



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

## MOBILNÍ GENERÁTOR SIGNÁLŮ PRO KALIBRACI ECU

MOBILE SIGNAL GENERATOR FOR ECU CALIBRATION

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Aliaksandr Pauliuchenka

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. David Svída, Ph.D.

BRNO 2023





## Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství  
Student: **Bc. Aliksandr Pauliuchenka**  
Studijní program: Automobilní a dopravní inženýrství  
Studijní obor: bez specializace  
Vedoucí práce: **Ing. David Svída, Ph.D.**  
Akademický rok: 2022/23

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### Mobilní generátor signálů pro kalibraci ECU

#### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce je zaměřená na návrh a realizaci mobilního generátoru signálů pro kalibraci elektronických řídicích jednotek vozidlových spalovacích motorů.

#### Cíle diplomové práce:

Pro zadanou elektronickou řídicí jednotku spalovacího motoru provést rozbor vstupních a výstupních veličin a jejich význam pro řízení. Navrhnout funkční schéma generátoru signálů a pomocí univerzální elektronické vývojové platformy vytvořit funkční prototyp.

#### Seznam doporučené literatury:

ZÁHLAVA, Vít. Metodika návrhu plošných spojů. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-010-2193-9.

VÁŇA, Vladimír. ARM pro začátečníky. 1. Praha: BEN - technická literatura, 2009. ISBN 978-80-7300-246-6.

SELECKÝ, Matuš. Arduino: uživatelská příručka. Brno: Computer Press, 2016. ISBN 978-80-251-4840-2.

ŠTĚRBA, Pavel. Elektronika a elektrotechnika motorových vozidel: Seřizování, diagnostika závad a chybové kódy OBD. Brno: CPress, 2013. ISBN 978-80-264-0271-8.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

---

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

---

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

## ABSTRAKT

Předmětem této diplomové práce je mobilní generátor elektrických signálů pro kalibraci řídicích jednotek spalovacích motorů. Práce v první řadě nabízí analýzu elektrických signálů, které vstupují do řídicí jednotky. Dále je popsán proces vývoje desky plošných spojů využité v generátoru, programů v jazyce C++ pro využité mikrokontroléry a softwaru pro ovládání a programování testovacích scénářů. Závěrem práce je provedení měření výstupních signálů generátoru osciloskopem a testování připojením k otevřené řídicí jednotce spalovacího motoru, na základě čehož byla vyhodnocena funkčnost generátoru.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Elektrický signál, snímač, kalibrace, ECU, HIL, testování, mikrokontrolér, generátor, deska plošných spojů, C/C++, SPI, CAN, Mbed, Simulink.

## ABSTRACT

The subject of this thesis is a mobile electrical signal generator for the calibration of an Electronic Control Unit (ECU). The thesis primarily offers an analysis of the electrical signals that enter the control unit. It then describes the process of developing the Printed Circuit Board (PCB) used in the generator, the C++ programs for the microcontrollers used, and the software for controlling and programming the test scenarios. Finally, the thesis concludes by measuring the output signals of the generator with an oscilloscope and testing the connection to an open ECU. Based on these tests, the functionality of the generator was evaluated.

## KEYWORDS

Electrical signal, sensor, calibration, ECU, HIL, testing, microcontroller, generator, PCB, C/C++, SPI, CAN, Mbed, Simulink.

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PAULIUCHENKA, Aliaksandr. *Mobilní generátor signálů pro kalibraci ECU*. Brno, 2023. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/149736>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce David Svída.

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Davida Svídy, Ph.D. a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 26. května 2023

.....

Aliaksandr Pauliuchenka

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Davidu Svídovi, Ph.D. za vstřícnost a cenné připomínky při vedení práce a za poskytnutí vybavení potřebného k jejímu vypracování. Rád bych také poděkoval doc. Ing. Pavlu Kučerovi, Ph.D., za jeho odborné rady. Velmi oceňuji významnou podporu svých blízkých přátel a rodiny po celou dobu studia a chtěl bych jim za ni poděkovat.

# OBSAH

Úvod.....	11
<b>1 Elektronická řídicí jednotka.....</b>	<b>12</b>
1.1 Přehled systémů řízení zážehového motoru.....	12
1.1.1 Požadavek na točivý moment.....	13
1.1.2 Struktura točivého momentu.....	13
1.1.3 Vzduchový systém.....	13
1.1.4 Palivový systém.....	13
1.1.5 Systém zapalování.....	14
1.1.6 Výfukový systém.....	14
<b>2 Rozbor elektrických signálů.....</b>	<b>15</b>
2.1 Vstupní signály.....	15
2.1.1 Analogové vstupní signály.....	15
2.1.2 Digitální vstupní signály.....	15
2.2 Výstupní signály.....	16
2.2.1 Spínací výstupní signály.....	16
2.2.2 Digitální výstupní signály.....	16
2.2.3 Speciální výstupní signály.....	16
<b>3 Snímače spalovacího motoru.....</b>	<b>17</b>
3.1 Snímač teploty.....	17
3.2 Snímač otáček.....	18
3.2.1 Indukční snímač.....	18
3.2.2 Hallův snímač.....	19
3.2.3 Snímač polohy.....	19
3.3 Snímač hmotnosti nasávaného vzduchu.....	20
3.4 Piezoelektrický snímač klepání.....	21
3.5 Snímač tlaku.....	21
3.6 Snímač obsahu kyslíku ve spalinách.....	22
3.6.1 Dvoustavová $\lambda$ sonda.....	22
3.6.2 Širokopásmová $\lambda$ sonda.....	23
<b>4 Kalibrace softwarových funkcí ECU.....</b>	<b>24</b>
<b>5 Hardware in the loop – HIL testování.....</b>	<b>25</b>
5.1 National instruments.....	25
5.2 DSPACE.....	26
<b>6 Funkce mobilního generátoru signálů.....</b>	<b>27</b>
6.1 Signály pro generování.....	27
6.2 Volba hardwaru.....	28
6.2.1 NI MYRIO.....	28
6.2.2 NUCLEO STM32.....	29
<b>7 Návrh hardwaru mobilního generátoru signálů.....</b>	<b>31</b>
7.1 Předběžná hardwarová koncepce mobilního generátoru signálů.....	31
7.2 Měření vstupních signálů.....	32

---

7.3	Úprava signálů.....	34
7.3.1	Změna výstupního napětí signálů .....	35
7.3.2	Zvětšení počtu výstupů .....	42
7.3.3	Generování odporu.....	44
7.4	Výsledná hardwarová koncepce mobilního generátoru signálů.....	44
7.5	Elektronické obvody.....	45
7.5.1	Napájení a zapojení mikrokontrolérů.....	45
7.5.2	D/A převodníky.....	48
7.5.3	Digitální potenciometry .....	48
7.5.4	CAN komunikace.....	49
7.5.5	Operační zesilovače .....	50
7.6	Návrh desky plošných spojů.....	52
7.7	Hardwarová konfigurace Nucleo F303K8 .....	54
<b>8</b>	<b>Návrh softwaru mobilního generátoru signálů .....</b>	<b>55</b>
8.1	Programování mikrokontrolérů .....	56
8.1.1	Programování STM32 I master.....	57
8.1.2	Programování STM32 II slave.....	59
8.2	Ovládání mobilního generátoru signálů .....	62
<b>9</b>	<b>Realizace mobilního generátoru signálů .....</b>	<b>74</b>
9.1	Měření signálů.....	75
9.2	Zapojení do řídicí jednotky .....	78
	<b>Závěr .....</b>	<b>80</b>
	<b>Použité informační zdroje .....</b>	<b>81</b>
	<b>Seznam použitých zkratk a symbolů .....</b>	<b>85</b>
	<b>Seznam příloh.....</b>	<b>87</b>



## ÚVOD

V oblasti testování mechatronických systémů se v poslední době výrazně projevuje trend automatizace. Manuální testování, které bylo dříve běžnou praxí, se s rostoucí složitostí technologií stává časově náročným a náchylným k chybám. Jako řešení se nabízí automatizace testovacích procesů pomocí testovacích zařízení s možností naprogramovat určité scénáře a zaručit jejich opakovatelnost.

Tato diplomová práce se dále věnuje analýze vstupních signálů do řídicí jednotky, návrhu desky plošných spojů pro napodobení reálných signálů a zvětšení počtu výstupů a návrhu programů pro využití mikrokontroléry. K programování ovládacího softwaru generátoru se využívá Matlab Simulink, spolehlivá platforma se snadným programováním specifických testovacích scénářů.

Využití mobilního generátoru signálů přináší v oblasti kalibrace řídicích jednotek několik výhod. Především umožňuje simulovat různé provozní podmínky a testovat odezvu řídicí jednotky, čímž usnadňuje přesnou kalibraci softwarových funkcí řídicí jednotky. Další možné uplatnění je při reverzním inženýrství softwaru řídicí jednotky, kdy lze generátor signálu využít k napodobení skutečných signálů snímačů za obtížných podmínek, jako je extrémně nízká teplota nebo tlak.

Funkční prototyp je praktickým nástrojem pro automobilové inženýry a odborníky v oblasti vývoje řídicích jednotek.

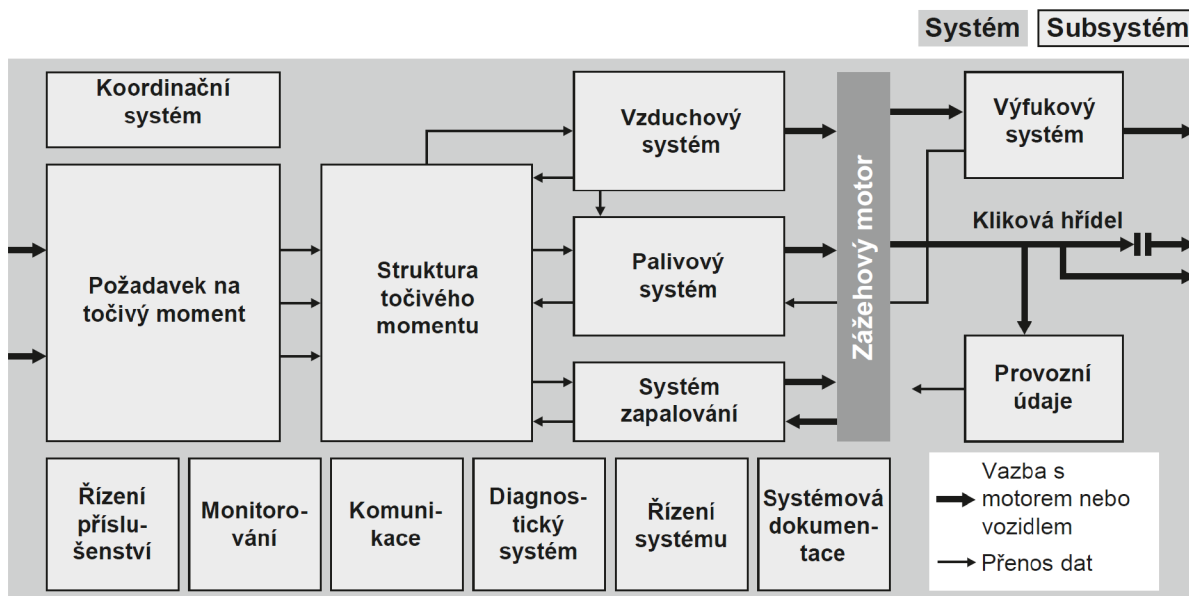
# 1 ELEKTRONICKÁ ŘÍDICÍ JEDNOTKA

V automobilovém průmyslu se pro řízení mechatronických systémů využívají elektronické řídicí jednotky, aby se systémy provozovaly podle určitých parametrů, které zajišťují správnost a bezpečnost provozu vozidla. Řídicí jednotka přijímá elektronické signály ze snímačů, následně je vyhodnocuje a vypočítává řídicí signály pro akční členy. Řízení probíhá v otevřené nebo uzavřené smyčce. Software, podle kterého probíhá výpočet je uložen v paměti řídicí jednotky. Umístěný na desce plošných spojů (DPS) řídicí jednotky mikrokontrolér spouští uložený v paměti řídicí program.

Řídicí jednotky jsou vzájemně propojené komunikačním rozhraním, většinou CAN sběrnici, která umožní výměnu informací mezi jednotlivými řídicími jednotkami vozidla. Pomocí toho, například, rychlost vozidla, která je vyžadovaná větším počtem řídicích jednotek jako vstupní signál se vyhodnocuje jednou řídicí jednotkou ze signálů snímačů rychlosti kol a následně informace o rychlosti vozidla je sdílena prostřednictvím datové sběrnice CAN s ostatními řídicími jednotkami.

## 1.1 PŘEHLED SYSTÉMŮ ŘÍZENÍ ZÁŽEHOVÉHO MOTORU

Řídicí systém zážehových motorů tvoří integrace všech snímačů, které nepřetržitě zjišťují provozní údaje motoru, vozidla, a všech akčních členů, které provádějí základní nastavení při provozu spalovacího motoru.



Obr. 1 Struktura řídicího systému [1]

Pro lepší přehlednost je systém řízení motoru rozdělen na přesně definované subsystémy [1], jak je znázorněno na Obr. 1, které budou podrobněji popsány v následujících podkapitolách. Tato kategorizace poskytuje přehledný a organizovaný systém pro pochopení různých činností, které tvoří systém řízení motoru. Analýzou rozdělení řízení spalovacího motoru lze zjistit, které snímače jsou nezbytné pro efektivní a bezchybné řízení spalovacího motoru.

### 1.1.1 POŽADAVEK NA TOČIVÝ MOMENT

Poloha plynového pedálu hraje zásadní roli při určování požadované hodnoty točivého momentu spalovacího motoru. V případě, že pedál akcelérátoru není řádně sešlápnut, bere se v úvahu hodnota točivého momentu potřebná k udržení volnoběžných otáček. Režimy jízdních vlastností a elektrické spotřebiče kladou dodatečné požadavky na točivý moment, které je třeba vzít v úvahu.

### 1.1.2 STRUKTURA TOČIVÉHO MOMENTU

Výsledkem koordinace požadavků na točivý moment z předchozích subsystémů, specifikací převodovky, požadavků na jízdní dynamiku a dalších specifických požadavků je stanovení požadovaného točivého momentu pro spalovací motor. Tento požadavek na točivý moment následně generuje specifické hodnoty pro plnění válců čerstvou směsí, vstříkovaní a zapalování.

U zážehových motorů s přímým vstříkovaním se požadovaná hodnota točivého momentu nastavuje stanovením množství kyslíku ve výfukových plynech motoru  $\lambda$  sondou. Pro sledování a řízení převodovky se k výpočtu skutečného točivého momentu motoru na spojce využívají signály z různých snímačů, které využívají výpočetní modely.

### 1.1.3 VZDUCHOVÝ SYSTÉM

V souvislosti s řízením plnění válců hraje požadovaná hmotnost vzduchu zásadní roli při určování vhodného nastavení příslušných pohonů. Konkrétně je hlavním akčním členem odpovědným za plnění válců škrticí klapka, která pracuje na základě vypočítaného úhlu otevření škrticí klapky odvozeného z požadované hodnoty hmotnosti nasávaného vzduchu. Tento pohyb je řízen pomocí signálu PWM. V některých systémech se k regulaci plnění válců využívají škrticí klapky sání a výfuku, přičemž škrticí klapka zůstává otevřená po delší dobu a využívá se pouze ke korekci změn hmotnosti nasávaného vzduchu. Naproti tomu motory s turbodmychadlem vyžadují dodatečné řízení plnicího tlaku turbodmychadla nebo mechanického kompresoru. Mezi další důležité regulační prvky patří systém variabilního nastavení vačkové hřídele a ventil recirkulace výfukových plynů (EGR). Kromě toho se k průběžnému měření aktuální hodnoty plnění spalovacího motoru využívají snímače teploty a tlaku v sacím potrubí.

### 1.1.4 PALIVOVÝ SYSTÉM

Úkolem palivového systému je dodávat palivo z nádrže do palivové lišty v požadovaném množství a při stanovené hodnotě tlaku paliva v liště. Z aktuální hodnoty náplně válce, tlaku paliva v liště, tlaku v sacím potrubí a požadované hodnoty poměru vzduchu a paliva (hodnota z  $\lambda$  sondy) se vypočítává doba otevření palivového vstříkovače. Palivové vstříkovače se ovládají synchronně v závislosti na úhlu natočení klikové hřídele.

### 1.1.5 SYSTÉM ZAPALOVÁNÍ

Výsledný předstih zážehu se vypočítává ze zadané hodnoty pro zapalování z provozních podmínek motoru a v zadaný okamžik se na zapalovací svíčke vytvoří zážehová jiskra. Předstih zážehu se nastavuje s ohledem na optimální spotřebu paliva. Pouze ve výjimečných případech se systém od toho odchyľuje, například při zahřívání katalyzátoru nebo pro rychle snížení točivého momentu spalovacího motoru. Spalování všech válců je trvale sledováno systémem kontroly klepání. Zajišťuje se, aby se spalovací motor provozoval s optimální spotřebou paliva v blízkosti hranice klepání, zabraňuje to možné škody způsobené detonačním spalováním. Při poruchách signálu ze snímače detonačního spalování se motor provozuje v hranicích pro bezpečné provedení zážehu směsi paliva se vzduchem (stav nouze).

### 1.1.6 VÝFUKOVÝ SYSTÉM

Ve výfukovém systému se provádí výpočet řídicích operací v otevřené a uzavřené smyčce pro optimální provoz třicestného katalyzátoru. Směs paliva se vzduchem musí být regulována v úzkých mezích kolem stechiometrického poměru. Základním snímačem pro ověření provozní schopnosti katalyzátoru je  $\lambda$  sonda. Je potřeba sledovat, aby výfukový systém nebyl tepelně přetížen. Za tímto účelem se v řídicí jednotce modelují skutečné teploty ve výfukovém systému.

## 2 ROZBOR ELEKTRICKÝCH SIGNÁLŮ

Řídicí jednotka se skládá ze vstupních obvodů, které sbírají signály ze snímačů, mikrokontroléru, který vypočítává řídicí signály, a výstupů, které využívají výkonovou elektroniku k regulaci akčních členů.

### 2.1 VSTUPNÍ SIGNÁLY

Elektronické signály generované snímači jsou přenášeny do řídicí jednotky prostřednictvím kabelových svazků a konektorů. Tyto signály mohou být analogové nebo digitální. Řídicí jednotka zpracovává signály a získává z nich informace o provozních podmínkách vozidla a pohonné jednotky, které využívá k regulaci různých komponent vozidla.

#### 2.1.1 ANALOGOVÉ VSTUPNÍ SIGNÁLY

Analogové vstupní signály mohou nabývat nekonečného počtu hodnot napětí v určitém rozsahu. Většinou výstupním signálem ze snímače je elektrické napětí. Analogový signál vystupující ze snímače se přenáší do řídicí jednotky, následně hodnota napětí je převedena A/D převodníkem na digitální signál, který se zpracovává mikrokontrolérem [2]. Důležitým faktorem A/D převodníku je počet jeho bitů, tento počet uvádí rozlišení převodníku. Typickou hodnotou počtu bitů je 8, 10 nebo 12 [4]. Osmibitový převodník disponuje 256 kvantizačními hladinami, což při referenční hodnotě napětí 5 V odpovídá rozlišení přibližně 20 mV. Větší počet bitů zvyšuje rozlišení, ale zároveň zvyšuje cenu převodníku.

#### 2.1.2 DIGITÁLNÍ VSTUPNÍ SIGNÁLY

Digitální vstupní signály vykazují dva rozlišné stavy, a to logickou jedničku nebo logickou nulu. Výhodou digitálního signálu je možnost přímého vyhodnocování řídicí jednotkou bez přídavného A/D převodníku [2]. Digitální výstupní signály jsou často preferovány před analogovými signály, protože jsou méně náchylné k šumu a rušení a lze je přenášet na velké vzdálenosti, aniž by ztratily svou přesnost nebo spolehlivost. Digitální výstupní signály mohou způsobit rušení nebo šum v analogových signálech, což může přivést ke zkreslení nebo degradaci analogového signálu [4].

V současném automobilovém průmyslu se stále častěji využívají senzory vybavené integrovanou elektronikou, která lokálně zpracovává a digitalizuje výstupní signál. Výstupní signál je následně vyslán do řídicí jednotky prostřednictvím standardizovaných komunikačních rozhraní, jako je SENT a LIN [1]. Výhoda přenosové metody SENT oproti analogovému signálu spočívá ve schopnosti minimalizovat náchylnost na rušení a přenášet větší rozsah dat. Přenos SENT totiž umožňuje nejen přenos hodnot z jednoho snímače, ale také z celého modulu (kombinace snímačů modulu měřiče hmotnosti nasávaného vzduchu). Standardem SAE J2716 [6] kromě toho se usnadňuje propojení mezi řídicími jednotkami a snímači různých výrobců. Tato možnost je obzvláště významná, protože rozšiřuje škálu možností využití snímačů, které mají inženýři k dispozici.

## 2.2 VÝSTUPNÍ SIGNÁLY

Na základě dat zpracovaných mikrokontrolérem řídicí jednotka neprodleně aktivuje jednotlivé akční členy prostřednictvím příslušných výstupních kanálů. Akční členy, rozdělené do kategorií podle spotřeby energie a mechanismu aktivace, jsou důkladně řízeny systémem. Určité moduly výstupních výkonových signálů mají dostatečný výkon k účinné regulaci a ovládání příslušných akčních členů, bez využití relé. [3]

### 2.2.1 SPÍNACÍ VÝSTUPNÍ SIGNÁLY

Spínací výstupní signály slouží k aktivaci a deaktivaci akčních členů, které jsou závislé na aktuálním pracovním bodě, jako jsou vstřikovače paliva a zapalovací cívky. Spotřebiče, které vyžadují značné proudy, například stěrače a ventilátor chlazení motoru se spínají pomocí relé. Výstupní signály na nízké straně se vztahují k řídicím signálům, které jsou určeny pro spínání a ovládání zátěží připojených k akumulátoru. Příkladem zátěží s nízkou stranou jsou relé, solenoidy a zapalovací cívky. Výstupní signály na vysoké straně naopak spínají spotřebiče, které jsou uzemněné. Příkladem je aktivace stejnosměrných motorů, která se provádí pomocí můstkových výstupních signálů, umožňujících změnu směru otáčení pohonu například škrtkí klapky. [1]

### 2.2.2 DIGITÁLNÍ VÝSTUPNÍ SIGNÁLY

Digitální výstupní signály mohou být vysílány jako signál PWM s konstantní frekvencí a proměnnou střídou [4]. Pohony, jako je ventil recirkulace výfukových plynů nebo škrtkí klapka, lze regulovat pomocí různé intenzity napájení, která závisí na proměnné střídě, aby bylo dosaženo požadovaných poloh.

### 2.2.3 SPECIÁLNÍ VÝSTUPNÍ SIGNÁLY

Výstupní signály specifické pro danou aplikaci se využívají v případech, kdy je k aktivaci akčních členů zapotřebí specializovaný průběh proudu nebo napětí, který není dosažitelný prostřednictvím standardních výstupních signálů. Ukázkovým příkladem takového případu je regulace vysokotlakého vstřikovače pro přímé vstřikování paliva. K tomu se využívají komplexní moduly výstupních signálů s integrovanou logikou řízení a úpravou analogového signálu. Při aktivaci těchto modulů je přiváděno vysoké napětí, které má za následek velký náběhový proud a rychlou aktivaci. Systém se následně reguluje zpět na nižší udržovací proud. [2]

### 3 SNÍMAČE SPALOVACÍHO MOTORU

Spalovací motory využívají řadu snímačů k měření různých parametrů, jako je teplota, tlak a poměr vzduchu a paliva, které zajišťují optimální provoz, účinnost a kontrolu emisí. Cílem této kapitoly je poskytnout komplexní přehled různých typů snímačů běžně využívaných v zážehových spalovacích motorech, jejich aplikace a výstupní signály.

#### 3.1 SNÍMAČ TEPLoty

Snímač teploty se skládá z polovodičového měřicího termistoru umístěného v pouzdře. Odpor termistoru je závislý na teplotě a obvykle se jedná o snímače typu NTC, ačkoli se občas využívají i snímače typu PTC. V případě NTC snímače při zvýšení teploty dochází k poklesu odporu, rezistor typu PTC se chová obráceně [7].

Snímač teploty funguje jako jeden z rezistorů v obvodu děliče napětí, na který je přivedeno napětí 5 V pomocí pull-up rezistoru, jehož typický odpor je 1 kΩ. Výsledné napětí je funkcí teploty a měří se pomocí A/D převodníku. Vzhledem k nelinearitě závislosti odporu a teploty je v paměti řídicí jednotky uložena charakteristická křivka, která přiřazuje každému odporu určitou teplotu [1].

Odpor NTC snímače pro určitou teplotu lze zjistit kalibrací nebo vypočítat podle vztahu [8][9]:

$$R_i = A_{25} \exp \left( B \left( \frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_{25}} \right) \right), \quad (1)$$

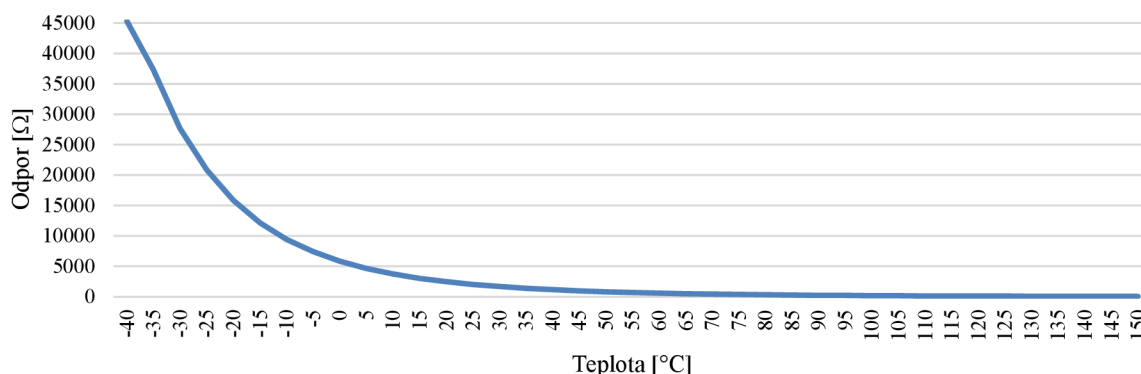
kde  $A_{25}$  je odpor snímače při 25 °C,  $T_i$  je teplota v bodě, pro který se vypočítává odpor,  $T_{25}$  je teplota 25 °C dosazena v K.

Teplotní konstanta  $B$  se vypočítává podle vztahu [8][9]:

$$B = \frac{\ln \left( \frac{R_1}{R_2} \right)}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}}, \quad (2)$$

kde  $R_1$  a  $R_2$  jsou odpory, odpovídající teplotám  $T_1$  a  $T_2$ .

V následujícím grafu (*Obr. 2*) je znázorněna závislost mezi teplotou a odporem snímače Bosch 0 281 002 170 [10]. Jedná se o snímač NTC 2,5, což znamená, že při teplotě 20 °C jeho odpor činí 2,5 kΩ. Výrobce poskytuje hodnoty odporu pro každých 10 °C, zatímco zbývající hodnoty jsou vypočteny na základě výše uvedeného vztahu nebo lineárně dointerpolovány.



Obr. 2 Závislost odporu na teplotě

Snímače NTC se v důsledku své univerzálnosti běžně využívají v různých aplikacích pro měření teploty kapalin i vzduchu. Teplotní rozsah snímačů NTC je poměrně široký, přičemž dolní mez měřených teplot je  $-40\text{ °C}$  a horní mez měřených teplot je většinou  $+150\text{ °C}$ . Je třeba poznamenat, že při překročení horní meze teploty dochází k malé změně odporu, což nepříznivě ovlivňuje přesnost měření. Kromě toho mimo rozsah provozních teplot dochází k meznímu odporu, což dále činí NTC snímače nevhodnými pro měření vysokoteplotních výfukových plynů, které mohou dosahovat teplot kolem  $1000\text{ °C}$ . Proto se pro zjištění teploty výfukových plynů se využívá termočlánek typu „K“ nebo v řídicí jednotce pomocí matematického modelu se stanoví poměrně přesná teplota [1].

## 3.2 SNÍMAČ OTÁČEK

Snímač otáček klikové hřídele je důležitou součástí, která se využívá při měření otáček motoru a zjišťování polohy klikové hřídele, zejména polohy pístu v horní nebo spodní úvratí. Měření otáček motoru se odvozuje z periody signálu. Snímače otáček se obecně dělí na dva základní typy: indukční snímače a snímače s Halloovým jevem [5][7].

### 3.2.1 INDUKČNÍ SNÍMAČ

Indukční snímač představuje zařízení bez napájení, které vytváří střídavé výstupní napětí se sinusovým průběhem, které je úměrné otáčkám ozubeného kola připojeného ke klikové hřídeli. Amplituda střídavého napětí se zvyšuje s rostoucí rychlostí otáčení klikové hřídele, rozsah napětí se pohybuje od několika milivoltů do více než  $100\text{ V}$ . Počet zubů využitého kola závisí na aplikaci a pro snímání otáček klikové hřídele se obvykle využívá kolo složené z 58 zubů a dvou vynechaných zubů, které vytvářejí mezeru odpovídající definované poloze klikové hřídele pro synchronizaci řídicí jednotky. Obvod odpovědný za zpracování signálu, který se nachází v řídicí jednotce, umožňuje převod střídavého napětí s proměnnou amplitudou na stejnosměrné napětí se čtvercovou vlnou a konstantní amplitudou. Tato transformace digitalizuje signál a umožňuje jeho snadné vyhodnocení mikrokontrolérem.



### 3.2.2 HALLŮV SNÍMAČ

Činnost snímačů otáček s Hallovým jevem vyžaduje napájení elektrickou energií. Výstupním signálem je digitální signál, který vykazuje kladné napětí a je přímo přiváděn do řídicí jednotky bez nutnosti dalšího zpracování. Na rozdíl od ozubeného kola využívaného v indukčních snímačích se ve snímačích s Hallovým jevem využívá vícepólové kolo složené ze střídavě zmagnetizovaného materiálu připojeného k nemagnetickému kovovému nosiči [1].

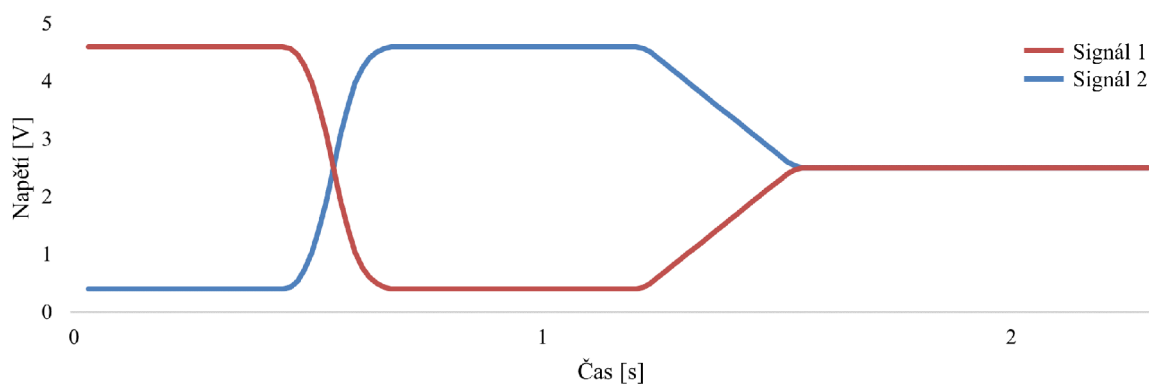
Snímače polohy s Hallovým jevem se také využívají pro zjištění polohy vačkových hřídelí, která indikuje fázi sání nebo expanze pro zapalovací systém nebo sekvenční vstřikování paliva. Základní princip činnosti těchto snímačů se podobá principu činnosti snímačů otáček klikové hřídele. Získaný signál je přenášen ve formě čtvercové vlny. Průběh signálu závisí na tvaru ozubeného kola připevněného k vačkové hřídele.

