C$  je požadovaná poměrná doba otevření [%] a  $T_{OC}$  je perioda jednoho taktu OC časovače (14,2857 ns; časovač je taktován frekvencí 70 MHz). V případě kódování  $D_C$  0,01  $\% \cdot \text{bit}^{-1}$ , dostaneme po dosazení konstantních veličin a úpravě vztahu pro celočíselné operace:

$$L = \frac{D_c \cdot 14}{5} \quad (13)$$

Funkce `HWD_CheckUARTRXBuffer()` otestuje příznak `DMA1IF`. Tento značí dokončení datového přenosu kanálu `DMA1`, tj. přijetí paketu o délce 8 bytů po sběrnici `RS232`. V případě aktivního příznaku funkce příznak smaže (pro příjem dalšího paketu) a vrátí hodnotu 1.



## 7 Návrh softwaru vyšší vrstvy

Hlavní úlohy softwaru vyšší vrstvy:

- Výpočet vnitřního odporu Nernstova článku a výpočet teploty substrátu sondy.
- Regulace teploty substrátu sondy.
- Regulace čerpacího proudu.
- Měření čerpacího proudu.
- Výpočet AFR a  $\lambda$ .
- Zajištění komunikace na protokolové úrovni s diagnostickým, zobrazovacím a záznamovým zařízením.
- Diagnostika závad měřícího systému.

### 7.1 Inicializace softwaru vyšší vrstvy

Zajišťuje inicializaci PID regulátorů. PID regulátory, speciálně navržené pro digitální signálový kontrolér (viz. kap. 7.7), používají v algoritmu regulátoru koeficienty a, b, c namísto koeficientů P, I, D. Během inicializace proběhne vypočítání koeficientů a, b, c na základě zadaných velikostí P, I, D. Proběhne předání ukazatelů na vstupní a výstupní veličiny do struktur PID regulátorů. V rámci inicializace je také nastavena globální proměnná velikosti napájecího napětí na počáteční hodnotu 12 V. Hodnota bude ihned po prvním měření napájecího napětí aktualizována. Nemůže však před startem softwaru vyšší vrstvy zůstat nulová, ve vztahu (16) by došlo k dělení nulou. Inicializaci softwaru vyšší vrstvy vykonává procedura `App_Init()`. Je spouštěna po dokončení inicializace hardwaru mikrokontroléru.

### 7.2 Operační systém

Pro zajištění časování a synchronizace jednotlivých úkolů řídicího systému je software vybaven jednoduchým operačním systémem. Základní perioda všech úloh operačního systému je 400  $\mu$ s. Tato doba je dále rozdělena na 5 úseků (fází), viz. obr. 16 a tab. 1. V každé fázi jsou spouštěny v definovaném pořadí jednotlivé procedury. Operační systém obsahuje jednoduchý stavový program, který spouštění procesů řídí. Jeho základem je časovač T1, jenž vyvolá při každém přetečení přerušení. Procedura tohoto přerušení je naprogramována ve zdrojovém souboru `App_ISR_T1.c`.

V proceduře přerušení dochází k nastavení stavové proměnné `App_ISR_T1_OSStage` na stav následující fáze operačního systému. Časovač T1 je aktualizován délkou následující fáze operačního systému. Délky jednotlivých pěti fází jsou určeny kalibračním datovým polem `CAL_OSStagesLength[]` a jsou nastaveny na velikosti 30, 125, 125, 60 a 60  $\mu\text{s}$ . Na základě stavu proměnné `App_ISR_T1_OSStage` jsou spouštěny jednotlivé balíky funkcí a procedur ve zdrojovém souboru `App_Main.c`.

Některé činnosti není třeba spouštět každý cyklus operačního systému, nýbrž např. jen každý desátý. Spouštění těchto procesů řídí procedura `App_OS()` ve zdrojovém souboru `App_OS.c`. Je volána ve 2. fázi cyklu operačního systému. Zapisuje globální příznaky, ovládající aktivaci procesů, které nejsou spouštěny každý cyklus OS (400  $\mu\text{s}$ ). Příznak pro aktivaci procesů s periodou 4 ms `App_OS_TaskActive_4ms` je aktivován každý 10. cyklus operačního systému, příznak `App_OS_TaskActive_100ms` je aktivován každý 250. cyklus OS apod. Procedura `App_OS()` také poskytuje systémový čas v jednotkách sekund, potřebný pro následující funkce softwaru vyšší vrstvy.



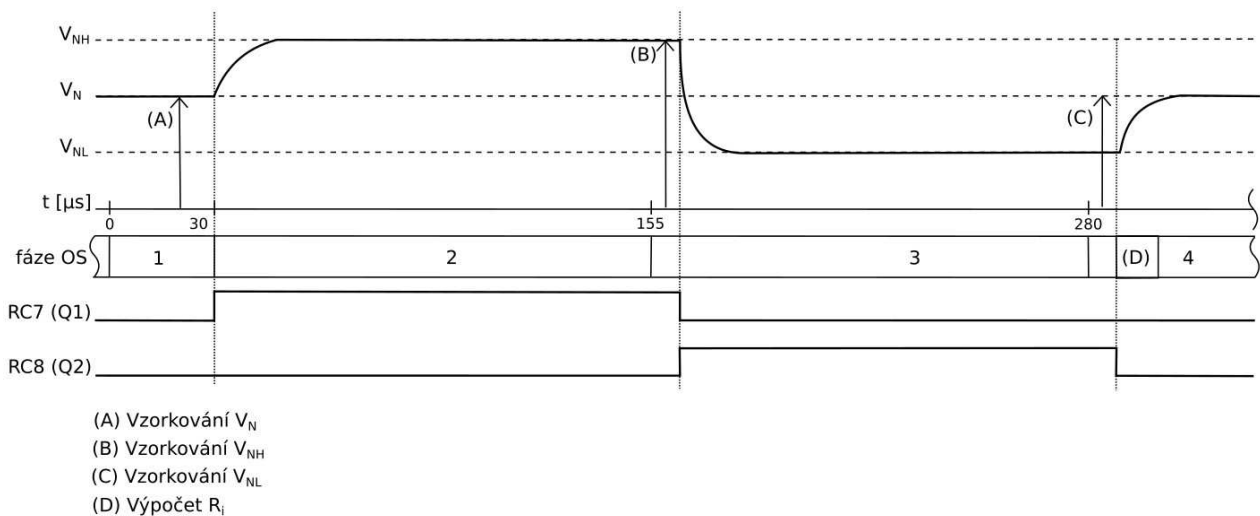
Obr. 16: Časový diagram fází operačního systému.

Tab. 1: Detailní rozvrh a časování úloh softwaru kontroléru kyslíkové sondy.

Fáze OS	Délka fáze	Procesy / činnosti	Funkce / Procedury / Příkazy
1	30 $\mu$ s	Vzorkování napětí Nernst. článku, A/D převod, filtrace, přepočet na fyzikální jednotky (15 $\mu$ s).	HWD_ADC1_Convert_Nernst()
		Vzorkování čerpacího proudu, A/D převod, filtrace, přepočet na fyzikální jednotky (15 $\mu$ s).	HWD_ADC1_Convert_IPump()
2	125 $\mu$ s	Generování náběžné hrany kladného impulzu pro měření vnitřního odporu Nernstova článku.	HWD_START_RI_HIGH_PULSE
		Řízení úloh OS s periodou > 400 $\mu$ s.	App_OS()
		PID regulátor čerpacího proudu.	App_PumpControl()
		Výpočet AFR a $\lambda$ .	App_AFRLambdaCalc()
		Nastavení výstupního napětí analog. výstupu.	App_SetDACOut()
3	125 $\mu$ s	Vzorkování napětí Nernst. článku při přiloženém kladném měřicím impulzu, A/D převod, filtrace, přepočet na fyzikální jednotky (15 $\mu$ s).	HWD_ADC1_convert_Nernst()
		Ukončení kladného impulzu pro měření vnitřního odporu Nernstova článku.	HWD_STOP_RI_HIGH_PULSE
		Generování náběžné hrany záporného impulzu pro měření vnitřního odporu Nernstova článku.	HWD_START_RI_LOW_PULSE
		Obsluha sériové komunikace se zobrazovacím / záznamovým zařízením.	App_DiagComDrv()
4	60 $\mu$ s	Vzorkování napětí Nernst. článku při přiloženém záporném měřicím impulzu, A/D převod, filtrace, přepočet na fyzikální jednotky (15 $\mu$ s).	HWD_ADC1_convert_Nernst()
		Ukončení záporného impulzu pro měření vnitřního odporu Nernstova článku.	HWD_STOP_RI_LOW_PULSE
		Výpočet vnitřního odporu Nernstova článku.	App_RiCalc()
		Výpočet teploty substrátu sondy.	App_TempCalc()
		Regulátor výkonu vyhřívacího tělesa (PID).	App_HeaterControl()
		Obsluha UDS pro servis 0x31.	App_RoutineControl()
5	60 $\mu$ s	Generování PWM impulzu vyhřívání sondy.	HWD_HeaterPWM_SetPulse();
		Vzorkování, převod, přepočet velikosti napáj. napětí.	HWD_ADC1_convert_Supply();

### 7.3 Měření a výpočet vnitřního odporu Nernstova článku

Předpis výrobce sondy LSU 4.9 stanovuje kmitočet pro měření vnitřního odporu Nernst. článku v rozmezí 1 až 4 kHz. Vzhledem k požadavku na vysokou rychlost odezvy systému bude použita nejvyšší měřicí frekvence o velikosti 4 kHz. Délka kladného i záporného měřícího impulzu bude tedy činit 125  $\mu\text{s}$ . Z tohoto důvodu je navržena délka 2. a 3. fáze operačního systému 125  $\mu\text{s}$ , viz. kap. 7.2. Časový diagram měření vnitřního odporu Nernstova článku ukazuje obr. 17:



Obr. 17: Časový diagram měření vnitřního odporu Nernstova článku.

Na počátku fáze 2 operačního systému je pomocí makra `HWD_START_RI_HIGH_PULSE` aktivován GPIO výstup mikrokontroléru RC7, dojde k otevření tranzistoru Q1 a tím k přiložení kladného měřícího impulzu na Nernstův článek. Po dobu běhu fáze 2 OS (125  $\mu\text{s}$ ) zůstává kladný měřicí proud připojen. Během této doby odezní přechodové děje a dojde k ustálení Nernstova napětí. Na počátku fáze 3 operačního systému je napětí Nernst. článku vzorkováno. Po vzorkování je kladný měřicí impulz ukončen pomocí makra `HWD_STOP_RI_HIGH_PULSE`. Následuje otevření tranzistoru Q2, připojeného k pinu RC8 mikrokontroléru, použitím makra `HWD_START_RI_LOW_PULSE`. Nyní je na Nernstův článek přiložený záporný měřicí proud, který potrvá po dobu běhu fáze 3 OS. Na počátku fáze 4 OS je Nernstovo napětí opět vzorkováno a poté

je záporný impulz ukončen použitím makra `HWD_STOP_RI_LOW_PULSE`. S použitím naměřených napětí lze vypočítat vnitřní odpor Nernstova článku podle vztahu:

$$R_i = \frac{V_{NH} - V_{NL}}{\frac{V_{cc} - V_{NH} - V_V}{R_{rp} \parallel R_H} - \frac{V_{cc} - V_{NL} - V_V}{R_{rp}} + \frac{V_V - V_{NL}}{R_L}}, \quad (14)$$

kde  $V_{NH}$  je změřené napětí Nernstova článku při aplikovaném kladném měřícím proudu,  $V_{NL}$  změřené napětí Nernstova článku při aplikovaném záporném měřícím proudu. Ostatní veličiny jsou popsány v kapitole 5.1.

Během ohřevu sondy v prostředí s  $\lambda > 1$  Nernstův článek vytváří napětí blízké nule. Po přiložení záporného měřícího proudu se objeví na Nernstově článku záporné napětí. S ním není počítáno při návrhu hardwaru a není jej možné zesílit a převést do číslicové podoby. Proto v případě, kdy je napětí  $V_{NL}$  menší, než 50 mV, je nezbytné použít pro výpočet vnitřního odporu Nernst. článku pouze kladný impulz měřícího proudu. Potom platí vztah:

$$R_i = \frac{V_{NH} - V_N}{\frac{V_{cc} - V_{NH} - V_V}{R_{rp} \parallel R_H} - \frac{V_{cc} - V_N - V_V}{R_{rp}}}, \quad (15)$$

kde  $V_N$  je napětí Nernstova článku bez přiložení měřícího proudu, změřené ve fázi 1 operačního systému. Vztahy (14) a (15) jsou implementovány ve zdrojovém souboru `App_RiCalc.c`, v proceduře `App_RiCalc()`. Tato je volána ve fázi 4 operačního systému, ihned po dokončení potřebných měření pro výpočet vnitřního odporu. Před provedením výpočtu  $R_i$  je nutno ověřit, zda nedošlo k přetečení A/D převodníku ( $V_{NH} > 1,45$  V). K přetečení dochází za nízkých teplot substrátu sondy, kdy je vnitřní odpor Nernst. článku velmi vysoký. V tomto případě nelze vnitřní odpor určit a do výstupního signálu je uložena hodnota `0xFFFF`, která pro ostatní funkce softwaru vyšší vrstvy znamená, že údaj není k dispozici. Pro potřeby dalších výpočtů procedura `App_RiCalc()` ještě poskytuje filtrovaný vnitřní odpor Nernst. článku. Jednotlivé hodnoty vnitřního odporu, získané každých 400  $\mu$ s, jsou ukládány do bufferu o velikosti deseti vzorků. Vzorky v bufferu jsou vždy nejprve posunuty o jednu úroveň níže, čímž dojde k zahazení posledního záznamu a uvolnění první pozice pro aktuální záznam. Následně je přes celý buffer

vypočítán aritmetický průměr. Filtrovaný vnitřní odpor tedy představuje jeho průměrnou hodnotu za posledních deset měření (4 ms).

#### 7.4 Výpočet teploty substrátu kyslíkové sondy

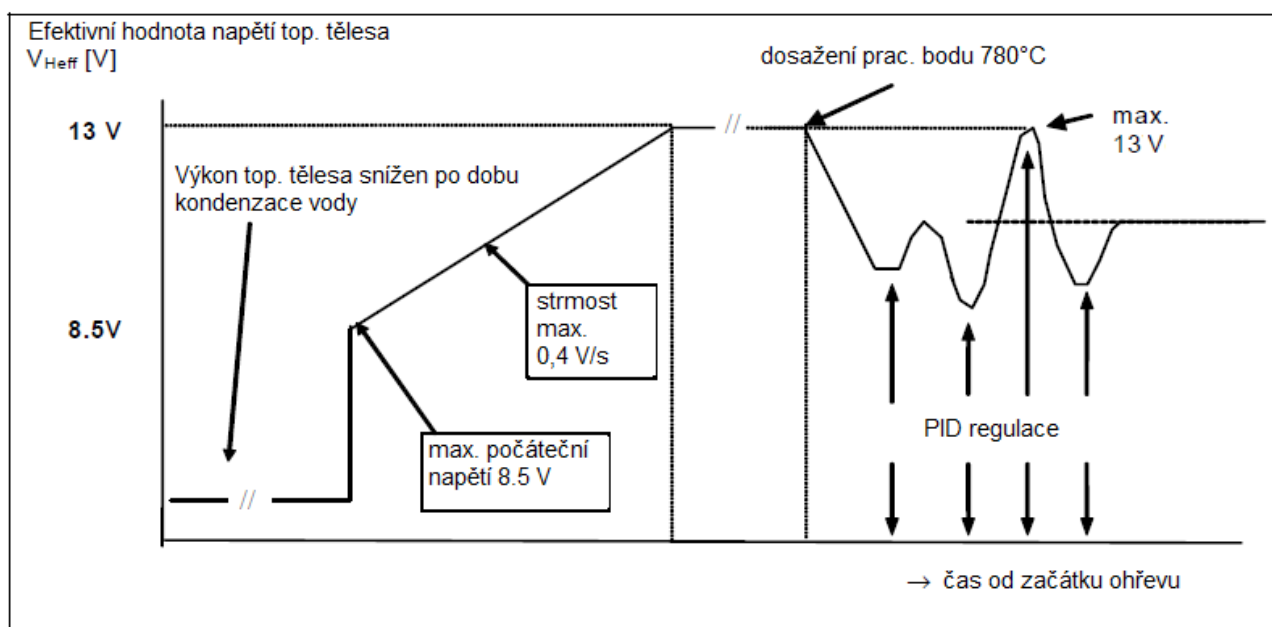
Výpočet teploty substrátu kyslíkové sondy provádí procedura `App_TempCalc()`, umístěná ve stejnojmenném zdrojovém souboru. Je volána ve fázi 4 operačního systému, ihned po výpočtu filtrovaného vnitřního odporu Nernst. článku, který je její vstupní veličinou. Teplota Nernstova článku je zjištěna z její závislosti na vnitřním odporu Nernstova článku (obr. 6). Křivka závislosti je modelována dvanácti body, uloženými v datovém poli v paměti flash (`CAL_TBL_Ri_Temp[2][12]`). Mezi jednotlivými body je prováděna lineární interpolace pomocí funkce `App_Interpolation_Linear_si16()`. Výpočet teploty je možný pouze v případě, kdy vnitřní odpor Nernst. článku není vyšší, než 1 k $\Omega$  (výrobce sondy uvádí závislost teploty na vnitřním odporu Nernst. článku v rozmezí 60  $\Omega$  – 1 k $\Omega$ ). V opačném případě je do výstupního signálu uložena hodnota 0xFFFF, jež pro ostatní funkce softwaru vyšší vrstvy znamená, že údaj není k dispozici.