### 3.2.3 SNÍMAČ POLOHY

Potenciometr je nejrozšířenějším typem snímače využívaného pro detekci úhlové polohy akčních členů. Tento snímač je široce využíván v různých akčních členech, jako je škrticí klapka, pedál plynu, regulátor plicního tlaku u přeplňovaných motorů a elektronický termostat [5]. V těchto aplikacích funguje potenciometr jako samostatný dělič napětí, přičemž odpor potenciometru se mění spolu s pohybem akčního členu, a tím vyvolává změnu napětí.

#### POLOHA ŠKRTICÍ Klapky

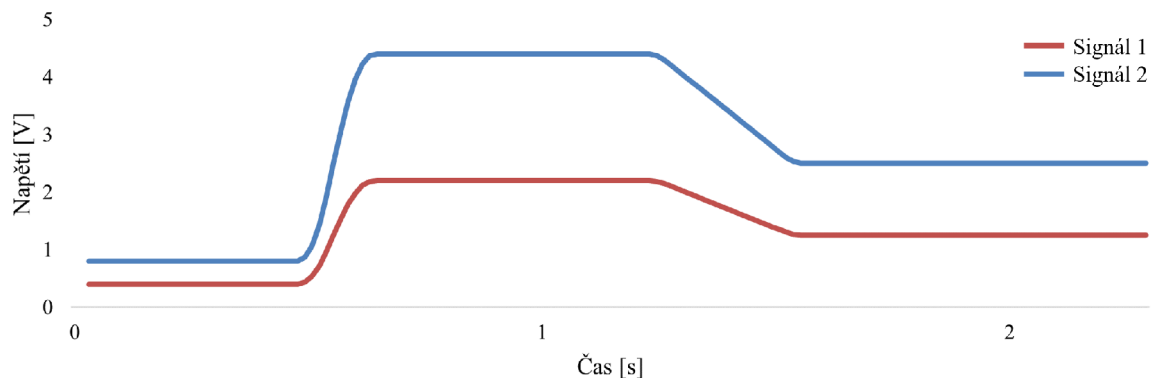
V současných spalovacích motorech se ke zjišťování polohy škrticí klapky běžně využívá dvojice potenciometrů. Tyto potenciometry jsou uspořádány zrcadlově, přičemž výstupní napětí jednoho snímače dosahuje minimální hodnoty, když je škrticí klapka plně otevřena, zatímco výstupní napětí druhého snímače dosahuje maximální hodnoty. Když je škrticí klapka zcela zavřená, výstupní signály obou snímačů jsou obrácené (*Obr. 3*). Oba snímače generují poloviční výstupní napětí referenčního napětí, když je škrticí klapka otevřená na polovinu.



*Obr. 3* Průběh napětí výstupního signálu snímače polohy škrticí klapky

### POLOHA PEDÁLU AKCELERACE

Poloha pedálu plynu se určuje pomocí dvou potenciometrů pro větší přesnost a zajištění možných poruch, podobně jako při zjišťování polohy škrtkicí klapky. Výstup tohoto uspořádání se skládá ze dvou signálů (Obr. 4), přičemž napětí jednoho signálu je poloviční oproti napětí druhého signálu.

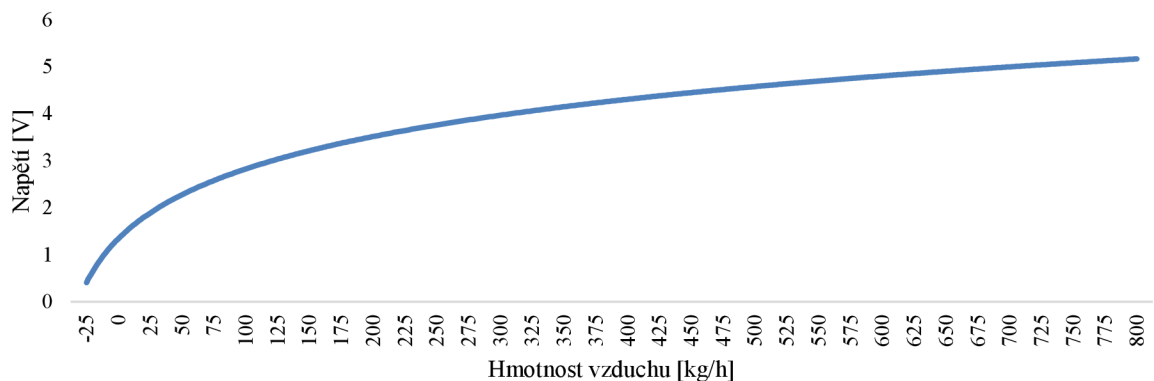


Obr. 4 Průběh napětí výstupního signálu snímače polohy pedálu akcelerace

### 3.3 SNÍMAČ HMOTNOSTI NASÁVANÉHO VZDUCHU

Přesné stanovení hmotnosti nasávaného vzduchu v určitém provozním stavu je rozhodující pro regulaci směsi vzduchu a paliva. Snímač hmotnosti vzduchu je navržen tak, aby zohledňoval pulzace a zpětné proudění, ke kterým dochází v důsledku otevírání a zavírání sacích a výfukových ventilů motoru. Modul snímače obsahuje snímač teploty NTC.

Většina snímačů hmotnosti nasávaného vzduchu obvykle vykazuje logaritmický průběh výstupního signálu. V grafu (Obr. 5) je uveden signál snímače Bosch 0 280 218 037 [11]. Při výstupním napětí 1 V nedochází k žádnému proudění vzduchu v sacím potrubí, vyšší napětí odpovídá nasávání vzduchu. Napětí nižší než 1 V naopak odpovídá zpětnému proudění vzduchu.

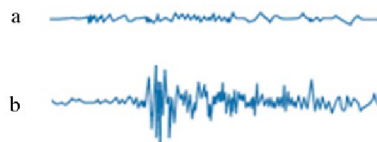


Obr. 5 Závislost napětí výstupního signálu na hmotnosti nasávaného vzduchu [11]

Jak již bylo zmíněno, moderní spalovací motory jsou vybaveny snímači, které obsahují elektroniku pro přenos digitálních signálů. Modul měřiče vzduchu může být vybaven integrovaným snímačem teploty, přičemž veškerá získaná data jsou přenášena prostřednictvím zpráv protokolu SENT.

### 3.4 PIEZOELEKTRICKÝ SNÍMAČ KLEPÁNÍ

Snímače klepání jsou specializované snímače, které fungují jako senzory vibrací a jsou určeny ke snímání akustických vibrací vznikajících při nekontrolovaném spalování v zážehových motorech. Snímač klepání je generátorem střídavého elektrického napětí, které roste se zvyšující se frekvencí vyvolané detonačním spalováním (Obr. 6) [1][7]. Tento signál se přenáší do řídicí jednotky motoru, která na základě překročení stanovené limitní amplitudy a frekvenci signálu detekuje klepání. Snímání střídavého napětí je obecně problematické pro elektroniku, proto střídavé napětí se posouvá o 2,5 V, aby do výpočtu vstupovali pouze kladné hodnoty napětí. Pokud dochází k detonačnímu spalování, upravuje se předstih zážehu. V závislosti na konkrétním spalovacím motoru při detonačním spalování snímač může generovat střídavé napětí frekvencí 10 – 16 kHz, většina snímačů je schopna pracovat i s vyššími frekvencemi do 24 kHz.



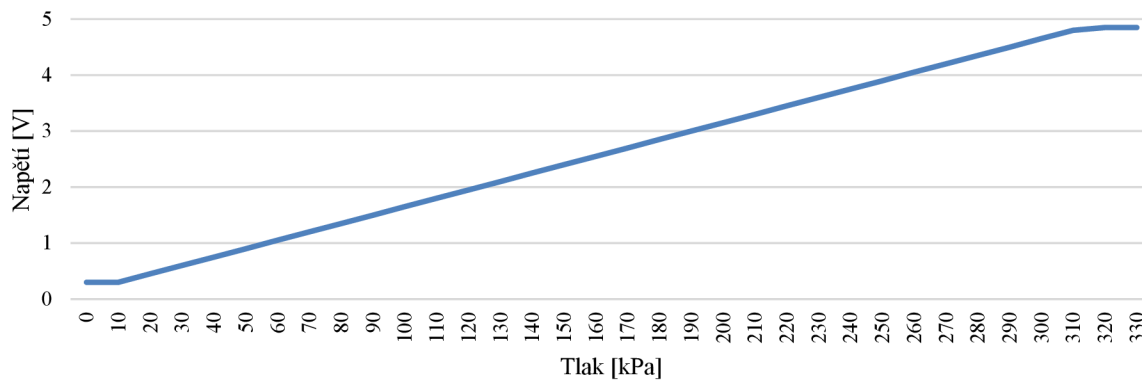
Obr. 6 Signál snímače klepání [1]

a – signál při normálním spalování, b – signál při detonačním spalování.

### 3.5 SNÍMAČ TLAKU

Snímače absolutního tlaku se běžně využívají ke stanovení tlaku plynů. Tento proces zahrnuje měření rozdílu tlaků vzhledem k určitému referenčnímu tlaku. Elektronické obvody využívané

k vyhodnocování a úpravě signálu jsou integrovány do samotného snímače. Konkrétně tyto obvody slouží k zesílení elektrického napětí, kompenzaci vlivu teploty a linearizaci tlakové křivky. Následně řídicí jednotka provádí výpočet hodnoty tlaku na základě analýzy hodnoty napětí získané ze snímače. Příkladem snímače absolutního tlaku je Bosch 0 261 230 133 [11], jehož hodnota napětí výstupního signálu se pohybuje kolem 0,5 až 4,5 V (Obr. 7).



Obr. 7 Závislost napětí výstupního signálu na tlaku [11]

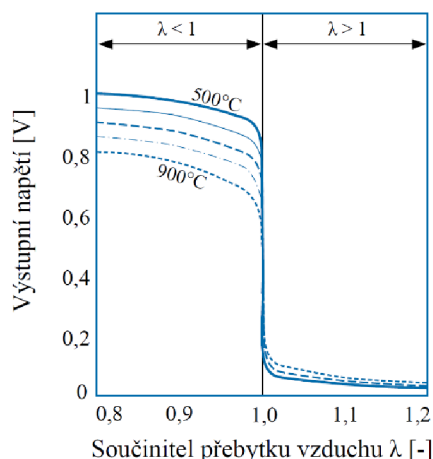
Vysokotlakové snímače, podobné snímačům absolutního tlaku, vykazují lineární závislost mezi napětím a tlakem, jsou však konstruovány pro vysoké tlaky a umístěny v kovovém pouzdře.

### 3.6 SNÍMAČ OBSAHU KYSLÍKU VE SPALINÁCH

Jak již bylo uvedeno,  $\lambda$  sondy, známé také jako senzory obsahu kyslíku, hrají v moderních motorech zásadní roli při regulaci vstřikování paliva a sledování provozní účinnosti katalyzátoru. V současné době se v moderních motorech využívají dva základní typy  $\lambda$  sond.

#### 3.6.1 DVOUSTAVOVÁ $\lambda$ SONDA.

Porovnává obsah kyslíku ve výfukových plynech s obsahem kyslíku v referenční atmosféře a ukazuje, zda spalovací směs je bohatá ( $\lambda < 1$ ), chudá ( $\lambda > 1$ ) nebo směs paliva se vzduchem odpovídá stechiometrické směsi ( $\lambda = 1$ ). Neumožní stanovit míru bohatosti nebo chudosti směsi. Doba odezvy na změnu napětí při změně složení směsi je závislá na teplotě. Při optimální provozní teplotě snímače kolem 600 °C reakce senzoru na změny je menší 50 ms [1]. Dokud snímač nedosáhne minimální provozní teploty je spalovací motor řízen otevřenou smyčkou. Charakteristika signálu ze snímače je zobrazena na Obr. 8. Průběh signálu má sinusový tvar závislý na aktuálním obsahu kyslíku ve výfukových plynech.

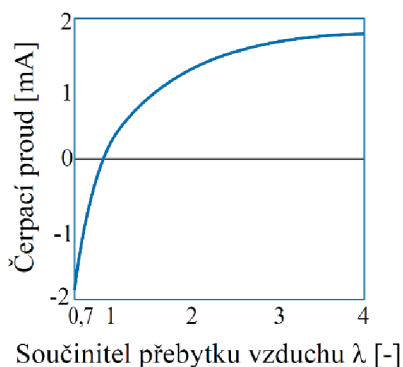


Obr. 8 Závislost napětí výstupního signálu na součiniteli přebytku vzduchu [1]

### 3.6.2 ŠIROKOPÁSMOVÁ $\lambda$ SONDA

Širokopásmová  $\lambda$  sonda se stále častěji využívá při stanovení obsahu kyslíku ve výfukových plynech. Funguje ve spojení s řídicí elektronikou a vytváří elektronický signál v měřicím rozsahu hodnot  $\lambda$  od 0,7 do  $\infty$ . Rozsah měření je však omezen obsahem kyslíku v okolním vzduchu, který obvykle je 21 % [3]. Tento typ snímače je schopen umožnit řízení motoru jak při chudé, tak při bohaté směsi vzduchu a paliva a je nezbytný u vznětových a zážehových motorů s přímým vstříkem.

Proces měření širokopásmové  $\lambda$  sondy zahrnuje přivedení napětí na elektrody čerpacího článku. V případě, že je směs paliva a vzduchu chudá, článek odebírá kyslík a vzniká kladný proud (Obr. 9). Naopak v případě bohaté směsi paliva a vzduchu je pozorován záporný proud. V bodě, kde  $\lambda = 1$ , je proud nulový. Hodnota čerpacího proudu je přímo úměrná koncentraci kyslíku ve spalinách a slouží jako spolehlivá míra hodnoty přebytku vzduchu  $\lambda$ . [1][2][7]



Obr. 9 Závislost čerpacího proudu na součiniteli přebytku vzduchu [1]

## 4 KALIBRACE SOFTWAREVÝCH FUNKCÍ ECU

Kalibrace je systematický proces, který zahrnuje nastavení proměnných parametrů elektronické řídicí jednotky tak, aby vyhovovali konkrétní variantě vozidla a provozním podmínkám, jako je atmosférický tlak a teplota nasávaného vzduchu. Základním cílem tohoto postupu je optimalizovat činnost řídicí jednotky ve vozidle a zajistit, aby fungovala v rámci předepsaných parametrů. Během kalibrace se berou v úvahu různé faktory, které ovlivňují činnost řídicí jednotky, a podle nich se upravují její proměnné parametry, aby mohla optimálně fungovat za různých provozních podmínek. Toto přizpůsobení má zásadní význam pro dosažení požadované funkčnosti řídicího systému ve vozidle. K dosažení optimální funkčnosti řídicího systému se používá rozsáhlý soubor charakteristických křivek, hodnot a programových map.

Počáteční kalibrace se provádí v laboratořích na zkušebních stanovištích. Při tomto procesu se ke kalibraci vnitřních parametrů řídicí jednotky využívají měřicí a diagnostické systémy, přičemž výsledná data se důkladně analyzují a následně se ukládá do paměti sériové řídicí jednotky. Během kalibrace hodnoty parametrů musí být v čase proměnné. Kalibrační systém se skládá ze řídicí jednotky s vhodným komunikačním rozhraním, měřicího a kalibračního zařízení.

Po úspěšné kalibraci na zkušebním stanovišti se software řídicí jednotky kalibruje přímo na motoru, aby bylo možné provést konečné nastavení parametrů za reálných provozních podmínek. Tento proces má zásadní význam pro dosažení optimálního chování řídicího systému ve všech provozních podmínkách. Finální kalibrace probíhá přímo ve vozidle.

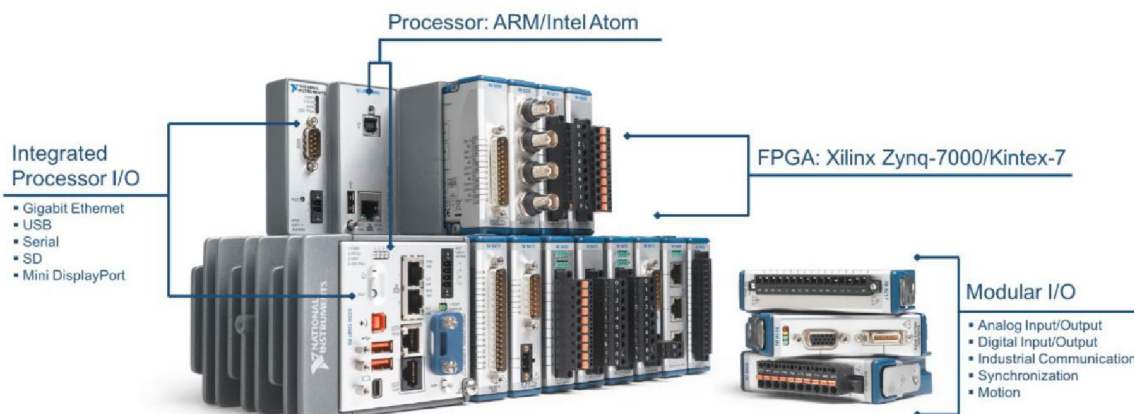
## 5 HARDWARE IN THE LOOP – HIL TESTOVÁNÍ

V této kapitole jsou představeny generátory signálu a měřicí přístroje, které se často využívají v automobilovém průmyslu a dalších oborech pro ověřování správné činnosti a parametrů softwaru řídicí jednotky mechatronického systému. Aby se zajistilo, že průběhy signálů odpovídají nastaveným parametrům, sledují se při této metodě výstupní signály řídicí jednotky. Tento zásadní proces zefektivňuje vývoj softwarových funkcí a eliminuje ohrožení skutečných prototypů, čímž urychluje proces vývoje a snižuje související náklady.

Testování HIL je jednou z technik testování softwaru pro řídicí jednotky. Tato metodika testování zahrnuje testování skutečných elektronických řídicích jednotek v simulovaném prostředí, které přesně napodobuje reálné situace. Mezi výhody tohoto přístupu patří nepřetržité komplexní testování v laboratorních podmínkách, možnost rozšíření rozsahu testovacích scénářů, opakovatelnost a automatizace testů. Simulace HIL umožňuje testování kritických případů v otevřené i uzavřené smyčce. [12][13]

### 5.1 NATIONAL INSTRUMENTS

National instruments disponuje širokým výběrem hardwaru pro různorodé testování softwaru řídicí jednotky. Jedním z přístrojů pro uplatnění v automobilovém průmyslu je CompactRIO [14], který pomocí své modularity umožní kombinovat testovací hardware pro široké uplatnění. Základem integrované systémové architektury je šasi CompactRIO (*Obr. 10*). Je přímo propojeno s moduly vstupních a výstupních signálů pro vysoce výkonný přístup k obvodům každého modulu, časování, spouštění a synchronizaci. Protože je každý modul připojen přímo k FPGA, a nikoli přes sběrnici, nedochází v porovnání s jinými řídicími architekturami téměř k žádnému zpoždění při řízení odezvy systému. Kontrolér obsahuje procesor, na kterém je spouštěná aplikace LabVIEW v reálném čase.



Obr. 10 NI CompactRIO [14]



## 5.2 DSPACE

dSPACE SCALEXIO [15] je specializovaný hardwarový systém určený pro simulaci v uzavřené smyčce, který nabízí širokou škálu možností přizpůsobení a konfigurace pro splnění konkrétních požadavků. Lze ho škálovat od malých až po velké systémy (*Obr. 11*) a lze ho využít jak pro testování komponent, tak pro simulaci celého vozidla. Systém lze konfigurovat s jedním nebo více procesory a je možné ho rozšířit pomocí modulů SCALEXIO, podobně jako u CompactRIO. Navíc je vybaven speciálním modulem pro generování signálů pro dvoustavové a širokopásmové  $\lambda$  senzory. Systém podporuje začlenění více řídicích jednotek pro účely testování.



*Obr. 11* dSPACE SCALEXIO [15]



## 6 FUNKCE MOBILNÍHO GENERÁTORU SIGNÁLŮ

Úkolem generátoru signálů je nahradit signály, které vstupují do řídicí jednotky spalovacího motoru. Přístroj musí být spolehlivý pro generování signálů podle naprogramovaných cyklů, snadno ovladatelný při manuálním ovládní, mít možnost ovládní jak pomocí softwaru v počítači, tak i fungovat samostatně pomocí připojení dalších jednoduchých zařízení, jako jsou vývojové minipočítače. Generátor musí mít minimálně jednu datovou sběrnici za účelem řízení a pro zajištění možnosti propojení s dalšími případnými zařízeními, která jsou součástí testovací smyčky. V neposlední řadě je přesnost výstupních signálů, jejich opakovatelnost. Signály musí být generovány nepřetržitě a umožňovat plynulou změnu, aby nedocházelo k nežádoucím chybám v řídicí jednotce.

Generovány budou pouze analogové a digitální vstupy. Generování datových signálů komunikačních sběrnic, jako je CAN bus, je složitou problematikou, jelikož informace o datech, která se přenášejí pomocí zpráv, jsou tajnou výroby vozidla a vývojářů softwaru. Tyto informace jsou poskytovány ověřeným firmám, které se zabývají vývojem zařízení pro generování datových signálů. Příkladem takové firmy je GOPEL [16], která dodává hardware s předinstalovaným softwarem pro nahrazení zbytku příslušenství vozidla pouze povoleným výrobcem zkušebnám, jsou to většinou motorové zkušebny. Pokud se při testování spalovacího motoru se sériovou řídicí jednotkou nevyužije generátor datových zpráv, je vysoké riziko nesprávné činnosti řídicí jednotky nebo motor bude řízen v nouzovém stavu.

### 6.1 SIGNÁLY PRO GENEROVÁNÍ

Na základě provedené rešerše byl stanoven seznam snímačů (*Tab. 1*), jejichž signál bude následně generován. Generování těchto signálů je nezbytné pro správnou funkci řídicí jednotky. Přestože ve většině případů skutečná hodnota napětí signálů nedosahuje přesného napětí 0 a 5 V pro účely generování bude tato možnost dostupná. Pro generování nebudou zohledněny širokopásmová  $\lambda$  sonda a snímače s výstupním signálem protokolu SENT z důvodu vysokého požadavku na výpočetní výkon hardwaru.

Generování signálu širokopásmové  $\lambda$  sondy klade vysoké nároky na přesné měření proudu při realizaci generátoru a dodržení veškerých podmínek v souvislosti s reálným provozem snímače při generování signálu. Tento signál lze nahradit generováním přesného konstantního proudu a odpovídajícího napětí zdrojem.

Veškeré signály snímačů, které budou generovány, jsou analogové nebo digitální. SENT protokol zvyšuje náročnost generování signálu, jelikož jeho zpráva se skládá z několika pulzů, které se skládají z příslušného počtu ticků. Jeden tick může trvat 3 až 10  $\mu$ s, což odpovídá frekvenci 0,1 až 0,33 MHz [6]. Doba trvání každého ticku musí být během přenosu celé zprávy konstantní. Při reverzním inženýrství snímače mohou vzniknout problémy související s dekódováním, jelikož v rámci jedné zprávy nemusí být přenesena všechna data.

Tab. 1 Přehled generovaných signálů

Typ snímače	Účel snímače	Typ signálu	Rozsah napětí [V]	Rozsah odporu [ $\Omega$ ]
<b>Teploty (termistory)</b>	Nasávaného vzduchu	Odpor	–	60 – 45000
	Plnicího vzduchu			
	Chladicí kapaliny v motoru			
	Chladicí kapaliny na výstupu z chladiče			
<b>Tlaku</b>	Nasávaného vzduchu	Analogový DC	0 – 5	–
	Plnicího vzduchu	Analogový DC	0 – 5	
	Výfukových plynů	Analogový DC	0 – 5	
	V palivové liště	Analogový DC	0 – 5	
	Oleje	Analogový DC	0 – 5	
<b>Polohy/otáček</b>	Ovladače plnicího tlaku	Analogový DC	0 – 5	
	Termostatu	Analogový DC	0 – 5	
	Pedálu plynu	Analogový DC	0 – 5	
	Škrťací klapky	Analogový DC	0 – 5	
	Klikové hřídele (Hall)	Digitální	0 – 5	
	Klikové hřídele (Indukční)	Analogový AC	-9 – +9	
	Vačkové hřídele	Digitální	0 – 5	
<b>Ostatní</b>	Měřič hmotnosti vzduchu	Analogový DC	0 – 5	
	$\lambda$ sonda (dvoustavová)	Analogový DC	0 – 1	
	Klepání	Analogový AC	-2 – +2	

## 6.2 VOLBA HARDWARU

Zvolený hardware musí odpovídat zadaným požadavkům generátoru. Počet jeho výstupů musí odpovídat počtu signálů nebo musí být podporována komunikace pomocí které se ovládají integrované obvody, jako je SPI nebo I2C. Frekvence procesoru musí být dostačující pro generování signálu otáček.

### 6.2.1 NI MYRIO

Vývojová platforma NI myRIO-1900 [17] obsahuje 6 analogových vstupů 5 analogových výstupů a 24 digitálních vstupů nebo výstupů. Analogové vstupy a výstupy podporují kladné a záporné napětí, digitální vstupy/výstupy mají na výstupu 3,3 V, ale podporují vstup 5 V. FPGA umožní velice přesné generování signálů s rychlou změnou, jako je například digitální signál snímače otáček klikové hřídele. Kromě toho obsahuje dvoujádrový procesor ARM Cortex – A9 667 MHz, 512 MB paměti pro ukládání dat. Zařízení podporuje komunikaci SPI a I2C,

ale nepodporuje přímou komunikaci prostřednictvím CAN sběrnice. MyRIO (*Obr. 12*) se programuje pomocí softwaru LabVIEW (grafické programovací prostředí firmy NI), nebo programovacího jazyka C.

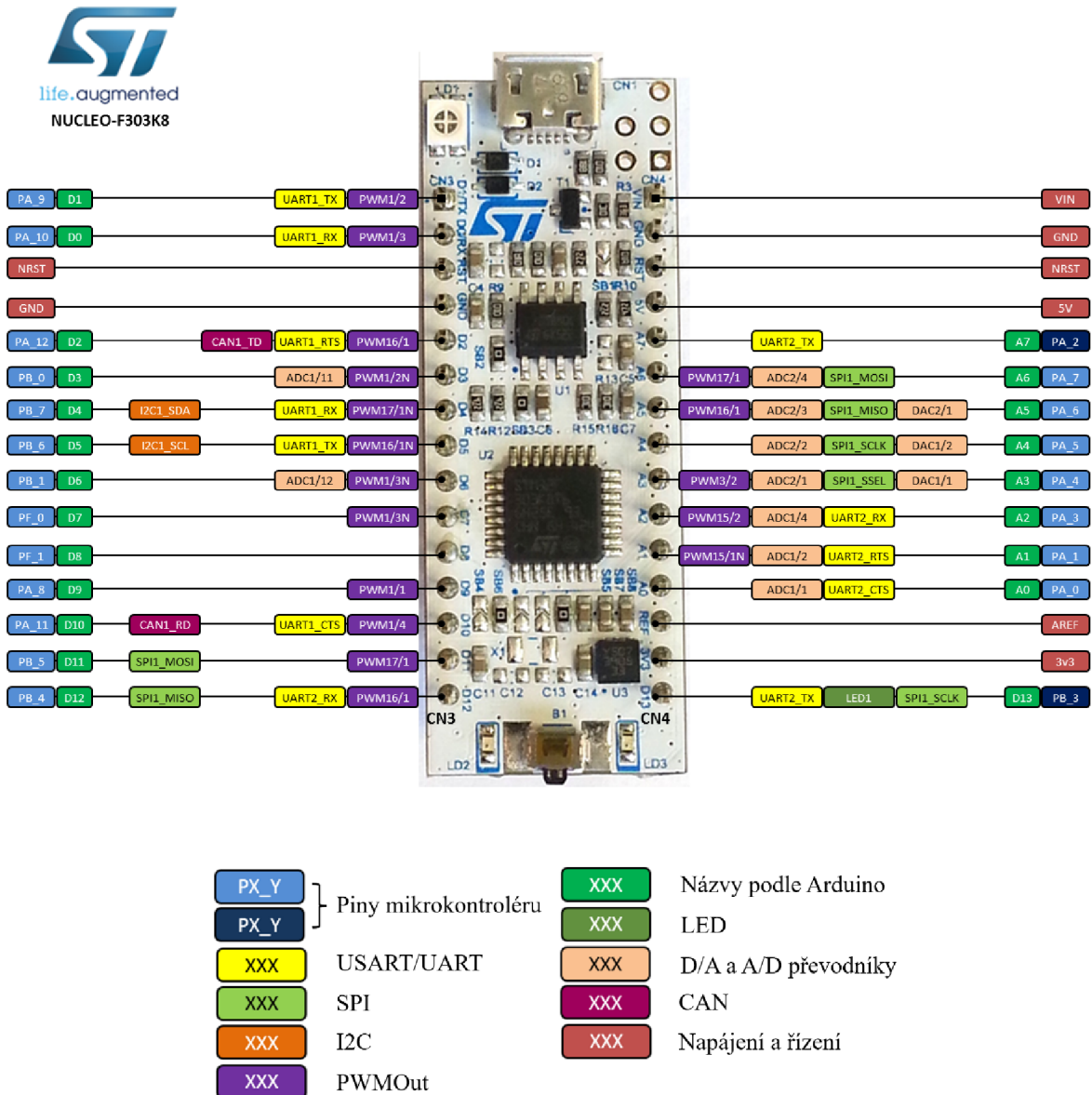


*Obr. 12* NI MyRIO [17]

### 6.2.2 NUCLEO STM32

Pro tvorbu prototypů se v praxi často využívají univerzální platformy, jako je Nucleo-F303K8 [18][19]. Jedná se o zařízení, které je výkonnější obdobou vývojové desky Arduino [20]. Desky Nucleo mají velké množství variant s využitím různých mikrokontrolerů, což poskytuje mnoho možností pro vytvoření konkrétního prototypu a umožňuje výběr mikrokontroléru, který nejlépe vyhovuje pro řešení úkolu. Velkou výhodou je také relativně nízká cena. Konkrétně tato vývojová platforma Nucleo-F303K8 obsahuje integrovaný programátor ST-LINK pro snadné nahrávání zkompilevaného souboru, který se generuje z kódu v programovacím jazyce C/C++ pomocí kompilátoru. Podporuje rozsáhlou knihovnu HAL a programování v různých průmyslových a bezplatných programovacích softwarech, jako je STM32CubeIDE [21], kde se kromě programování snadno nastavuje konfigurace mikrokontroléru, nebo Mbed OS (Mbed Studio) [22], který disponuje zdokumentovanou knihovnou s rozsáhlým počtem funkcí.

Mikrokontrolér je založen na procesoru ARM Cortex-M4 s 32bitovou architekturou s maximální frekvencí 72 MHz, 64 KB flash paměti a 12 KB SRAM. Podporuje SPI, I2C a CAN komunikaci. Obsahuje 25 univerzálních vstupních nebo výstupních pinů (*Obr. 13*), z nichž některé jsou 12bitové A/D a D/A převodníky.



Obr. 13 Nucleo F303K8 [18]

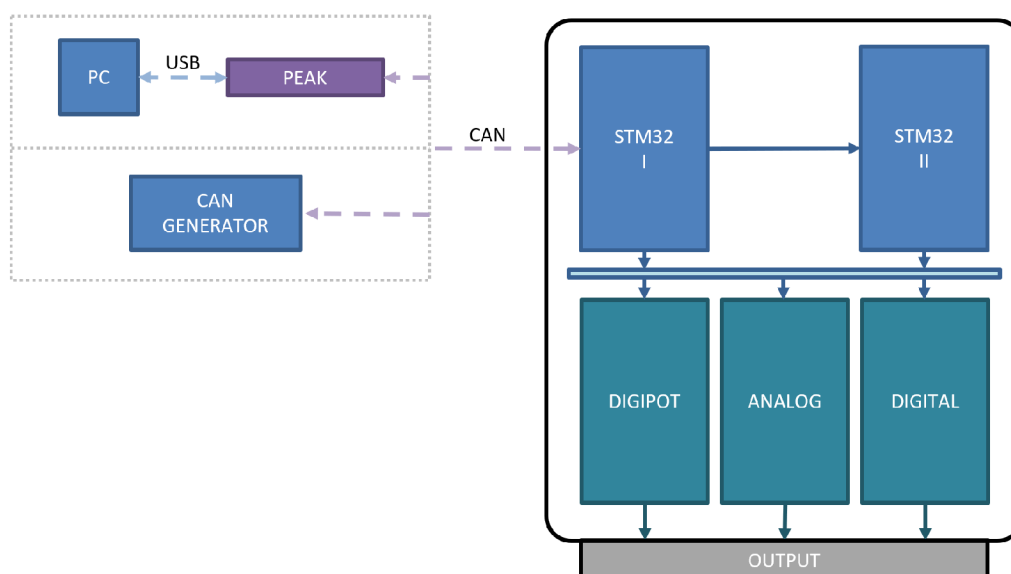
Účelem mobilního generátoru je pouze generování signálů a není nutné využívat univerzální programovací zařízení, jako je myRIO. K dosažení požadavků kladených na zařízení je vhodnější využít mikrokontrolér. Pro předběžný návrh se využije vývojová deska Nucleo, která je založena na mikrokontroléru STM32. Po otestování softwaru a hardwaru generátoru signálů v konečném návrhu může předem naprogramovaný mikrokontrolér být umístěn přímo na DPS bez využití univerzální vývojové platformy Nucleo, která je pouze rozšířením pro snadné využití mikrokontroléru.

## 7 NÁVRH HARDWARU MOBILNÍHO GENERÁTORU SIGNÁLŮ

V této kapitole je popsána předběžná hardwarová koncepce mobilního generátoru signálů, v níž jsou zmíněny funkce po hardwarové stránce a způsoby ovládání generátoru. Bude provedeno seznámení se způsoby dosažení požadovaných vlastností výstupního signálu z hlediska hardwaru. V následujících podkapitolách budou popsány elektronické obvody využité pro návrh DPS.

### 7.1 PŘEDBĚŽNÁ HARDWAROVÁ KONCEPCE MOBILNÍHO GENERÁTORU SIGNÁLŮ

V souvislosti s typy signálů, které budou následně generovány, a na základě zvoleného hardwaru byla vytvořena koncepce návrhu (Obr. 14), která rozhoduje o využití potřebných komponent pro generování, způsobu ovládání a komunikaci.



Obr. 14 Předběžná hardwarová koncepce

Podle dané koncepce je zařízení ovládáno pomocí CAN sběrnice, do které mohou být generovány zprávy jak pomocí počítače s využitím CAN vysílače PEAK [23] nebo jiného transceiveru, tak pomocí externího systému, jako je mikrokontrolér nebo jiné počítače, které jsou schopny generovat CAN zprávy podle naprogramovaného cyklu. Tato funkce zaručí požadovanou schopnost propojení generátoru s dalšími testovacími zařízeními. CAN komunikace je výhodná z důvodu podpory velkým množstvím zařízení a jednoduchosti využití. Vývoj složitých počítačových aplikací pro ovládání generátoru není vyžadován. Komunikace s generátorem prostřednictvím Ethernet nebo USB zvyšuje požadavky na výkon mikrokontroléru.

Spolehlivá komunikace pomocí CAN sběrnice a přesné generování signálu otáček kladou vysoké nároky na výpočetní výkon mikrokontroléru. Proto pro rozdělení těchto dvou úkolů budou využity dva mikrokontroléry, aby byla zajištěna správná činnost podle požadavků. Mikrokontrolery budou komunikovat prostřednictvím SPI.

Jak už bylo zmíněno, budou generovány digitální a analogové signály se stejnosměrným napětím. Jeden z digitálních signálů mikrokontroléru se převede na analogový signál střídavého napětí, aby se generoval signál buď indukčního snímače otáček klikové hřídele, nebo snímače klepání. Napětí zbývajících analogových a digitálních signálů se musí zesílit, jelikož maximální výstupní napětí mikrokontroléru je 3,3 V, což pro drtivou většinu generovaných signálů není dostačující.

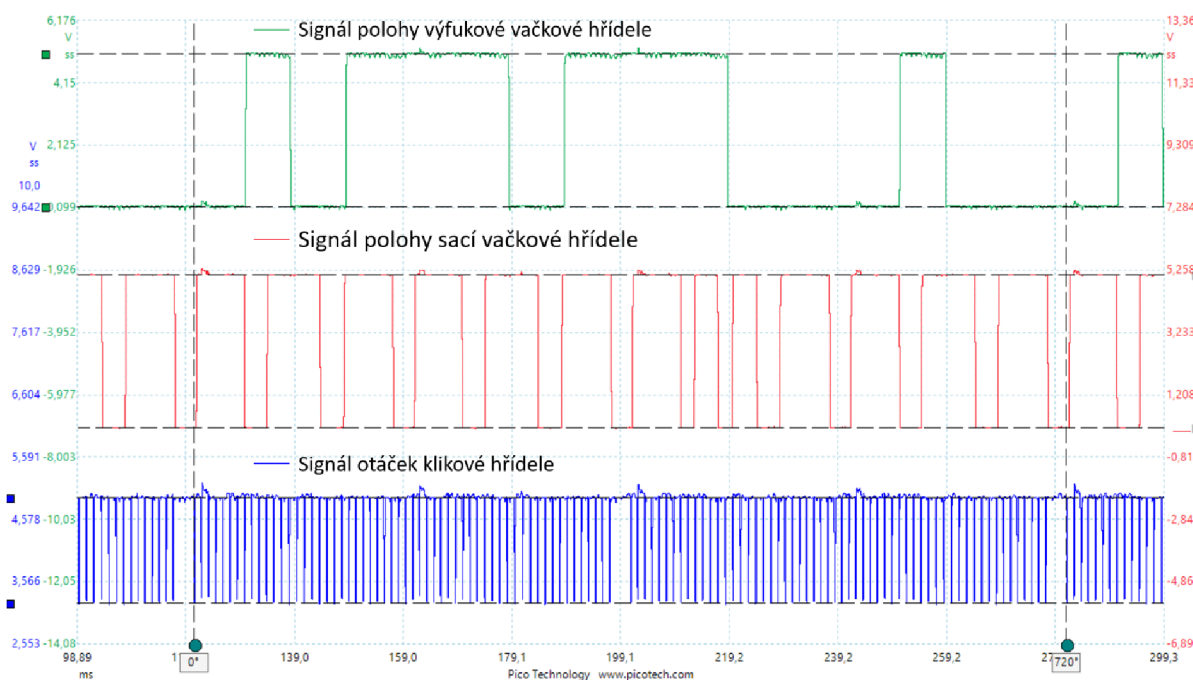
Při simulaci snímače teploty NTC je třeba vzít v úvahu rozsah odporu snímače pro konkrétní teploty. Aby měl generátor signálů co největší přínos, měl by simulovaný odpor odpovídat nejen teplotnímu rozsahu běžného provozu vozidla, ale měl by mít také schopnost dosáhnout odporu při extrémních teplotách. Umožní to kalibraci řídicí jednotky pro nízké teploty, při kterých má spalovací motor problémy se startováním v důsledku špatného promísení a zapálení směsi paliva se vzduchem.

## 7.2 MĚŘENÍ VSTUPNÍCH SIGNÁLŮ

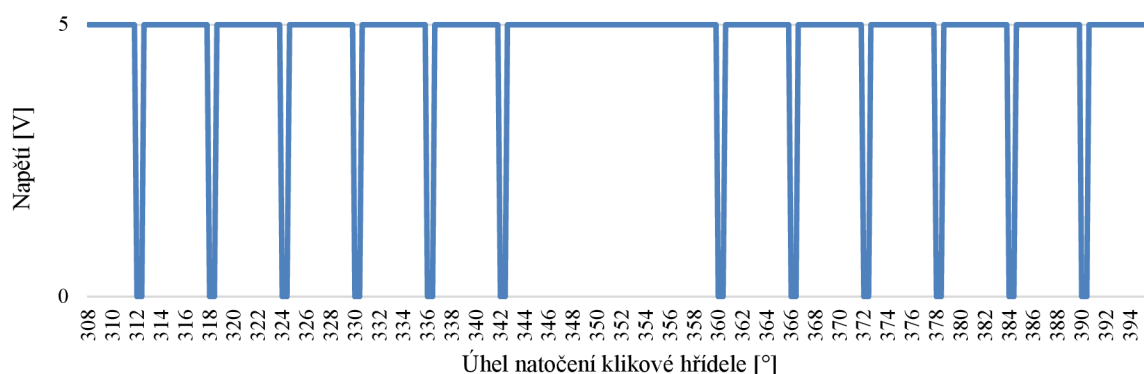
Jedním z nejnáročnějších signálů na generování je signál otáček klikové hřídele, který je těsně spojen se signály polohy sací a výfukové vačkové hřídele. Pro zjištění přesného průběhu těchto signálů bylo provedeno měření na vozidle pomocí osciloskopu PicoScope. Měření bylo provedeno při volnoběžných otáčkách ( $745 \text{ min}^{-1}$ ) na spalovacím motoru vozidla VW Golf osmé generace se zážehovým motorem TSI o objemu  $1498 \text{ cm}^3$ , jedná se o přeplňovaný motor EA211 EVO s přímým vstřikem paliva do spalovacího prostoru. Z grafu (*Obr. 15*) se stanovila amplituda signálů polohy vačkových hřídelí, která je přibližně stejná a má hodnotu 0,13 až 5,11 V. Přestože v grafu je amplituda signálu otáček klikové hřídele 3,22 až 4,93 V, skutečný signál má rozsah téměř 0 až 5 V, zkresluje to elektronika samotné řídicí jednotky. Rozsah napětí je pro vyhodnocení period signálu nepodstatný. Všechny průběhy signálu vykazují rušení v minimálních a maximálních hodnotách napětí, které může být způsobeno šumem od signálů jiných snímačů nebo nedokonalostmi v elektronickém měření signálu. Každopádně toto rušení neovlivňuje přesnost signálu, jelikož řídicí jednotka zaznamenává buď vzestupnou, sestupnou nebo obě hrany signálu otáček hřídele v určitém rozsahu napětí mezi minimální a maximální hodnotou pomocí integrovaných obvodů nebo softwaru. Při zpracování signálu řídicí jednotkou se vypočítává perioda většinou mezi třemi zuby, aby se zachytila zubová mezera. Pro výpočet periody nemá doba náběhu nebo doba poklesu napětí zásadní vliv.

Po důkladném zpracování naměřených dat byly zjištěny zubové profily ozubených kol vačkových hřídelí a profil ozubeného věnce připevněného ke klikové hřídeli (*Obr. 16*). V následujících grafech této kapitoly jsou vykresleny průběhy signálů bez rušení a s přiřazenou úhlovou závislostí. Jak bylo uvedeno, řídicí jednotka zpracovává signál v určitém rozsahu napětí, proto amplituda signálu 0 až 5 V nebude mít při generování negativní vliv.

Signál otáček klikové hřídele lze rozdělit na jednu nebo dvě otáčky. Jelikož se jedná o čtyřdobý spalovací motor, je vhodnější uvažovat dvě otáčky, tedy  $720^\circ$ , aby se zohlednila celá otáčka vačkové hřídele. Signál se skládá z 57 krátkých period a jedné dlouhé periody, což odpovídá třem krátkým periodám. Z toho vyplývá, že ozubený věnec se skládá z 58 zubů a zubové mezery odpovídající dvěma zubům. Úhlová hodnota mezizubové periody je  $6^\circ$  se střídou přibližně  $5,5^\circ$ , tedy 90 %. V důsledku torzních kmitů klikové hřídele a nepravidelnosti chodu spalovacího motoru se úhlová hodnota periody při otáčkách  $745 \text{ min}^{-1}$  neustále mění přibližně o  $0,25^\circ$ .



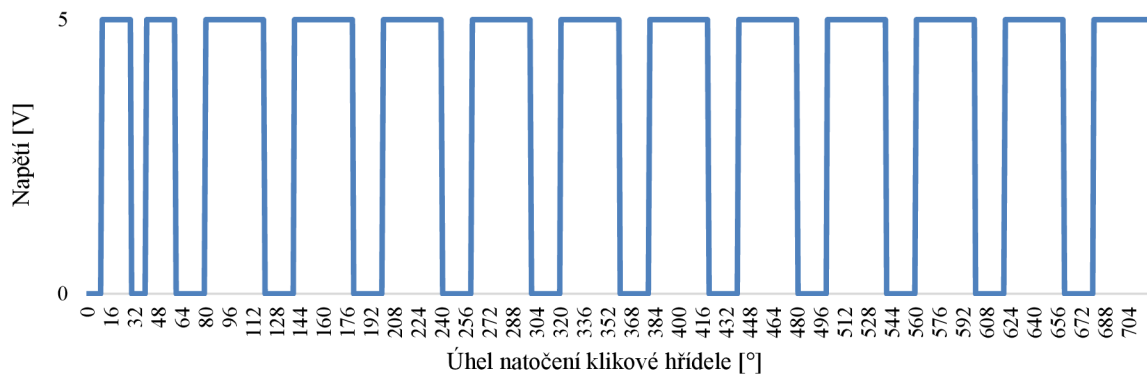
Obr. 15 Měření signálů otáček a polohy



Obr. 16 Zubový profil signálu otáček klikové hřídele

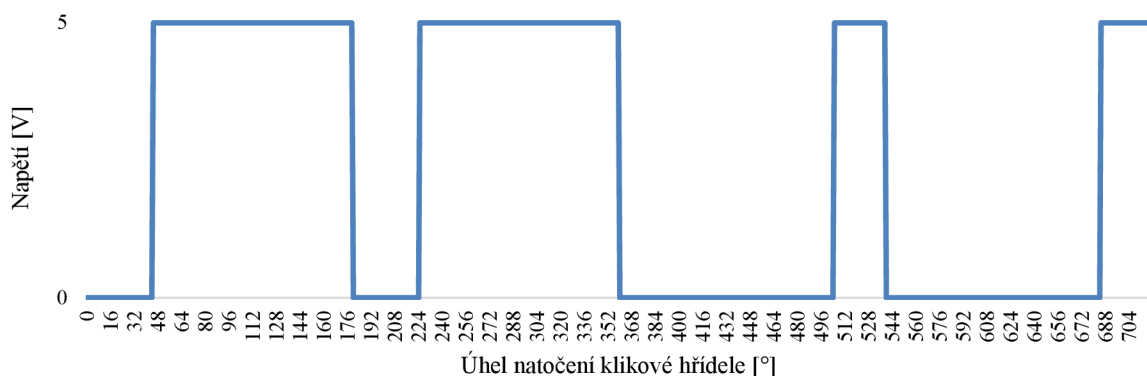
Signál polohy sací vačkové hřídele je pro stanovení potřebných parametrů problematictější vzhledem k neustálé regulaci natočením sací vačkové hřídele v moderních spalovacích motorech. Tento faktor byl zohledněn při určování tvaru zubového profilu ozubeného kola umístěného na hřídeli. Úhlové hodnoty dlouhé periody se pohybují v rozmezí  $57^\circ$  až  $63^\circ$  a krátké periody v rozmezí  $30^\circ$  až  $32^\circ$ . Z velkého objemu naměřených dat bylo zjištěno, že profil ozubeného kola (Obr. 17) se skládá ze dvou krátkých period  $30^\circ$ , kde  $10^\circ$  je rozměr zubu a  $20^\circ$  je rozměr mezery. Zbývajících 11 dlouhých period má velikost  $60^\circ$ , kde  $20^\circ$  je rozměr zubu a  $40^\circ$  je rozměr mezery.





Obr. 17 Zubový profil signálu polohy sací vačkové hřídele

Úhlová hodnota period signálu polohy výfukové vačkové hřídele se mění v rozmezí  $0,5^\circ$ . Profil ozubeného kola se skládá ze čtyř period  $180^\circ$  (Obr. 18), přičemž rozměr zubů prvních dvou period je  $45^\circ$  a rozměr mezer  $135^\circ$ . Další dvě periody odpovídají dvěma zubům s rozměrem  $145^\circ$  a mezerou  $35^\circ$ .



Obr. 18 Zubový profil signálu polohy výfukové vačkové hřídele

Jakmile se píst přiblíží k horní úvratí (konec komprese), řídicí jednotka vysílá signál pro zapalování směsi paliva se vzduchem. Aby byla zajištěna vysoká přesnost předstihu zážehu, je ozubený věnec umístěn vůči klikové hřídeli tak, aby v okamžiku, kdy je píst v horní úvratí, zubová mezera nebyla v oblasti měření snímače otáček. V daném spalovacím motoru bylo zjištěno, že horní úvrat' a začátek cyklu se nachází před zubem výfukové vačkové hřídele za zubovou mezerou ozubeného věnce, což odpovídá úhlové hodnotě  $78^\circ$  při začátku odečítání signálu otáček klikové hřídele koncem zubové mezery.

### 7.3 ÚPRAVA SIGNÁLŮ

Tato kapitola se zabývá možnostmi dosažení požadovaných vlastností signálů ze strany hardwaru. Jak již bylo zmíněno, některé signály mikrokontroléru je třeba zesílit, zvětšit počet výstupů a vytvořit potřebný odpor pro simulování snímače teploty NTC. Některé způsoby úpravy signálů jsou ověřeny pomocí softwaru SIMetrix [24], který umožní velmi přesnou



simulaci elektronických obvodů pro usnadnění posouzení využitelnosti v mobilním generátoru signálů.

### 7.3.1 ZMĚNA VÝSTUPNÍHO NAPĚTÍ SIGNÁLŮ

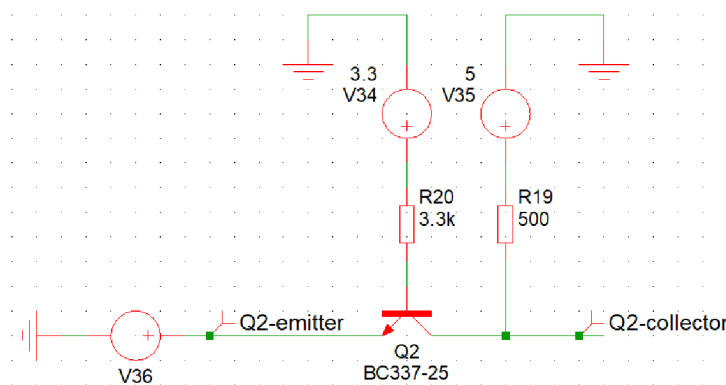
Jak již bylo uvedeno, maximální napětí výstupního signálu mikrokontroléru je 3,3 V. Pro napodobení reálných signálů je ve většině případů nutné toto výstupní napětí zesílit na 5 V. Pro generování signálu dvoustavové  $\lambda$  sondy je třeba maximální napětí snížit na 1 V.

#### ZESÍLENÍ POMOCÍ TRANZISTORU

Tranzistor je elektronická polovodičová součástka, která se běžně využívá v elektronických obvodech k zesilování nebo spínání signálů. Existují různé varianty tranzistorů, ale vzhledem k téměř shodnému principu činnosti bude popsán pouze bipolární tranzistor.

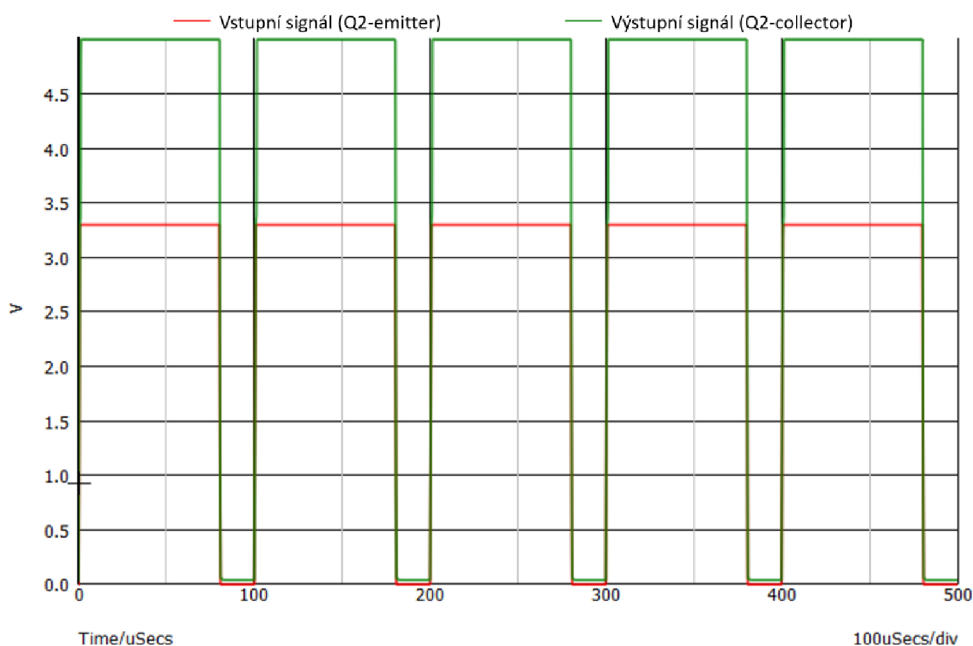
Bipolární tranzistor se skládá ze dvou PN přechodů a lze ho rozdělit podle druhu zapojení na NPN a PNP, což je dáno opačnou polaritou jednotlivých elektrod tranzistoru. Tranzistor disponuje třemi elektrodami: emitor, báze a kolektor. Přívodem proudu na elektrodu báze se řídí proud protékající tranzistorem mezi elektrodami kolektoru a emitoru. V případě tranzistoru NPN je kolektor připojen ke zdroji kladného napětí a emitor je připojen ke zdroji záporného napětí nebo k zemi, zatímco u tranzistoru PNP je zapojení kolektoru a emitoru obrácené. [4]

Na *Obr. 19* je znázorněno zapojení tranzistoru NPN pro zesílení digitálního signálu s maximálním napětím 3,3 V, který je připojen k emitoru, k bázi je připojen zdroj napětí 3,3 V a na kolektor je přes pull-up rezistor přivedeno napětí 5 V. Daný obvod neinvertuje výstupní signál.



*Obr. 19* Zesílení pomocí NPN tranzistoru

Pokud je vstupní signál 3,3 V (V36), tranzistor bude ve vypnutém stavu ( $U_{BE} = 0$  V) a v důsledku převedeného na kolektor napětí 5 V s využitím pull-up rezistoru bude na této elektrodě napětí 5 V. Pokud bude vstupní signál v logické nule, tedy napětí 0 V, tranzistor se sepne ( $U_{BE} = 3,3$  V) a na elektrodu kolektoru se přenesou hodnota 0 V. Průběh signálu s daným zapojením je zobrazen na *Obr. 20*.



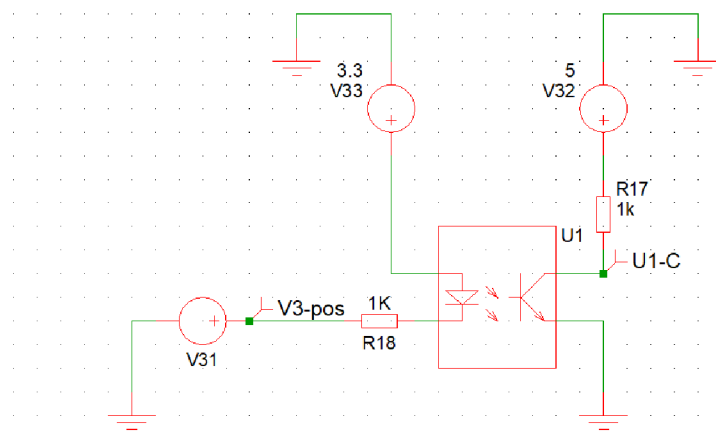
Obr. 20 Průběh signálu při zapojení NPN tranzistoru

Nevýhodou využití tranzistoru pro zesílení signálu je relativně vysoká spotřeba energie [4]. Při logické nule se k napětí přičítá saturační napětí mezi kolektorem a emitorem.

### ZESÍLENÍ POMOCÍ OPTOČLENU

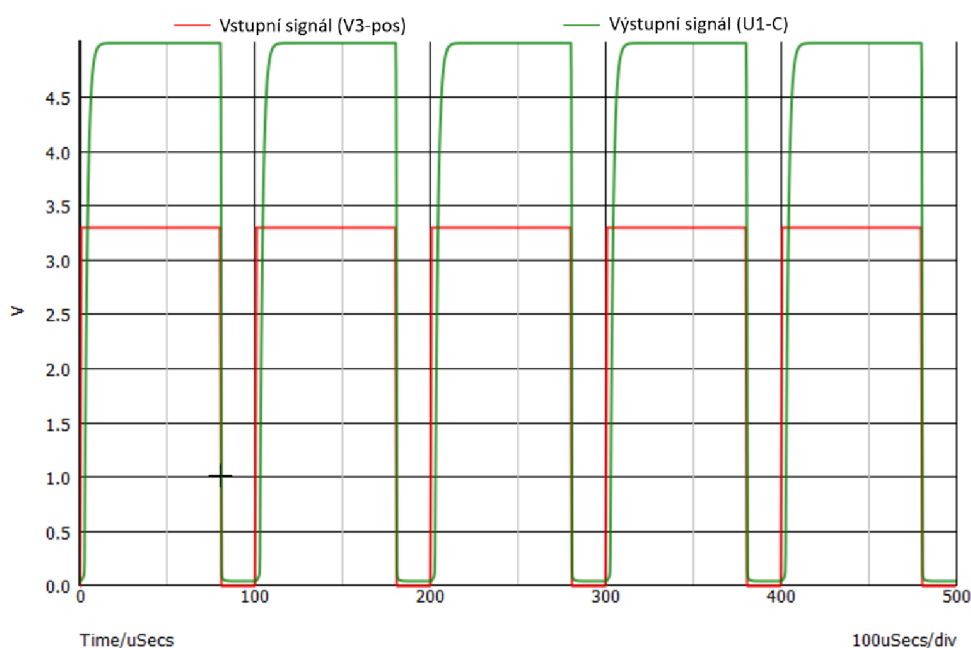
Optočlen je elektronická součástka, která se využívá ke galvanickému oddělení dvou obvodů a vzájemné komunikaci pomocí světla. Nejvyužívanější optočleny se skládají z LED diody a tranzistoru. [25]

Možný způsob neinvertujícího zapojení je znázorněn na Obr. 21, kde je na anodu diody přivedeno konstantní napětí 3,3 V a na katodu je přiveden výstupní signál. Z druhé strany je na kolektor přivedeno napětí 5 V a emitor je uzemněn.



Obr. 21 Zesílení pomocí optočlenu

Když je signál (V31) na úrovni logické jedničky, začne LED diodou protékat elektrický proud a dioda začne svítit, čímž se aktivuje tranzistor a obvod 5 V se uzemní. Při logické nule se nevyzařuje žádné světlo a obvod 5 V není uzemněn (Obr. 22).



Obr. 22 Průběh signálu při zapojení optočlenu

Optočlen má vysokou spotřebu energie a je relativně drahý. Další nevýhodou je rychlost náběhu při přepnutí na logickou jedničku, která je v určitých případech nepřijatelná, přestože je zachována perioda.

### ZESÍLENÍ POMOCÍ PŘEVODNÍKU ÚROVNĚ

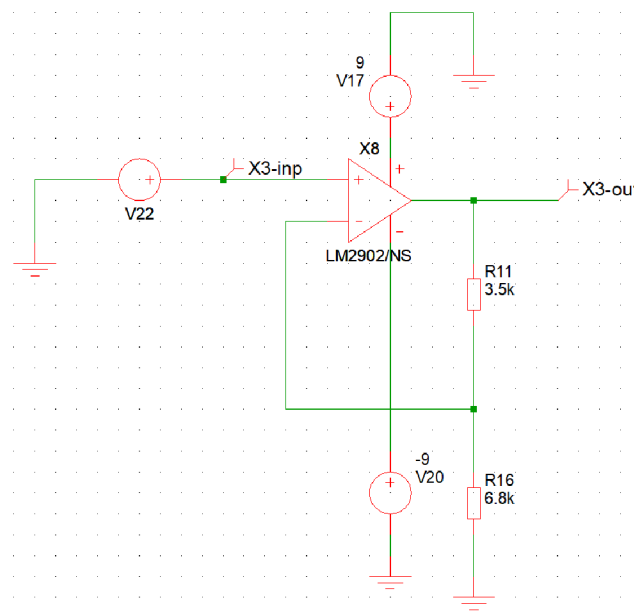
Pro zesílení logické úrovně se využívají speciální integrované elektronické obvody. Převodník logické úrovně z 3,3 V na 5 V je vysoce výkonný a typický se využívá ve vysokorychlostních

datových sběrnicích. Příkladem tohoto obvodu je 74LVC1T245 [27]. Nevýhodou je cena obvodu.

### ZESÍLENÍ POMOCÍ OPERAČNÍHO ZESILOVAČE

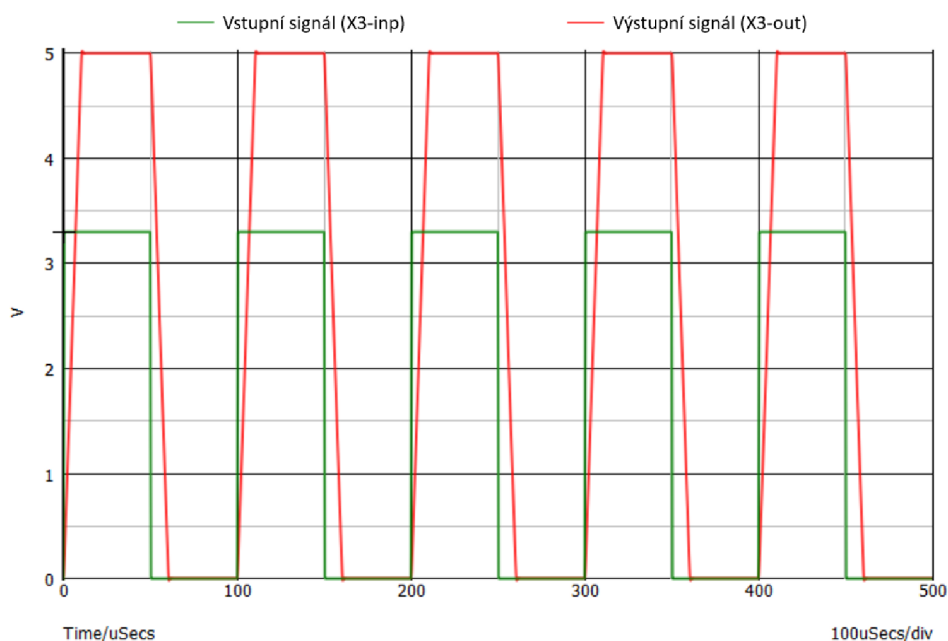
Operační zesilovač je nejlepším řešením ve srovnání se všemi předchozími, pokud je třeba zesílit nejen digitální, ale i analogový signál. Konfigurace zesilovače se skládá z invertujícího vstupu (-), neinvertujícího vstupu (+), výstupu a napájecích vstupů. Vstupy mají vysokou impedanci (zdánlivý odpor kladený střídavému harmonickému proudu) a výstup má nízkou impedanci. Výstupní signál nelze zesílit na hodnotu větší, než je hodnota napájecího napětí, a jelikož v operačním zesilovači dochází ke ztrátám, je hodnota výstupního napětí menší než hodnota napájecího napětí o hodnotu, která závisí na konkrétním využitím integrovaném obvodu. [26] Možné způsoby využití operačního zesilovače jsou znázorněny na následujících obrázcích.