#### 7.5 Řízení ohřevu a regulace teploty substrátu kyslíkové sondy

Řízení ohřevu substrátu sondy musí být z následujících důvodů prováděno zvláštním způsobem:

- Výrobce předepisuje časový průběh napětí topného tělesa během ohřevu substrátu sondy, aby bylo vyloučeno jeho poškození teplotními šoky (obr. 18). K ohřevu sondy dochází zpravidla ihned po spuštění motoru. Je-li výfukové potrubí studené, může v substrátu sondy být přítomen vodní kondenzát (voda je produkt spalování uhlovodíkových paliv). Při prudkém ohřátí substrátu by expandující vodní pára mohla substrát roztrhat. Z tohoto důvodu je prvních 5 sekund ohřevu napětí vyhřívacího článku nastaveno na 2 V. Během této doby se kondenzát volně odpaří ze substrátu sondy.
- Při teplotách substrátu nižších, než 630°C, nelze teplotu změřit (vnitřní odpor Nernst. článku je příliš vysoký). Lze ji pouze hrubě odhadnout. Je-li substrát studený, vnitřní odpor Nernst. článku se pohybuje v řádu stovek M $\Omega$ . Přes rezistor  $R_p$  se dostane na Nerstův článek napětí  $V_{cc}$ . Napětí  $V_N$  v tomto případě bude rovno 5 V. Klesne-li vlivem stoupající teploty substrátu

vnitřní odpor Nernst. článku natolik, že dojde k poklesu  $V_N$  pod 1,5 V, přestane měřicí A/D převodník přetékat. Při měření  $V_{NH}$ , kdy je proud Nernst. článkem vyšší, však k přetečení stále dochází. Můžeme říci, že substrát je „mírně zahřátý“. Teplotu však určit nelze. Přestane-li přetékat A/D převodník i při měření  $V_{NH}$ , víme, že je teplota substrátu vyšší, než v předchozím případě. Tento stav můžeme označit jako „středně zahřátý“. Vnitřní odpor Nernst. článku již lze vypočítat, nicméně je podstatně vyšší, než 1 k $\Omega$ . Teplotu substrátu sondy lze určit až v případě poklesu vnitřního odporu pod 1 k $\Omega$ . Dokud je teplota substrátu neznámá, musí řízení ohřevu probíhat v otevřené smyčce.



Obr. 18: Výrobce předepsaný časový průběh napětí pro ohřev substrátu sondy.

Řízení ohřevu substrátu sondy zajišťuje stavový program, umístěný v proceduře `App_HeaterControl()` ve stejnojmenném zdrojovém souboru. Činnost stavového programu znázorňuje obr. 19. Po zapnutí kontroléru je stav programu implicitně nastaven na „INIT“. Je-li substrát studený ( $V_N > 1,45$  V), program je přepnut na stav „KONDENZACE“. V tomto stavu je nastaveno napětí vyhřívacího tělesa na velikost 2 V. Po uplynutí 5 sekund pro odpaření kondenzátu je program přepnut do stavu „STUDENÝ“. Zde je napětí vyhřívacího tělesa nastaveno na velikost 4 V a každých 100 ms je zvýšeno o 20 mV. Je-li zjištěno zvýšení teploty substrátu ( $V_N < 1,45$  V), program je přepnut do stavu „MÍRNĚ ZAHŘÁTÝ“. V tomto je napětí vyhřívacího tělesa zvyšováno o 15 mV každých 100 ms. Dojde-li k dalšímu nárůstu teploty substrátu ( $V_{NH} < 1,45$  V),

program je přepnut do stavu „STŘEDNĚ ZAHŘÁTÝ“, v němž je napětí vyhřívacího tělesa zvyšováno o 9 mV každých 100 ms. Po dosažení teploty 780°C dojde k přepnutí programu do stavu „PID UZAVŘENO“. V tomto stavu reguluje napětí topného tělesa PID regulátor, běžící v periodě 4 ms (z tohoto důvodu je počítán průměrný vnitřní odpor Nernst. článku za poslední 4 ms, viz. kap 7.3). Vzhledem k tepelné setrvačnosti substrátu sondy není nutné PID regulátor spouštět s periodou 400  $\mu$ s. Není to ani možné, koeficienty integrační a derivační složky by v tomto případě vyšly příliš malé (menší, než 1 bit použitého datového typu). Vystoupí-li teplota substrátu nad 850°C (např. vlivem špatného nastavení PID regulátoru nebo překmitu), je program přepnut do stavu „PŘEHŘÁTÝ“ a vyhřívací napětí je odpojeno. K opětovnému připojení PID regulátoru dojde při poklesu teploty substrátu pod 780°C. V případě spuštění kontroléru při běžícím motoru, nebo po resetu kontroléru, může dojít k situaci, kdy substrát sondy bude již do určité míry zahřátý. Není poté nutné procházet kondenzační fází ohřevu a případně i některými dalšími fázemi ohřevu. Přeskočení dotyčných fází zajišťují přechody (G), (H) a (I) na obr. 19. Havarijní stavy (např. prudké ochlazení substrátu při zaplavení sondy nespáleným palivem) jsou řešeny přechody (J) a (K).

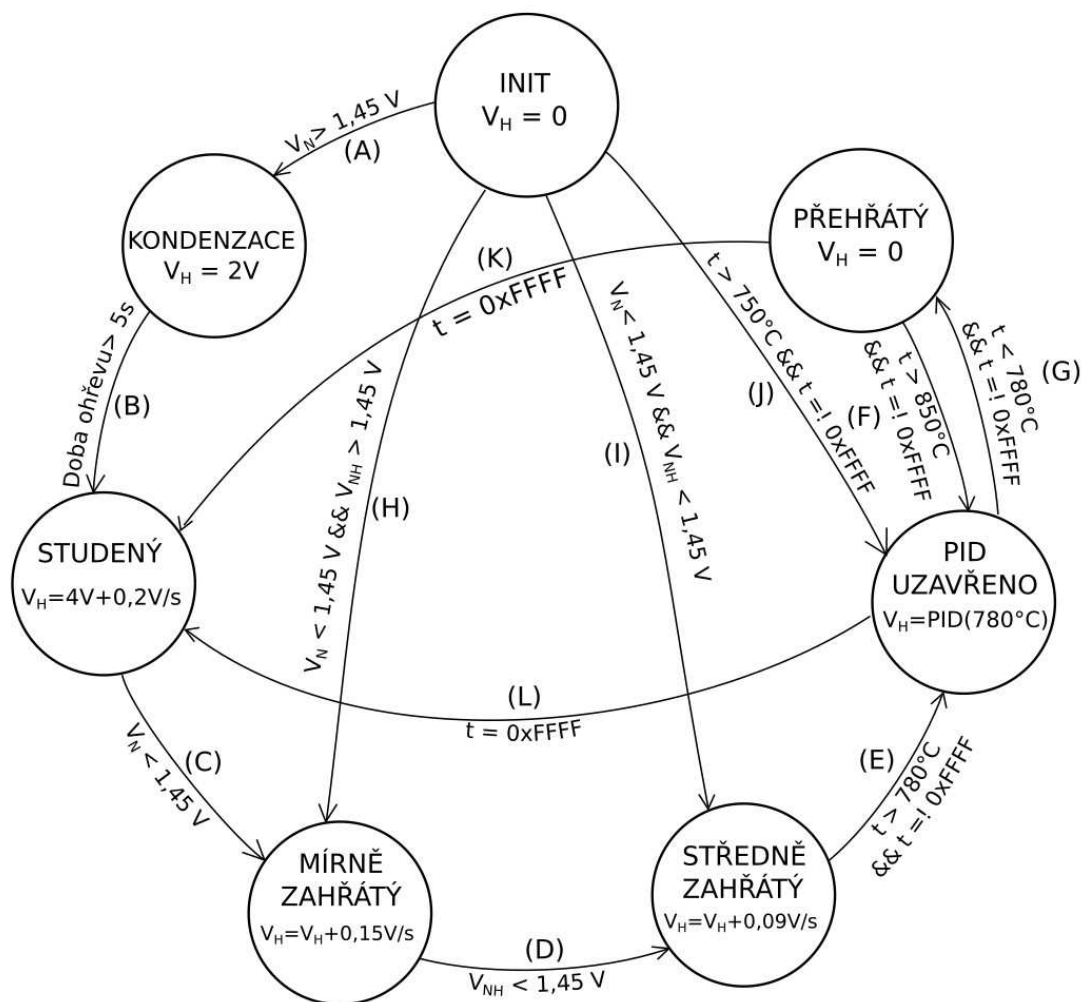
Po proběhnutí stavového programu, případně včetně PID regulátoru, je k dispozici vypočítané požadované napětí vyhřívacího tělíska  $V_H$ . Z požadovaného napětí pro vyhřívání  $V_H$  je dále vypočtena požadovaná poměrná doba otevření  $D_c$  PWM modulace:

$$D_c = \frac{V_H}{V_{PWR}} \quad (16)$$

kde  $V_{PWR}$  je napájecí napětí vyhřívacího tělesa, změřené softwarem nízké vrstvy (kap. 6.2). V případě  $V_{PWR} < 10$  V je naprogramováno odpojení vyhřívacího napětí. Při takto nízkém napětí již regulátor nemůže spolehlivě udržet požadovanou teplotu substrátu sondy. Podpětí je pravděpodobně způsobeno závadou generátoru či akumulátoru vozidla a je zapotřebí odpojit všechny postradatelné spotřebiče, aby zbývající elektrická energie stačila pro chod důležitých bezpečnostních systémů vozidla (řízení, ABS, airbagy). Dále je požadovaná poměrná doba otevření PWM omezena na 99%. Tím je zabráněno opětovnému spuštění již spuštěného OC modulu v softwaru nízké vrstvy. Ve fázi 5 OS je zavoláním procedury softwaru nízké vrstvy `HWD_HeaterPWM_SetPulse()` generován PWM impulz s požadovanou poměrnou dobou otevření. Pro použití v dalších metodách softwaru vyšší vrstvy je procedurou řízení teploty poskytován příznak dosaženého teplotního pracovního bodu substrátu sondy `App_HeaterControl_OpPointReached`. Tento je nastaven, nachází-li se



teplota substrátu v rozmezí 750 až 810°C a je-li stavový program řízení teploty ve stavu „PID UZAVŘENO“.



Obr. 19: Diagram stavového programu řízení ohřevu substrátu sondy.

## 7.6 Regulace čerpacího proudu

Je prováděna procedurou `App_PumpControl()` ve stejnojmenném zdrojovém souboru. Výrobce sondy dovoluje připojit čerpací proud pouze je-li dosaženo pracovní teploty substrátu sondy. Má-li substrát sondy provozní teplotu (příznak `App_HeaterControl_OpPointReached` je aktivní), běží PID regulátor čerpacího proudu cyklicky s periodou 400  $\mu$ s. Aplikaci regulátorem vypočteného čerpacího proudu na čerpací článek zajistí procedura softwaru nízké vrstvy `HWD_PumpDAC_SetUPump()`. Není-li pracovní teplota sondy v požadovaném rozmezí, čerpací

proud je odpojen zavoláním procedury `HWD_PumpDAC_SetUPump()`. Procedura regulace čerpacího proudu také poskytuje příznak splněného požadovaného pracovního bodu `App_PumpControl_OpPointReached`. Je nastaven v případě, kdy se napětí Nernstova článku  $V_N$  nachází v rozmezí 430 až 480 mV.

## 7.7 Implementace PID regulátorů v softwaru vyšší vrstvy

Algoritmus PID regulátoru je naprogramován výrobcem mikrokontroléru v assembleru. Používá DSP jádro a zdvojenou paměť RAM. Do projektu je importován v předkompilovaném knihovním souboru `libdsp-elf.a`. Algoritmus PID regulátoru sestává z pouze 17 instrukcí, jeho vykonání zabere pouze 240 ns výpočetního času.

```

1      ; Calculate most recent error with saturation, no limit checking required
2      lac    w3, a                ; A = tPID.controlReference
3      lac    w2, b                ; B = tPID.MeasuredOutput
4      sub    a                    ; A = tPID.controlReference - tPID.measuredOutput
5      sac.r  a, [w10]             ; tPID.ControlHistory[n] = Sat(Rnd(A))
6
7      ; Calculate PID Control Output
8      clr    a, [w8]+=2, w4, [w10]+=2, w5          ; w4 = (Kp+Ki+Kd), w5 = _ControlHistory[n]
9      lac    w1, a                ; A = ControlOutput[n-1]
10     mac    w4*w5, a, [w8]+=2, w4, [w10]+=2, w5    ; A += (Kp+Ki+Kd) * _ControlHistory[n]
11                                     ; w4 = -(Kp+2Kd), w5 = _ControlHistory[n-1]
12     mac    w4*w5, a, [w8], w4, [w10]-=2, w5      ; A += -(Kp+2Kd) * _ControlHistory[n-1]
13                                     ; w4 = Kd, w5 = _ControlHistory[n-2]
14     mac    w4*w5, a, [w10]+=2, w5                ; A += Kd * _ControlHistory[n-2]
15                                     ; w5 = _ControlHistory[n-1]
16                                     ; w10 = &_ControlHistory[n-2]
17     sac.r  a, w1                ; ControlOutput[n] = Sat(Rnd(A))
18     mov    w1, [w0 + #offsetcontrolOutput]
19
20     ;Update the error history on the delay line
21     mov    w5, [w10]            ; _ControlHistory[n-2] = _ControlHistory[n-1]
22     mov    [w10 + #-4], w5      ; _ControlHistory[n-1] = ControlHistory[n]
23     mov    w5, [--w10]

```

*Zdrojový kód 1: Ukázka algoritmu PID regulátoru pro DSC dsPIC33.*

## 7.8 Nastavení PID regulátorů

Koeficienty P, I, D pro regulátor teploty substrátu sondy a regulátor čerpacího proudu jsou definovány ve zdrojovém souboru *App\_Calibrations.h*. Používají datový typ s pevnou desetinnou čárkou Q15. Ladění koeficientů během chodu kontroléru umožňuje UDS servis 0x31 (viz. kap. 7.10). Změn vstupních veličin regulátorů pro účely ladění je možné dosáhnout následujícími postupy:

- Změnu vstupní veličiny pro regulátor teploty substrátu lze vyvolat náhlým ochlazením substrátu (např. fouknutím čistého vzduchu na vstupní otvory kyslíkové sondy).
- Změnu vstupní veličiny pro regulátor čerpacího proudu lze vyvolat náhlou změnou koncentrace kyslíku v prostředí sondy (např. vpuštěním propan-butanu z kapesního zapalovače do prostoru sondy a jeho následným odstraněním proudem čistého vzduchu).

Pro nalezení vhodných velikostí P, I, D koeficientů byl použit univerzální postup:

- Postupné zvyšování velikosti P koeficientu až na hranici překmitů či oscilací regulované veličiny.
- Postupné zvyšování velikosti I koeficientu, dokud není dosaženo konvergence regulátoru na požadovanou hodnotu a uspokojivých reakcí regulátoru na změny vstupní veličiny.
- Postupné zvyšování koeficientu D pro zrychlení reakcí regulátoru na prudké odchylky regulované veličiny.

Do regulační smyčky teploty substrátu sondy vnáší teplotní setrvačnost substrátu dopravní zpoždění, které činí systém náchylný k překmitům a oscilacím. Téměř vylučuje použití D složky regulátoru a značně omezuje velikost složky I. Nastavení, které přineslo uspokojivé regulační vlastnosti, bylo dosaženo s velikostmi koeficientů  $P = 0,76294$ ;  $I = 0,00762$  a  $D = 0$ .

Čerpací článek vykazuje okamžitou reakci na změnu čerpacího proudu. PID regulátor je možné naladit na velmi vysoký zisk a rychlé a strmé reakce. Uspokojivé regulační vlastnosti přineslo nastavení koeficientů  $P = 0,91553$ ;  $I = 0,91553$ ;  $D = 0,74769$ . Nalezené hodnoty koeficientů je po nastavení nutno aktualizovat v paměti flash.

## 7.9 Výpočet AFR a $\lambda$

Provádí jej procedura `App_AFRLambdaCalc()`, umístěná ve stejnojmenném zdrojovém souboru. Součinitel přebytku vzduchu  $\lambda$  je zjištěn z jeho závislosti na čerpacím proudu, viz. obr. 5. Měřený čerpací proud je v případě přebytku vzduchu ( $I_p > 0$ ) před výpočtem AFR/ $\lambda$  ještě vynásoben koeficientem kalibrace na čistém vzduchu, viz. kap. 8.2. Křivka závislosti je modelována pomocí 24 bodů, jejichž hodnoty poskytuje výrobce sondy a jsou uloženy v datovém poli `CAL_TBL_Ip_Lambda[2][24]`. Mezi jednotlivými body je prováděna lineární interpolace. AFR pro benzin je vypočítáno stejným způsobem. AFR a  $\lambda$  jsou výstupní veličiny, které jsou přímo odesílány do zobrazovacího, popř. záznamového a vyhodnocovacího zařízení. Hodnota měřené veličiny je proto odeslána jen v případě, je-li kontrolér sondy v bezchybném stavu. V opačném případě je místo hodnoty měřené veličiny odeslán chybový kód, viz. tab. 2.

Tab. 2: Chybové kódy výstupu kontroléru.

Hodnota chybového kódu (sériový výstup) (analog. výstup)	Popis chyby	Možná příčina chyby
-1 100 mV	Probíhá ohřev substrátu sondy a ještě není dosaženo pracovní teploty.	
-2 200 mV	Substrát sondy je přehřátý.	Příliš vysoká teplota výfukových plynů.
-3 300 mV	Došlo k náhlému přílišnému odchýlení teploty substrátu sondy od požadované hodnoty během provozu.	PID regulátor nedokázal udržet požadovanou hodnotu teploty. Sondu mohl prudce ochladit proud nespálené palivové směsi, nebo ji mohla prudce ohřát dohořívající palivová směs při sekundárním spalování.
-4 400 mV	Došlo k náhlému přílišnému odchýlení Nernstova napětí z rovnovážné hodnoty během provozu.	PID regulátor nedokázal udržet rovnovážný stav v měřící komoře sondy. Měřená směs je příliš bohatá ( $\lambda < 0,65$ ).
-5 500 mV	Napájecí napětí je příliš nízké (< 10 V).	Závada na zdroji el. energie, popř. přechodové odpory v napájecím vedení kontroléru.

## 7.10 Ovladač sériové komunikace

Pro sériovou komunikaci s vyhodnocovacím, záznamovým a zobrazovacím zařízením je použit komunikační protokol UDS podle normy ISO 14229-1. Implementovány jsou 3 servery:

- SID 0x22 (RDBI). Umožňuje čtení aktuálních hodnot vnitřních signálů podle ID signálu.
- SID 0x2F (IOCBI). Umožňuje ovládat vstupní/výstupní veličiny ECU podle ID veličiny.
- SID 0x31 (RC). Umožňuje spouštět funkce/procedury podle jejich ID.

Seznam implementovaných ID a subfunkcí jednotlivých servisů obsahují tab. 3, 4 a 5.

Tab. 3: Seznam podporovaných DID pro servis 0x22.

DID	Čtená veličina	Jednotky a kódování
0x0001	Identifikace řídicí jednotky	(string) „WBO2“
0x0100	Naměřený součinitel přebytku vzduchu $\lambda$ filtrovaný (4 ms průměr)	0,001 [-].bit <sup>-1</sup>
0x0101	Čerpací proud korigovaný	1 $\mu$ A.bit <sup>-1</sup>
0x0102	Teplota substrátu sondy	0,1°C.bit <sup>-1</sup>
0x0103	Vnitřní odpor Nernstova článku	0,1 $\Omega$ .bit <sup>-1</sup>
0x0104	Poměrná doba otevření PWM vyhřívacího článku	0,01 %.bit <sup>-1</sup>
0x0105	Velikost napájecího napětí	1 mV.bit <sup>-1</sup>
0x0106	Napětí Nernstova článku	0,1 mV.bit <sup>-1</sup>
0x0107	Napětí Nernstova článku při kladném měřicím pulzu	0,1 mV.bit <sup>-1</sup>
0x0108	Napětí Nernstova článku při záporném měřicím pulzu	0,1 mV.bit <sup>-1</sup>
0x0109	Stav stavového programu řízení ohřevu sondy	[-]
0x010A	Systémový čas (od spuštění kontroléru)	1 s.bit <sup>-1</sup>
0x010B	Cílové čerpací napětí	[-] DAC kód
0x010C	Příznak splněního teplotního pracovního bodu	[-]
0x010D	Naměřené AFR pro benzin okamžitě	0,001 [-].bit <sup>-1</sup>
0x010E	Čerpací proud nekorigovaný	1 $\mu$ A.bit <sup>-1</sup>
0x010F	Naměřený součinitel přebytku vzduchu $\lambda$ okamžitý	0,001 [-].bit <sup>-1</sup>
0x0110	Aktuální koeficient kalibrace na čistém vzduchu	0,0001 [-].bit <sup>-1</sup>

Tab. 4: Seznam podporovaných DID pro servis 0x2F.

DID	Nastavovaná veličina	Jednotky a kódování
0x0F00	Poměrná doba otevření PWM vyhřívacího článku	0,01 %.bit <sup>-1</sup>
0x0F01	Cílová teplota PID regulátoru teploty	0,1°C.bit <sup>-1</sup>
0x0F02	Cílové čerpací napětí	[-] DAC kód
0x0F03	Napětí analogového výstupu	1 mV.bit <sup>-1</sup>

Tab. 5: Seznam podporovaných RID pro servis 0x31.

RID	Spouštěná funkce/procedura	Jednotky a kódování
0x0001	Změna P parametru PID regulátoru teploty a reinitialize PID reg.	fractional Q15
0x0001	Změna I parametru PID regulátoru teploty a reinitialize PID reg.	fractional Q15
0x0003	Změna D parametru PID regulátoru teploty a reinitialize PID reg.	fractional Q15
0x0004	Změna P parametru PID regulátoru čerpacího proudu a reinitialize PID..	fractional Q15
0x0005	Změna I parametru PID regulátoru čerpacího proudu a reinitialize PID..	fractional Q15
0x0006	Změna D parametru PID regulátoru čerpacího proudu a reinitialize PID..	fractional Q15
0x000A	Kalibrace sondy na čistém vzduchu	-

## 8 Kalibrace kontroléru

### 8.1 Kalibrace hardwaru kontroléru

Kalibraci hardwaru je nutné provést pro každý zhotovený kontrolér. Provádí se po osazení plošného spoje součástkami a naprogramování mikrokontroléru. Kalibrační konstanty hardwaru jsou uloženy ve zdrojovém souboru *HW\_Calibrations.h*. Kalibraci provádíme při teplotě okolí v rozmezí 20 až 25°C.

Postup kalibrace nuly měření čerpacího proudu:

- Kyslíková sonda je odpojena od kontroléru, kontrolér je připojen k napájecímu napětí.
- Pomocí UDS servisu 0x22, DID 0x10E přečteme velikost čerpacího proudu. Konstantu `C_I_PumpOffsetIn` zvýšíme o velikost přečteného proudu (popř. snížíme, je-li přečtený proud záporný).
- Ověříme, zda-li je po úpravě konstanty čtený proud nulový.

Postup kalibrace offsetu zesilovače Nernstova napětí:

- Velikost konstanty `C_V_NernstAmpOffset` nastavíme rovnu nule (výchozí hodnota).
- Kyslíková sonda je připojena ke kontroléru, napájecí napětí připojeno.
- Kyslíková sonda je umístěna v čistém vzduchu ohřátá na pracovní teplotu.
- Ověřeným voltmetrem s rozlišením alespoň 0,1 mV změříme napětí Nernstova článku  $U_N$ .
- Velikost offsetu vypočítáme dle vztahu:

$$o = 4500 - 10 \cdot U_N \quad [--; \text{ mV}] \quad (17)$$

- Velikost konstanty `C_V_NernstAmpOffset` nastavíme na velikost  $o$ .
- Opakovaným měřením ověříme, je-li  $U_N$  rovno 450 mV.

## 8.2 Kalibrace sondy na čistém vzduchu

Nulový čerpací proud pro  $\lambda = 1$  je dán fyzikální podstatou činnosti sondy. Směrnice převodní charakteristiky  $I_p/\lambda$  v oblasti nedostatku kyslíku ( $\lambda < 1$ ) je zkalibrována ve výrobě trimováním měřicího bočnicku čerpacího proudu. Směrnice převodní charakteristiky  $I_p/\lambda$  v oblasti přebytku kyslíku ( $\lambda > 1$ ) má také výrobní rozptyl a nelze ji trimovat (bylo by nutné přepínat mezi dvěma bočnickými). Z tohoto důvodu kalibrace není uskutečněna ve výrobě. Je jí nutné učinit až v provozu. Vlivem opotřebení sondy dochází rovněž ke změně strmosti závislosti  $I_p/\lambda$  v režimu přebytku kyslíku – je vhodné tedy kalibraci na čistém vzduchu provádět pravidelně. Princip kalibrace vychází ze znalosti koncentrace kyslíku v čistém vzduchu (20,95 % objemových) a čerpacího proudu, odpovídajícímu této koncentraci kyslíku (2,54 mA). V softwaru kontroléru je proto měřený kladný čerpací proud násoben koeficientem `CAL_CleanAirPumpRatio`. Výsledný součin reprezentuje korigovaný čerpací proud, jenž je následně použit pro výpočet AFR a  $\lambda$ . Velikost kalibračního koeficientu je možné vypočítat jako podíl konstanty 2,54 mA a měřeného (nekorigovaného) čerpacího proudu na čistém vzduchu [mA]. Kalibraci sondy na čistém vzduchu lze provést pomocí UDS servisu 0x31, RID 0xA. Sondu je nutno před spuštěním kalibrace umístit na čistý vzduch, nejlépe venkovní. Vydýchaný vzduch v místnosti vykazuje nižší koncentraci kyslíku a provedení kalibrace by přineslo zkreslený výsledek. Kontrolér si během kalibrace sám vypočte velikost korekčního koeficientu. Po odpojení napájecího napětí však dojde ke ztrátě vypočítané hodnoty koeficientu. Pro trvalé zachování jeho hodnoty musí být vypočítaná velikost aktualizována v

paměti flash. Aktualizace zpravidla není nutná, v případě ověřovacích měření je kalibrace spouštěna před každým měřením.

## 9 Laboratorní ověření přesnosti měření

### 9.1 Metodika ověřovacího měření součinitele přebytku vzduchu

Pro ověření přesnosti měření měřícího řetězce širokopásmové kyslíkové sondy je potřebný zdroj výfukových plynů s nastavitelným součinitelem přebytku vzduchu v rozmezí  $\lambda = 0,65$  až  $1,3$ . K tomuto účelu bude použit testovací benzinový motor, jehož řídicí systém umožňuje nastavit libovolné AFR pomocí diagnostického rozhraní. Součinitel přebytku vzduchu bude měřen pomocí testovaného zařízení a ověřovacího měřidla (ověřeného analyzátoru složení výfukových plynů). Během měření je nutné počítat s dlouhou dobou odezvy ověřovacího měřidla (až 15 s).

### 9.2 Výsledky ověřovacího měření

Tab. 4: Výsledky 1. ověřovacího měření  $\lambda$ .

Údaj $\lambda$ testovaného měřidla [-]	Údaj $\lambda$ ověřovacího měřidla [-]	Relativní chyba $\delta$ [%]
0,736	0,772	-4,7
1,062	1,077	-1,4

První ověřovací měření přineslo poznatek o kladné odchylce směrnice převodní charakteristiky  $I_p/\lambda$  v režimu nedostatku kyslíku. Tato byla způsobena chybnou implementací kalibrace na čistém vzduchu (software ji chybně používal i pro oblast nedostatku kyslíku). Chyba implementace byla způsobena neúplnými údaji v dokumentaci výrobce. Po opravě softwaru bylo měření opakováno:

Tab. 5: Výsledky 2. ověřovacího měření  $\lambda$ .

Údaj $\lambda$ testovaného měřidla [-]	Údaj $\lambda$ ověřovacího měřidla [-]	Relativní chyba $\delta$ [%]
0,989	1,002	1,29
0,904	0,925	2,27
0,825	0,834	1,07

Druhé ověřovací měření ukázalo na kladný offset měření čerpacího proudu o velikosti asi  $15 \mu\text{A}$ . Pozornost proto byla zaměřena na správnost nastavení nuly a kompenzace offsetu zesilovače



čerpacího proudu. Žádná závada však nebyla zjištěna. Po hlubší analýze byla příčina offsetu nalezena v parazitním jevu senzoru, jenž není výrobcem popsán v dokumentaci. Existenci parazitního jevu lze usoudit pouze z konstrukce měřícího monolitického obvodu (viz. [4]), který byl pro sondu vyvinut výrobcem. Jeho činnost probíhá pouze v analogové formě a je zde přítomna blíže nevysvětlená kompenzace offsetu. V softwaru zde popisovaného kontroléru byl offset kompenzován a ověřovací měření bylo znovu opakováno:

Tab. 6: Výsledky 3. ověřovacího měření  $\lambda$ .