Na *Obr. 23* je znázorněno zapojení operačního zesilovače pro zesílení digitálního signálu z 3,3 V na 5 V. Vstupní signál (V22) je zapojen na neinvertující vstup a operační zesilovač je napájen napětím 9 V pro kladný vstup a -9 V pro záporný vstup. Výstupní signál se přivádí zpět na invertující vstup přes dělič napětí. Celý obvod funguje tak, že když se vstupní signál přepne na 3,3 V, operační zesilovač se přepne na kladné napájení 9 V. Výstupní signál pomocí děliče napětí se sníží, ale pořád je na invertujícím vstupu větší než vstupní napětí 3,3 V, což způsobí přepnutí operačního zesilovače na záporné napětí -9 V. Výstupní napětí rychle klesá, ale stále se dělí děličem napětí. Když bude na neinvertujícím vstupu napětí menší 3,3 V, operační zesilovač se přepne zpět na kladné napájení 9 V. Proto je na grafu průběhu signálu při přepínání z logické nuly na logickou jedničku vidět oscilace. V důsledku zpožděné hodnoty napětí na výstupu z operačního zesilovače tento proces přepínání rychle zaniká a operační zesilovač pracuje v ustáleném režimu.



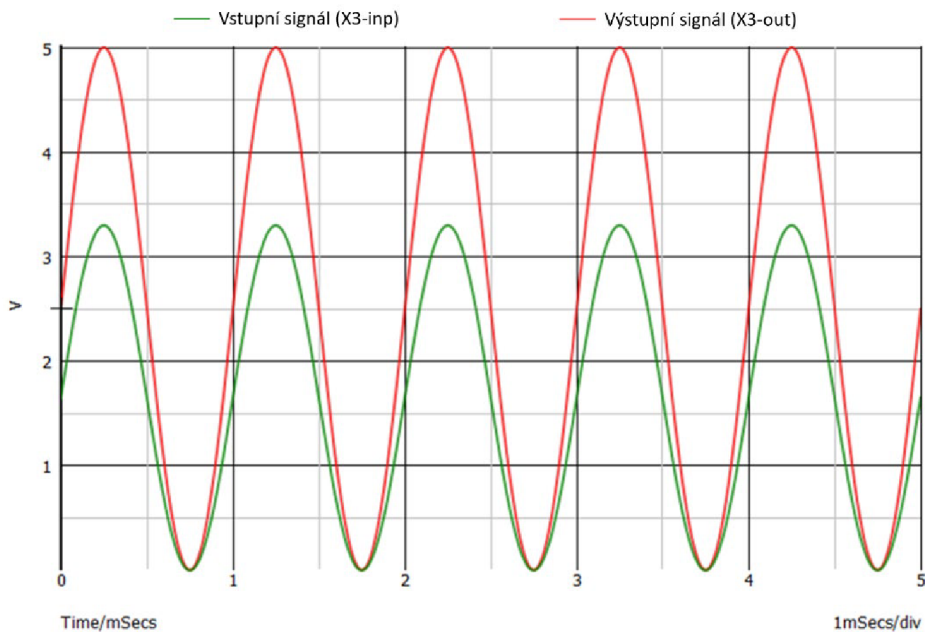
*Obr. 23* Zesílení pomocí operačního zesilovače (dělení zpětného napětí)

Z Obr. 24 je patrné, že zesílený signál má oproti vstupnímu zpoždění. Rychlost nárůstu a poklesu napětí je dána charakteristikou konkrétního operačního zesilovače. Generovaný signál má frekvenci 10 kHz, při frekvencích vyšších než 100 kHz může výstupní signál nedosáhnout požadovaných 5 V a bude třeba využít jiný vysokorychlostní operační zesilovač.



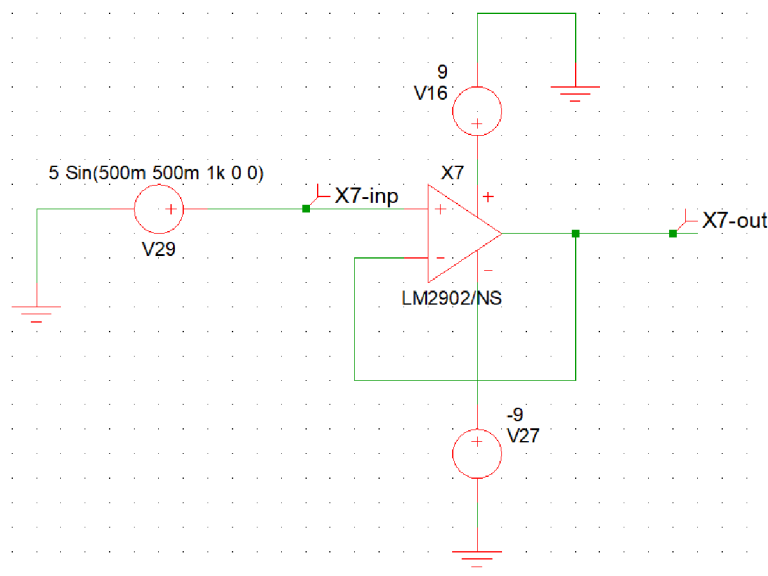
Obr. 24 Průběh digitálního signálu při zesílení pomocí operačního zesilovače (dělení zpětného napětí)

Jak bylo výše uvedeno, operační zesilovač lze využít k zesílení analogového signálu. Pro znázornění zesílení analogového signálu na Obr. 25 bylo využito předchozí zapojení se změnou průběhu vstupního signálu na sinusový průběh. Pokud je rychlost změny hodnoty napětí menší než v případě digitálního signálu, není zpoždění výstupního signálu významné.



Obr. 25 Průběh analogového signálu při zesílení pomocí operačního zesilovače (dělení zpětného napětí)

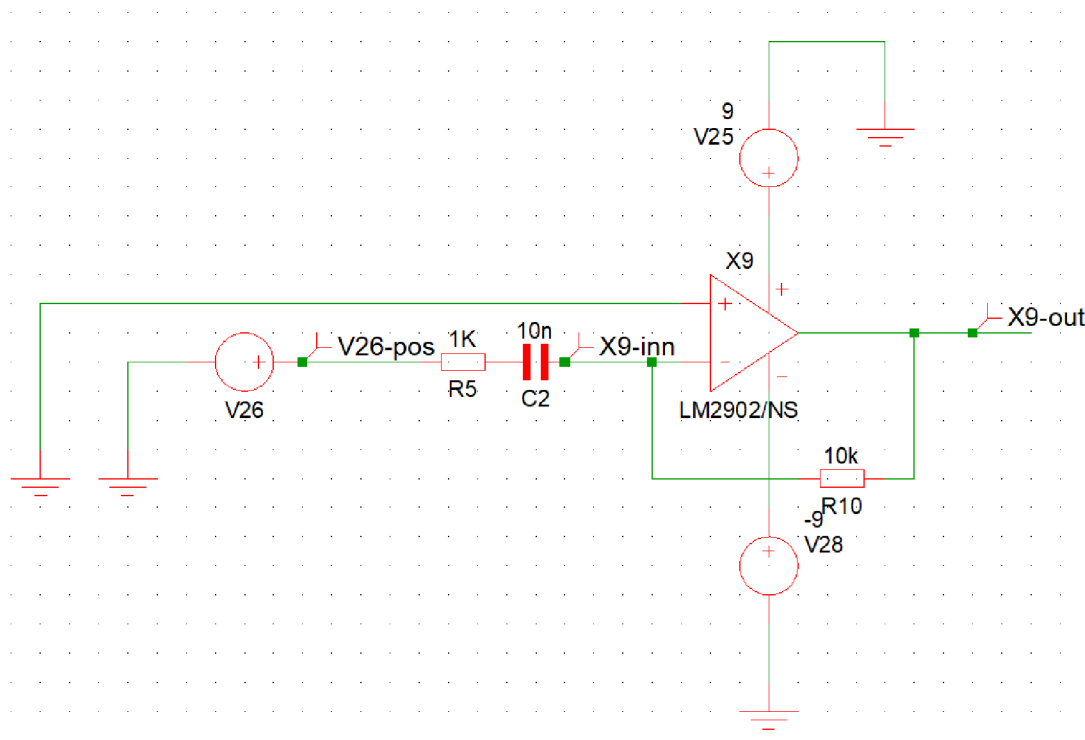
Další možností využití operačního zesilovače je režim sledovače napětí. Tento obvod se využívá především k oddělení vysokoimpedančního vstupu od nízkoimpedančního výstupu se zachováním hodnoty vstupního napětí na výstupu. Příklad tohoto obvodu je na Obr. 26, kde je výstupní signál zapojen do invertujícího vstupu jako zpětná vazba.



Obr. 26 Zapojení operačního zesilovače v režimu sledovače

Pomocí operačního zesilovače lze digitální vstupní signál s rozsahem napětí 0 V až 3,3 V převést na střídavý analogový signál v rozsahu téměř -9 V až 9 V, s ohledem na úbytek napětí v maximálních hodnotách. Na Obr. 27 je znázorněno zapojení operačního zesilovače jako diferenciátor [25]. K invertujícímu vstupu je připojen kondenzátor zapojený

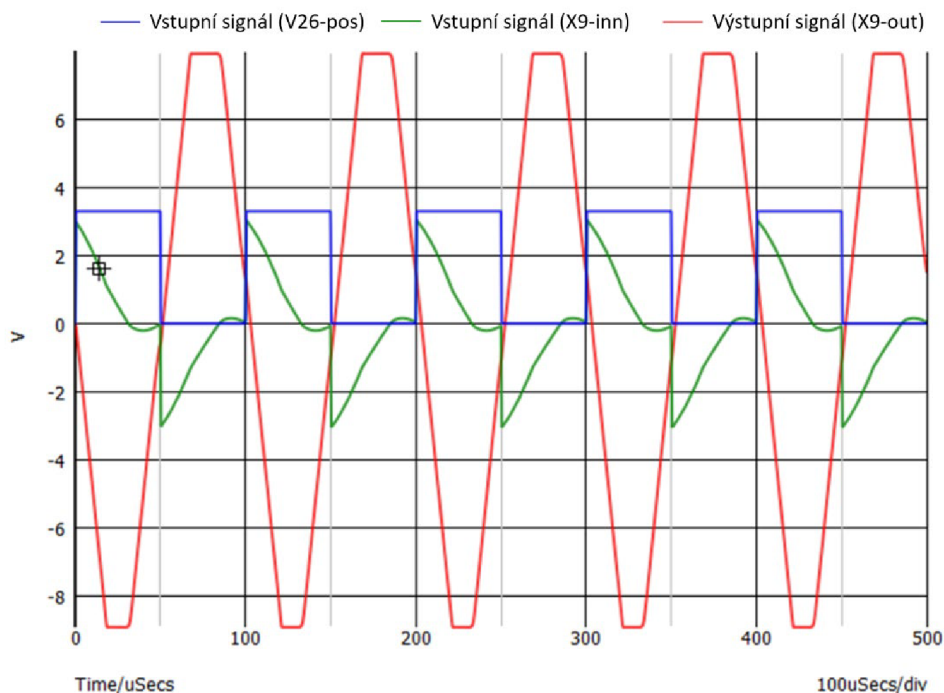
do série s generátorem signálu (V26), neinvertující vstup je připojen k zemi. Výstupní signál je připojen k invertujícímu vstupu přes zpětnovazební rezistor. Integrovaný obvod je napájen napětím -9 V na záporný zdroj a 9 V na kladný zdroj.



Obr. 27 Zapojení operačního zesilovače jako diferenciátor

K tvorbě vstupního napětí stačí využít pouze jeden kondenzátor, avšak v tomto obvodu byl využit další rezistor, který stabilizuje protékající kondenzátorem napětí tak, že v každé periodě je téměř stejný průběh napětí při počáteční inicializaci, čímž se eliminuje plovoucí počáteční perioda. Hodnota využitého kondenzátoru odpovídá frekvenci vstupního signálu 10 kHz, při nižší frekvenci se výstupní napěťový impuls proběhne stejnou rychlostí a ustálí se na 0 V, protože napětí na kondenzátoru vzniká rychlou změnou napětí vstupního digitálního signálu. Když bude na invertující vstup převedeno kladné napětí (X9-inn), výstupní signál (X9-out) se zvýší na maximální možnou zápornou hodnotu a ustálí se, jakmile vstupní napětí projde nulou, hodnota výstupního napětí bude směřovat k nule (Obr. 28). Když je napětí vstupního digitálního signálu (V26) nulové, napětí nabitého kondenzátoru se uvolní a výstupní signál se zvýší na maximální možnou kladnou hodnotu, dokud napětí na invertujícím vstupu nepřekročí nulu.





Obr. 28 Průběh analogového signálu při zapojení operačního zesilovače jako diferenciátor

Operační zesilovač disponuje širokou škálou možností zpracování signálů pro různé aplikace, je relativně levný a má nízkou impedanci na výstupu. Nevýhodou je nutnost využití záporného zdroje napětí při generování střídavého napětí.

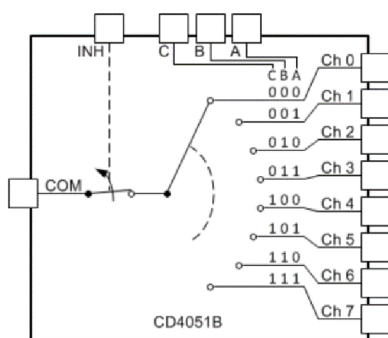
### 7.3.2 ZVĚTŠENÍ POČTU VÝSTUPŮ

Mikrokontrolér disponuje omezeným počtem vstupů a výstupů, většinou jednotlivé piny umožňují jak generování výstupních signálů, tak snímání vstupních signálů. Pokud je počet vstupů nebo výstupů příliš malý, je nutné najít řešení, jak jejich počet zvětšit. Nejjednodušším řešením by bylo využít mikrokontrolér s větším počtem pinů, ale toto řešení může navrhovaný hardware výrazně zdražit. Větší mikrokontrolér nemusí odpovídat požadovaným schopnostem, kromě toho většina vícepinových mikrokontrolérů má stejný počet analogových vstupů a výstupů jako menší mikrokontroléry. Z tohoto důvodu se v praxi často využívají jiné elektronické integrované obvody.

### MULTIPLEXOR A DEMULTIPLEXOR

Multiplexor je integrovaný obvod, jehož účelem je spojit několik vstupních signálů do jednoho výstupního signálu. Multiplexor si lze představit jako digitální přepínač, který přepíná mezi vstupy a výstupy. Přepínání se programuje pomocí signálů z mikrokontroléru. Například multiplexor Texas Instruments CD4051BE [28] má 8 vstupních kanálů a jeden výstupní *Obr. 29*, vstup INH slouží k vypnutí přenosu signálu, vstupy A, B a C jsou programovací vstupy, vstupy Ch 0 až Ch 7 slouží k připojení vstupních signálů, COM je výstup z multiplexoru.





Obr. 29 Funkční schéma multiplexoru / demultiplexoru [28]

K přenosu signálů z 8 vstupů se využívá 5 pinů mikrokontroléru. V případě trvalé činnosti multiplexoru lze vynechat připojení vstupu pro vypnutí integrovaného obvodu, což zachovává jeden výstup mikrokontroléru. Ve vícekanálových multiplexorech je více programovacích vstupů pro zvětšení počtu kombinací, čímž se výrazně zvyšuje počet kanálů pro vstupní signály.

Demultiplexor je ve většině případů stejný integrovaný obvod, jen že jeden výstupní pin mikrokontroléru je podle aktuální programovací kombinace propojen s jedním z výstupních kanálů. Některé demultiplexory podporují také analogové signály.

Nevýhodou takového zvětšení počtu vstupů nebo výstupů je, že neumožňuje průběžné sledování každého vstupu v případě multiplexoru nebo přenos různých hodnot současně pro všechny výstupy v případě demultiplexoru, to je způsobeno rychlostí přepínání mezi kanály a v některých případech je tato vlastnost nevyhovující. Dalším problémem demultiplexoru je zachování napětí ze vstupního signálu po odpojení.

### D/A A A/D PŘEVODNÍKY

Pro zvětšení počtu analogových vstupů nebo výstupů se obecně využívají A/D a D/A převodníky. V případě využití A/D převodníků se analogový signál převádí na digitální zaokrouhlením na nejbližší kvantizační hladinu, jejichž počet je určen počtem bitů převodníku. Větší počet bitů zvyšuje počet kvantizačních hladin, a tím i rozlišení převodníku [25].

D/A převodníky převádějí digitální signál na analogový. Digitální data se do převodníku posílají pro volbu kvantizační hladiny a nastavení dalších parametrů, jako je volba konkrétního kanálu nebo aktivace převodníku.

Údaje pro nastavení programovacího kódu poskytuje výrobce, při výpočtu se zohledňuje hodnota referenčního napětí, která se dělí kvantizačními hladinami podle počtu bitů. V případě A/D převodníku nesmí vstupní signál překročit hodnotu referenčního napětí.

Převodníky jsou obvykle programovány mikrokontrolérem pomocí datové komunikace, jako je SPI nebo I2C, což způsobuje zpomalení rychlosti změny signálu o dobu potřebnou k naprogramování převodníku. Pro správnou funkci převodníku je nutné mít velmi přesný zdroj referenčního napětí, aby nedocházelo ke zkreslení generovaného signálu.

### 7.3.3 GENEROVÁNÍ ODPORU

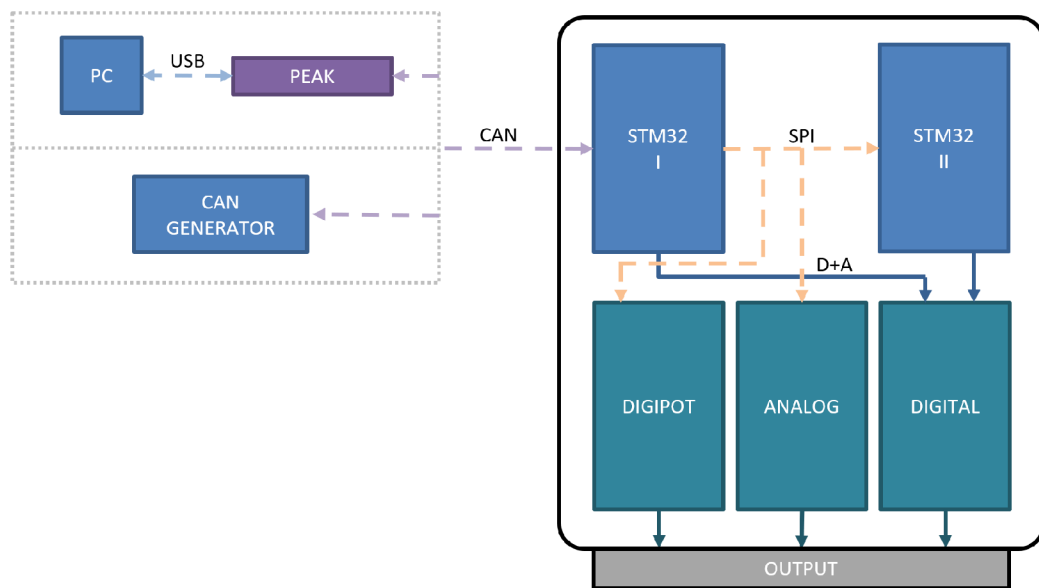
Vzhledem k tomu, že snímač teploty NTC je odporový snímač, je třeba tento odpor simulovat pomocí elektronického obvodu. Manuální způsoby ovládání jsou pro tuto aplikaci zcela nevhodné vzhledem k chybějící možnosti automatické regulace.

Speciální elektronickou součástí pro tento účel je digitální potenciometr, který se ovládá mikrokontrolérem prostřednictvím komunikace SPI nebo I2C. Digitální potenciometr má určitý rozsah odporu, typické hodnoty jsou 10, 50 a 100 k $\Omega$ . Programování probíhá odesláním datových zpráv do integrovaného obvodu, které programují potenciometr podle údajů poskytnutých výrobcem. Úrovně, na které je odpor rozdělen, jsou dány počtem bitů. Na rozdíl od A/D nebo D/A převodníků mají digitální potenciometry obvykle rozlišení 8 bitů, což je důsledkem relativně vysoké hodnoty odporu pro jeden krok.

## 7.4 VÝSLEDNÁ HARDWAROVÁ KONCEPCE MOBILNÍHO GENERÁTORU SIGNÁLŮ

V souvislosti s popsánými možnostmi úprav signálů byla upřesněna koncepce generátoru signálů (*Obr. 30*). K simulaci snímačů teploty NTC budou využity digitální potenciometry, počet analogových výstupů bude zvětšen pomocí D/A převodníků. Digitální a analogové signály mikrokontrolérů STM32 I a STM32 II budou zesíleny pomocí operačních zesilovačů.

Jak již bylo zmíněno, generátor signálů bude ovládán pomocí CAN komunikace, konkrétně mikrokontrolér STM32 I. Pro ovládání mikrokontroléru STM32 II, D/A převodníků a digitálních potenciometrů byla zvolena běžně využívaná komunikace s integrovanými obvody SPI, která podporuje pouze jedno řídicí zařízení (master), počet podřízených zařízení (slave) je omezen počtem ovládacích pinů zařízení master. SPI komunikace vyžaduje propojení čtyř vodičů mezi master a slave, jeden vodič CS slouží k výběru slave, MOSI slouží k odesílání zpráv z master do slave a MISO k odesílání zpráv ze slave do master, poslední vodič je časovač SCLK. V některých integrovaných obvodech se pro komunikaci využívají tři vodiče (CS, MOSI a SCLK). Na rozdíl od I2C komunikace, která využívá pouze dva vodiče a podporuje více zařízení master, je SPI komunikace rychlejší, 10 MHz oproti 5 MHz. Pro úsporu pinů pro výběr slave se používá zapojení daisy-chain, kdy se zpráva postupně předává z jednoho slave do druhého připojením výstupu MISO prvního slave na vstup MOSI druhého slave. Nevýhodou této konstrukce je, že se řízení zpomaluje, a pokud dojde k poruše prvního slave, ostatní zařízení slave nebudou řízeny.



Obr. 30 Výsledná hardwarová koncepce

## 7.5 ELEKTRONICKÉ OBVODY

Tato kapitola popisuje vybrané integrované obvody a jejich schémata zapojení. Rezistory a kondenzátor byly vybrány na základě doporučení výrobců integrovaných obvodů nebo s ohledem na existující podobné elektronické obvody. Pro všechny rezistory byl vypočítán ztrátový výkon podle vzorce:

$$P = UI, \quad (3)$$

kde  $U$  je napětí, a  $I$  je proud protékající rezistorem. Proud se vypočítá podle Ohmova zákona. Hodnoty ztrátového výkonu nepřekračují přípustný výkon SMD součástek.

Předpokládá se, že řídicí jednotka má obvody pro filtrování elektronického signálu vůči šumu, proto nebyly použity žádné další metody filtrování, jako je horní a dolní propust. Výstupní signály se následně zkontrolují na přítomnost elektronického šumu pomocí precizního osciloskopu. Elektronická schémata byla vytvořena v open source softwaru pro návrh DPS KiCAD [29].

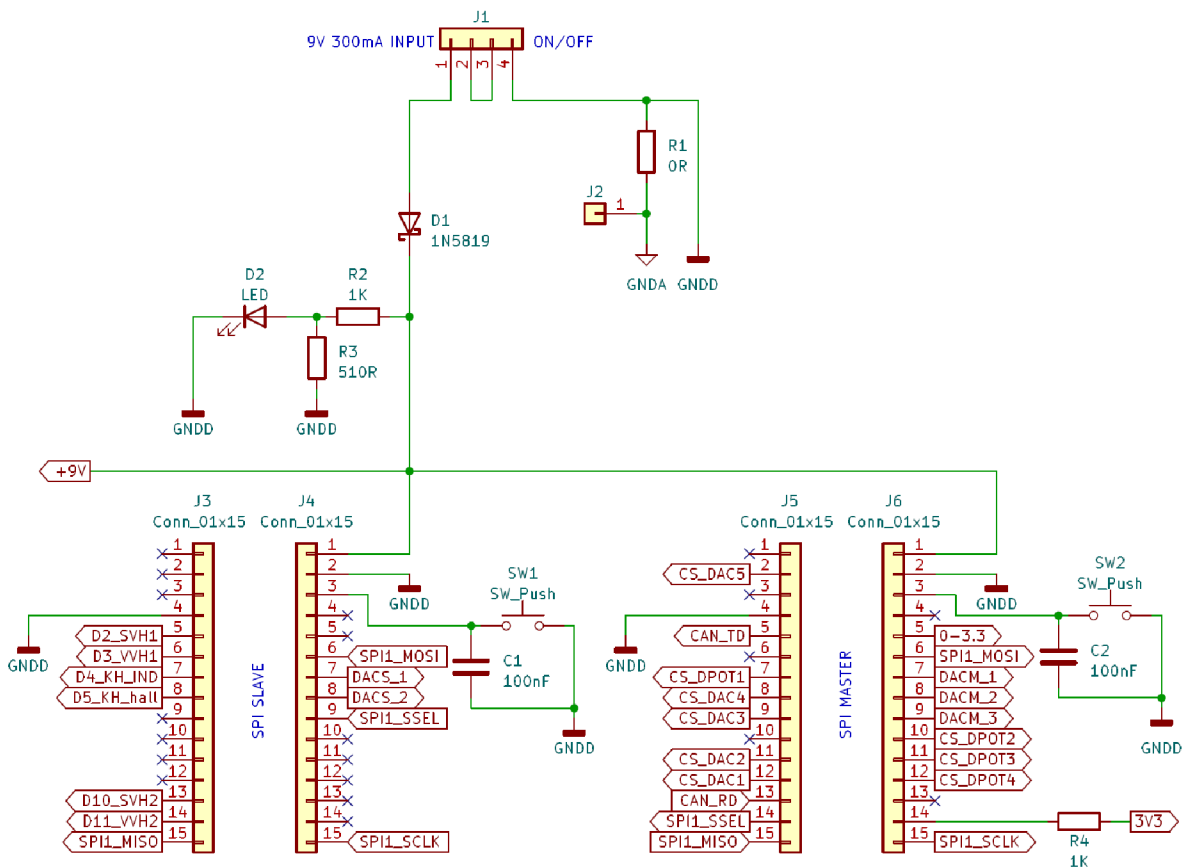
### 7.5.1 NAPÁJENÍ A ZAPOJENÍ MIKROKONTROLÉRŮ

Vývojová deska Nucleo disponuje měničem napětí, proto může být napájena napětím v rozsahu 7 V až 12 V, přivedeným na pin VIN. Generátor signálů je napájen zdrojem napětí 9 V, při daném napětí potřebuje deska Nucleo proud 0,3 A (Obr. 31). Napájení je přivedeno na vývody 3 a 4 svorkovnice J1, vývody 1 a 2 jsou určeny pro spínač. Jako ochrana proti přepólování byla využita Schottkyho dioda 1N5819 [30], protože má menší úbytek napětí než běžná dioda. Úbytek napětí byl určen z grafu a má hodnotu 0,375 V při maximálním proudu 0,3 A. Vypočtený ztrátový výkon je 0,11 W, což vyhovuje využití SMD diody s maximálním ztrátovým výkonem 1,67 W, vypočteným podle následujícího vztahu [25]:

$$P_{z\_DI0max} = \frac{T_J - T_A}{\Theta_{JA}}, \quad (4)$$

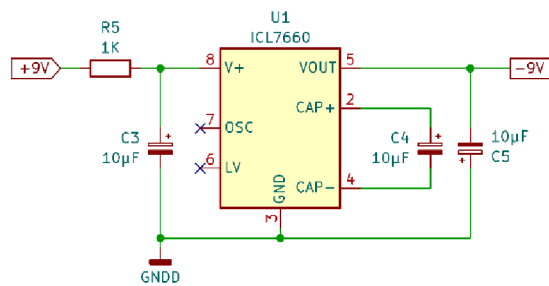
kde  $T_J$  je maximální teplota přechodu,  $T_A$  je teplota okolí a  $\Theta_{JA}$  je tepelný odpor přechodu okolí. Všechny potřebné hodnoty jsou získány z dokumentace výrobce.

K indikaci napájení DPS se využívá LED dioda, jejíž vstupní napětí je sníženo napěťovým děličem s rezistory R2 a R3. Na desce plošných spojů je z důvodu generování analogových signálů zem rozdělena na digitální a analogovou, které jsou propojeny pomocí rezistoru R1 s nulovým odporem. J2 je na DPS pouze prokovem pro připojení vodiče analogové země. Mikrokontrolér STM32 I, který je SPI master, je připojen k DPS pomocí dutinkových lišt J5 a J6, mikrokontrolér STM32 II, který je SPI slave, je připojen pomocí J3 a J4. Součástí přílohy je tabulka s popisem vstupů a výstupů mikrokontrolérů. Tlačítka SW1 a SW2 slouží k resetování mikrokontrolérů, kondenzátory C1 a C2 slouží k filtraci signálu při sepnutí a rozepnutí tlačítek. Rezistor R4 se využívá k regulaci proudu zdroje napětí 3,3 V.



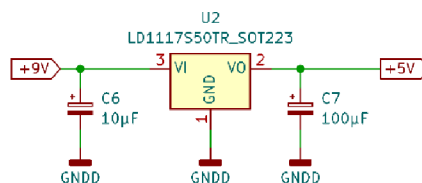
Obr. 31 Zapojení mikrokontrolérů

Pro generování záporného napětí potřebného k zápornému napájení operačního zesilovače byl využit obvod ICL7660 [31]. Rezistor R5 je využit k nastavení provozního elektrického proudu (Obr. 32). Tantalové kondenzátory jsou využity podle doporučení výrobce.



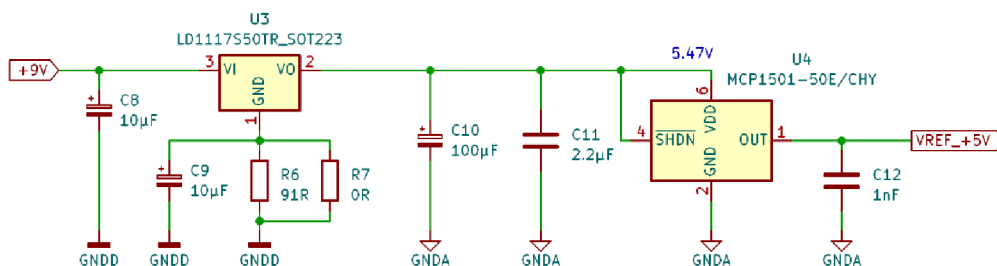
Obr. 32 Zapojení ICL7660

K napájení integrovaných elektronických obvodů se využívá pevný regulátor napětí LD1117S50TR [32], který převádí vstupní napětí v rozsahu 6,5 V až 12 V na výstupní napětí 5 V. Podle dokumentace byly pro zlepšení stability vstupního a výstupního napětí využity tantalové kondenzátory C6 a C7 (Obr. 33).