Údaj $\lambda$ testovaného měřidla [-]	Údaj $\lambda$ ověřovacího měřidla [-]	Relativní chyba $\delta$ [%]
1,002	1,001	0,1
0,901	0,898	0,33
0,966	0,962	0,41
0,873	0,878	-0,56
1,062	1,067	-0,47
1,099	1,097	0,18
1,205	1,216	-0,9

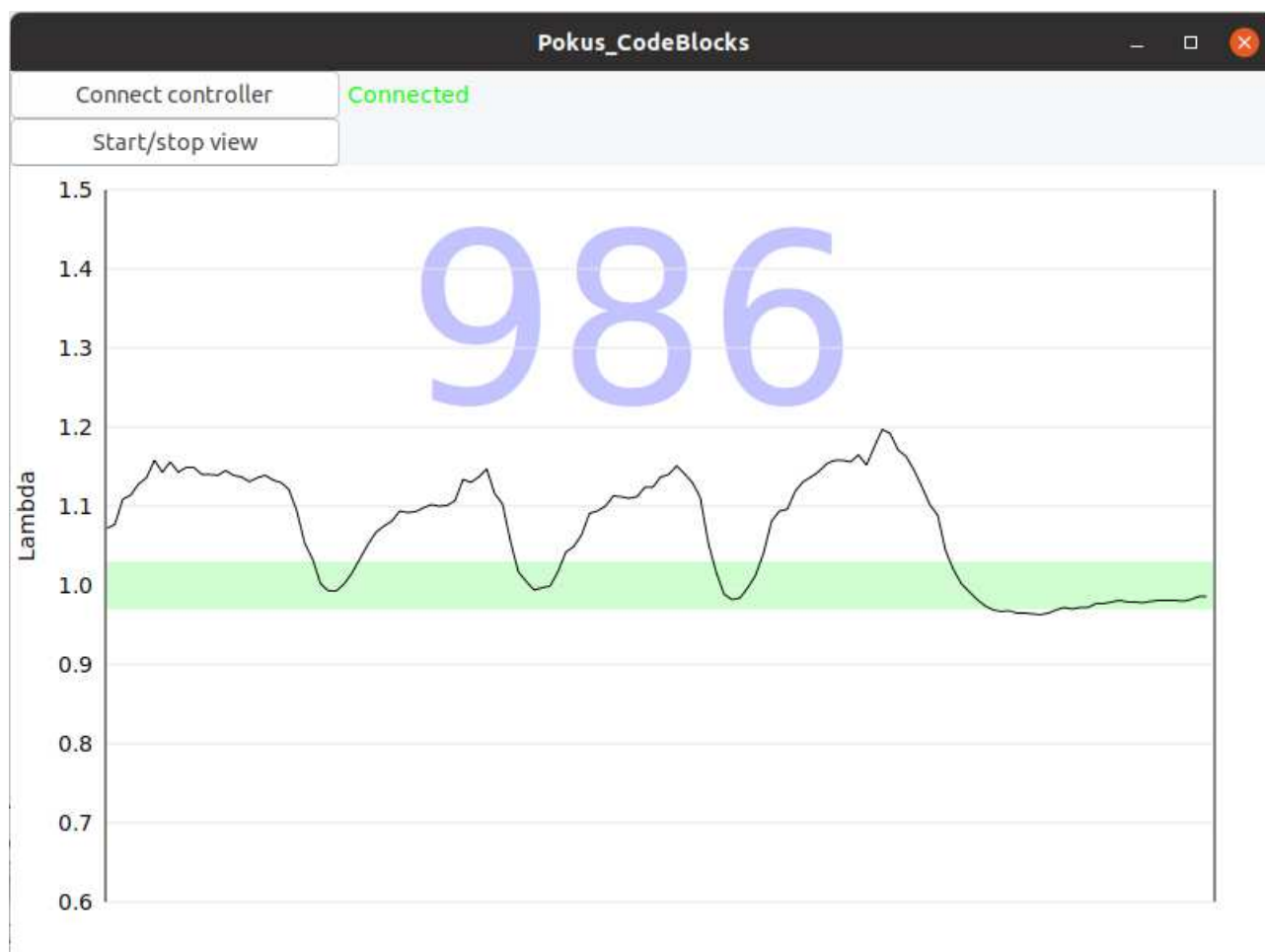
## 10 Grafické zobrazovací rozhraní pro PC

Kalibrace řídicích systémů zážehových motorů probíhají na výkonové zkušebně, nebo na vozidlech při zkušebních jízdách na zkušebních tratích. Kalibrátor potřebuje mít aktuální hodnotu AFR/ $\lambda$  vždy dobře viditelnou ve svém zorném poli. Často je potřebné vidět průběh AFR v čase za posledních 5 – 10 sekund. Pro tento účel bylo naprogramováno jednoduché grafické zobrazovací rozhraní pro PC. Využívá sériovou sběrnici RS-232, jejíž výhodou je snadná připojitelnost k jakémukoliv počítači.

Uživatelské rozhraní bylo vytvořeno s pomocí knihoven pro tvorbu grafických uživatelských aplikací GTK verze 3. Pro kreslení on-line grafů byly použity nástroje pro dvourozměrné vektorové kreslení Cairo, které jsou součástí GTK. Zobrazovací rozhraní podporuje grafický výstup a textový výstup s velkým, dobře čitelným fontem.

Po spuštění aplikace zobrazovacího rozhraní je otevřeno hlavní okno se dvěma tlačítky a prostorem pro grafické zobrazení. Tlačítko, nazvané „Connect controller“ slouží k navázání a ukončení komunikace PC s kontrolérem kyslíkové sondy. Vlevo od tlačítka „Connect controller“ je

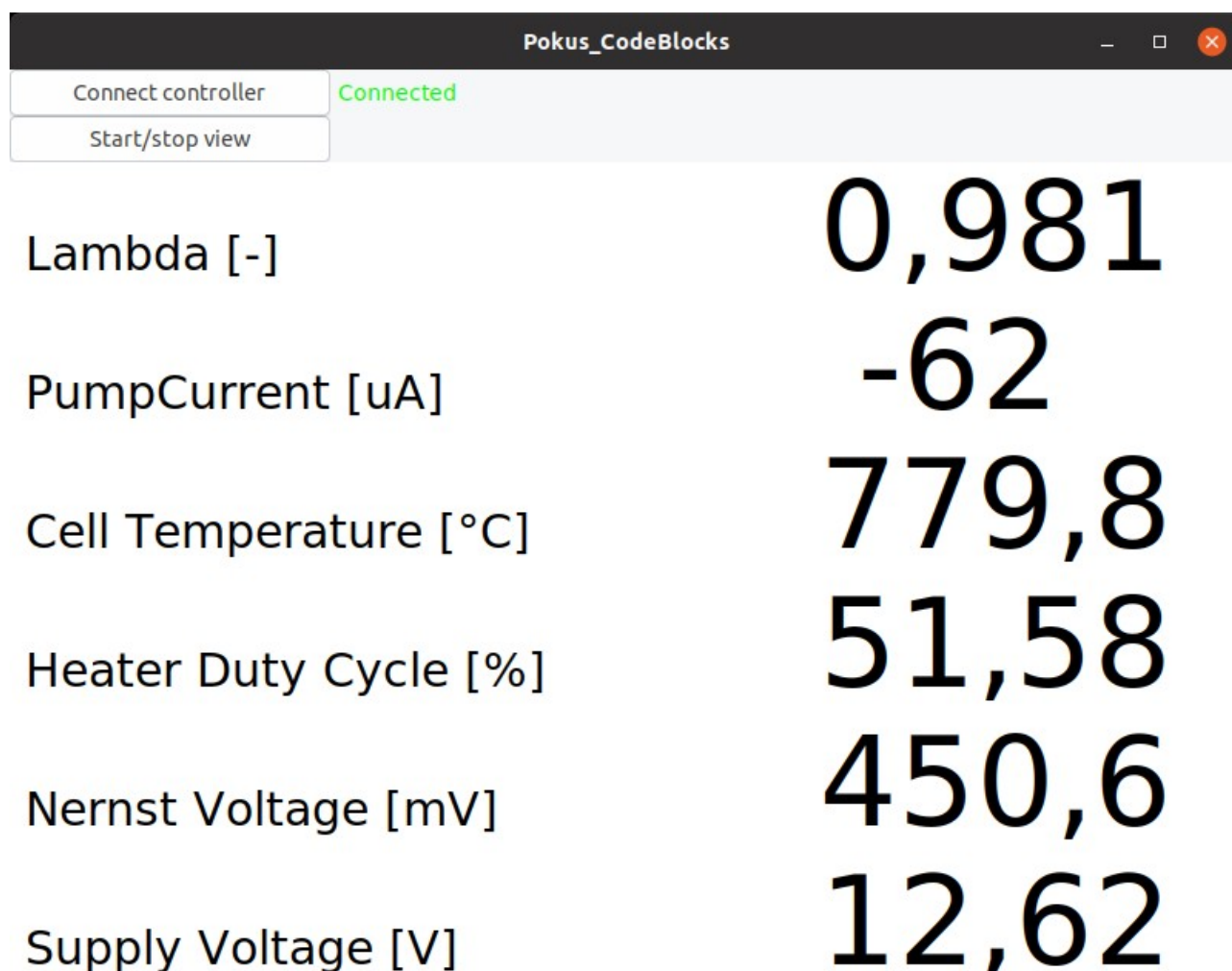
umístěna zpráva, zobrazující stav komunikace PC s kontrolérem. Ve výchozím stavu je přítomen nápis „Not connected“ v černé barvě. Po stisknutí tlačítka „Connect controller“ program postupně prohledá všechny dostupné USB porty, dokud nenajde připojený převodník USB-RS232. Jakmile jej najde, provede konfiguraci komunikace (rychlost 9600 baud.s<sup>-1</sup>, 8 bitů na znak, 1 stop bit, 1 start bit, bez parity) a pošle UDS požadavek na vyčtení identifikace řídicí jednotky (servis 0x22, DID 0x1). Dostane-li v odpovědi řetězec „WBO2“, identifikovala se řídicí jednotka kyslíkové sondy a zpráva o stavu komunikace je změněna na zelený nápis „Connected“. Nedostane-li program očekávanou odpověď, dotyčný USB port uvolní a pokračuje pokusem o připojení na dalším portu. V případě nezdaření připojení na žádném USB portu program zobrazí červeně zbarvený stav komunikace „Could not connect“. Je-li tlačítko „Connect controller“ stisknuto ve stavu komunikace „Connected“, dojde k odpojení komunikace a uvolnění portu USB. Je-li stisknuto ve stavu „Not connected“ nebo „Could not connect“, je spuštěn nový pokus o spojení.



Obr. 20: Grafické zobrazovací rozhraní v módu grafu.

Tlačítko „Start/Stop view“ slouží ke spuštění/zastavení vizualizace. Je-li kontrolér připojen, lze jeho stisknutím spustit on-line zobrazování pořízených dat. Kalibrátor může v případě potřeby tímto tlačítkem vizualizaci zastavit a aktuálně zachycená data si podrobně prohlédnout. Opětovným stisknutím tlačítka je vizualizace opět spuštěna.

V módu grafu program zobrazuje on-line průběh naměřeného součinitele přebytku vzduchu  $\lambda$  (obr. 20). V oblasti grafu je rovněž zobrazena velkým průhledným písmem aktuální změřená hodnota v celočíselném formátu (např. hodnota 986 odpovídá  $\lambda = 0,986$ ). Světle zelená oblast vyznačuje tzv. Lambda okno – cílové rozmezí součinitele přebytku vzduchu pro řízené katalytické reakce (viz. příloha [A]). Perioda vyčítání měřené hodnoty  $\lambda$  je v módu grafu nastavena na 50 ms.



Obr. 21: Grafické zobrazovací rozhraní v textovém módu.

V textovém módu (obr. 21) program zobrazuje velkým písmem všechny důležité signály kontroléru kyslíkové sondy. Perioda aktualizace dat je v tomto režimu 100 ms. Textový mód slouží zejména pro kalibrace a nastavení samotného kontroléru.

## 11 Závěr

Prototyp popisovaného zařízení má v době vzniku tohoto odstavce odslouženy desítky hodin měření na testovacích vozidlech a výkonové zkušebně. Prokázal spolehlivost v širokém spektru provozních podmínek (včetně z hlediska EMC nepříznivých). Osvědčily se rovněž i implementované schopnosti konektivity měřicího řetězce. Byl využíván ve spojení se záznamovými a zobrazovacími systémy, včetně spolupráce s řídicími systémy zážehových motorů při regulaci AFR v uzavřené smyčce.

Plně číslicová implementace zpracování signálů a regulátorů přinesla zjednodušení hardwaru. Odpadly vnější analogové multiplexery a S&H obvody, nutné pro přepínání měření napětí Nernstova článku a jeho vnitřního odporu. Z datových záznamů měření je rovněž patrné podstatné snížení vlivu rušivých signálů a zvýšení rychlosti odezvy. Tradiční analogové měřicí kontroléry nejsou schopny odstranit rušivý vliv pulzně-širokového napájení vyhřívacího tělesa na měřicí signály. Rušivé signály musí být následně tlumeny integračními články s vysokými časovými konstantami, které snižují rychlost odezvy měření. Navrhované řešení umožnilo rušivý vliv pulzně-širokové modulace odstranit pomocí vhodného časování hran modulace a vzorkování měřených signálů takovým způsobem, aby citlivé měření nebylo ovlivněno.

Největší překážkou během vývoje kontroléru byla nepřehledná a neúplná dokumentace výrobce kyslíkové sondy. Datové listy obsahovaly protichůdné údaje a zároveň chyběla některá důležitá fakta.

Časové vytížení jádra mikrokontroléru činí 18,75 %. V budoucnosti je tedy možné implementovat další softwarovou funkčnost bez obav o dostatek výpočetního výkonu mikrokontroléru.

Po provedení kalibrace byla ověřovacím měřením stanovena přesnost měření zkonstruovaného měřicího řetězce. Vykazoval střední relativní chybu rovnu 0,42 %; nejvyšší relativní chyba činila 0,9 %. Doba odezvy měření je dána pouze rychlostí reakce kyslíkové sondy a činí asi 8 ms při změně součinitele přebytku vzduchu přes celý měřicí rozsah ( $\lambda = 0,65$  až  $\lambda = 10$ ). Reakční doba kontroléru (400  $\mu$ s) je oproti době odezvy kyslíkové sondy zanedbatelná.

## 12 Seznam použitých zdrojů

- [1] Microchip Technology Inc.: *dsPIC33EPXXXGP50X data sheet*, DS70000657H, 2013.
- [2] Robert Bosch GmbH: *Planar Wide Band Lambda Sensor LSU 4.9 – Technical product information*, Y 258 E00 015e, 2005.
- [3] Robert Bosch GmbH: *Lambda Sensor LSU 4.9*, 2779147659, 2015.
- [4] Robert Bosch GmbH: *Product Information Lambda Probe Interface IC – CJ125*, 2005.

## 13 Seznam příloh

- [A] DOSEDLA, Martin: *Základní principy řízení zážehových motorů*, 2020.

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A TELEKOMUNIKACÍ

**ZÁKLADNÍ PRINCIPY ŘÍZENÍ ZÁŽEHOVÝCH**  
**PÍSTOVÝCH MOTORŮ**

**Příloha diplomové práce**

## **Abstrakt**

Tento dokument má za úkol stručně popsat základní úlohy, funkce, principy a algoritmy řídicích systémů zážehových spalovacích motorů. Vytváří souvislé propojení oboru strojírenského (pístové motory), oboru fyzikálně-chemického (termodynamika, procesy spalování) a elektronického (řídicí systémy). Je určen zejména čtenářům z řad automobilových servisních pracovníků, diagnostiků a kalibrátorů, elektrotechniků, elektroniků a programátorů, kteří rádi získají povědomí o principech řízení zážehových motorů.

## **Klíčová slova**

Zážehové motory, řídicí systémy,  $\alpha$ -N, Speed-density, MAF, objemová (volumetrická) účinnost, emise zážehových motorů.

## Obsah

1	Seznam symbolů a zkratk.....	4
2	Základní pojmy teorie řízení pístových motorů.....	5
2.1	Palivová směs.....	5
2.2	Úhel zážehu.....	5
2.3	AFR, Součinitel přebytku vzduchu.....	5
2.4	Vliv AFR na průběh spalování a točivý moment motoru.....	5
2.5	Objemová (volumetrická) účinnost motoru.....	7
3	Základní úlohy řídicího systému zážehového motoru.....	10
4	Blokové schéma systému řízení zážehového motoru.....	11
5	Řízení rychlosti otáčení, výkonu a točivého momentu motoru.....	12
5.1	Určení hmotnosti plnicího vzduchu metodou $\alpha$ -n.....	13
5.2	Určení hmotnosti plnicího vzduchu metodou Speed-Density.....	18
5.3	Určení hmotnosti plnicího vzduchu metodou MAF.....	20
6	Vznik a eliminace škodlivin při provozu zážehových motorů.....	23
6.1	Vznik škodlivin při provozu zážehových motorů.....	23
6.2	Eliminace škodlivin vzniklých provozem zážehového motoru.....	24
7	Regulace AFR v uzavřené smyčce.....	26
8	Seznam použitých zdrojů.....	30



## 1 Seznam symbolů a zkratk

<i>AFR</i>	„Air to fuel ratio“ – Poměr vzduchu a paliva v palivové směsi.
<i>ECM</i>	„Engine Control Module“ – Řídící jednotka motoru.
<i>MAF</i>	„Manifold air flow“ – Průtok vzduchu sacím potrubím.
<i>NTC</i>	„Negative temperature coefficient“ – Termistor s negativní závislostí odporu na teplotě.

## 2 Základní pojmy teorie řízení pístových motorů

### 2.1 Palivová směs

Palivovou směsí rozumíme směs uhlovodíkového paliva a vzduchu. Palivo může být ve vzduchu rozptýleno ve formě malých kapiček (mlhy), popř. může být již zcela odpařeno.

### 2.2 Úhel zážehu

Úhel zážehu (ignition angle, ignition advance), někdy také *předstih zapalování*, udává polohu klikového hřídele, ve které počíná hořet elektrický výboj mezi elektrodami zapalovací svíčky, oproti poloze klikové hřídele v horní úvrati pístu dotyčného válce.

### 2.3 AFR, Součinitel přebytku vzduchu

AFR (Air to Fuel Ratio) je bezrozměrná veličina, vyjadřující hmotnostní poměr vzduchu a paliva v palivové směsi (tzv. bohatost směsi). Pro směs, obsahující 14,68 hmotnostního dílu vzduchu a jeden hmotnostní díl paliva, bude  $AFR = 14,68$ .