Obr. 33 Zapojení LD1117S50TR

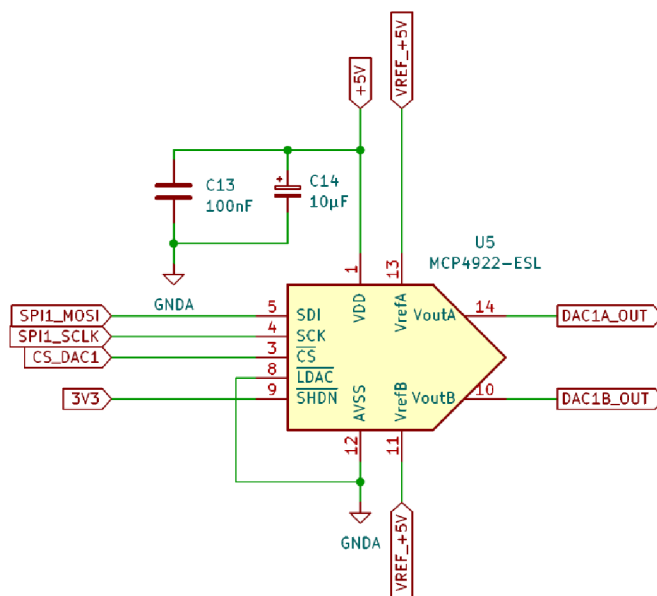
Integrovaný obvod LD1117S50TR generuje výstupní napětí 5 V, avšak toto napětí není přesné, a proto se pro generování přesného referenčního napětí 5 V ( $V_{REF\_+5V}$ ) vstupujícího do D/A převodníků využije elektronická součástka MCP1501-50E/CHY [33]. Podle katalogového listu musí být tato součástka napájena napětím v rozsahu 5,2 V až 5,5 V. Pro generování napětí v tomto rozsahu je využit další integrovaný obvod LD1117S50TR, který je napájen napětím 9 V. Na rozdíl od předchozího zapojení jsou rezistory R6 a R7 připojeny k zemi, aby se dosáhlo požadovaného napětí, a tantalový kondenzátor C9 (Obr. 34). Odpor rezistoru R6 byl předběžně zvolen na základě simulace provedené v softwaru LTspice [34] a má hodnotu 91  $\Omega$ , což odpovídá výstupnímu napětí 5,47 V. Pro případ regulace je paralelně zapojen rezistor R7. Na pin SHDN (vypnutí) je také přivedeno napětí 5,47 V, aby obvod mohl generovat referenční napětí. Další integrovaný obvod, LD1117S50TR, zlepšuje stabilitu, a tedy i přesnost generovaného referenčního napětí, protože ho využívá pouze jeden přímo zapojený integrovaný obvod, U4. Mezi těmito dvěma obvody je provedeno rozdělení země na analogovou a digitální.



Obr. 34 Zapojení LD1117S50TR a MCP1501-50E/CHY

### 7.5.2 D/A PŘEVODNÍKY

Počet analogových výstupů je zvětšen využitím pěti dvojitých 12bitových D/A převodníků MCP4922 [35], které mají dostatečné rozlišení pro všechny potřebné aplikace. Externí D/A převodník je přesnější vzhledem k využití referenčního napětí a připojení výstupu AVSS k analogové zemi. Výstupní zesilovač tohoto D/A převodníku je dostatečně výkonný pro přímé připojení k malým zátěžím. Kondenzátory C13 a C14 se využívají ke zvýšení stability napájení v případě velmi krátkých přerušení (*Obr. 35*). Převodník je napájen napětím 5 V a má dva vstupní piny pro referenční napětí pro každý kanál zvlášť. Ovládání převodníku probíhá pomocí komunikace SPI, pin SDI přijímá signál datové zprávy, pin SCK přijímá signál časovače a pin CS přijímá signál aktivace zařízení slave pro příjem dat. Vývod LDAC se využívá k synchronní aktualizaci obou analogových výstupů po přijetí zprávy SPI. Pokud je tento pin připojen k zemi, oba analogové výstupy se aktualizují současně při náběžné hraně signálu aktivace na pinu CS. SHDN je vstupní pin pro vypnutí převodníku, pokud na tento pin není přivedeno napětí odpovídající logické jedničce, jsou oba kanály nedostupné.



*Obr. 35* Zapojení MCP4922

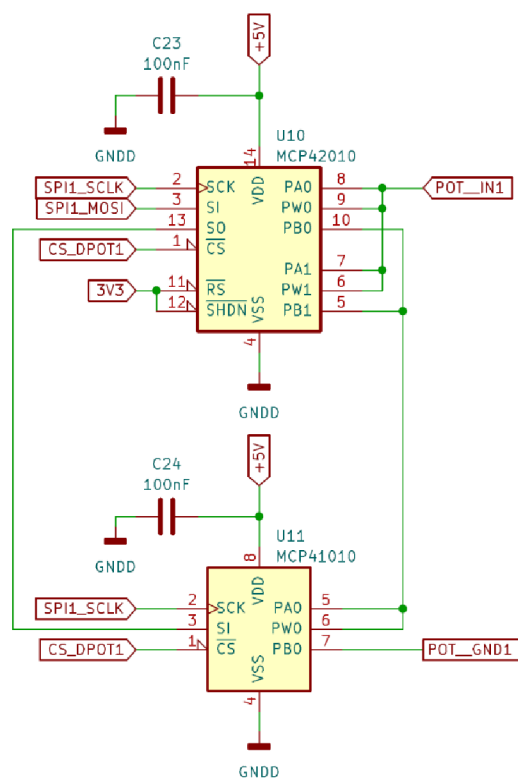
### 7.5.3 DIGITÁLNÍ POTENCIOMETRY

Simulace odporového snímače teploty je realizována pomocí 8bitových digitálních potenciometrů. K simulaci jednoho snímače byl využit jeden jednoduchý (MCP41010) a jeden dvojitý (MCP42010) lineární digitální potenciometr s hodnotou odporu 10 k $\Omega$  [36]. Celkový počet simulovaných snímačů je čtyři, byly tedy využity čtyři dvojitě a čtyři jednoduché digitální potenciometry. PA a PB jsou terminály a PW je jezdec potenciometru. Všechny tři potenciometry jsou zapojeny v režimu digitálního reostatu. Podle zapojení (*Obr. 36*) jsou ve všech potenciometrech jako reostaty využity odpory mezi terminálem PB a jezdcem PW. V případě dvojitěho potenciometru jsou odpory zapojeny paralelně, aby se snížil odpor jednoho kroku mezi hladinami. Celkový odpor se zvyšuje jednoduchým potenciometrem zapojeným do série. Tímto zapojením se dosáhne maximálního odporu 15 k $\Omega$ , ale zvýší se minimální odpor, protože každý potenciometr má minimální hodnotu odporu přibližně 52  $\Omega$ . Z tohoto důvodu



nebyly využity další potenciometry v rámci jednoho simulovaného snímače teploty, aby bylo možné simulovat odpor odpovídající vysokým teplotám. V případě simulace vyššího odporu lze využít externí sériově zapojený rezistor. Potenciometry jsou ovládány pomocí komunikace SPI, zde je využita metoda zapojení daisy-chain, jelikož obě komponenty jsou ve všech případech využity současně, čímž jsou zachovány celkem čtyři výstupní piny z mikrokontroléru pro volbu zařízení slave. Způsob programování obou potenciometrů s daným obvodem je popsán v kapitole o návrhu softwaru.

Kondenzátory C23 a C24 stabilizují napájení integrovaných obvodů. Časovač SCK je přiveden do obou součástek, jeden signál volby zařízení slave je připojen ke dvěma potenciometrům. Datové zprávy jsou přijímány dvojitým potenciometrem přes pin SI a následně odesílány z pinu SO na pin SI jednoduchého potenciometru. Účelem pinu RS je resetovat obvod a pro fungování potenciometrů musí být tento pin v logické jedničce, pokud bude na tento pin přivedena logická nula po dobu alespoň 150 ns, potenciometr se nastaví na střední polohu jezdce. Vývod SHDN přepne potenciometr do úsporného režimu, pokud je na něj přivedena logická nula, při přivedení logické jedničky je potenciometr uveden do plného provozu. Celkový odpor všech zapojených odporů je snímán dvěma výstupy POT\_IN1 a POT\_GND1. Stejně jako u zapojení rezistorů nezáleží na orientaci zapojení vodičů k vývodům.

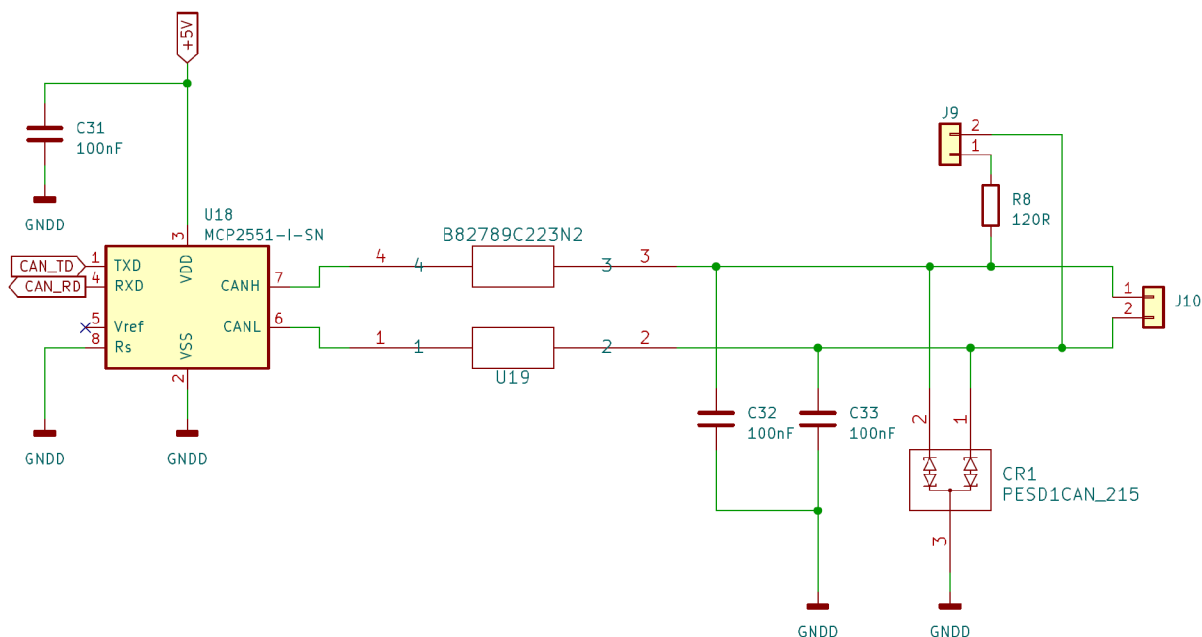


Obr. 36 Zapojení MCP41010 a MCP42010

#### 7.5.4 CAN KOMUNIKACE

Vývojová deska Nucleo nemá vlastní CAN transceiver, ale tento obvod je pro komunikaci CAN nezbytný. Jedním z nejčastěji využívaných transceiverů umožňujících odesílání a příjem zpráv je MCP2551 [37]. Integrovaný obvod je napájen zdrojem 5 V s využitím stabilizačního

kondenzátoru C31 (Obr. 37). Vývod mikrokontroléru vysílající zprávy CAN (CAN\_TD) je připojen k vývodu TDX a vývod přijímající zprávy CAN (CAN\_RD) je připojen k vývodu RDX. Vývod Rs slouží k volbě mezi vysokorychlostním režimem, režimem řízení sklonu nebo nouzovým režimem pomocí externího rezistoru. Daný transceiver je zapojen pro vysokorychlostní režim, tj. bez rezistoru, v tomto režimu je rychlost přepínání signálu mezi úrovněmi největší. Vývod Vref nemá žádný významný vliv na provoz transceiveru, a proto není připojen. Elektronická součástka má signální vstupy a výstupy CANH (CAN High) a CANL (CAN Low). Aby se zabránilo rušivému signálu, byla využita tlumivka B82789C0223N002 [38], která je navržena pro komunikaci CAN a FlaxRay v automobilovém průmyslu. Využití kondenzátorů C32 a C33 pro stabilizaci signálu bude zvaženo po testování na zhotovené DPS. PESDCAN\_215 [39] je speciální elektronická součástka složená z ochranných diod proti elektrostatickému výboji na CAN sběrnici. Rezistor 120  $\Omega$  se běžně využívá jako zakončovací rezistor pro minimalizaci odrazů signálu. V případě, že bude generátor signálů připojen k lince s ukončovacími rezistory a další rezistor nebude potřeba, lze ho odpojit rozpojením propojky J9. J10 je výstupní konektor, ke kterému se připojuje kroucená dvoulinka.

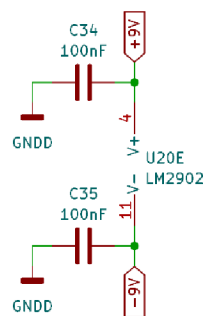


Obr. 37 Zapojení MCP2551

### 7.5.5 OPERAČNÍ ZESILOVAČE

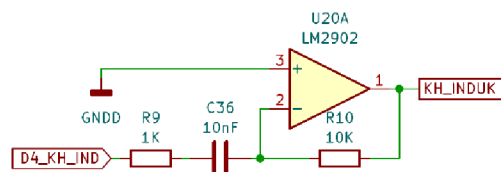
Operační zesilovače LM2902 [40] jsou napájeny napětím přibližně 9 V (Obr. 38) (závisí na přesnosti napětí zdroje a úbytku napětí diody D1) na kladném napájecím vstupu a napětím přibližně -9 V na záporném napájecím vstupu. Ke všem vstupům pro napájení zesilovače jsou připojeny stabilizační kondenzátory o kapacitě 100 nF. Jsou využity celkem čtyři integrované obvody, z nichž každý obsahuje čtyři operační zesilovače.





Obr. 38 Napájení LM2902

Pro generování signálu indukčního snímače otáček nebo snímače klepání se využilo již zmíněné zapojení operačního zesilovače jako diferenciátoru (Obr. 39). Na základě simulace provedené v softwaru SIMetrix byla zvolena předběžná kapacita kondenzátoru 10 nF, která je nejvhodnější pro frekvenční rozsah signálu 0,5 kHz až 25 kHz. Při nízké frekvenci bude impuls výstupního signálu během jednoho přepnutí vstupního digitálního signálu rychle zanikat, ale při maximální frekvenci nedojde k žádnému rozkmitání výstupního signálu během jednoho impulsu. Výsledný maximální rozsah výstupního napětí podle simulace je -8,9 V až 7,9 V při využití zdroje 9 V.



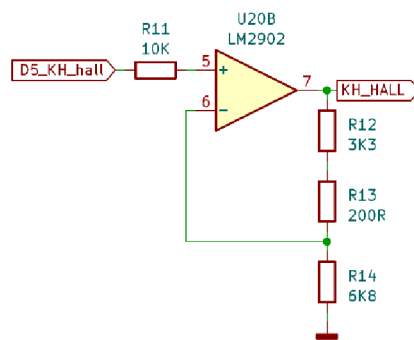
Obr. 39 Zapojení LM2902 (diferenciátor)

Zesílení analogového a digitálního signálu je realizováno následujícím obvodem (Obr. 40), který již byl popsán. Rezistor R11 slouží k regulaci elektrického proudu. Dělič napětí zpětné vazby se skládá ze dvou rezistorů R12 a R13 zapojených do série, aby bylo dosaženo požadovaného odporu 3,5 k $\Omega$  a rezistoru R14. Napětí na výstupu z operačního zesilovače se vypočítá podle vztahu:

$$V_{out} = \frac{V_{in}(R_{12} + R_{13} + R_{14})}{R_{14}}, \quad (5)$$

kde  $V_{in}$  je napětí, které vstupuje do invertujícího vstupu.

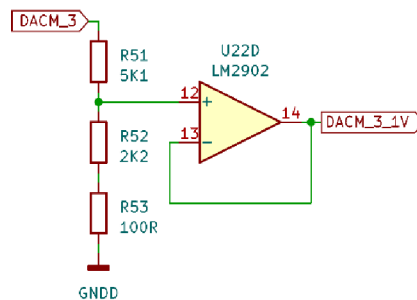
Maximální hodnota vystupujícího napětí ze zesilovače odpovídající 3,3 V na výstupu z mikrokontroléru je 4,9985 V. Pro digitální signály je zesílení na tuto hodnotu vyhovující, ale pro analogové výstupní signály se musí vypočítat korekce, aby se zachovala správná závislost mezi vstupním a výstupním signálem, tj. při vstupním napětí 1,65 V musí být výstupní napětí 2,5 V. Nedosažení výstupního napětí 5 V není podle probraných signálů vstupujících do řídicí jednotky zásadním problémem.



Obr. 40 Zapojení LM2902 (dělič zpětného napětí)

Některé signály, například výstupní signál dvoustavové  $\lambda$  sondy, mají rozsah napětí 0 V až 1 V, proto je napětí signálu jednoho z integrovaných D/A převodníků redukováno na tento rozsah (Obr. 41). To přináší další výhodu v podobě zlepšení rozlišení napětí signálu, protože se sníží rozdíl napětí různých kvantizačních hladin. Operační zesilovač je zapojen jako sledovač napětí vstupujícího na neinvertující vstup, výstupní napětí ze zesilovače se rovná výstupnímu napětí z děliče. Výpočet se provádí dle předchozího vztahu 5.

Když je vstupní napětí na děliči 3,3 V, zesilovač bude mít na výstupu 1,0257 V, proto je třeba vypočítat korekci tak, aby při vstupním napětí 3,3 V bylo výstupní napětí 1 V.



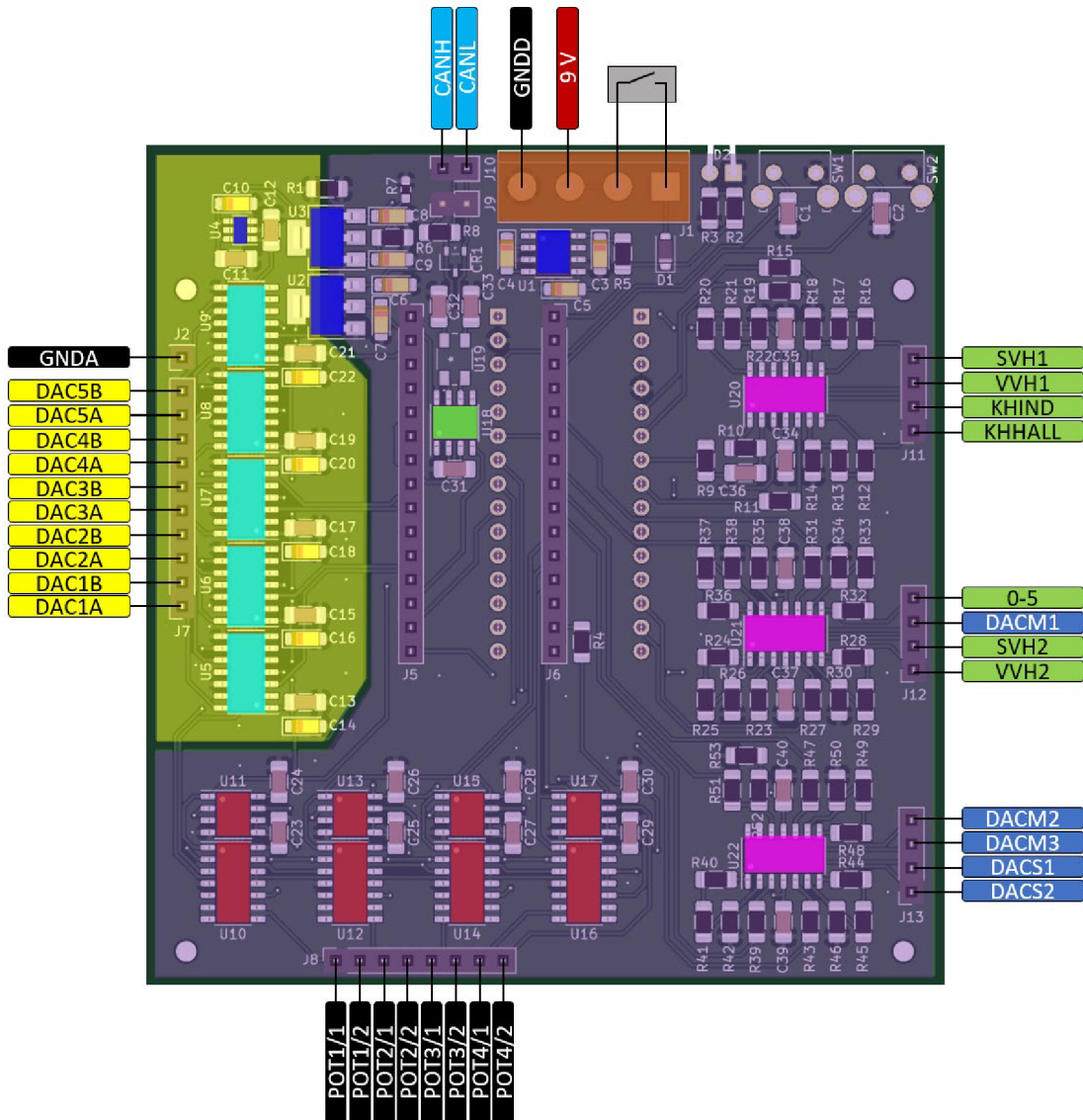
Obr. 41 Zapojení LM2902 (sledovač)

Operační zesilovače se využívají v rozsahu doporučeném výrobcem, všechny hodnoty napětí jsou určeny simulací v softwaru SIMetrix, případné poruchy nebo nadměrné zatížení se podle výsledků předpokládají.

## 7.6 NÁVRH DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ

DPS je po vytvoření schémat elektronických obvodů navržena v souladu s pravidly návrhu a podle výrobních podmínek výrobce DPS v softwaru KiCAD. Analogová a digitální část musí být odděleny, takže deska obsahuje dvě země tvořené rozlitou mědí, analogovou (žlutá zóna Obr. 42) a digitální (fialová zóna), které jsou oddělené izolačním příkopem (izolace částí zónou, ve které není rozlita měď ve všech vrstvách DPS [45]), zóny rozlité mědi odpovídají horní a spodní vrstvě. Napájení a signály jsou vedeny přemostěním příkopu, země jsou propojeny rezistorem nulového odporu R1. Vývojová deska Nucleo nedisponuje rozdělením země pro analogový a digitální signály, proto mohou být generované analogové signály ovlivněny rušením v důsledku generování digitálních signálů, tedy vlivem impulzního proudu. Z toho

důvodu nejsou analogové signály integrovaných převodníků, které jsou zesíleny operačními zesilovači, odděleny a jsou umístěny na digitální části DPS.



Obr. 42 Návrh DPS

Navržená DPS je dvouvrstvá, horní strana je určena především k umístění součástek a vodičů, spodní strana je určena k tomu, aby bylo možné vodiče položit co nejkratší cestou. Výjimkou jsou signálové vodiče CAN sběrnice, u nichž musí být délka stejná, aby se zabránilo posunu jednoho signálu vůči druhému. Přechody mezi vrstvami jsou tvořeny prvokovy, které byly rovněž využity pro lepší propojení země z obou stran. Plocha příčného průřezu vodičů souvisí s přípustným proudovým zatížením, při šířce 0,3 mm a tloušťce 0,018 mm je plocha příčného průřezu 0,0054 mm<sup>2</sup>, pokud vodičem bude protékat proud 0,5 A, bude hodnota teplotního nárůstu menší než 10 °C [45]. Minimální izolační vzdálenost vodičů je 0,15 mm. Pájecí plošky uzemnění jsou termální z důvodu velké plochy rozlité mědi, aby se zabránilo nadměrnému odvodu tepla při pájení, šířka a délka propojovacích paprsků je 0,5 mm. Rozměry pájecích plošek závisí na konkrétních pouzdrech součástek. Pro montáž desky byly vytvořeny čtyři otvory o průměru 2,2 mm.

Napájecí svorkovnice, do které je přiváděno napájení a připojen vypínač napájení, je zvýrazněna oranžově. Komponenty pro napájení integrovaných obvodů jsou umístěny co nejbližší svorkovnici a na obrázku jsou zvýrazněny modře. Integrované obvody externích D/A převodníků jsou zvýrazněny světlemodře, integrované obvody digitálních potenciometrů jsou zvýrazněny červeně, operační zesilovače jsou zvýrazněny růžově a CAN transceiver je zvýrazněn zeleně. LED dioda a resetovací tlačítka jsou umístěna na stejné hraně, aby je bylo možné vysunout do bočního panelu montážní krabice, do které bude následně namontována DPS. Konektory pro připojení vodičů výstupních signálů jsou umístěny po obvodu desky v blízkosti příslušných obvodů. Pro úsporu místa a lepší umístění vodičů pro komunikaci SPI jsou mikrokontroléry umístěny na obou stranách DPS, STM32 I (SPI Master) na horní straně zapojením do dutinkových lišt J5 a J6, STM32 II (SPI Slave) na spodní straně zapojením do dutinkových lišt J3 a J4.

Pro většinu využitých součástek jsou zvolena pouzdra SMD, která jsou ve srovnání se součástkami s drátovými vývody výhodnější, šetří se tím místo, vedení jsou kratší, což zlepšuje pracovní frekvenci signálů. Pouzdra SMD byla zvolena s ohledem na snadnost ručního pájení.

## 7.7 HARDWAROVÁ KONFIGURACE NUCLEO F303K8

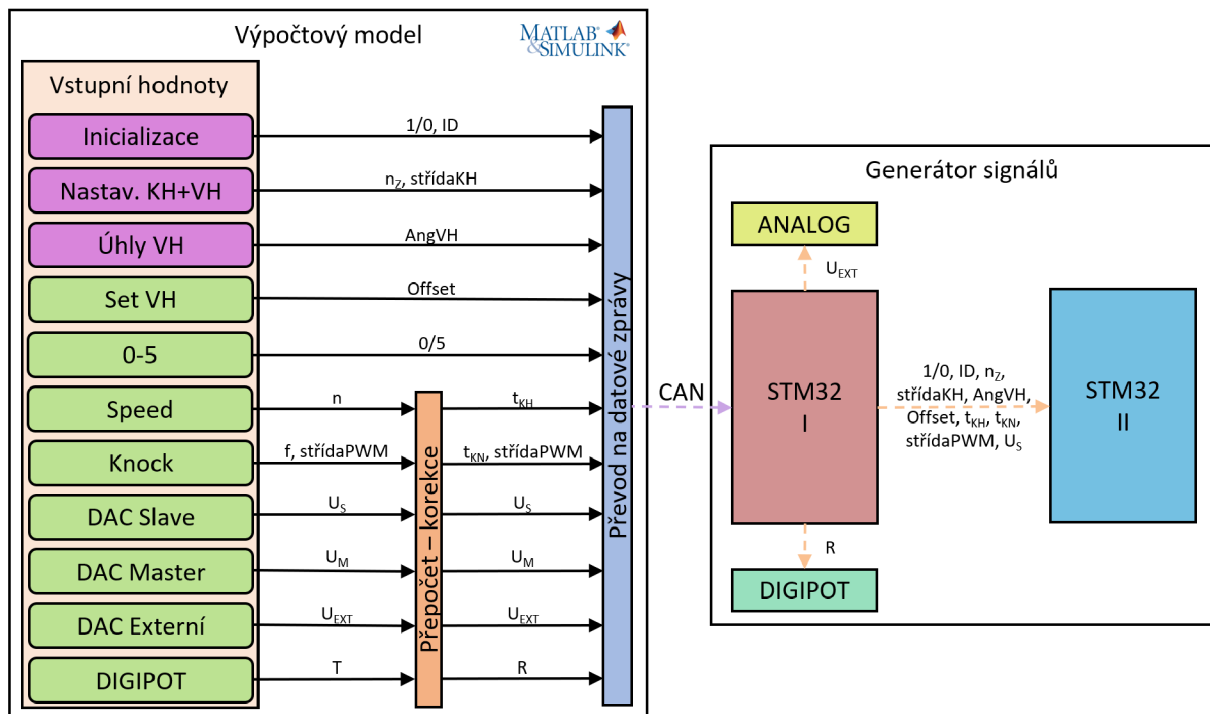
Vzhledem k tomu, že deska Nucleo je univerzální elektronická vývojová platforma, jsou možná různá konfigurační nastavení. Ve výchozím nastavení je pin PA\_6 připojen k pinu PB\_6 a pin PA\_5 k pinu PB\_7. Tímto připojením se komunikační piny I2C přemístí tak, aby odpovídaly pinům Arduino Nano. Rozšiřující desky kompatibilní s Arduino Nano nebudou využity, takže tyto piny budou využity jako samostatné odpojení můstků SB16 a SB18. Desky Nucleo řady "F" nejsou z výroby vybaveny externím krystalem X1, v případě potřeby lze tento krystal využít pro zlepšení stability signálů.

## 8 NÁVRH SOFTWARE MOBILNÍHO GENERÁTORU SIGNÁLŮ

Mobilní regulátor signálů se ovládá prostřednictvím CAN sběrnice, zprávy do které se můžou generovat různými způsoby. Pro ovládání se zvolil způsob generování CAN zpráv pomocí softwaru Matlab Simulink s komunikací pomocí CAN vysíláče PEAK, který je podporován programem Matlab.

Přestože byly změřeny signály snímačů konkrétního motoru EA 211, generátor signálů musí být univerzální, pro využití při kalibraci jiných motorových řídicích jednotek. Jelikož přeprogramování generátoru na úrovni přepsání kódu může být pro nezkušeného uživatele náročné, je třeba software připravit na případnou rekonfiguraci vysíláním CAN zpráv. Pro ovládání analogových signálů a digitálních potenciometrů jsou vysílány zprávy, volící kvantizační úrovně v souvislosti výpočtem provedeným v ovládacím systému. Kalibrační křivku příslušného senzoru lze nahrát do ovládacího systému, a proto jsou výstupy samostatně univerzální. Digitální výstupní signály, jako jsou signály otáček klikové hřídele a signály polohy vačkové hřídele, se inicializují v mikrokontroléru pomocí přijatých dat. Tyto data v sobě nesou počty zubů, hodnotu střidy a úhlové hodnoty pro nastavení zubového profilu. Pro kalibraci řídicích jednotek se dvěma hlavami motoru jsou využité další dva digitální výstupy polohy druhé sady vačkových hřídelí.

V modelu vytvořeném v Simulink se zadávají požadované hodnoty (Obr. 43), které se následně přepočítávají nebo korigují na hodnoty usnadňující přenos dat do mikrokontrolérů a urychlující běh naprogramovaného softwaru v důsledku snížení objemu přepočítávání proměnných v mikrokontrolérech.



Obr. 43 Celková funkce softwaru

Skupiny bloků se vstupními hodnotami označenými fialovou barvou obsahují hodnoty pro parametrizaci a inicializaci mikrokontroléru STM32 II, tyto hodnoty jsou odeslány při

spuštění generátoru signálů. Po úspěšné inicializaci se vysílají hodnoty ovládání výstupů, které lze měnit v průběhu činnosti generátoru (zelené bloky).

Do ovládacího systému se zadávají aktivační hodnoty výstupních pinů (blok **Inicializace**, hodnoty 1/0) pro generování signálů snímačů otáček klikové hřídele, polohy vačkových hřídelí a klepání. Za účelem zajištění správnosti přijaté mikrokontrolérem zprávy se zavedlo *ID*. Hodnoty počtu zubů klikové hřídele  $n_z$  s možností nastavení šířky zubů pomocí zadané střídy *střídaKH* a hodnoty počtu zubů sací a výfukové vačkových hřídelí se nastavují v bloku parametrizace zubových profilů (**Nastav. KH+VH**). Tvorba zubového profilu vačkových hřídelí se završuje odesláním úhlových hodnot zubů *AngVH* v bloku **Úhly VH**.

V bloku **Set VH** se zadávají hodnoty úhlů posunu variabilního nastavení vačkových hřídelí (*Offset*). Hodnota 0/5 nastavená v bloku **0-5** může být buď logickou jedničkou, nebo nulou pro řízení spínacího výstupního signálu. **Speed** je blok s hodnotou otáček klikové hřídele  $n$ , tato hodnota je převedena na periodu jednoho stupně otočení klikové hřídele  $t_{KH}$ . Signál snímače klepání (blok **Knock**) je generován pomocí signálu PWM, pro jehož nastavení je nutné zadat pracovní frekvenci  $f$  a požadovanou střidu *střídaPWM*, frekvence se následně převádí na periodu mezi impulsy  $t_{KN}$ . **DAC Slave** a **DAC Master** jsou bloky pro zadávání hodnot výstupního napětí integrovaných D/A převodníků ( $U_S$  a  $U_M$ ), jelikož dělič napětí není dokonale přesný kvůli využitým rezistorům s hodnotami odporů běžně dostupnými na trhu, je potřeba vstupní hodnoty korigovat, aby odpovídali výstupnímu napětí z vyšší přesnosti. Přesnost napětí externích D/A převodníku je závislá na referenčním napětí, do systému je přímo zadaná hodnota napětí  $U_{EX}$  v bloku **DAC Externí**. V případě využití konkrétního výstupu pro určitý snímač, lze do systému jako vstupní hodnoty zadávat tlak nebo polohu potenciometru, tyto hodnoty se pak musí převést na hodnoty napětí. V bloku **DIGIPOT** se nastavuje požadovaný odpor digitálního potenciometru podle zadané teploty  $T$ . Teplotu je nutné převést na požadovaný odpor  $R$  v návaznosti na kalibrační křivku snímače teploty, nebo se požadovaný odpor zadá přímo do panelu.

Všechny zadané hodnoty jsou po přepočtu a korekci převedeny do 8bitového nebo 16bitového formátu pro následnou kombinaci datových zpráv CAN sběrnice. Tyto zprávy jsou přijímány mikrokontrolérem STM32 I, jehož primární funkcí je činnost SPI master. Jednotlivé bajty získané ze zpráv CAN sběrnice se přenášejí do zařízení SPI slave, avšak část dat získaných zařízením master se využívá k řízení vlastních integrovaných D/A převodníků a jednoho spínacího digitálního výstupu. Zprávy volby kvantizační hladiny se posílají do externích D/A převodníků a také do digitálních potenciometrů. Zbývající data slouží k inicializaci a řízení mikrokontroléru STM32 II.

## 8.1 PROGRAMOVÁNÍ MIKROKONTROLÉRŮ

Mikrokontrolér STM32F303K8 je podporován velkým množstvím programovacích prostředí pro kompilaci napsaného kódu. Výrobce poskytuje software STM32CubeMX [41], což je grafický nástroj, který se využívá ke konfiguraci všech mikrokontrolérů STM32. V tomto prostředí se inicializační kód generuje v programovacím jazyce C pro procesory Cortex-M. Dalším softwarem je STM32CubeIDE [21] s integrovaným vývojovým prostředím z možností kompilace a ladění kódu, obsahuje také některé funkce ze STM32CubeMX pro inicializaci hardwaru a softwaru.

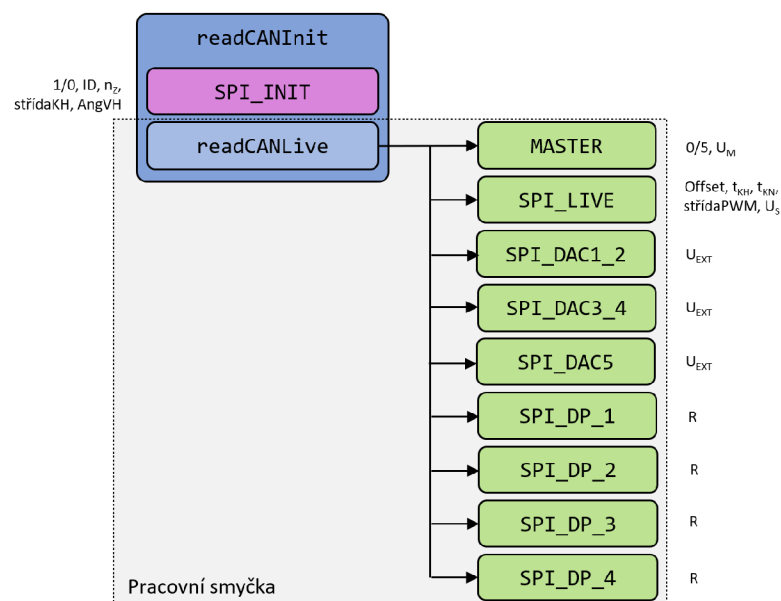


Vývojové platformy Nucleo-F303K8 využitě pro generátor signálů jsou podporovány dalším široce využívaným programovacím prostředím Mbed Studio [43], což je bezplatné IDE pro vývoj softwaru s využitím knihovny Mbed OS v programovacím jazyce C/C++. Tato knihovna obsahuje velké množství zdokumentovaných funkcí [22]. Při vývoji v Mbed Studiu není třeba konfigurovat hardware, což přináší určitá omezení pro vývoj, ale ve většině případů je dané nastavení vyhovující.

Plný profil Mbed OS je RTOS a podporuje deterministické, vícevláknové spuštění softwaru v reálném čase. Pro méně složitou správu vláken je určen profil bare metal, který neobsahuje RTOS. Zaměřuje se na minimalizaci velikosti výsledného softwaru, disponuje nejmenší možnou sadou rozhraní API [43], v případě potřeby lze další API ručně přidat. Místo RTOS jsou funkce řízeny dotazováním nebo přerušením, což zjednodušuje kód aplikace a umožňuje využívat rozhraní API. Profil bare metal umožňuje vývoj rozsáhlého softwaru s co nejmenší ztrátou paměti mikrokontroléru.

### 8.1.1 PROGRAMOVÁNÍ STM32 I MASTER

Všechny proměnné v kódu jsou nastaveny jako volatile, takže při převodu do strojového kódu se předpokládá, že hodnoty proměnných mohou být za běhu přepsány, tudíž nebudou konstantní. Program STM32 I (*Obr. 44*) začíná funkcí **readCANInit**, která načítá inicializační data pouze určitých identifikačních kódů. Uvnitř této funkce jsou funkce **SPI\_INIT** pro odeslání inicializačních dat do STM32 II prostřednictvím SPI komunikace a funkce **readCANLive** pro záznam CAN zpráv s výstupními řídicími daty pro hlavní pracovní smyčku. Úkolem zbývajících funkcí je odesílání SPI zpráv pro digitální potenciometry **SPI\_DP\_1** až **SPI\_DP\_4**, externí D/A převodníky **SPI\_DAC1\_2** až **SPI\_DAC5** a pro STM32 II **SPI\_LIVE**, funkce **MASTER** přímo programuje analogové a digitální výstupy STM32 I. Výše uvedené funkce probíhají v souvislosti s přijatými daty v jedné CAN zprávě.



Obr. 44 Funkce softwaru STM32 I master

Běh kódu začíná nastavením počátečních hodnot kontrolních proměnných a hodnot výstupních pinů volby zařízení SPI slave. Dále se konfiguruje SPI komunikace na 8bitový formát zpráv a frekvenci 100 kHz a CAN komunikace na pracovní frekvenci 250 kHz. Počáteční nastavení je ukončeno spouštěním tickeru **STM32\_SLAVE**, který spustí funkci **readCANInit** s intervalem 5 ms.

Funkce **readCANInit** odesílá CAN zprávu *msgT\_RUN* s identifikačním kódem 0x7FF a hodnotou nulového bajtu 0x11, tato zpráva je oznámením požadavku na inicializační data pro externí ovládací systém. Následně, pokud má přijatá CAN zpráva identifikační kód 0x63, uloží se inicializační data nastavení výstupů STM32 II a počty zubů ozubených kol hřidel. Nulový bajt této zprávy se dekóduje na aktivační proměnné výstupů pro následné využití při nastavování spouštěcích podmínek dalších funkcí. Dále následují tři příkazy *if*, z nichž jeden proběhne na základě získaných hodnot aktivačních proměnných výstupů. Přístroj umožňuje generovat signály polohy vačkových hřidel bez zapnutí výstupu signálu otáček klikové hřídele. Inicializace nastavení zubového profilu signálů polohy vačkových hřidel může proběhnout minimálně při zapnutí první sady vačkových hřidel, která je primární, tj. nelze generovat pouze druhou sadu vačkových hřidel. Načtení údajů zubového profilu začíná kontrolou lichého počtu zubů sací a výfukové hřídele. Pokud je počet zubů lichý, přidá se k němu další zub a tato hodnota se ukládá do proměnné vyuzité ve smyčce *for* pro načtení inicializačních dat zubového profilu z CAN zpráv. Jedna zpráva nese dvě 16bitové hodnoty pro začátky dvou zubů a dvě 16bitové hodnoty pro začátky mezer. Pro každou smyčku jsou definovány identifikační kódy v decimálním formátu v rozsahu 100 až 149 pro výfukovou vačkovou hřidel a v rozsahu 150 až 199 pro sací vačkovou hřidel, což omezuje profil zubů na 100 zubů a mezer. Po načtení dat vačkových hřidel se provede kontrola obsahu dat, a pokud jsou zaznamenány všechny očekávané zprávy, zastaví se ticker spouštějící funkci **readCANInit** a spustí se funkce **SPI\_INIT**, po které se aktivuje přerušení pro funkci **readCANLive** reagující na přijaté CAN zprávy. V případě, že je aktivován pouze výstup signálu snímače otáček klikové hřídele nebo snímače klepání, nebudou údaje pro vačkové hřídele načteny. Pokud jsou všechny aktivační hodnoty nulové, funkce **SPI\_INIT** se nevolá. Pro zachování možnosti ovládní analogových výstupů STM32 II musí ovládací systém minimálně odeslat zprávu s kódem aktivace mikrokontroléru. Při využití pouze mikrokontroléru STM32 I je dostačující odeslat pouze zprávu s kódem 0x63 a libovolným obsahem, nulový bajt v tomto případě nesmí obsahovat aktivační kód.

Zařízení SPI slave se programují odesláním 8bitové nebo 16bitové zprávy. Všechny zařízení slave se programují pomocí jediného pinu MOSI, ke kterému jsou připojena všechna zařízení. K programování příslušného zařízení slave se využívá vlastní ovládací pin. Pokud je ovládací pin nastaven na logickou jedničku, zpráva se nenačte, aby se programování mohlo uskutečnit, musí být ovládací pin přepnut na logickou nulu a po dokončení přenosu zprávy se přepnout zpět na jedničku.

Funkce **SPI\_INIT** posílá inicializační zprávy mikrokontroléru STM32 II prostřednictvím SPI komunikace v souvislosti s aktivovanými výstupními signály. Vysílané zprávy jsou ve formátu 8bitové zprávy. Počet zpráv generovaných pro inicializaci vačkových hřidel závisí na počtu zubů pro konkrétní vačkovou hřidel.

Funkce načítání ovládacích dat **readCANLive** aktivovaná přerušením představuje řadu podmínek s podobným úkolem. Pokud identifikační kód CAN zprávy splňuje podmínku, jsou data načtena do příslušné proměnné a startovací podmínka se přepíše na logickou jedničku.



V nekonečné smyčce *while* je naprogramována řada podmínek (viz zelené bloky obr. 44), které spustí příslušnou funkci. Aby bylo možné spustit funkci **SPI\_LIVE**, která bude generovat zprávy pro ovládání výstupů mikrokontroléru STM32 II, musí být splněna podmínka dokončení funkce **readCANInit** (proměnná *done* s logickou jedničkou), která zaručuje dokončení inicializace. Další podmínkou pro spuštění funkce je, že CAN zpráva byla přečtena ve funkci **readCANLive**, která je indikována startovací podmínkou. Protože data pro ovládání výstupů mikrokontroléru STM32 II jsou přenášena prostřednictvím dvou CAN zpráv, jsou pro spuštění funkce **SPI\_LIVE** dvě podmínky.

Funkce **SPI\_LIVE** začíná odesláním synchronizační zprávy 0x77 do mikrokontroléru STM32 II, další zprávy jsou odesílány podle nastavení aktivních výstupů. Zprávy pro ovládání analogových výstupů se posílají bez dalších podmínek, protože jejich generování nezpůsobuje rušení ostatních signálů. Údaje nastavení otáček klikové hřídele, tj. perioda otáčení klikové hřídele o jeden stupeň, se přenášejí i v případě, že není aktivován signál otáček klikové hřídele, ale je aktivován výstup signálu polohy vačkové hřídele.

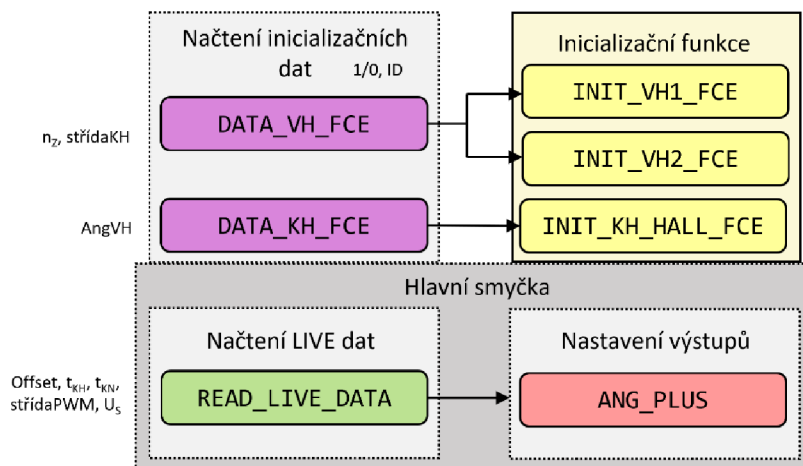
Analogové a digitální výstupy mikrokontroléru STM32 I se nastavují ve funkci **MASTER**. Digitálnímu výstupnímu pinu je přímo přiřazena buď logická jednička, nebo nula. Analogové piny jsou naprogramovány instanční funkcí `write_u16`, do které se zapíše 16bitové číslo. Hodnota 0x0000 odpovídá hodnotě napětí 0 V a 0xFFFF odpovídá maximálnímu výstupnímu napětí mikrokontroléru 3,3 V.

Funkce **SPI\_DAC1\_2**, **SPI\_DAC3\_4** a **SPI\_DAC5** programují externí dvojitě D/A převodníky. Programovací zpráva se skládá ze dvou po sobě jdoucích 8bitových zpráv. Jednotlivé komponenty mají pouze jeden ovládací pin MOSI.

Programování digitálních potenciometrů se provádí ve funkcích **SPI\_DPOT1** až **SPI\_DPOT4**. V každé funkci se programuje celkem jedna skupina, která se skládá ze tří potenciometrů, jednoho dvojitého a jednoho jednoduchého, zapojených v kombinaci sériového a paralelního zapojení. Jak již bylo uvedeno, pro šetření ovládacích pinů byla použita metoda zapojení daisy-chain. Do programovacího vstupu jednoduchého potenciometru se zapojil datový výstup dvojitého potenciometru. Programování je založeno na principu postupného přenosu datových zpráv. Po přepnutí ovládacího pinu se do dvojitého potenciometru ze začátku vyšlou data složená ze dvou 8bitových zpráv pro programování jednoduchého potenciometru, v tuto chvíli disponuje daty pouze dvojitý potenciometr. Po následném přenosu dvou 8bitových zpráv, určených pro dvojitý potenciometr, dříve vyslaná data se přepíší do jednoduchého potenciometru. Programování je ukončeno přepnutím ovládacího pinu zpět na logickou jedničku. Nevýhodou je závislost na prvním zařízení, ale pokud dojde k jeho výpadku, celý modul nebude využitelný z důvodu nedosažení požadované hodnoty odporu, takže zapojení je vyhovující.

### 8.1.2 PROGRAMOVÁNÍ STM32 II SLAVE

Software mikrokontroléru STM32 II se skládá z inicializačních funkcí pro načtení dat, inicializačních funkcí se spuštěním programování zubových profilů a hlavní smyčky (Obr. 45). V hlavní pracovní smyčce probíhá načtení dat pro ovládání výstupních signálů mikrokontroléru a spouštění funkcí pro generování signálů otáček klikové hřídele a polohy vačkových hřídelí.



Obr. 45 Funkce softwaru STM32 II slave

Stejně jako u mikrokontroléru STM32 I jsou proměnné nastaveny jako volatily. Na začátku kódu se nakonfiguruje SPI komunikace na stejné parametry jako mikrokontrolér STM32 I a nastaví se spouštěcí podmínky pro následující smyčky. Dále běh kódu pokračuje v nekonečné smyčce *while* se dvěma hlavními podmínkami. První inicializační podmínka se splňuje probíhajícím načítáním dat SPI komunikace a logickou jedničkou spouštěcí podmínky *INIT*. Pokud je tato podmínka splněna, načte se aktivační SPI zpráva. Tato zpráva se dekóduje, a pokud je kód aktivace výstupního signálu 2 v decimálním formátu, provede se dekódování ze zbývajících dat aktivujících výstupní signály snímače otáček klikové hřídele, snímače klepání a polohy vačkových hřídelí. Jako poslední se nastaví aktivní hrana signálu otáček klikové hřídele na logickou nulu nebo jedničku. Podle aktivovaných výstupních signálů jsou splněny podmínky pro spuštění funkcí nejprve načtení inicializačních dat **DATA\_KH\_FCE** a **DATA\_VH\_FCE** a poté inicializace zubových profilů pro generování signálů otáček a polohy **INIT\_KH\_HALL\_FCE**, **INIT\_VH1\_FCE** a **INIT\_VH2\_FCE**.

Funkce **DATA\_KH\_FCE** načítá zprávy s daty počtu zubů ozubeného věnce klikové hřídele, počtu vynechaných zubů a střídý.

Funkce načítání inicializačních dat vačkových hřídelí **DATA\_VH\_FCE** začíná načtením počtu zubů profilu výfukové hřídele a profilu sací hřídele. Počty zubů se poté využijí k nastavení počtu cyklů smyčky *for*, v nichž se do matice *Patt* načtou nejprve úhlové hodnoty zubů a poté úhlové hodnoty mezer. Pro každou hodnotu se načtou dvě 8bitové zprávy, které se skládají do jedné 16bitové hodnoty úhlu. Načtení inicializačních dat sací a výfukové vačkových hřídelí probíhá ve dvou podobných smyčkách *for*.

Inicializační funkce **INIT\_KH\_HALL\_FCE** provádí přepočítání podle získaných dat a sestavuje zubový profil ozubeného věnce. Nejprve se provede smyčka *for*, která nastaví 360 hodnot připraveného vektoru čísel *LogicStatusKH* na hodnotu aktivní hrany. Potom se provede výpočet úhlové hodnoty mezizubové periody, předpokládá se počet zubů věnce, který po přepočtu úhlové hodnoty mezizubové periody vrátí celočíselnou hodnotu. V další smyčce *for* se přepíšou hodnoty vektoru *LogicStatusKH* tak, aby odpovídaly zadané střídě a počtu zubů. Po výpočtu začátku zubové mezery se provede smyčka *for*, která přepíše hodnoty dříve vytvořeného zubového profilu v souvislosti s počtem vynechaných zubů. Mezera se umísťuje v opačném směru od konce vektoru *LogicStatusKH*. Výsledkem je připravený vektor čísel *LogicStatusKH*, který se skládá z 360 čísel odpovídajících konkrétnímu úhlu, logické hodnoty vektoru

proměnných odpovídají počtu zubů a zubové mezeře. Rozlišení na 1° bylo zvoleno z důvodu snadného přepočtu bez nutnosti zaokrouhlování, vyšší rozlišení vede ke snížení simulované rychlosti otáčení klikové hřídele.

Inicializace zubového profilu vačkových hřídelí ve funkci **INIT\_VH1\_FCE** je podobná inicializaci profilu klikové hřídele. Na začátku se do předdefinované matice čísel *LogicStatusVH* o velikosti 2 x 720 se zapíše jednička. Velikost matice souvisí s dvojnásobným zpomalením otáčení vačkových hřídelí oproti klikové. Vektor čísel s indexem 0 odpovídá zubovému profilu výfukové vačkové hřídele a s indexem 1 odpovídá zubovému profilu sací vačkové hřídele. Podle získaných údajů o počtu zubů a úhlových hodnotách zubů a mezer v profilu se v jedné smyčce *for* přepisují hodnoty matice *LogicStatusVH* s indexem 0 a v druhé smyčce se přepisují hodnoty matice *LogicStatusVH* s indexem 1. Po dokončení inicializační funkce se vytvoří matice zubových profilů signálů polohy vačkových hřídelí *LogicStatusVH*, tato matice se využívá pro obě sady vačkových hřídelí.

Ve funkci **INIT\_VH2\_FCE** se pouze vynulují počáteční hodnoty nastavení polohy, protože profil zubů druhé sady hřídelí je stejný jako u první sady hřídelí.

Ve všech inicializačních funkcích se na konci nastavují hodnoty počátečních hodnot polohy hřídelí. Inicializační podmínka *INIT* se po načtení a inicializaci proměnných nastaví na logickou nulu a podmínka pro změnu hodnot potřebných k ovládní výstupů *LIVE* se nastaví na logickou jedničku.

Pokud je proměnná *LIVE* nastavena na logickou jedničku a přijatá SPI zpráva obsahuje hodnotu 0x77, splní se podmínka načtení dat a zahájí se přepisování ovládacích hodnot výstupních signálů.

Funkce **READ\_LIVE\_DATA** načítá hodnoty z mikrokontroléru STM32 I přenášené prostřednictvím komunikace SPI. Tato funkce obsahuje podmínky, jejichž splnění umožňuje načtení ovládacích zpráv aktivovaných výstupů. Získané zprávy se přepočítají a jejich údaje se přiřazují k definovaným proměnným. Při aktivovaných vačkových hřídelích se přiřazují zprávy proměnným, které slouží k nastavení proměnného natočení vačkových hřídelí. Naprogramovaný software umožňuje nezávislé polohování všech vačkových hřídelí. Analogové výstupy integrovaných D/A převodníků se nastavují stejně jako u mikrokontroléru STM32 I. Změna nastavení generovaného PWM signálu je problematická z hlediska stability běžícího kódu, pokud se rychle přepisují hodnoty periody signálu, může dojít k selhání celého běhu kódu, což je nežádoucí při kalibraci řídicí jednotky. Proto jsou uvedeny podmínky pro změnu nastavení signálu PWM. První podmínkou je aktivace generování snímače klepání, další podmínky kontrolují změnu hodnot periody nebo střídy a v případě rozdílu se nastavení signálu PWM přepíše. Hodnota střídy je uvedena v rozsahu 0 až 1 v datovém typu float, který se nedá přenášet pomocí SPI komunikace, proto se hodnota přenáší v rozsahu 0 až 100 a dělí se 100. Vzhledem k tomu, že při nízkých otáčkách může perioda v us nabývat hodnot větších než 255, je hodnota otáček klikové hřídele představována periodou *FlipTime*, která se skládá ze dvou 8bitových zpráv, spojených do jediné hodnoty v 16bitovém formátu. Stejně jako v případě změny nastavení signálu PWM se změna nastavení tickeru **RPM** provádí až po splnění podmínek. Musí být aktivován buď signál generování otáček klikové hřídele, nebo signál polohy vačkových hřídelí a zároveň musí mít nově vypočtená perioda *FlipTime* jinou hodnotu než dříve vypočtená. Tato poslední podmínka zvyšuje stabilitu systémů, protože ke změně periody dochází pouze v případě změny.

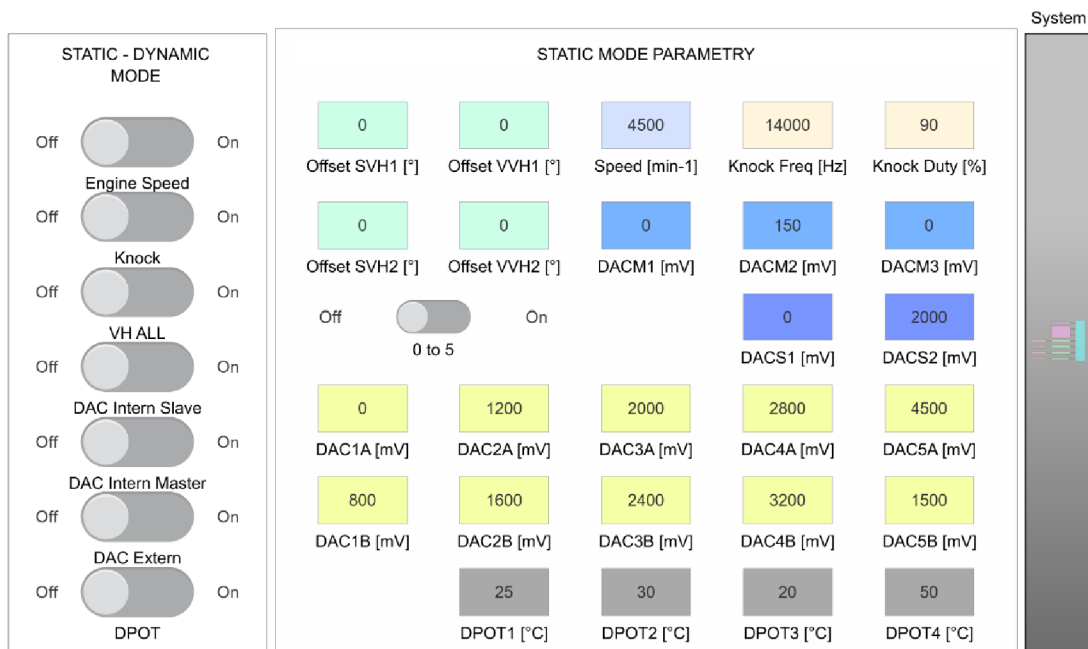
Ticker **RPM** spouští funkci **ANG\_PLUS**, jejímž hlavním úkolem je přecházet mezi hodnotami úhlu natočení klikové a vačkových hřídelí o jeden stupeň v závislosti na požadované simulované rychlosti otáčení, tj. periodě *FlipTime* tickeru **RPM**. Protože matice nejsou nekonečné, je nutné zajistit cyklický přechod mezi hodnotami matic *LogicStatusKH* a *LogicStatusVH*, dané hodnoty přímo ovládají výstupní piny *KH\_HALL*, *VVH1*, *SVH1*, *VVH2*, *SVH2*. Přepočty a kontroly aktuálních indexů se provádějí pouze pro aktivované výstupy, což zkracuje funkci v případě, že je aktivován pouze signál otáček klikové hřídele, a umožňuje spustit funkci **ANG\_PLUS** s menší periodou tickeru, tj. generovat signál s vyššími rychlostí otáčení. Proměnná *Ang* odpovídající indexu matice se při každém spuštění funkce zvyšuje o 1 a kontroluje se její aktuální hodnota, která nesmí být větší než 359, v případě vyššího čísla se proměnná *Ang* vynuluje pro zajištění cyklického přechodu mezi hodnotami matice *LogicStatusKH*. Jelikož se vačkové hřídele mohou libovolně otáčet, byly zavedeny pomocné proměnné *MatrVVH1*, *MatrSVH1*, *MatrVVH2* a *MatrSVH2* pro cyklický přechod mezi indexy matice *LogicStatusVH*, které se při každém běhu funkce zvyšují o 1 a nesmí překročit hodnotu 719. Proměnná přímo odpovídající aktuálnímu indexu matice *LogicStatusVH* (*AngVVH1*, *AngSVH1*, *AngVVH2* a *AngSVH2*) je součtem hodnoty pomocné proměnné a hodnoty proměnné nastavení vačkové hřídele (*SetVVH1*, *SetSVH1*, *SetVVH2* a *SetSVH2*). Kontroluje se, zda hodnota indexu matice nepřekračuje úhel 719, a pokud k tomu dojde, odečte se od výsledné hodnoty 720. Popsané přepočty a kontroly se provádějí zvláště pro signály polohy každé vačkové hřídele.

Výstupní kanál pro generování signálu snímače klepání lze využít jako výstup pro generování signálu indukčního snímače otáček. Protože je výstupní pin nastaven na generování signálu PWM, je třeba do mikrokontroléru STM32 II nainstalovat jiný software, ve kterém se pin nastaví na digitální výstup. Vzhledem k tomu, že snímač klepání se využívá pouze u zážehových motorů a indukční snímač otáček klikové hřídele se ve většině případů montuje do vznětových motorů užitkových vozidel, je tento návrh změny softwaru zcela vyhovující. Signál se spustí ve funkci **ANG\_PLUS**. Zubový profil signálu indukčního snímače otáček se kopíruje ze zubového profilu signálu snímače otáček s Hallovým jevem. Při načtení *LIVE* dat budou zprávy nastavení PWM ignorovány, aby se do STM32 I nemusel nahrávat nový software. Kód pro aktivaci výstupu je stejný jako pro aktivaci výstupu signálu snímače klepání.

## 8.2 OVLÁDÁNÍ MOBILNÍHO GENERÁTORU SIGNÁLŮ

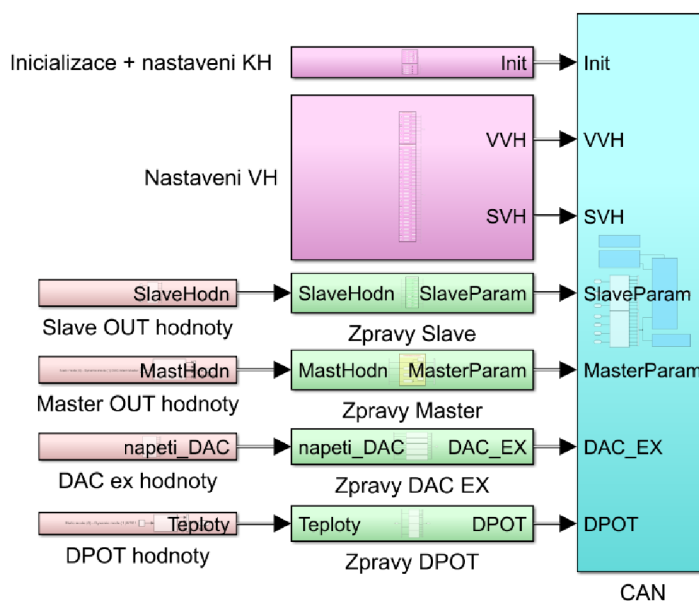
Do ovládacího softwaru lze snadno přidat potřebné moduly, například moduly pro nahrávání datových souborů pro generování a moduly pro korekci nebo případný přepočítání vstupních hodnot. V této kapitole jsou popsány klíčové funkční moduly a subsystémy, které vysvětlují princip fungování ovládacího softwaru naprogramovaného v prostředí Matlab Simulink.

Všechny hodnoty potřebné k nastavení výstupních signálů lze snadno nastavit na ovládacím panelu (*Obr. 46*). Pomocí přepínačů vlevo lze změnit režim ovládání na statický, ve kterém se načítají ručně nastavené hodnoty (static mode parametry), nebo dynamický, ve kterém se hodnoty přenášejí podle vytvořených funkcí generování proměnných. V subsystému na pravé straně je umístěn ovládací software. Model lze spustit nastavením testovacího času na nekonečno, čímž se zahájí trvalý přenos CAN zpráv s dostatečnou přesností periody.