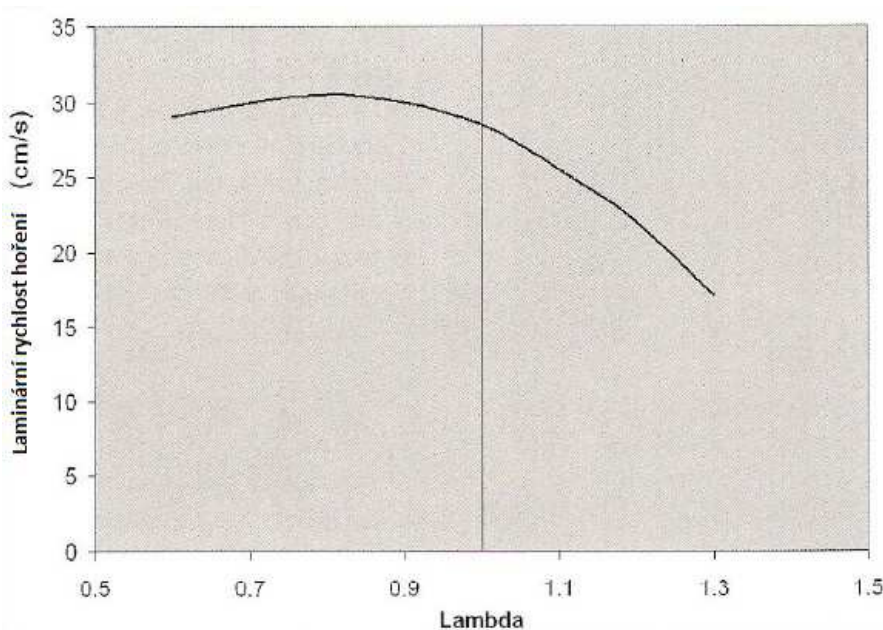
Součinitel přebytku vzduchu je bezrozměrná veličina, označovaná písmenem  $\lambda$ . Umožňuje vyjádřit bohatost směsi nezávisle na použitém typu paliva.  $\lambda$  udává poměr mezi okamžitým AFR, a *stechiometrickým* AFR. Stechiometrická směs (směs o stechiometrickém AFR) je taková směs vzduchu a paliva, ve které je přesně takové množství kyslíku, které je zapotřebí ke spálení veškerého paliva, obsaženého ve směsi. Po spálení stechiometrické směsi nezbude žádný kyslík, ani nespálené palivo. Pro benzín je stechiometrické AFR rovno 14,68. Vytvoříme – li benzinovou směs o AFR např. 16,14; bude  $\lambda = 16,14 : 14,68 \approx 1,1$ . Vytvoříme – li směs o AFR např. 13,21; bude  $\lambda = 13,21 : 14,68 \approx 0,9$ . Směsi s poměrem  $\lambda < 1$  mají přebytek paliva a nazýváme je *bohaté*. Směsi s poměrem  $\lambda > 1$  mají přebytek vzduchu a nazýváme je *chudé*. Směsi o rovnosti  $\lambda = 1$  nazýváme *stechiometrické*.

### 2.4 Vliv AFR na průběh spalování a točivý moment motoru

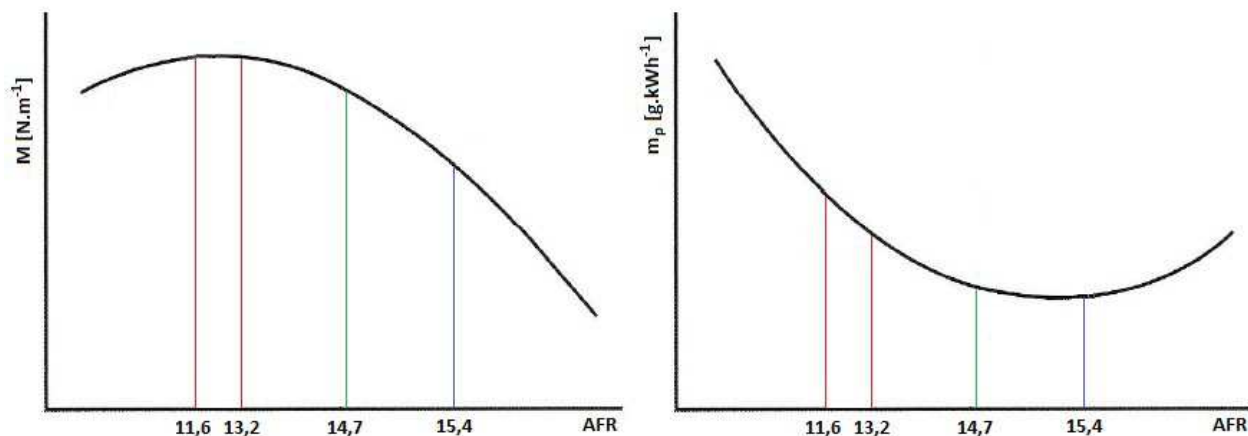
AFR má bezprostřední vliv na rychlost a teplotu hoření směsi a složení výfukových plynů. Závislost rychlosti hoření na  $\lambda$  ilustruje obr.1. Směsi s přebytkem paliva (AFR v rozmezí 11,6 až

13,2), vykazují nejvyšší rychlost hoření. Díky vysoké rychlosti hoření je možné použít nízký úhel zážehu. Expandující, již hořící směs, pak působí proti stoupajícímu pístu v kompresím zdvihu po nejkratší dobu. Motor tak dosahuje nejvyššího točivého momentu. Spalování směsi s přebytkem paliva probíhá při nižších teplotách. Vysoký přebytek paliva je po smísení se vzduchem odpařen a směsi tak odebere znatelné množství skupenského tepla. Snížením teploty směs zvýší hustotu, dochází k lepšímu plnění válce a točivý moment opět narůstá. Pro vysoké výkony je tedy výhodné použít bohaté směsi. Mechanické části motoru jsou méně tepelně namáhány. V rozmezí AFR = 11,6 až 13,2 je velikost točivého momentu téměř beze změny, mění se však teplota hoření. Je-li potřeba dosáhnout nejvyššího toč. momentu a nevádí-li vyšší teploty hoření (např. při středních rychlostech otáčení motoru), je vhodné použít AFR o hodnotě okolo 13,2. V případě potřeby snížení spalovací teploty (ochrana mechanických částí motoru nebo katalytického konvertoru), je užíváno nižších AFR. Nevýhodou používání bohatých směsí je snížená energetická účinnost motoru a zejména tvorba toxických zplodin (viz. kap. 6.1).

Spalování směsi s přebytkem vzduchu probíhá při nejvyšších teplotách a dosahuje nejvyšší energetické účinnosti. Rychlosti hoření jsou však nízké a není tedy možné dosáhnout nejvyšších toč. momentů. Chudé směsi je výhodné použít v případě částečných výkonů, kdy není na závalu snížený toč. moment a zvýšená teplota hoření. Nevýhodou je tvorba škodlivých oxidů dusíku.



Obr.1: Vliv AFR na rychlost hoření směsi. Zdroj:[2].



Obr.2: Vliv AFR na točivý moment a měrnou spotřebu paliva.

## 2.5 Objemová (volumetrická) účinnost motoru

Objemová účinnost motoru (angl. volumetric efficiency,  $\eta_v$ ), je bezrozměrná veličina, udávající „čerpací schopnost“ motoru. Je to poměrný ukazatel, vyjadřující množství vzduchu (palivové směsi), které je schopen do sebe válec přivést v aktuálních provozních podmínkách, v poměru k jeho celkovému objemu. Objemová účinnost motoru je funkcí mnoha proměnných. K ozřejmení jejího významu je nutné připomenout, jak probíhají procesy plnění a vyplachování válců motoru. Pro vysvětlení budeme uvažovat atmosféricky plněný motor.

V průběhu sacího zdvihu pístu jsou sací ventily otevřeny a píst klesá dolů. Do rostoucího objemu válce proudí otevřenými sacími ventily palivová směs. Do válce je vtlačována atmosférickým tlakem. Během sání získá palivová směs, proudící sacím potrubím, pohybovou energii (rychlost). Té je využíváno ke zvýšení množství náplně válce. Jakmile píst dorazí do dolní úvrati, sací ventily zůstávají ještě otevřeny. Tím je využito setrvačnosti pohybu palivové směsi, která stále proudí do válce, přestože píst již stoupá a objem válce klesá. Jakmile je velikost tlaku ve válci vyrovnána s velikostí tlaku proudící palivové směsi, směs přestane do válce dále proudit. Nastává ideální okamžik sací ventily zavřít.

Během expanzního zdvihu pístu tlačí horké, rozpínající se produkty hoření, píst dolů a konají práci. Výfukové ventily však otevírají dříve, než píst dosáhne dolní úvrati, aby stále ještě vysoký tlak pracovních plynů stihl klesnout (plyny z válce odejdou do výfuku), než píst bude pokračovat ve

výfukovém zdvihu. V tom okamžiku je již zapotřebí dosáhnout minimálního zbytkového tlaku ve válci. Zbytkový tlak by kladl odpor pístu během výfukového zdvihu a způsoboval tak dodatečné čerpací ztráty. Během výfukového zdvihu vytlačuje píst otevřenými výfukovými ventily spaliny do výfukového potrubí. Opět, spaliny proudící výfukovým potrubím, získávají během výfukového zdvihu pohybovou energii. Ke konci výfukového zdvihu se již objem válce příliš nesnižuje, ale výfukové plyny, stále proudící setrvačností potrubím, snižují ve válci tlak. V tomto okamžiku otevírají sací ventily. Nízký tlak ve válci vyvolá proudění nové palivové směsi ze sacího potrubí do válce, zatímco spaliny z válce odsává do výfuku. V okamžiku, kdy je celý objem spalovacího prostoru nahrazen čerstvou směsí, výfukové ventily zavírají a začíná nový sací zdvih.

Výše popsané procesy vyplachování a plnění válce takto probíhají pouze v ideálních podmínkách, resp. v úzkém pásmu provozního spektra motoru. V něm je možné dosáhnout objemové účinnosti rovné jedné nebo i vyšší. Tento stav je věrně animován na videu [5].

Je-li např. rychlost otáčení motoru nízká, nebo je-li zatížení motoru nízké, je nízká i pohybová energie plynů proudících v pracovních kanálech motoru. Na začátku kompresního zdvihu, kdy stále ještě probíhá sání, není tlak proudící palivové směsi dostatečný, aby překonával narůstající tlak ve válci, způsobený počínajícím kompresním zdvihem. Píst potom část nasáté palivové směsi vytlačí zpět do sání, čímž objemová účinnost klesá. Na konci výfukového zdvihu rovněž nestačí pohybová energie výfukových plynů na plné nasátí čerstvé směsi do spalovacího prostoru. Část spalin v něm tedy zůstane a zablokuje část objemu válce pro nasátí čerstvé palivové směsi. Objemová účinnost opět klesá.

V opačném případě, je-li rychlost otáčení motoru vysoká, je příliš vysoká i pohybová energie plynů proudících v pracovních kanálech motoru. Na konci sání, po zavření sacích ventilů, má proudící směs do válce ještě příliš vysokou rychlost, a dojde k jejímu odrazu od zavřených sacích ventilů zpět do sacího kanálu. Na výfukové straně dojde vlivem příliš vysoké rychlosti plynů k nasátí čerstvé směsi až do výfuku a tím k její ztrátě. Ve většině případů tyto rezonance způsobují další snížení objemové účinnosti. Někteří vývojáři motorů ovšem dokázali tyto rezonance využít ke zvýšení objemové účinnosti motoru. Po odražení palivové směsi od zavírajícího sacího ventilu, pokračuje tlaková vlna sacím potrubím. Toto je vhodně tvarované tak, aby došlo k odrazu vlny zpět směrem k motoru. Při nižších úhlech otevření škrťací klapky může být vlna rovněž odražena od ní. Jakmile vlna doputuje zpět k sacímu ventilu, začíná nový pracovní cyklus motoru a sací ventil je již znovu otevřen. Tlaková vlna poté natlačí do válce více čerstvé palivové směsi, a dojde ke zvýšení

objemové účinnosti. Jelikož rychlost otáčení motoru (a tím i frekvence otevírání sacího ventilu) je proměnná v závislosti na aktuálních provozních podmínkách, používají výrobci proměnnou délku sacího potrubí. Díky té jsou schopni přizpůsobit dobu šíření vlny v potrubí době mezi sacími cykly motoru tak, aby rezonanční přeplňování bylo účinné v širším spektru provozních podmínek. Obdobný jev je používán i na výfukové straně. Výfukové potrubí je speciálně vytvarované, a dojde-li vlivem příliš vysoké rychlosti výfukových plynů k nasátí čerstvé směsi do výfuku, odražená tlaková vlna od výfukového potrubí natlačí čerstvou směs zpět do válce.

Například, budeme-li uvažovat válec o celkovém objemu  $500 \text{ cm}^3$ , běžící nízkou rychlostí, ve které neprobíhá plnění válce optimálně, může mít objemovou účinnost jen 0,5. To znamená, že nasaje jen  $250 \text{ cm}^3$  palivové směsi. Bude-li ten samý válec provozován v rychlosti, pro kterou jsou sací trakt, výfukový trakt a úhly otevření ventilů navrženy, bude plnění válce optimální a může dosáhnout objemové účinnosti např. 1,1. Při ní nasaje  $550 \text{ cm}^3$  palivové směsi. Průběh závislosti objemové účinnosti motoru na rychlosti otáčení motoru tedy kopíruje průběh závislosti točivého momentu.

Konstantní faktory, ovlivňující průběh objemové účinnosti motoru:

- Tvar a délka sacích a výfukových potrubí, konstrukce tlumičů sání a výfuku.
- Zdvih, úhel otevření a zavření ventilů, průměr ventilů.
- Tvar dna pístu a spalovacího prostoru.

Proměnné, měřitelné faktory, ovlivňující průběh objemové účinnosti motoru:

- Úhel otevření škrtkové klapky, popř. tlak v sacím potrubí.
- Tlak atmosférický.
- Rychlost otáčení motoru.

Proměnné a neměřitelné faktory, ovlivňující průběh objemové účinnosti motoru:

- Vůle ventilů (opotřebení - mění zdvih, úhel otevření a zavření ventilů).
- Opotřebení rozvodového mechanismu.
- Zanesení vzduchového filtru a výfukového potrubí nečistotami.
- Netěsnosti sacího a/nebo výfukového potrubí.

Z předchozího je zřejmé, že objemová účinnost motoru je natolik komplexní veličina, že její průběh není možné vypočítat či analyticky vyjádřit. Pro přesné řízení motoru je však nutné jej znát. Průběh objemové účinnosti v závislosti na rychlosti otáčení motoru a tlaku v sacím potrubí, popř. úhlu otevření škrtkové klapky, je obvykle zjišťován na konkrétním typu motoru měřením. Měření probíhá na výkonové zkušební. Měřit je možné průtok nasávaného vzduchu  $Q_s$ , pak lze objemovou účinnost  $\eta_v$  vypočítat podle vztahu:

$$\eta_v = \frac{60 Q_s}{n \cdot k \cdot V_c} \quad [ -; \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}, \text{1} \cdot \text{min}^{-1}, -, \text{m}^3 ], \quad (1)$$

kde  $V_c$  je celkový objem válců motoru,  $n$  je počet otáček motoru za sekundu, a  $k$  konstanta, zohledňující počet expanzních zdvihů motoru, vykonaných za jeden pracovní cyklus motoru.  $k$  je rovna 0,5 pro čtyřdobý motor, 1 pro dvoudobý motor. Výsledkem měření je trojrozměrné datové pole, udávající závislost objemové účinnosti motoru na rychlosti otáčení motoru a úhlu otevření škrtkové klapky (popř. absolutním tlaku v sacím potrubí). Datové pole modeluje průběh funkce objemové účinnosti motoru. Často jsou charakteristiky objemové účinnosti hledány přímo při kalibraci modelů řízení motoru, viz. další kapitoly.

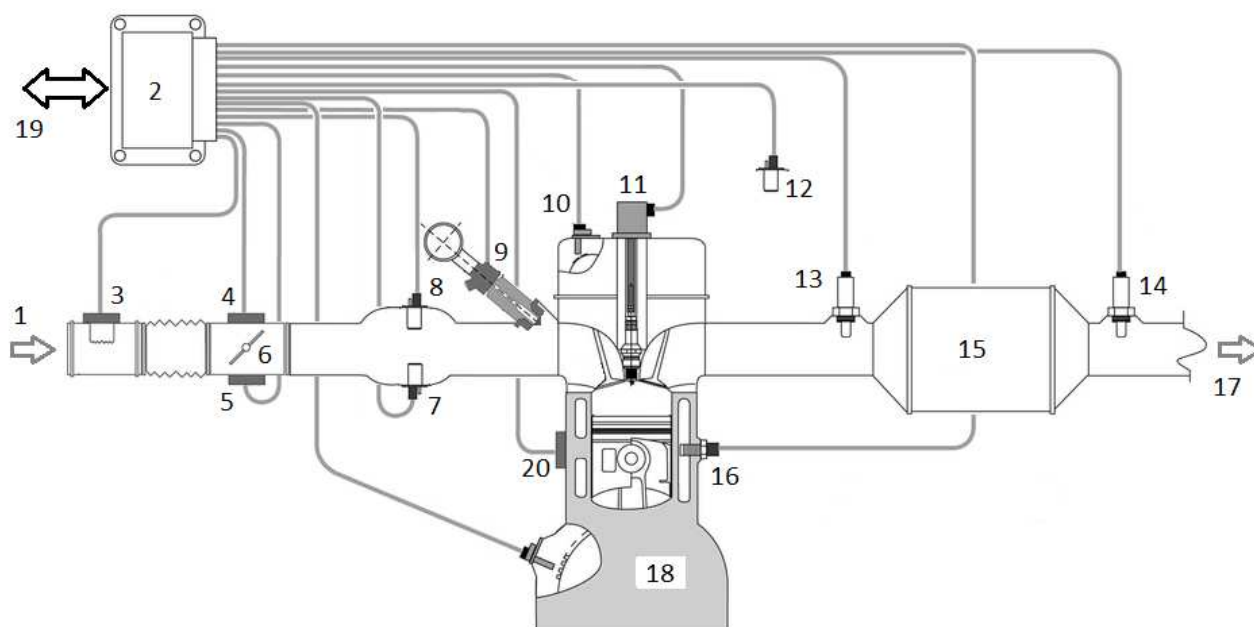
### 3 Základní úlohy řídicího systému zážehového motoru

- Řídit točivý moment a výkon motoru dle požadavku řidiče, popř. dle požadavků jiných.
- Řídit volnoběžnou rychlost otáčení motoru (zajistit rovnost odebíraného a produkovaného mechanického výkonu).
- Udržovat příznivou energetickou účinnost motoru napříč celým spektrem všech provozních podmínek.
- Řídit procesy spalování tak, aby byla v nejvyšší možné míře snížena produkce škodlivin.
- Udržovat takové složení výfukových plynů, aby bylo možno vzniklé škodliviny účinně eliminovat následnými prostředky (katalyzátory a filtry).
- Řídit následné procesy eliminace škodlivin ve výfukových plynech a ověřovat jejich účinnost.

- Diagnostikovat a reportovat závady na mechanickém, senzorkém, akčním a řídicím podsystemu motoru s cílem zamezit mechanickým i elektrickým poškozením, a zabránit zvýšené tvorbě škodlivin.
- Řídit start a ohřev motoru.

Výše zmíněné požadavky jsou někdy protichůdné, proto v praxi často usilujeme o určitý kompromis.

#### 4 Blokové schéma systému řízení zážehového motoru



- |                                     |  |
|-------------------------------------|--|
| 1 - Vstup atmosférického vzduchu    | 11 - Zapalovací modul                              |
| 2 - Řídicí jednotka motoru          | 12 - Snímač tlaku atmosféry                        |
| 3 - Snímač průtoku plnicího vzduchu | 13 - Primární kyslíková sonda                      |
| 4 - Aktuátor škrtící klapky         | 14 - Sekundární kyslíková sonda                    |
| 5 - Snímač polohy škrtící klapky    | 15 - Katalytický konvertor                         |
| 6 - Škrtící klapka                  | 16 - Snímač teploty chladící kapaliny              |
| 7 - Snímač tlaku v sacím potrubí    | 17 - Výstup výfukových plynů                       |
| 8 - Snímač teploty plnicího vzduchu | 18 - Zážehový motor                                |
| 9 - Vstřikovací ventil              | 19 - Interakce řízení motoru s<br>okolními systémy |
| 10 - Snímač polohy vačkové hřídele  | 20 - Snímač detonačního spalování                  |

Obr. 3.: Blokové schéma systému řízení zážehového motoru. Zdroj: [6], upraveno.



## 5 Řízení rychlosti otáčení, výkonu a točivého momentu motoru

Točivý moment zážehových motorů je řízen *kvantitativním* způsobem, tj. *množstvím* palivové směsi, přivedeným do válce motoru v průběhu sacího taktu. S rostoucím množstvím palivové směsi, přivedené do válce, roste užitečný tlak na píst, uvolněný po jejím spálení. Tlak, působící na plochu dna pístu, koná práci po délku expanzního zdvihu pístu. Práce, vykonaná každý pracovní cyklus motoru, tvoří výkon motoru. Z těchto souvislostí můžeme napsat vztah pro výkon motoru:

$$P_m = \frac{1}{60} V_z \cdot p_e \cdot n \cdot k \quad [\text{W}; \text{m}^3, \text{Pa}, \text{1.min}^{-1}, -], \quad (2)$$

kde  $P_m$  je mechanický výkon motoru,  $p_e$  střední efektivní tlak na píst,  $V_z$  zdvihový objem válců motoru,  $n$  počet otáček motoru za minutu, a  $k$  konstanta, zohledňující počet expanzních zdvihů pístu, vykonaných za jeden pracovní cyklus motoru.

Dodání potřebného množství palivové směsi s požadovaným součinitelem přebytku vzduchu, má za úkol ECM. Používá k tomu dva akční členy – škrťící klapku, umístěnou v cestě plnicímu vzduchu, a vstříkovací ventil paliva. Vhodným nastavením polohy škrťící klapky ECM dosáhne požadovaného množství vzduchu, přiváděného do válce motoru. Vstříknutím přesně odměřené dávky paliva do tohoto vzduchu ECM dosáhne vytvoření palivové směsi s požadovaným součinitelem přebytku vzduchu.

Z předchozího textu vyplývá skutečnost, že okamžitý točivý moment motoru je přímo úměrný okamžitému množství nasávaného vzduchu motorem. Základní úlohou řídicího systému motoru je tedy toto množství určit. Jeho závislost na úhlu otevření škrťící klapky však není lineární a vstupují do ní další proměnné. K určení množství (hmotnosti) nasávaného vzduchu je možno použít několik metod, každá má své výhody i nevýhody (viz. další kapitoly). V inverzní podobě lze tyto metody použít k řízení točivého momentu. Řídicí systémy často tyto metody za provozu střídají – používají vždy metodu, která je nejvhodnější pro okamžité provozní podmínky. Každá z metod používá jiné vstupní veličiny (jiné senzory). Obsahuje-li software řídicího systému více metod, je možné při výpadku některého senzoru pokračovat v řízení motoru metodou, jejíž senzory zůstaly v provozu.

Točivý moment motoru je možné v omezených mezích řídit i změnou úhlu zážehu, ovšem za ceny snížení energetické účinnosti motoru. Výhodou je okamžitá reakce točivého momentu na

změnu úhlu zážehu. Používá se zejména v případech, kdy je zapotřebí rychlého snížení točivého momentu na krátkou dobu (změna rychlostního stupně automatické převodovky, zásah protiskluzového regulátoru). Zde je řízení točivého momentu pomocí změny úhlu zážehu a krátkodobé snížení účinnosti motoru přípustné. Regulace momentu klasickým způsobem (snížením množství vzduchu) vyžaduje změnu polohy škrťací klapky, která zabere jistý čas. Došlo by takto k prodloužení reakční doby např. protiskluzového systému.

## 5.1 Určení hmotnosti plnicího vzduchu metodou $\alpha$ -n

### Algoritmus metody $\alpha$ -n

Metoda  $\alpha$ -n používá ke zjištění hmotnosti plnicího vzduchu ( $m_a$ ) dvě hlavní vstupní veličiny. Těmi jsou úhel otevření škrťací klapky ( $\alpha$ ), a rychlost otáčení motoru ( $n$ ). Funkce  $m_a = f(\alpha, n)$  je funkce objemové účinnosti motoru a je obtížné či nemožné ji analyticky vyjádřit. Proto je nutné průběh funkce modelovat pomocí datového pole, udávajícího závislost hmotnosti nasávaného vzduchu (osa  $z$ ) na rychlosti otáčení motoru (osa  $x$ ) a úhlu otevření škrťací klapky (osa  $y$ ). Pole zpravidla obsahuje 256 až 1200 prvků. Moderní řídicí systémy podporují bilineární interpolaci mezi prvky. Obr. 4 ukazuje příklad datového pole závislosti základní hmotnosti vzduchu ( $m_a$ ) pro metodu  $\alpha$ -n.

100.0	92	94	95	97	98	98	99	100	101	101	102	105	103	104	102	100
91.0	90	93	94	97	99	99	100	100	100	100	101	102	101	102	99	97
80.0	89	92	93	96	98	99	100	99	99	99	101	101	95	93	87	85
68.0	88	92	94	96	98	99	100	98	95	95	97	92	83	81	77	75
57.0	88	92	92	93	99	100	102	102	100	98	97	89	86	83	81	78
47.0	88	90	90	95	100	101	96	91	88	80	79	76	73	71	69	67
37.0	87	91	89	91	92	87	80	76	73	69	66	63	62	61	60	59
28.0	86	92	90	83	78	69	59	53	52	52	51	48	46	44	42	40
23.0	78	87	82	70	63	55	49	46	46	42	41	38	36	34	32	30
18.0	70	71	61	55	51	44	40	39	40	38	40	37	32	30	28	26
15.0	64	64	56	52	47	40	38	37	37	36	37	34	32	30	28	26
12.0	56	54	46	43	39	36	34	33	35	35	34	31	29	28	27	26
9.0	44	47	41	40	35	31	33	34	33	33	32	31	30	29	28	27
6.0	33	34	37	39	37	34	33	33	33	33	33	32	31	30	29	28
3.0	34	33	35	33	33	30	30	29	32	32	32	31	30	29	28	27
0.0	33	32	32	29	26	27	27	27	27	27	25	24	23	22	21	20
	1000	1400	1800	2200	2600	3000	3400	3800	4200	4600	5000	5400	5800	6200	6600	7000
	$n$ [1/min]															

Obr. 4: Příklad datového pole pro základní hmotnost vzduchu pro metodu  $\alpha$ -n.

Základní (nekorigovanou) hmotnost vzduchu  $m_a$ , nasátého za jeden sací zdvih jednoho válce, získáme:

$$m_a = f(\alpha, n) \quad [\text{kg}; ^\circ, 1.\text{min}^{-1}] \quad (3)$$

Pro získání hmotnosti vzduchu skutečně nasátého, musí být dále provedeny korekce podle atmosférického tlaku a teploty. Hustota vzduchu klesá s jeho teplotou. Proto při vyšších teplotách vzduchu, bude hmotnost vzduchu nasátého na jeden sací zdvih nižší. Je-li nižší atmosférický tlak, hmotnost nasátého vzduchu rovněž klesá. Zavádíme tedy kompenzační faktory -  $c_t$  (pro atmosférický tlak) a  $c_p$  (pro teplotu nasávaného vzduchu). Kompenzační faktory jsou obvykle funkce jedné proměnné  $c_t = f(t_a)$  a  $c_p = f(p_a)$ , kde  $t_a$  je teplota nasávaného vzduchu [ $^\circ\text{C}$ ] a  $p_a$  je atmosférický tlak [Pa]. Korigovanou hmotnost nasávaného vzduchu  $m_{ac}$  lze poté určit:

$$m_{ac} = m_a \cdot c_t \cdot c_p \quad [\text{kg}; \text{kg}, -, -] \quad (4)$$

Nyní lze vypočítat hmotnost paliva  $m_f$ , které bude dodáno na jeden pracovní cyklus jednoho válce:

$$m_f = \frac{m_{ac}}{AFR_T} \quad [\text{kg}; \text{kg}, -], \quad (5)$$

kde  $AFR_T$  je požadovaný poměr vzduchu k palivu pro daný pracovní bod. Jeho průběh je dán funkcí  $AFR_T = f(\alpha, n)$  a modelován datovým polem. Příklad datového pole pro  $AFR_T$  je na obr. 5.

	101.0	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5
	94.0	12.9	12.9	12.9	12.9	12.9	12.9	12.9	12.9	12.9	12.5	12.5	12.5
	87.0	13.3	13.3	13.3	13.3	13.3	13.3	13.3	13.3	13.3	12.9	12.5	12.5
	79.0	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8	13.3	12.9	12.9
	73.0	14.1	14.1	14.1	14.3	14.5	14.5	14.3	14.2	14.1	13.8	13.3	13.3
	66.0	14.2	14.2	14.2	14.8	15.2	15.2	14.9	14.7	14.5	14.4	13.8	13.8
	59.0	14.3	14.3	14.3	15.2	16.0	16.0	15.4	15.1	14.9	14.7	14.4	14.4
	52.0	14.4	14.4	14.4	15.2	16.0	16.0	16.0	15.6	15.2	15.0	14.7	14.7
	46.0	14.4	14.4	14.5	15.2	16.0	16.0	16.0	16.0	15.6	15.3	14.7	14.7
	38.0	14.5	14.5	14.5	15.3	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	15.3	14.7	14.7
	32.0	14.6	14.6	14.6	15.3	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	15.3	14.7	14.7
	25.0	14.7	14.7	14.7	15.0	15.4	15.7	15.9	15.9	15.8	15.4	14.7	14.7
	↙	500	800	1100	1400	1700	2000	2300	2600	3000	4100	5300	6500
		$n \text{ [1.min}^{-1}]$											

Obr. 5: Příklad datového pole cílového AFR pro metodu  $\alpha$ -n.

Kalibrace metody  $\alpha$ -n

Kalibrace spočívá v nastavení velikosti prvků datových polí pro konkrétní typ motoru. Kalibrace prvků datového pole pro  $m_a$  (základní hmotnost vzduchu) je prováděna zpravidla na statické výkonové zkušebně. Měříme úhel škrtkové klapky, rychlost otáčení motoru a součinitel přebytku vzduchu  $\lambda$  ve výfukovém potrubí. Pro měření  $\lambda$  použijeme širokopásmovou kyslíkovou sondu. Je možno použít též analyzátor složení výfukových plynů, je však nutné počítat s o poznání delší reakční dobou měření. Před zahájením a během kalibrace je zapotřebí dodržet následující podmínky:

- Konstantní tlak a teplota atmosféry.
- Vyřazené kompenzace  $c_t$  a  $c_p$  (datová pole pro  $c_t$  a  $c_p$  vyplníme konstantou 1,0).
- Datové pole pro cílové AFR vyplněné konstantou 14,68.
- Motor zahřátý a udržovaný při provozní teplotě.
- Vlastnosti použitého paliva musí být shodné s vlastnostmi paliva, na které bude motor provozován.

Aby bylo možno motor na výkonové zkušebně spustit, musí být v datovém poli pro  $m_a$  nastaveny prvky hmotnosti plnicího vzduchu alespoň takové velikosti, aby došlo k vytvoření spalitelné palivové směsi ( $\lambda = 0,6$  až  $1,3$ ). Je-li k dispozici datové pole pro podobný motor, je výhodné jej použít jako počáteční nastavení. Nejsou-li k dispozici žádná data, vyplníme celé pole konstantou  $m_i$ , jejíž velikost zjistíme podle vztahu:

$$m_i = 0,25 \cdot V_{cyl} \cdot \rho_p \quad [\text{kg}; \text{m}^3, \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}], \quad (6)$$

kde  $V_{cyl}$  je zdvihový objem jednoho válce motoru a  $\rho_p$  je hustota paliva. Nyní by motor měl být schopen nastartovat a udržet běh naprázdno. Pro kalibraci prvku pole pro  $m_a$ , uvedeme motor do pracovního bodu tohoto prvku a vyčkáme na ustálený stav. Odečteme hodnotu  $\lambda$  a změním dotyčný prvek v datovém poli pro  $m_a$  tak, abychom dostali  $\lambda = 1$ . Požadovanou hodnotu prvku  $m_a$  lze vypočítat dle vztahu

$$m_a = \frac{\lambda_0 \cdot m_{a0}}{\lambda_p} \quad [\text{kg}; -, \text{kg}, -], \quad (7)$$

kde veličiny, označené indexem ‚0‘ představují hodnoty před provedením kalibrace, veličiny označené indexem ‚p‘ představují požadované hodnoty. Stejný postup provedeme pro kalibraci ostatních prvků datového pole pro  $m_a$ . Není-li možné provádět kalibraci při  $\lambda = 1$  (detonační spalování, nepravidelný chod), je možné provést kalibraci např. při  $\lambda = 0,9$ . Poté před začátkem kalibrace vyplníme datové pole pro cílové AFR konstantou 13,21. Podaří-li se identifikovat v datovém poli pro  $m_a$  lineární oblasti, je možné kalibraci urychlit kalibrováním prvků ob jeden nebo více prvků a následnou interpolací.