Obr. 46 Ovládací panel mobilního generátoru signálů

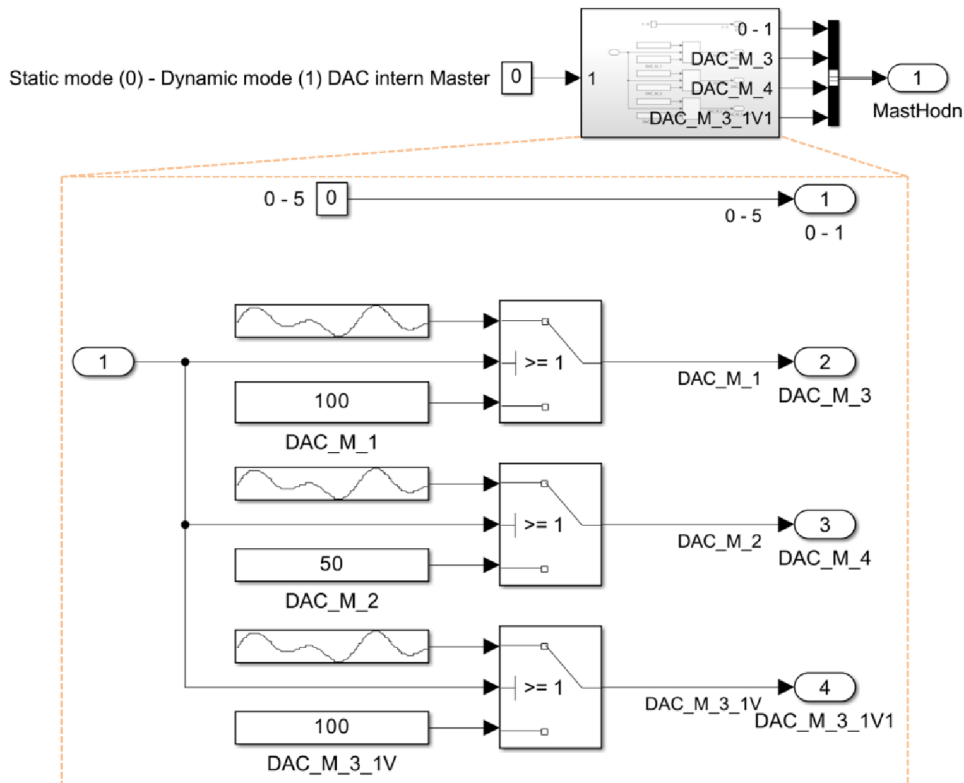
Software systému (Obr. 47) se skládá z bloků s inicializačními daty a daty pro nastavení zubových profilů signálů otáček klikové a vačkových hřídelí (**Inicializace + nastavení KH, Nastavení VH**). Subsystémy **Slave OUT, Master OUT, DAC ex** a **DPOT** hodnoty obsahují moduly pro zadávání hodnot ovládacích proměnných výstupních signálů. Následně jsou zadané hodnoty přepracovány v příslušných zelených blocích **Zpravy Slave, Master, DAC EX** a **DPOT**. Hodnoty převedené do 8bitového nebo 16bitového formátu se přenášejí do subsystému generování zpráv **CAN**.



Obr. 47 Hlavní subsystémy softwaru

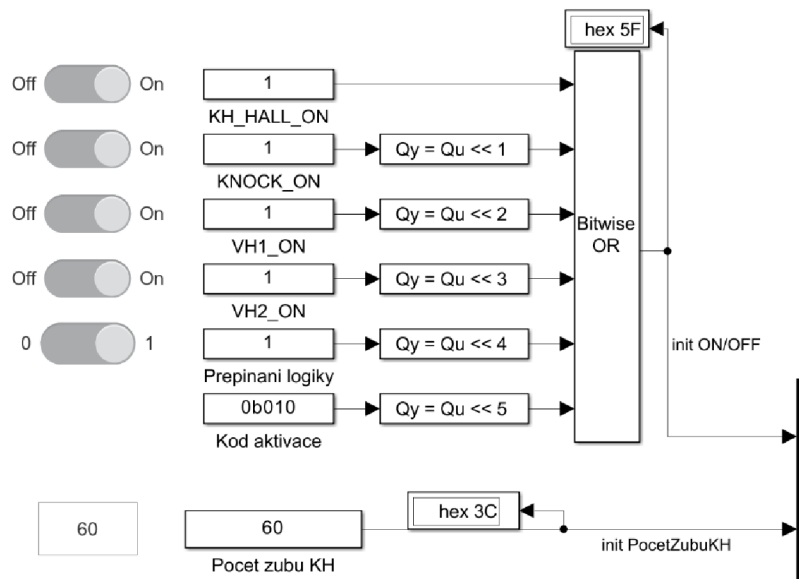
Subsystémy pro zadávání proměnných obsahují blok, do kterého se zadávají hodnoty příslušných proměnných. Přepínáním mezi statickým a dynamickým režimem se vybírá buď

statická, nebo dynamická hodnota, kterou lze naprogramovat pomocí jiných subsystémů (sinusový průběh generování hodnot proměnných viz Obr. 48), nebo přepsat z bloku obsahujícího načtený datový soubor s definovanými hodnotami testovacího scénáře. Dynamické parametry mohou být propojeny, aby byla zaručena závislost mezi generovanými signály. V daném modelu se pro ověření funkčnosti generuje sinusová funkce s určitou frekvencí, amplitudou a posunem. Výstupní hodnoty se kombinují do sběrnice.



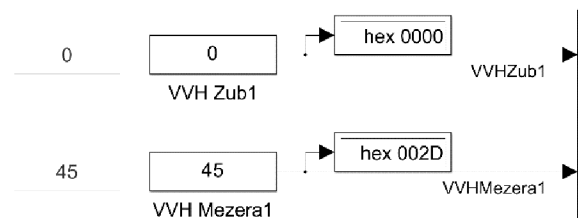
Obr. 48 Subsystém „Master OUT hodnoty“

V bloku inicializace a nastavení klikové hřídele se aktivační kód a aktivační hodnoty výstupů mikrokontroléru STM32 II spojí do 8bitové hodnoty pomocí využitých funkcí bitového posunu a logické operace *OR* (Obr. 49). Ostatní parametry, jako je počet zubů a počet vynechaných zubů ozubeného věnce klikové hřídele, střída a počet zubů ozubených kol vačkových hřídelí, jsou pouze zapsány do příslušných bloků a nastaveny na 8bitový formát. Aby bylo možné přepisovat hodnoty parametrů a měnit nastavení aktivních výstupů za běhu simulace, jsou přidána ovládací tlačítka a políčka.



Obr. 49 Subsystem „Inicializace + nastaveni KH“

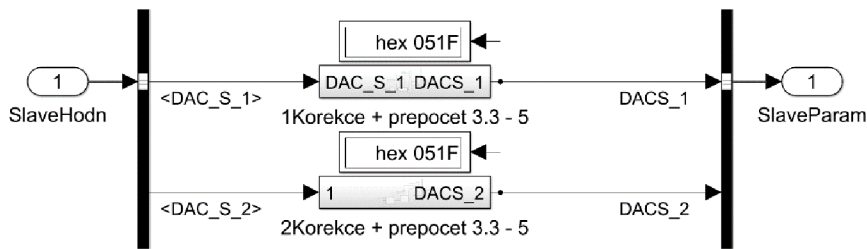
Stejně jako hodnoty počtu zubů se v bloku nastavení vačkových hřídelí (Obr. 50) zapisují úhlové hodnoty zubů a mezer v 16bitovém formátu, protože úhlové hodnoty přesahují číslo 255. Zadané úhly zubového profilu musí odpovídat  $720^\circ$  pro výfukovou i sací vačkovou hřídel z důvodu dvakrát pomalejšího otáčení vačkové hřídele vůči klikové hřídeli u čtyřdobých spalovacích motorů. Nejprve se zadá úhlová hodnota zubu a poté hodnota mezery, přičemž počet zubů se musí rovnat počtu mezer.



Obr. 50 Subsystem „Nastaveni VH“

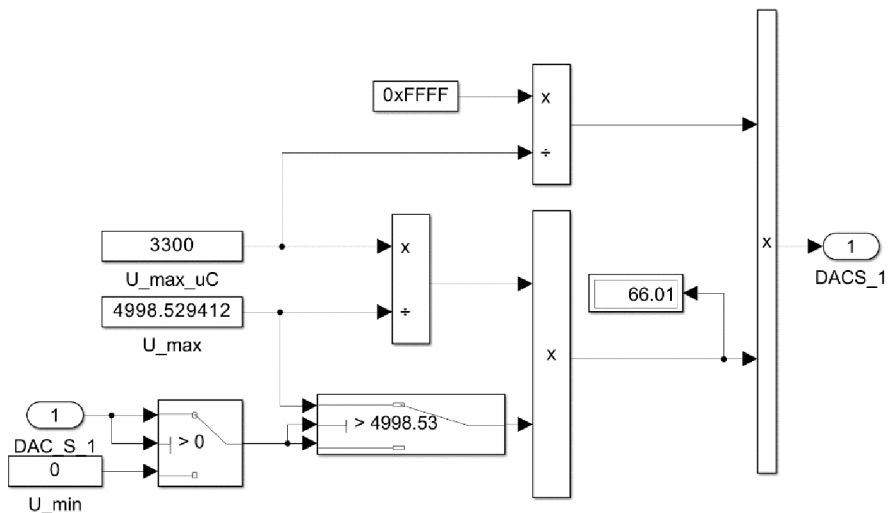
V subsystému **Zpravy Slave** (Obr. 51) probíhá korekce zadaných hodnot napětí analogových výstupů integrovaných D/A převodníků, přepočítání požadované hodnoty rychlosti otáček klikové hřídele na periodu otáčení klikové hřídele o jeden stupeň a přepočítání hodnot parametrizace generování signálu PWM. Hodnoty nastavení posunu vačkových hřídelí se odesílají přímo do subsystému generování CAN zpráv.





Obr. 51 Subsystem „Zpravy slave“

Přepočet obou analogových výstupů se provádí podle subsystemu na Obr. 52. Do výpočtu vstupují maximální hodnota výstupního napětí mikrokontroléru  $U_{max\_uC}$ , maximální dosažitelná hodnota výstupního napětí z operačního zesilovače  $U_{max}$  s využitým děličem napětí a hodnota požadavku na výstupní napětí  $DAC\_S\_1$ . Po přepočtu skutečná hodnota výstupního napětí odpovídá zadané hodnotě, přičemž maximální možné výstupní napětí nedosahuje přesné hodnoty 5 V. Další přepočet je přípravou pro nastavení napětí analogového výstupu mikrokontroléru v 16bitovém formátu, princip programování integrovaného D/A převodníku je zmíněn v kapitole popisující software mikrokontroléru.



Obr. 52 Subsystem „Korekce + prepocet 3.3 – 5“

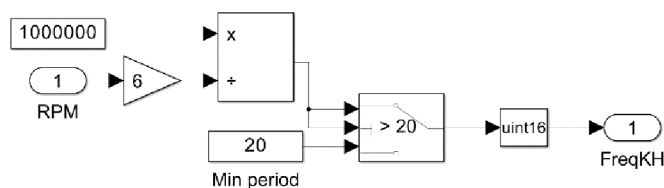
Perioda otáčení klikové hřídele o jeden stupeň v us (Obr. 53) se vypočítává podle následujícího vztahu:

$$Freq_{KH} = \frac{10^6}{6 \cdot RPM} \quad (6)$$

kde  $RPM$  je zadané otáčky klikové hřídele. Jelikož výsledkem může být neceločíselná hodnota, zaokrouhlování se provádí pomocí bloku převodu na 16bitový formát, který nepodporuje hodnoty s plovoucí desetinnou čárkou jako datový typ float. Zaokrouhlování nezpůsobuje negativní vliv při nastavování otáček klikové hřídele, protože funkce ticker v softwaru mikrokontroléru podporuje pouze celočíselné hodnoty. Je třeba vzít v úvahu, že nastavení celočíselných otáček v us způsobuje proměnný krok při změně otáček, který lze vypočítat zpětným přepočtem podle výše uvedeného vztahu. Při otáčkách pohybujících se kolem  $1000 \text{ min}^{-1}$  je krok  $6 \text{ min}^{-1}$ , při otáčkách kolem  $5000 \text{ min}^{-1}$  –  $148 \text{ min}^{-1}$ . Zadaní příliš malé periody

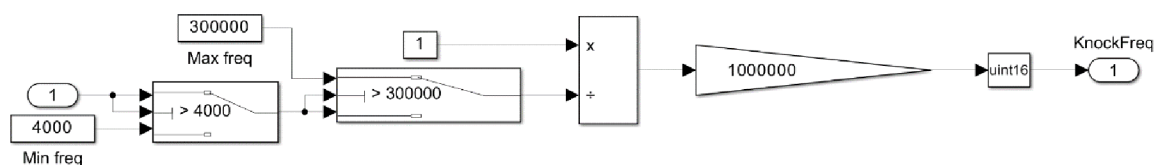


do tickeru může přivést k nesprávné funkci mikrokontroléru, proto je třeba tuto hodnotu omezovat.



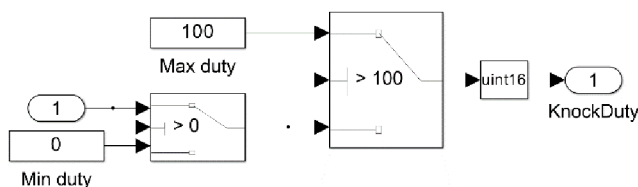
Obr. 53 Subsystem „Limita max RPM“

Maximální a minimální frekvence generovaného PWM signálu také musí být omezena (Obr. 54), zadaná frekvence se pouze převede na periodu v us, jak to vyžaduje funkce v softwaru mikrokontroléru.



Obr. 54 Subsystem „Freq Limita + konvertace“

Hodnota stídy signálu PWM se omezuje pouze na rozsah 0 až 100 % (Obr. 55).



Obr. 55 Subsystem „Duty Limita + konvertace“

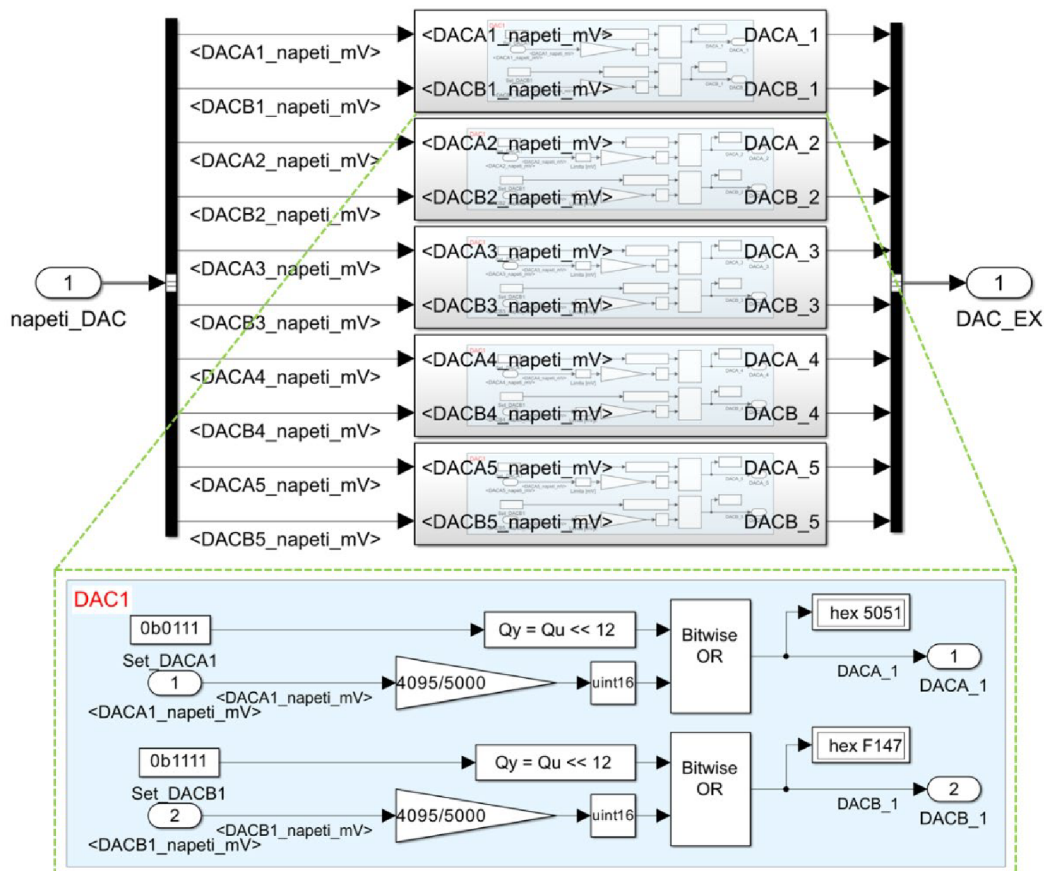
Subsystem **Zpravy Master** koriguje a převádí hodnoty pro programování analogových výstupů integrovaných D/A převodníků mikrokontroléru na datové zprávy jako v subsystému **Zpravy Slave**.

Generování programovacích zpráv pro externí D/A převodníky probíhá v subsystému **Zpravy DAC EX** (Obr. 56), který má pět subsystémů pro programování konkrétního převodníku. Programovací zpráva se generuje podle dat poskytnutých výrobcem. Proměnné *Set\_DACA1* a *Set\_DACB1* jsou proměnné nastavení, kde bit 3 volí výstupní kanál (1 – DAC<sub>A</sub>, 0 – DAC<sub>B</sub>), bit 2 řídí vstupní buffer referenčního napětí (1 – buffered, 0 – unbuffered), bit 1 aktivuje násobič výstupního napětí (1 – 1x, 0 – 2x), toto napětí však nemůže překročit hodnotu referenčního napětí 5 V a bit 0 deaktivuje programovaný převodník (1 – aktivní režim, 0 – vypnutý kanál). Nastavovací kód je posunut o 12 bitů, takže původní bit číslo 3 je bit číslo 15. Zbývajících 12 bitů se využívají k volbě kvantizační úrovně převodníku a výpočtu hodnoty výstupního napětí podle vztahu [35]:

$$V_{OUT} = \frac{(V_{REF}D_n)}{2^n}G, \quad (7)$$

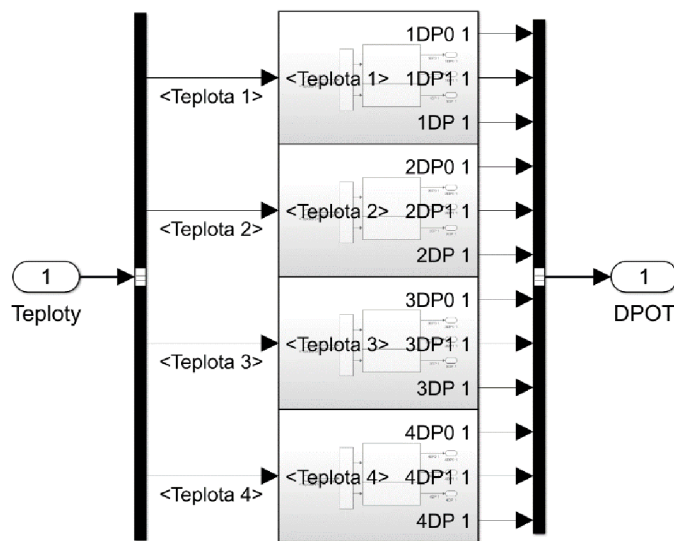
kde  $V_{ref}$  je referenční napětí externího zdroje,  $D_n$  je vstupní kód v rozsahu 12 bitů, stupeň  $n$  je počet bitů převodníku a proměnná  $G$  je násobič odpovídající bitu 13. Minimální krok napětí podle rozlišení D/A převodníku je 1,22 mV.

V modelu je zadaná hodnota napětí převedena na 12bitový kód podle výše uvedeného vztahu, který je poté kombinován s kódem nastavení převodníku pomocí logického operátoru OR. Výstupem subsystému jsou dvě 16bitové zprávy programující převodníky A a B.



Obr. 56 Subsystém „Zpravy DAC EX“

Nastavení digitálního potenciometru se provádí v subsystému **Zpravy DPOT** (Obr. 57), který se skládá ze čtyř programovacích subsystémů. V každém subsystému se programují tři potenciometry, které kombinací sériového a paralelního zapojení vytvářejí digitální reostat.



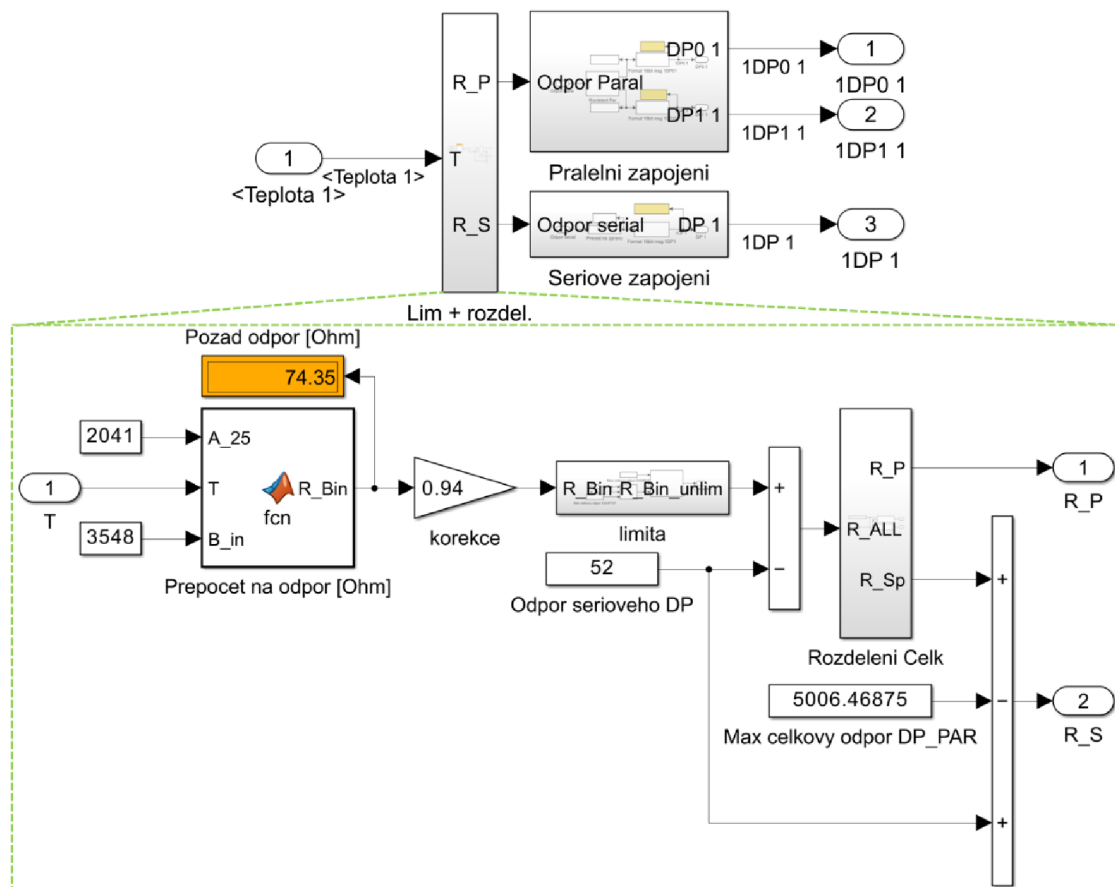
Obr. 57 Subsystem „Zpravy DPOT“

Do bloku lze zadat buď teplotu, na jejíž základě se pomocí kalibrační křivky termistoru určí celkový požadovaný odpor, nebo přímo požadovanou hodnotu celkového odporu obvodu. V tomto modelu se zadává vstupní teplota a převádí se na požadovaný odpor podle *vztahu 1*. Teoretický požadovaný odpor je korigován o 94 % z důvodu nepřesnosti (viz kapitola měření signálů). Poté se provádí kontrola limitů, minimální odpor potenciometru je 52  $\Omega$ , při daném zapojení potenciometrů má celkový odpor minimální hodnotu 78  $\Omega$  a maximální hodnotu 15019  $\Omega$ . Výpočet odporu potenciometru podle zvoleného výstupu B se provádí podle vztahu [36]:

$$R_{WB} = \frac{R_{AB}D_n}{256} + R_W, \quad (8)$$

kde  $R_{AB}$  je jmenovitý odpor potenciometru,  $D_n$  je nastavená hodnota v 8bitovém formátu a  $R_W$  je minimální odpor potenciometru (odpor jezdce).

Požadovaný odpor se rozděluje v subsystému rozdělení (Obr. 58), primárně se odpor nastavuje na paralelně zapojených potenciometrech z důvodu lepší rozlišitelnosti. Od celkového odporu je třeba odečíst minimální hodnotu jednoduchého potenciometru, kterou disponuje při zadaném požadavku na nulový odpor. Z rozdělení odporu vyplývá hodnota odporu pro paralelní zapojení a hodnota pro samostatný potenciometr zapojený do série, která se rovná proměnné  $R_{ALL}$ , pokud je překročen limit odporu paralelního zapojení, proto je třeba odečíst maximální odpor paralelního zapojení. Pokud je kapacita paralelních potenciometrů dostatečná pro nastavení požadovaného odporu, bude proměnná  $R_{Sp}$  rovna maximálnímu odporu paralelního obvodu, aby se do smyčky nedostala záporná hodnota odporu. Konečným výpočtem požadované hodnoty odporu jednoduchého potenciometru je přičtení jeho minimálního možného odporu.

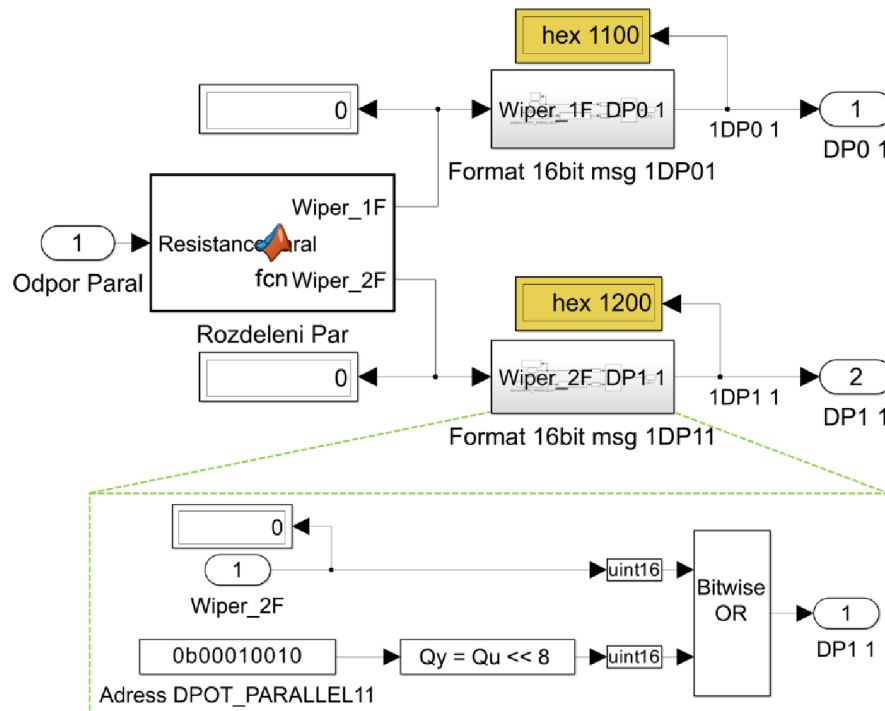


Obr. 58 Subsystém „Lim + rozdel.“

V subsystému paralelního zapojení (Obr. 59) je klíčovou funkcí rozdělení odporu pro jednotlivé potenciometry, které se provádí pomocí modulu s ručně napsaným kódem. V nekonečné smyčce se odpory dvou potenciometrů počítají podle nastavení jezdců, které je na začátku běhu kódu nulové. Následně se vypočítává celkový odpor obou potenciometrů  $R_{Final}$ , pokud nastavení potenciometrů nedosahuje požadované hodnoty, aktuální polohy jezdců se zapíší do proměnných  $WiperOld_1$  a  $WiperOld_2$ . Primárně se zvyšuje hodnota nastavení jezdců prvního potenciometru o jednu, ale nepřekročuje hodnotu 255. Větší rozdíl nastavení jezdců zvyšuje rozlišení. V případě, kdy je rozdíl mezi hodnotami  $R_{Final}$  a  $R_{Final\_Old}$  menší než  $0,1 \Omega$ , je poloha jezdců prvního potenciometru nastavena na aktuální polohu jezdců druhého potenciometru. Následně se nastavení jezdců druhého potenciometru zvedne o jednu úroveň. Tím je možné dosáhnout vyšších hodnot celkového odporu s větším krokem změny odporu než  $0,1$ . Na konci smyčky se hodnota celkového odporu přiřadí proměnné  $R_{Final\_Old}$ . Pokud je poloha jezdců primárního potenciometru v maximální poloze, začne se posunovat jezdec druhého potenciometru. Výpočet celkového odporu se provede znovu s nově stanovenými hodnotami polohy jezdců. Pokud je splněna podmínka, kdy je výsledný odpor  $R_{Final}$  větší nebo roven požadovanému odporu  $ResistanceParal$ , provede se kontrola pro kvantování polohy jezdců. Účelem kontroly je nastavit jezdců potenciometrů tak, aby se výsledný odpor co nejvíce přiblížil požadovanému odporu. Nejvhodnější nastavení jezdců se přiřazují proměnným  $Wiper_1F$  a  $Wiper_2F$ .

Každá hodnota nastavení jezdců potenciometru se převádí na programovací zprávu v subsystému formátování 16bitové zprávy. Bity 0 až 7 obsahují údaje o poloze jezdců potenciometru, zatímco zbývající bity 8 až 15 se využívají k nastavení příkazu pro nastavení

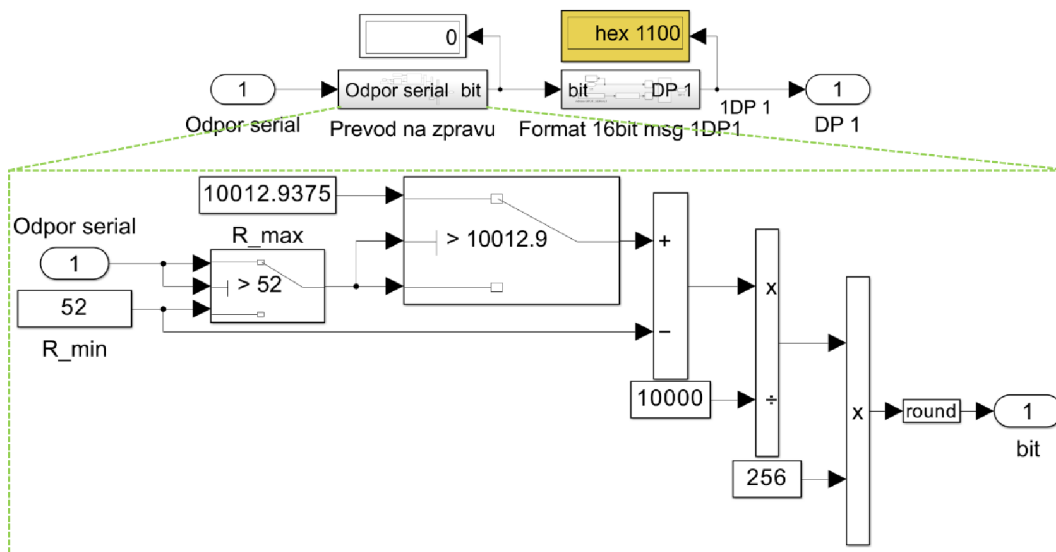
potenciometru. Aby se data načetla, musí být bit číslo 12 logickou jedničkou. Bity 9 a 8 volí potenciometr, do kterého budou data načtena. U dvojitého potenciometru, pokud je bit 9 nastaven na logickou nulu a bit 8 na logickou jedničku, budou data načtena do potenciometru 0, jinak do potenciometru 1. Jestliže jsou oba bity nastaveny na logické jedničky, data se načítají do obou potenciometrů současně. V případě jednoduchého potenciometru se pro načtení dat nastaví bit 8 na logickou jedničku.