Kompenzační faktor  $c_p$  lze odhadnout ze závislosti hustoty vzduchu na jeho tlaku, podle Boyleova–Mariottova zákona:

$$c_p = \frac{p}{p_0} = \frac{\rho_0}{\rho} \quad [-; \text{Pa}, \text{Pa}; \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}, \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}], \quad (8)$$

kde veličiny označené indexem ‚0‘ jsou velikosti atmosférického tlaku a hustoty vzduchu, při nichž byla provedena kalibrace pole pro  $m_a$ . Z důvodu časté nutnosti úprav průběhu funkce  $c_p = f(p_a)$  při kalibraci je vhodné její průběh modelovat pomocí dvourozměrného datového pole. Pro případ  $p_0 = 96 \text{ kPa}$  je odhad velikostí prvků pro datové pole  $c_p$  následující:

Tab.1: Odhad velikosti prvků datového pole pro  $c_p$ .

$p_a$ [kPa]	56	66	76	86	96	106
$c_p$ [-]	0,583	0,688	0,792	0,896	1	1,104

Kompenzační faktor  $c_t$  lze odhadnout ze závislosti hustoty vzduchu na jeho teplotě, podle vztahu:

$$c_t = \frac{T_0}{T} = \frac{\rho_0}{\rho} \quad [-, \text{°K}, \text{°K}; \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}, \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}], \quad (9)$$

kde  $T_0$  je teplota nasávaného vzduchu, při níž byla provedena kalibrace pole pro  $m_a$ . Podobně jako závislost  $c_p$ , bývá i závislost  $c_t$  často modelována pomocí datového pole. Průběh skutečných kompenzačních faktorů  $c_t$  a  $c_p$  může být od jejich odhadu odlišný, důvodem jsou dynamické jevy plynů (víření, rezonance) a jimi způsobené nelinearity. Další nelinearity způsobuje ohřev palivové směsi cestou horkým sacím kanálem v hlavě válců. Přesný průběh  $c_t$  a  $c_p$  lze zjistit jen měřením na

výkonové zkušebně, popř. zkušebními jízdami se záznamovým zařízením a následnou analýzou dat. Může se objevit rovněž závislost  $c_t$  a  $c_p$  na úhlu otevření škrťící klapky. V takovém případě je nutné zavést datová pole pro  $c_t$  a  $c_p$  trojrozměrná.

Kalibrace velikosti prvků datového pole pro cílové AFR vychází zejména z požadavků na točivý moment motoru, energetickou účinnost motoru a množství škodlivin obsažených ve výfukových plynech. Vychází z požadovaných vlastností motoru v cílovém případě použití. Obecně, požadujeme-li nejvyšší točivý moment, kalibrujeme AFR = 13,2. V případě potřeby snížit teplotu spalování při vysokých výkonech, můžeme obohacovat směs až na AFR = 11,6. Požadujeme-li nejnižší obsah škodlivin ve výfukových plynech, kalibrujeme AFR = 14,68. Pro nejvyšší energetickou účinnost použijeme AFR = 15,4.

Výhody metody řízení  $\alpha$ -n:

- Velmi krátká doba odezvy, dobré dynamické vlastnosti.
- Postačují jednoduché a spolehlivé senzory.
- Vysoká přesnost řízení při vyšších výkonech motoru – výhodné použití pro závodní účely.
- Dobře použitelná pro výkonné motory s vysokými úhly otevření ventilů a individuálními škrťícími klapkami.
- Nízké nároky na výpočetní čas a výkon.

Nejúhody metody řízení  $\alpha$ -n:

- Časově náročná kalibrace.
- Nutnost korekcí pro tlak a teplotu atmosféry a jejich kalibrace.
- Nutnost rekalibrace v případě jakékoliv mechanické změny motoru (sacího a výfukového traktu, úhlu a zdvihu otevření ventilů, spalovací komory).
- Nízká přesnost řízení při nízkých výkonech (při nízkých výkonech je závislost hmotnosti plnicího vzduchu na úhlu otevření klapky velmi strmá, projevuje se vliv chyb senzoru, A/D převodu a šum, rušení a teplotní závislosti analogových systémů). Tyto vlivy komplikují či znemožňují splnění přísných emisních norem při nízkých výkonech motoru.

## 5.2 Určení hmotnosti plnicího vzduchu metodou Speed-Density

### Algoritmus metody Speed-Density

Metoda vychází ze stavové rovnice ideálního plynu. Známe-li objem plynu, jeho tlak a teplotu, můžeme vypočítat molární množství plynu, obsažené v daném objemu:

$$n_m = \frac{p \cdot V}{R \cdot T} \quad [\text{mol}; \text{Pa}, \text{m}^3, \text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}, \text{K}], \quad (10)$$

kde  $R$  je molární plynová konstanta, rovna přibližně  $8,314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ .  $V$ ,  $p$  a  $T$  představují objem, tlak a teplotu palivové směsi ve válci v okamžiku zavření sacího ventilu.

Objem  $V$  lze vypočítat ze vztahu

$$V = \eta_v \cdot \left( \frac{V_{cyl}}{C_R - 1} + V_{cyl} \right) \quad [\text{m}^3, \text{m}^3, -, \text{m}^3]. \quad (11)$$

$C_R$  představuje kompresní poměr motoru,  $V_{cyl}$  je zdvihový objem jednoho válce motoru,  $\eta_v$  objemová účinnost motoru. Pro měření tlaku  $p$  jsou používány rychlé piezoelektrické senzory tlaku a ECM vzorkuje tlak v sacím potrubí synchronně s okamžiky zavírání sacích ventilů jednotlivých válců.

Teplota  $T$  je měřena termistorem NTC, umístěným v sacím potrubí. Při nízkých výkonech motoru, kdy je průtok vzduchu sacím potrubím nízký, dochází k ohřívání palivové směsi v horkém kanálu hlavy válce. Při vysokých výkonech, dochází naopak k ochlazení palivové směsi skupenským teplem vypařovaného paliva. Teplota vzduchu měřená termistorem v sacím potrubí tedy nemusí odpovídat skutečné teplotě směsi ve válci v okamžiku uzavírání sacího ventilu. Tyto parazitní jevy jsou kompenzovány započítáním objemové účinnosti motoru.

Dosazením do vztahu (10) a vynásobením molární hmotností vzduchu  $M$  ( $\approx 0,0289647 \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$ ) dostáváme výsledný vztah pro hmotnost nasátého vzduchu na jeden pracovní cyklus jednoho válce:

$$m_a = \frac{M \cdot p \cdot \eta_v \cdot \left( \frac{V_{cyl}}{C_R - 1} + V_{cyl} \right)}{R \cdot T} \quad [\text{kg}; \text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}, \text{Pa}, -, \text{m}^3, -, \text{m}^3, \text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}, \text{K}] \quad (12)$$

Objemová účinnost motoru  $\eta_v$  je pro metodu Speed-Density reprezentována funkcí  $\eta_v = f(p, n)$ . Pro nemožnost analytického vyjádření je její průběh zaznamenán v datovém poli.

Hmotnost dodaného paliva na jeden pracovní cyklus jednoho válce je dána vztahem (5),  $AFR_T$  je požadovaný poměr vzduchu k palivu pro daný pracovní bod. Je získán z trojrozměrného datového pole jako  $AFR_T = f(p, n)$ .

### Kalibrace metody Speed-Density

Kalibrace spočívá v nalezení správné velikosti prvků datového pole pro objemovou účinnost motoru, tzn. nalezení průběhu  $f(p, n)$ . Probíhá podobným způsobem, jako kalibrace metody  $\alpha$ -n (str. 15). Provádí se zpravidla na výkonové zkušebně, s motorem zahřátým a udržovaným při pracovní teplotě a palivem, na které bude motor po kalibraci provozován. Datové pole pro  $AFR_T$  vyplníme konstantou o velikosti 14,68; případně nižší, nastanou-li potíže se stabilitou chodu motoru, detonačním spalováním nebo vysokou teplotou hoření. Je-li k dispozici datové pole pro objemovou účinnost pro podobný motor, lze jej použít jako počáteční nastavení. Nejsou-li data k dispozici, vyplníme datové pole pro objemovou účinnost konstantou o velikosti 0,25 – 0,3. Toto nastavení umožní motoru alespoň spustit a běžet naprázdno. Cílem kalibrace je, pro každý prvek datového pole objemové účinnosti (pracovní bod motoru), nalézt takovou velikost  $\eta_v$ , aby skutečné  $AFR$  (měřeno širokopásmovou kyslíkovou sondou) odpovídalo nastavenému  $AFR_T$ .

Postup kalibrace:

- Nastavíme motor do pracovního bodu, pro který chceme nalézt velikost prvku pole  $\eta_v$  a vyčkáme na ustálený stav.
- Odečteme  $\lambda$  (měřeno širokopásmovou kyslíkovou sondou ve výfukovém potrubí).
- Změníme dotyčný prvek pole  $\eta_v$  tak, abychom dostali  $\lambda$  odpovídající  $AFR_T$ . Hodnotu, na níž je zapotřebí prvek  $\eta_v$  nastavit, lze vypočítat:

$$\eta_v = \frac{\lambda_0 \cdot \eta_{v0}}{\lambda_p} \quad [\text{kg}; -, \text{kg}, -], \quad (13)$$

kde veličiny, označené indexem ,0' představují hodnoty před provedením kalibrace, veličiny označené indexem ,p' představují požadované hodnoty.



- Ověříme, že nová hodnota prvku  $\eta_v$  způsobila požadovanou změnu  $\lambda$ .
- Kalibrace datového pole pro  $AFR_T$  podléhá stejným zásadám jako pro metodu  $\alpha$ -n (str. 17).

Výhody metody řízení Speed-Density:

- Uspokojivá doba odezvy (avšak delší než u metody  $\alpha$ -n), dobré dynamické vlastnosti.
- Metoda sama kompenzuje vliv teploty a tlaku plnicího vzduchu.
- Vysoká přesnost řízení při nízkých výkonech.

Nevýhody metody řízení Speed-Density:

- Časově náročná kalibrace.
- Nutnost rekalibrace v případě jakékoliv mechanické změny motoru (sacího a výfukového traktu, úhlu a zdvihu otevření ventilů, spalovací komory).
- Snížená přesnost řízení u motorů s velkými průměry škrťících klapek při vysokých výkonech (velmi strmá závislost hmotnosti plnicího vzduchu na tlaku v sacím potrubí).
- Nutnost použít komplikovanější a dražší senzor tlaku v sacím potrubí.

### 5.3 Určení hmotnosti plnicího vzduchu metodou MAF

Metoda MAF (Manifold Air Flow, z angl. „Průtok vzduchu sacím potrubím“) využívá přímé měření senzorem hmotnostního průtoku vzduchu sacím potrubím (často nesprávně označován jako „váha vzduchu“). Nároky na vlastnosti senzoru jsou zde vysoké. Vzduch v sacím potrubí motoru rezonuje (viz. kap. 2.5), tzn. pohybuje se v jednom okamžiku směrem k motoru, a ve druhém zpět. Frekvence rezonancí je proměnná, od několika Hz až po stovky Hz. Senzor musí být tedy schopen rozlišit směr proudění vzduchu a hmotností průtoky v obou směrech od sebe odečíst. Dále musí být teplotně kompenzovaný. Sací trakt motoru, v němž je umístěn senzor, musí být uzpůsoben tak, aby v senzoru a jeho okolí nevznikalo turbulentní proudění vzduchu, které způsobuje chyby měření. Převodní charakteristika senzoru většinou vyžaduje linearizaci v softwaru ECM. Stanovení hmotnosti dodaného paliva na jeden pracovní cyklus jednoho válce je pak možné dle vztahu:

$$m_f = \frac{60 \cdot Q_m}{n_c \cdot k \cdot n \cdot AFR_T} \quad [\text{kg}; \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}, -, 1 \cdot \text{min}^{-1}, -], \quad (14)$$

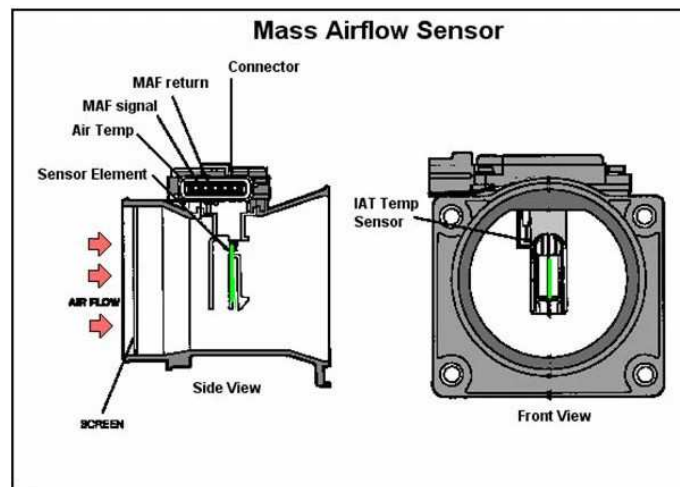
kde  $Q_m$  představuje měřený hmotnostní průtok vzduchu,  $n_c$  počet válců motoru,  $k$  konstantu (viz. vztah (1)),  $n$  rychlost otáčení motoru a  $AFR_T$  cílový poměr paliva a vzduchu výsledné směsi. V případě metody MAF platí  $AFR_T = f(Q_m, n)$ . Průběh funkce je modelován pomocí trojrozměrného datového pole a pro jeho kalibraci platí stejné zásady jako u ostatních metod řízení (viz. str. 17).

Výhody metody řízení MAF:

- Vysoká flexibilita. Přesnost metody neovlivňují změny objemové účinnosti motoru, způsobené mechanickými změnami v sacím a výfukovém traktu, změnami zdvihu a úhlu otevření ventilů, tvaru spalovacího prostoru, případně změnami způsobenými opotřebením motoru (např. zanášení vzduchového čističe a sacího traktu motoru nečistotami).

Nevýhody metody řízení MAF:

- Používá drahý a komplikovaný senzor, který často trpí závadami. Mohou nastat problémy s opakovatelností měření a linearizací převodní charakteristiky.
- Spoléhá na jediný senzor. V případě jeho závady je provoz motoru nemožný. Ostatní metody využívají více vstupních signálů a při výpadku jednoho z nich je většinou provoz motoru, v omezených podmínkách, možný. Z těchto důvodů bývá v řídicích systémech zážehových motorů implementováno více metod řízení, aby bylo možno jejich výsledky ověřovat a v případě potřeby použít metodu náhradní.
- Delší doba odezvy, v dynamicky náročných aplikacích musí být přechodové jevy řízeny jinou metodou.
- MAF senzor je překážkou v cestě plnicímu vzduchu, která způsobuje snížení objemové účinnosti motoru při vysokých výkonech.



Obr.6: Příklad konstrukce MAF senzoru.

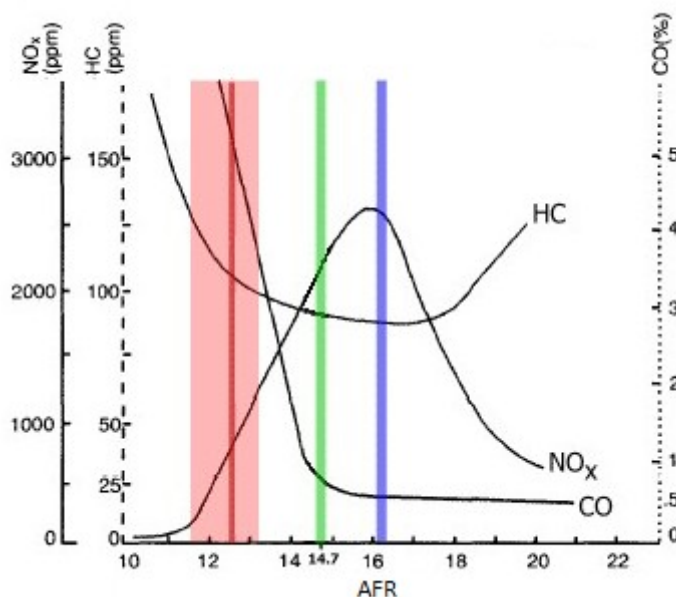


Obr.7: Příklad provedení MAF senzoru.

## 6 Vznik a eliminace škodlivin při provozu zážehových motorů

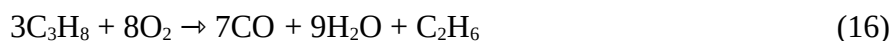
### 6.1 Vznik škodlivin při provozu zážehových motorů

Složení výfukových plynů zážehového motoru je závislé na poměru vzduchu a paliva (AFR) spalované palivové směsi, viz. obr. 8.

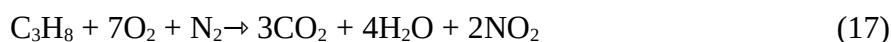


Obr. 8: Závislost složení výfukových plynů na AFR.

Bohaté směsi (AFR < 14,68) neobsahují dostatek kyslíku k dokonalému spálení veškerého obsaženého paliva. Dochází tak ke tvorbě nespálených uhlovodíků (HC) a oxidu uhelnatého (CO), jak je patrné z rovnic:



Oxid uhelnatý (CO) i uhlovodíky ( $C_xH_y$ ) jsou lidskému zdraví i životnímu prostředí škodlivé. Chudé směsi (AFR > 14,68) obsahují přebytek kyslíku, jehož následkem jsou vysoké spalovací teploty. Po vyhoření veškerého paliva ve válci zůstává ještě kyslík. Tento, při vysoké teplotě a tlaku, reaguje s přirozeně v atmosféře přítomným dusíkem, za vzniku oxidů dusíku:



Oxidy dusíku jsou rovněž škodlivé plyny. Stechiometrická směs (AFR = 14,68) v ideálních podmínkách shoří dokonale a vyprodukuje oxid uhličitý a vodu:



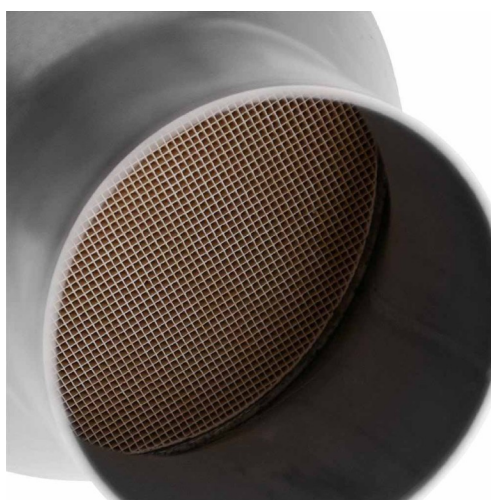
Reálné spalování ve válci zážehového motoru však neprobíhá dokonale. Palivo a vzduch nejsou dokonale smíchány a vznikají tak oblasti směsi chudší, i bohatší. Palivo nemusí být dokonale odpařeno a může tvořit mikroskopické kapičky. Uvnitř těchto kapiček palivo nemá přístup ke kyslíku, nemůže tedy dokonale shořet. Do úzkého prostoru mezi pístem a válcem, nad prvním pístním kroužkem, se zpravidla nedostane plamen a směs, obsažená v tomto prostoru, nevyhoří. Uhlovodíkové plyny se odpařují z mazacího olejového filmu na stěně válce. Při vyšších výkonech motoru je rovněž možné dosáhnout dostatečných tlaků a teplot pro vznik oxidů dusíku. Jisté množství škodlivin tedy vzniká i při spalování stechiometrické směsi. Optimalizací tvaru spalovacího prostoru a dobrým promícháním palivové směsi (často vířením) lze množství oxidu uhelnatého a nespálených uhlovodíků snížit, nikoliv však eliminovat.

## 6.2 Eliminace škodlivin vzniklých provozem zážehového motoru

Pro eliminaci škodlivých plynů, vznikajících při provozu zážehových motorů, se užívají nejčastěji katalytické konvertory. Jejich aktivní část tvoří pórovité keramické těleso (jemná struktura s velkým povrchem, viz. obr. 9), pokrytá katalyzátorem – tenkou vrstvou vzácných kovů. Katalyzátor vyvolává chemickou reakci, aniž by se jí zúčastnil. Existují dva druhy katalytických konvertorů pro spalovací motory:

- Redukční katalytické konvertory. Používají jako katalyzátor rhodium. Dostanou-li se, při teplotě nad 400 °C, do kontaktu s rhodiem oxidy dusíku, jsou redukovány na kyslík a dusík.
- Oxidační katalytické konvertory používají jako katalyzátor platinu, při teplotě nad 400 °C oxidují nespálené uhlovodíky a oxid uhelnatý za přítomnosti kyslíku na oxid uhličitý a vodu.

Kombinací redukčního a oxidačního katalytického konvertoru vzniká nejpoužívanější trojčinný katalytický konvertor. Jeho první část – redukční – redukuje oxidy dusíku na kyslík a dusík. Druhá – oxidační – část konvertoru užívá kyslík (včetně kyslíku vytvořeného redukční částí), k oxidaci nespálených uhlovodíků a oxidu uhelnatého na oxid uhličitý a vodu. Zmíněné chemické reakce však probíhají rovnovážně jen za předpokladu, že konvertor není nasycen. Konvertor má akumulaci schopnost – v případě nedostatku kyslíku ve výfukových plynech je schopen krátkodobě ukládat nespálené uhlovodíky a oxid uhelnatý, v případě přebytku kyslíku ukládá kyslík. Dojde-li však k nasycení konvertoru, účinnost katalytických reakcí strmě klesá. Při nasycení kyslíkem přestávají probíhat redukční reakce oxidů dusíku, při nasycení uhlovodíky a oxidem uhelnatým přestávají probíhat oxidační reakce z důvodu nedostatku kyslíku. Pro správnou činnost trojčinného katalytického konvertoru musí být složení výfukových plynů řízeno takovým způsobem, aby nedošlo k nasycení katalyzátoru. Součinitel přebytku vzduchu je zpravidla regulován v rozmezí  $\lambda = 0,97$  až  $1,03$  (tzv. lambda okno), se střídáním mírně chudého a mírně bohatého chodu. Pro monitorování stavu konvertoru používají moderní systémy sekundární kyslíkovou sondu. Je-li její signál chudý, v konvertoru je přebytek kyslíku, v opačném případě je v konvertoru přebytek uhlovodíků a oxidu uhelnatého. Za pomoci signálu sekundární kyslíkové sondy je možné konvertor regulovat v nenasyčeném režimu a monitorovat jeho akumulaci schopnost, která klesá s opotřebením konvertoru. Akumulaci schopností dokáže rovněž konvertor vykryt krátkodobé odchylky od lambda okna, které mohou nastat zejména v přechodových stavech systému.



Obr. 9: Pohled do katalytického konvertoru vstupním potrubím.

## 7 Regulace AFR v uzavřené smyčce

Pro efektivní průběh katalytických reakcí v katalytických konvertorech výfukových plynů je nutné precizně regulovat poměr vzduchu a paliva (AFR) spalované směsi (viz. kap. 6). Povolená odchylka součinitele přebytku vzduchu v ustáleném stavu činí pouze  $\pm 3\%$  ( $\lambda = 0,97 \dots 1,03$ ). K řízení AFR palivové směsi slouží speciálně vyvinuté metody (viz. kap. 5.1 – 5.3). Výsledný, skutečný AFR je však ovlivňován množstvím okolních parametrů:

- Složení paliva (jeho výhřevnost). Způsobuje změnu velikosti stechiometrického AFR. Snížení výhřevnosti paliv způsobuje mimo jiné přidávání složek z obnovitelných zdrojů (bioethanol). Stechiometrický AFR pro čistý benzin je roven 14,68; pro bioethanol 9,6.
- Zanášení vzduchového čističe nečistotami, zanášení sacích kanálů a ventilů uhlíkovými usazeninami. Způsobují pokles objemové účinnosti motoru.
- Opatřebení pohonu vačkových hřídelí, opotřebení vaček a změny vůlí ventilů. Ovlivňují objemovou účinnost.
- Tolerance tlaku paliva – přímo ovlivňuje dodané množství paliva za jednotku času otevření vstřikovacího ventilu, a tím i AFR.
- Výrobní tolerance vstřikovacích ventilů.
- Odchytky měření (tolerance senzorů).

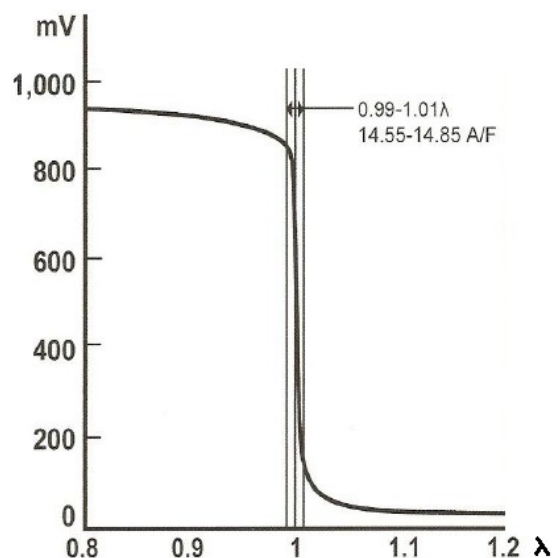
Výše uvedené odchylky jsou zpravidla nepředvídatelné a nelze pro ně vytvořit kompenzační metody. Řídicí systém s nimi nemůže žádným způsobem počítat a vnáší tak do řízení AFR odchylky o velikosti až 10 %. Požadavky na udržení  $\lambda = 1 \pm 3\%$  tedy přinesly nutnost regulovat AFR v uzavřené smyčce.

Skutečné AFR je měřeno ve výfukovém potrubí pomocí kyslíkové sondy. Používají se dva druhy kyslíkových sond:

### Úzkopásmová (skoková) kyslíková sonda

Z jejího výstupního signálu lze detekovat dva stavy:

- Výstupní napětí je nižší než 450 mV, potom  $\lambda < 1$ .
- Výstupní napětí je větší než 450 mV, potom  $\lambda > 1$ .



Obr. 10: Převodní charakteristika úzkopásmové kyslíkové sondy.

#### Širokopásmová kyslíková sonda

- Měří spojitě součinitel přebytku vzduchu  $\lambda$  v rozsahu od 0,65 až po čistý vzduch.
- Sama ke své činnosti vyžaduje precizní analogové systémy a dva PID regulátory, které musí být součástí ECM.

Metody řízení AFR obvykle zavádí korekční koeficient pro regulaci dodaného množství paliva v závislosti na zpětné vazbě od kyslíkové sondy  $c_\lambda$ . Požadovaná hmotnost dodaného paliva vstříkovacími ventily  $m_{p\lambda}$  je potom dána vztahem:

$$m_{f\lambda} = m_f \cdot c_\lambda \quad [\text{kg}; \text{kg}, -], \quad (19)$$

kde  $m_f$  je nekorigovaná hmotnost paliva vypočtená řídicí metodou bez zpětné vazby. Výchozí velikost  $c_\lambda$  je rovna 1 (žádná korekce hmotnosti dodaného paliva). Systémy s úzkopásmovou kyslíkovou sondou používají k výpočtu  $c_\lambda$  různé druhy integračních regulátorů. Jejich společným principem je postupné zvyšování  $c_\lambda$  v případě  $\lambda > 1$  (napětí kyslíkové sondy nižší než 450 mV), a naopak postupné snižování  $c_\lambda$  v případě  $\lambda < 1$  (napětí kyslíkové sondy vyšší než 450 mV). Výsledkem činnosti těchto regulátorů je oscilování  $\lambda$  těsně okolo hodnoty 1. Tyto oscilace podporují správnou činnost trojčinného katalytického konvertoru, kdy během periody  $\lambda > 1$  konvertor



akumuluje kyslík, a během periody  $\lambda < 1$  uložený kyslík využije pro oxidaci CO a HC. V případě použití širokopásmové kyslíkové sondy je známa velikost odchylky skutečného AFR od požadovaného. Je možné užít PID regulátory a dosáhnout tak podstatně lepších regulačních vlastností. Komplikací pro  $\lambda$  regulátory je zpoždění zpětné vazby v regulované soustavě. Po vstříknutí dávky paliva do sacího potrubí (akčním zásahu) musí proběhnout celý pracovní cyklus motoru (dvě otáčky klikového hřídele) a spálené plyny musí dorazit výfukovým potrubím ke kyslíkové sondě. Až v tomto okamžiku řídicí systém dostane zpětnou vazbu o tom, jakého AFR ve skutečnosti dosáhl vstříknutím zmíněné dávky paliva. Velikost toto zpoždění je navíc proměnná – závislá na rychlosti otáčení motoru a úhlu otevření škrtkové klapky, činí desítky milisekund až jednotky sekund. Při vyšších úhlech otevření klapky proudí pracovní plyny potrubím rychleji a naopak. Regulátory proto musejí používat proměnné P, I, D konstanty v závislosti na rychlosti otáčení motoru a úhlu otevření škrtkové klapky. Pokročilejší regulační systémy mohou použít trojrozměrné pole koeficientů  $c_\lambda$ . V závislosti na aktuálním pracovním bodu motoru je vybírán z pole příslušný koeficient, který je dále upravován regulátorem tak, aby bylo dosaženo požadovaného AFR. Datové pole je vždy po zastavení motoru uloženo do trvalé paměti. Tímto způsobem se systém stává přizpůsobivý i většině nepředvídatelných vlivů, např. kolísajícímu podílu bioethanolu v palivu.

### **Poznámka autora na závěr**

Tato stať, v současné podobě, stručně popisuje základní principy a metody řízení dodávky paliva u zážehových motorů. Slouží jako příloha diplomové práce a klade si za úkol uvést čtenáře do souvislostí předkládané problematiky. Cílem autora je v budoucnosti stať podstatně rozšířit a uvést další kapitoly:

- Řízení vstřikovacích ventilů.
- Řízení zapalování.
- Přejídné jevy a jejich řízení v systémech zážehových motorů.
- Řízení startu a ohřevu motoru.
- Metody diagnostiky motoru a jeho řídicího systému.
- Použití FPGA pro systémy řízení pístových motorů.
- Možnosti a metody automatických kalibrací on-line a off-line.
- Výzkum použití umělé inteligence a neuronových sítí pro systémy řízení pístových motorů.
- Principy detekce polohy klikového a vačkového hřídele.
- Možnosti provedení softwaru a hardwaru pro řídicí systémy pístových motorů.

## 8 Seznam použitých zdrojů

- [1] DOSEDLA, Martin: *Hardwarová a softwarová implementace řídicí jednotky motoru*, absolventská práce, 2010.
- [2] BANISH, Greg: *Designing and tuning high performance fuel injection systems*. CarTech, North Branch, USA, 2009. ISBN 978-1-932494-90-7.
- [3] BANISH, Greg: *Engine management advanced tuning*. CarTech, North Branch, USA, 2007. ISBN 978-1-932494-42-6.
- [4] Kawasaki heavy industries Ltd.: *Z750S Service manual*, Part No.99924-1344-01, 2005.
- [5] Robert BOSCH Company: „Scavenging“ [online], dostupné z <https://www.youtube.com/watch?v=EE2ybLnQX9c> .
- [6] COOK, Jeffrey: *Electronic engine control system diagram* [online], dostupné z [https://www.researchgate.net/figure/Electronic-engine-control-system-diagram\\_fig1\\_224617391](https://www.researchgate.net/figure/Electronic-engine-control-system-diagram_fig1_224617391) .
- [7] Zobrazení snímače hmotnostního průtoku vzduchu, online dostupné z: [https://www.alibaba.com/product-detail/HOT-SALE-Original-Mass-Air-Flow\\_60259761516.html](https://www.alibaba.com/product-detail/HOT-SALE-Original-Mass-Air-Flow_60259761516.html) .