Obr. 59 Subsystém „Paralelní zapojení“

Jak již bylo uvedeno, pokud paralelní potenciometry nepokryjí celkový požadovaný odpor, přeneše se zbývající hodnota na jednoduchý potenciometr (Obr. 60). Pro zvýšení rozlišení se paralelní potenciometry již neprogramují, jelikož v odpovídajících danému odporu teplotách není požadován malý krok, tedy krok posunu jezdce je za těchto podmínek téměř  $39 \Omega$ . Formátování programovací zprávy jednoduchého potenciometru je stejné jako u paralelně zapojených potenciometrů.



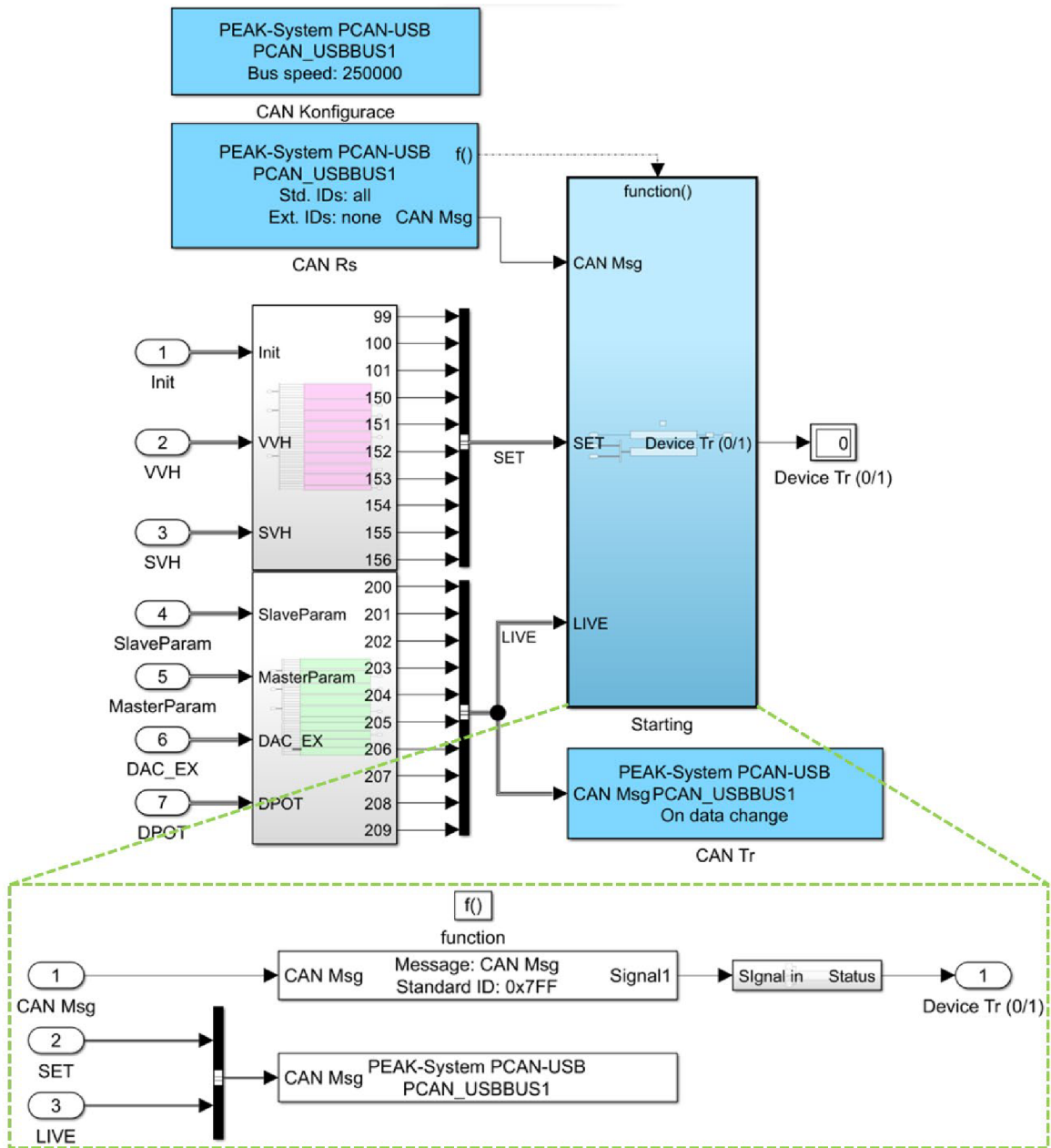


Obr. 60 Subsystem „Serieve zapojeni“

V subsystému **CAN** (Obr. 61) probíhá kombinování zadaných dat pro CAN zprávy a jejich následné vysílání do sběrnice. V modulu **CAN konfigurace** se nastavuje zařízení, které bude komunikačním prostředkem mezi počítačem a generátorem signálu, v tomto modulu se také nastavuje rychlost přenosu dat. Kombinace dat je rozdělena do dvou subsystémů, pro data nastavení **SET** a pro data ovládání výstupních signálů generátoru **LIVE**. V modulech **CAN pack** jsou konkrétním bajtům zpráv přiřazeny proměnné, tyto bajty jsou součástí cele CAN zprávy s určitým identifikačním číslem. Moduly vysílají datové signály, které jsou přenášeny prostřednictvím sběrnic **SET** a **LIVE**. Obě sběrnice jsou spojeny v subsystému **Starting**, jehož funkce probíhají v případě generování libovolných CAN zpráv jinými zařízeními připojenými k lince. Přijaté zprávy se zaznamenávají modulem **CAN Rs**, který generuje spouštěcí funkci a přenáší zaznamenaná data. V subsystému **Starting** je modul **CAN\_Unpack** s nastaveným identifikačním číslem, které odpovídá identifikačnímu číslu zprávy požadavku na inicializační data (0x7FF) vygenerované mikrokontrolérem STM32 I CAN. Pokud je zpráva o požadavku na inicializační data zaznamenána, zobrazí se v bloku **Device Tr** jednička. Modul **CAN Transmit**, umístěný v subsystému **Starting**, generuje CAN zprávy, když jsou libovolné CAN zprávy zaznamenány modulem **CAN Rs**. Modul **CAN Tr**, ke kterému jsou přivedena pouze data **LIVE**, odesílá zprávy, pokud se změnila data alespoň jedné generované CAN zprávy. Tento modul lze také nastavit tak, aby odesílal zprávy pravidelně podle nastavené frekvence, jejíž maximální hodnota je 200 Hz. **LIVE** data se přivádějí i do **Starting** modulu pro případ výpadků napájení mobilního generátoru signálů, aby se načetly poslední nastavené údaje všech zpráv bez nutnosti provádět změny.

V Matlab Simulink je zvolena metoda odesílání CAN zpráv podle malého endiánu, tzn. pokud se odesílá zpráva se dvoubajtovými hodnotami, bude pořadí bajtů obrácené, ale pouze konkrétních hodnot. Příklad daného uspořádání bajtů:

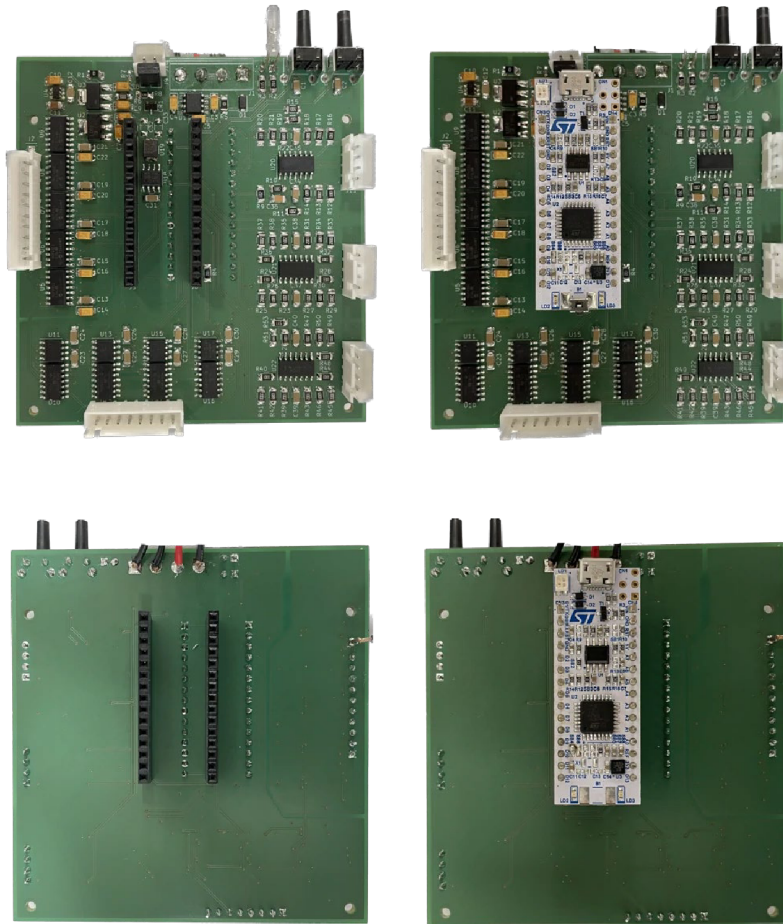
$$0d291 = 0x0123 \rightarrow 23 \ 01.$$



Obr. 61 Subsystem „CAN“

## 9 REALIZACE MOBILNÍHO GENERÁTORU SIGNÁLŮ

Z vytvořeného návrhu se vyrobila DPS (*Obr. 62*), která následně byla ručně osazena zvolenými SMD součástkami (pouzdra rezistorů a kondenzátorů 1206, většina pouzder integrovaných obvodů SOIC). Výška desky se zapojenými mikrokontroléry je 37 mm. Výkres s rozměry desky je součástí přílohy. Rezistor R5 nebyl osazen, pájecí plošiny jsou propojeny rezistorem nulového odporu. Bylo zjištěno, že kondenzátory C32 a C33 blokují přenos dat CAN sběrnici, proto byly odpájeny z DPS.



*Obr. 62* DPS mobilního generátoru signálů

Deska se zapojenými mikrokontroléry je umístěna v hliníkové krabici pro elektronickou instalaci o velikosti 228 x 169 x 56 mm (*Obr. 63*), výstupní kanály jsou vyvedeny pomocí konektorů s vodiči, které jsou připojeny k příslušným banánkům namontovaným na panelu krabice. Pro zprovoznění generátoru signálů je potřeba zapojit napájecí zdroj do banánek a přepnout tlačítko napájení, zelená LED indikuje napájení DPS. V případě potřeby lze každý mikrokontrolér resetovat samostatně pomocí tlačítek na panelu. Komunikační CAN zařízení se připojuje pomocí standardizovaného konektoru RS232, kde je vodič CAN High připojen na pin 7 a vodič CAN Low na pin 2. Generátor disponuje třemi uzemňovacími výstupy. V příloze je fotografie sestavy.





Obr. 63 Mobilní generátor signálů

V následující *Tab. 2* je uvedena výsledná cena mobilního generátoru signálů. Ceny jsou vzhledem k dostupnosti některých komponent pouze orientační. Cenová rozvaha nezohledňuje placený software, ve kterém je vytvořen ovládací program, a CAN vysílač PEAK.

Tab. 2 Cenová rozvaha

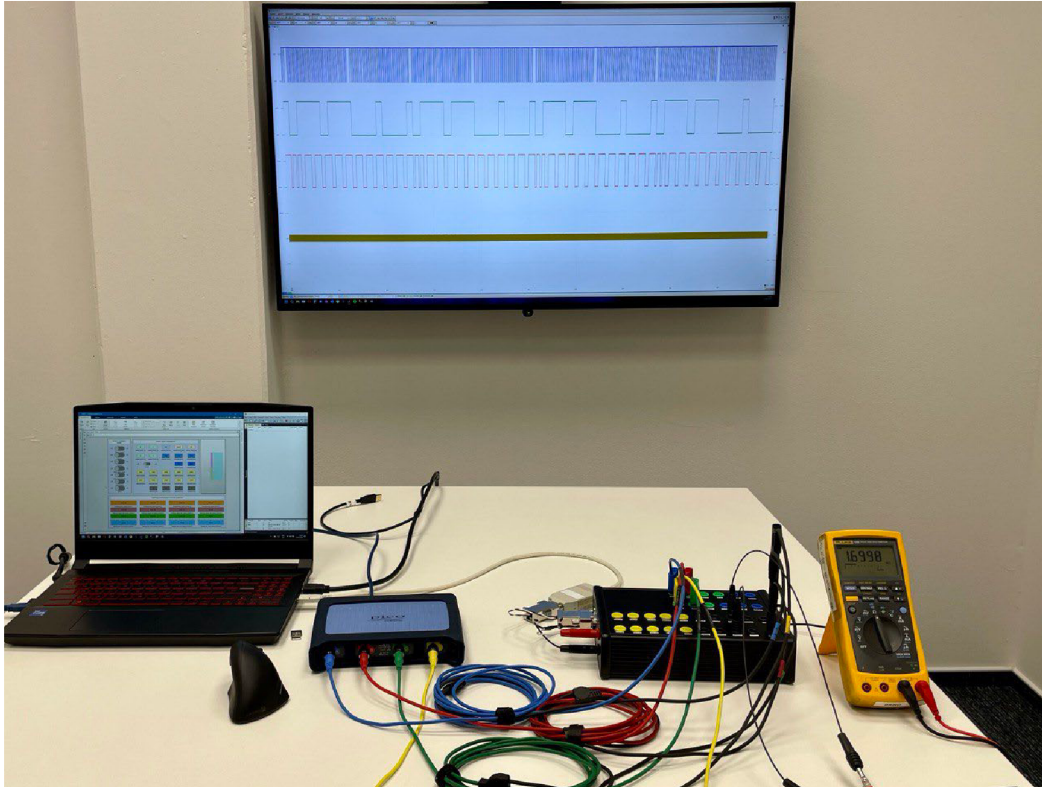
Název zboží	Cena bez DPH [Kč]
Mikrokontroléry	476,-
Výroba DPS	900,-
Integrované obvody	1023,-
Pasivní a polovodičové součástky	520,-
Konektory a banánky	421,-
Montážní krabice	887,-
Celková cena	4227,-

Podobný generátor signálů, který je schopen snímat výstupní signály z řídicí jednotky, vyrábí firma Bosch [44]. Disponuje vlastním ovládacím softwarem a podporuje komunikační protokoly, jako jsou SENT, CAN a LIN. Je mobilní a univerzální pro široké možnosti provedení HIL testování. Cílovými zákazníky jsou vývojáři softwaru řídicích jednotek v oblasti motorsportu. Cena zařízení je kolem 370000,- Kč, proto je pro velké množství vývojářů pořízení daného hardwaru finančně náročné.

## 9.1 MĚŘENÍ SIGNÁLŮ

Ověření navrženého softwaru a hardwaru se provedlo měřením výstupních signálů pomocí osciloskopu PicoScope 4425 (*Obr. 64*). Grafy měření klíčových signálů jsou součástí přílohy. Paralelně s průběhy signálů byly sledovány datové zprávy CAN sběrnice, zdá odpovídají

zadaným hodnotám proměnných. Dekódování CAN zpráv je taktéž součástí přílohy. Signály byly měřeny při maximálním zatížení generátoru signálů: frekvence vysílání CAN zpráv 200 Hz, veškeré výstupní signály aktivní, signál snímače otáček klikové hřídele v rozsahu 500 až 4888  $\text{min}^{-1}$ , statický a dynamický režim všech parametrů ovládání výstupů.



Obr. 64 Měření výstupních signálů

Měřením se odhalila minimální perioda natočení klikové hřídele o jeden stupeň, při které nedochází k nesprávné činnosti kódu běžícího v mikrokontroléru. Jak již bylo vysvětleno v kapitole návrhu softwaru mikrokontroléru STM32 II, minimální hodnota této periody závisí na počtu aktivovaných výstupů, jejichž logická hodnota se přepisuje ve funkci tickeru RPM. Pokud se aktivují všechny tyto výstupy, bude maximální frekvence odpovídat otáčkám klikové hřídele 4888  $\text{min}^{-1}$  ( $t_{KH} = 34 \text{ us}$ ). V případě aktivace pouze signálu otáček klikové hřídele odpovídá maximální frekvence 5555  $\text{min}^{-1}$  ( $t_{KH} = 30 \text{ us}$ ). Jelikož zkoušená funkce ovládání výstupů jednoho portu najednou, PortOut, neakceptovala při návrhu softwaru mikrokontroléru STM32 II změnu periody spínání tickeru, digitální výstupy se přepisují postupně, což zavádí určité posunutí, které je konstantní pro jakoukoli periodu a dosahuje 1 us ( $0,03^\circ$  při  $t_{KH} = 34 \text{ us}$ ). Signál polohy sací vačkové hřídele, který se ve funkci spíná posledním, je tedy posunut o 4 us.

Pomocí měření plného rozsahu odporu multimetrem Fluke 189 bylo zjištěno, že potenciometry vykazují chybu, naměřený odpor byl přibližně o 6,4 % vyšší než požadovaný pro celý pracovní rozsah, což souvisí s přesností potenciometrů, viz dokumentace [36]. Minimální hodnota odporu je 88  $\Omega$ , maximální hodnota dosahuje 15900  $\Omega$ , což u většiny senzorů pokrývá teplotní rozsah přibližně od  $-15$  do  $130 \text{ }^\circ\text{C}$ . Při provádění kalibrace řídicí jednotky je třeba vzít v úvahu nepravidelné kolísání odporu, aby se zajistilo, že jsou v rámci přípustné tolerance konkrétního teplotního čidla.

V *Tab. 3* jsou uvedeny výsledky měření digitálních potenciometrů pro porovnání odporu. Požadovaný odpor je odpor zadaný v ovládacím prostředí, programovací odpor je odpor, na který jsou potenciometry naprogramovány se zohledněním korekce 6,4 %. Korigovaný odpor udává očekávanou hodnotu odporu v souvislosti se zaokrouhlením na kvantizační hladinu. V posledním sloupci je uveden odpor změřený multimetrem.

*Tab. 3* Měření odporu

Požadovaný odpor [ $\Omega$ ]	Programovací odpor [ $\Omega$ ]	Korigovaný odpor [ $\Omega$ ]	Změřený odpor [ $\Omega$ ]
15981,80	15019,4	15978,10	15943,0
9936,29	9355,34	9952,49	9834,0
6065,30	5683,50	6046,24	6000,0
3833,80	3605,70	3835,90	3735,0
2500,29	2351,02	2501,08	2458,0
1677,27	1576,36	1676,98	1663,0
1154,22	1084,78	1154,02	1154,0
812,90	764,06	812,83	820,0
584,64	549,60	584,69	596,0
428,65	402,87	428,59	444,5
319,85	300,66	319,85	331,1
242,55	228,22	242,79	252,3
186,68	175,52	186,73	194,2
145,65	13726	146,02	153,4
115,09	105,57	112,31	117,8
92,00	85,10	90,53	93,8
74,35	78,00	82,98	86,2

Při měření analogových signálů se kontrolovalo rušení, přesnost vzhledem k nastaveným hodnotám a rychlost změny napětí při přepisování proměnných volby kvantizační hladiny. Výsledky měření těchto parametrů jsou uvedeny v příloze. Všechny analogové výstupy dosahují poměrně přesných hodnot napětí. Napětí z integrovaných D/A převodníků závisí na přesnosti rezistorů využitých pro dělič napětí. Maximální hodnota napětí externích D/A převodníku je o jednu kvantizační hladinu nižší než referenční napětí, tedy maximální napětí nepřesahuje 4998,8 V. Tyto signály také vykazují výrazně nižší šum ve srovnání s převodníky integrovanými v mikrokontrolérech. Vzhledem k tomu, že nejvyšší špičky kolísání signálů integrovaných D/A převodníků mají frekvenci v rozmezí 150 až 250 kHz, nelze tento šum považovat za způsobený generovanými signály, protože jeho kolísání probíhá na výrazně vyšších frekvencích. V průběhu měření nebyly pomocí SPI programovány žádné další integrované obvody a mikrokontrolér nekomunikoval s řídicím systémem prostřednictvím CAN sběrnice.

Průběh střídavého napěťového signálu závisí na kapacitě využitého kondenzátoru, amplituda signálu se mění softwarově pomocí proměnného signálu PWM.

Nastavením dynamického režimu, kdy se hodnoty všech proměnných pro řízení výstupních signálů dynamicky mění, byla ověřena schopnost celého generátoru signálů (software

mikrokontroléru, řídicí software a hardware) pracovat podle zadaného cyklu. Za tímto účelem byly v prostředí Matlab Simulink vytvořeny moduly pro generování sinusových funkcí. Z naměřeného signálu je patrné, že generátor signálů je schopen provádět změny signálu při maximálním zatížení.

## 9.2 ZAPOJENÍ DO ŘÍDICÍ JEDNOTKY

K ověření, zda řídicí jednotka signály akceptuje, byla využita otevřená řídicí jednotka Motec s předem připraveným softwarem, který kopíruje software sériové řídicí jednotky motoru VW 1.5 TSI EA211 EVO. Zapojení bylo provedeno prostřednictvím rozváděcího boxu (BOB) (*Obr. 65*). Napěťové signály, které byly připojeny k řídicí jednotce, byly rovněž paralelně sledovány osciloskopem. Ovládaní generátoru signálů probíhalo prostřednictvím softwaru v Matlab Simulink, generované CAN zprávy byly sledovány v aplikaci PCAN – View. Frekvence generování CAN zpráv, a tedy i ovládaní signálu, byla 200 Hz, s touto frekvencí jsou vstupní signály zaznamenávány v reálné řídicí jednotce.

Podstatnými signály pro kontrolu, zda jsou akceptovány řídicí jednotkou, jsou signály otáček klikové hřídele a signály polohy vačkových hřídelí. Proměnné stanovené na jejich základě vstupují do výpočtů nejdůležitějších softwarových subsystémů, jako je například výpočet předstihu zážehu. Dále byly ověřeny signály snímače klepání a snímače teploty.

Během měření se nevyskytly žádné závažné problémy, hodnota otáček klikové hřídele naměřená řídicí jednotkou odpovídala hodnotě zadané na ovládacím panelu až na jednotky otáček, a to jak ve statickém, tak v dynamickém režimu. Při načítání dat prostřednictvím rozhraní SPI v okamžiku, kdy byla spuštěna funkce nastavení hodnoty výstupního signálu, docházelo ke kolísání mezi jednotlivými periodami zubů, protože načítání dat přetěžovalo mikrokontrolér. Možným řešením tohoto problému je využití výkonnějšího mikrokontroléru nebo programování na nižší úrovni s použitím knihovny HAL. Generovaný signál snímače klepání byl zaznamenáván v odpovídající nastavení frekvenci. Měření odporu řídicí jednotkou se provádí pomocí pull-up rezistoru 1 k $\Omega$ , referenční napětí je 5 V. Během měření odporu řídicí jednotkou nedocházelo k žádnému kolísání nebo nebylo zaznamenáno vzhledem k přesnosti měření a je zanedbatelné. Výsledkem měření odporu je napětí, aby se zjistil generovaný odpor, byl proveden přepočít podle následujícího vztahu:

$$R_2 = \frac{V_{out}R_1}{V_{in} - V_{out}}, \quad (9)$$

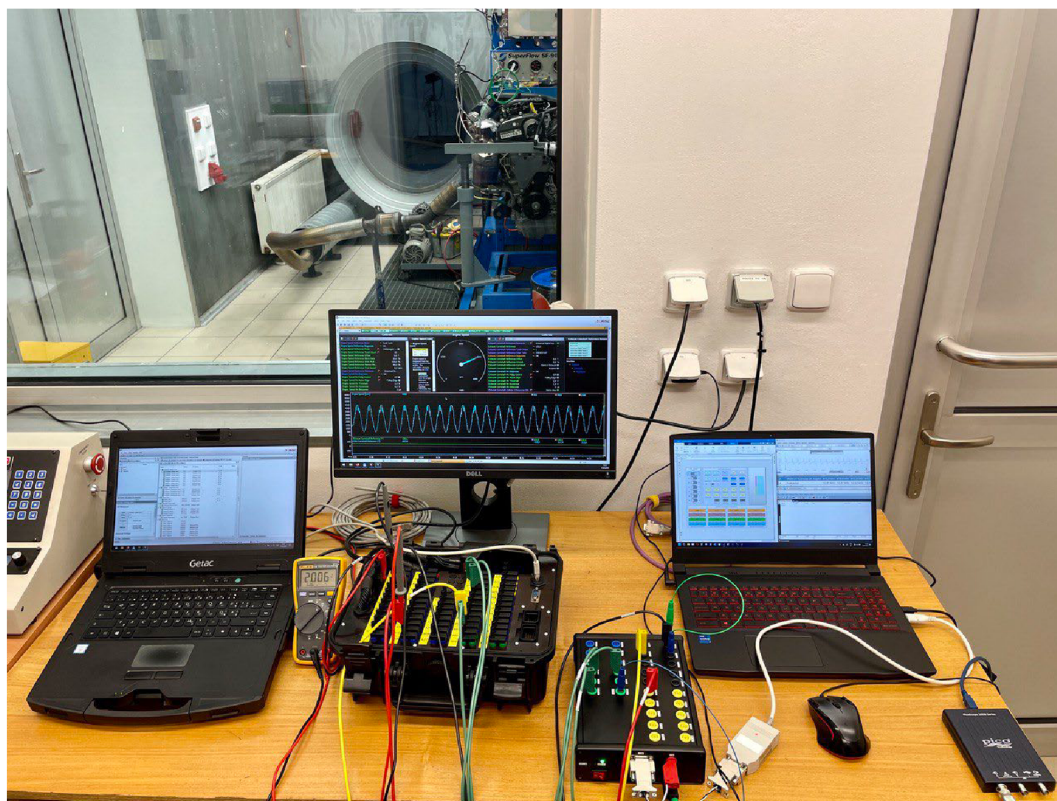
kde  $V_{out}$  je napětí změřené řídicí jednotkou,  $V_{in}$  je referenční napětí a  $R_1$  je odpor pull-up rezistoru. Výsledky přepočtu jsou uvedeny v *Tab. 4*.

*Tab. 4* Změřené napětí

Požadovaný odpor [ $\Omega$ ]	Výstupní napětí děliče [V]	Vypočítaný odpor [ $\Omega$ ]
7727,53	4,411	7489,00
2041,00	3,346	2023,00
186,68	0,799	190,19



Podle výsledku měření lze konstatovat, že nepřesnost změřeného odporu vzhledem k požadovanému odporu není pravidelná. Tuto nepřesnost je třeba zohlednit při simulaci nebo naprogramovat účinnější korekci, protože obvod zpětné vazby nelze připojit k odporovým výstupům.



Obr. 65 Zapojení generátoru signálů do řídicí jednotky

## ZÁVĚR

Tato práce se zabývá vývojem mobilního generátoru signálů pro kalibraci řídicí jednotky spalovacího motoru. Ten je určen k testování softwaru řídicích jednotek různých motorů. V jednotlivých kapitolách byly popsány postupy vývoje hardwaru a softwaru zařízení. Generátor je sestaven z univerzálních elektronických platforem Nucleo s nainstalovaným navrženým softwarem, DPS a ovládacího softwaru. Základní princip činnosti generátoru spočívá v odesílání řídicích CAN zpráv s údaji vztahujícími se k nastaveným hodnotám proměnných, tyto zprávy jsou dekodovány v mikrokontroléru a podle získaných dat je generován požadovaný signál.

V první fázi návrhu se provedla analýza vstupních do řídicí jednotky signálů, na základě které se stanovil seznam snímačů, jejichž generování je nezbytné pro správnou funkci řídicí jednotky. Následně se provedl návrh hardwaru, aby generátor disponoval potřebným počtem výstupů s ohledem na jejich vlastnost a podporoval komunikaci s ovládacím systémem prostřednictvím CAN sběrnice. Dále byl naprogramován software pro dva mikrokontroléry, software jednoho mikrokontroléru je primárně určen k přijímání CAN zpráv a ovládaní druhého mikrokontroléru a integrovaných obvodů pomocí SPI komunikace. Úkolem druhého mikrokontroléru je generovat nejnáročnější z hlediska vytižení signály otáček hřídelí. Pro ovládaní generátoru signálů, tedy generování CAN zpráv, je navržen ovládací software v Matlab Simulink, ve kterém se provádí veškerá nastavení.

Univerzalita generátoru signálů je dosažena možností nastavení téměř libovolných zubových profilů ozubeného věnce, připevněného ke klikové hřídele a ozubených kol, namontovaných na vačkových hřídelích. Ostatní signály jsou samostatně univerzální a jejich přiřazení konkrétním snímačům probíhá nastavením kalibračních křivek v ovládacím softwaru. Snadnost změn nastavení zaručuje model v Matlab Simulink, jež podporuje široké možnosti při programování testovacích scénářů. V statickém režimu se generátor signálů snadno ovládá prostřednictvím ovládacího panelu.

Na základě provedených měření a testů lze generátor signálů považovat za funkční prototyp, který plní zadané úkoly. Přístroj má širší uplatnění pro testování mechatronických systémů než pouze kalibrace řídicích jednotek spalovacích motorů, a to jak v oblasti automobilového průmyslu, tak i v jiných odvětvích. Generátor lze využít jako součást vybavení pro testování mechatronických systémů v uzavřené smyčce HIL.

Přestože práce byla zaměřena na rozbor signálů vstupujících do řídicí jednotky zážehového spalovacího motoru, vzhledem k probíhajícímu projektu na Ústavu automobilního a dopravního inženýrství FSI VUT, v rámci kterého probíhalo reverzní inženýrství softwaru řídicí jednotky motoru VW 1,5 TSI EA211 EVO, lze mobilní generátor signálů využít i pro řídicí jednotky vznětových motorů. Velké množství snímačů je určeno pro oba typy spalovacích motorů.

Po měřeních a testování byla odhalena některá omezení způsobená jak navrženým hardwarem, tak softwarem mikrokontrolérů. Jedním z nejvýznamnějších omezení je limitace frekvence provádění interní funkce Mbed OS, která vede ke snížení simulovaných otáček klikové hřídele. V DPS by bylo vhodné zvážit možnost hardwarové rekonfigurace některých obvodů pro rozšíření možností generovaných signálů.

Všechny body zadání byly splněny.

## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] DIETSCHE, Karl-Heinz a Konrad REIF. *Automotive handbook*. 11th edition, revised and extended. Karlsruhe: Robert Bosch, 2022, 2048 stran: ilustrace. ISBN 978-1-119-91190-6.
- [2] *Automotive Mechatronics*. 2015. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. ISBN 3658039744. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-658-03975-2
- [3] REIF, Konrad. *Gasoline engine management: systems and components*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015, ix, 354 stran: ilustrace. ISBN 978-3-658-03963-9.
- [4] JAN, Zdeněk, Bronislav ŽDÁNSKÝ, Jindřich KUBÁT a Jiří ČUPERA. *Automobily. (5), Elektrotechnika motorových vozidel I*. Přpracované 4. vydání. Brno: Avid, spol. s r.o, 2018, 273 stran : ilustrace (převážně barevné). ISBN 978-80-87143-38-4.
- [5] ŠTĚRBA, Pavel. *Elektronika a elektrotechnika motorových vozidel: seřizování, diagnostika závad a chybové kódy OBD*. Brno: CPRESS, 2013, 191 s. : il. ISBN 978-80-264-0271-8.
- [6] SENT - Single Edge Nibble Transmission for Automotive Applications SAE J2716. SAE int., 2016, doi:10.4271/J2716\_201604
- [7] VLK, František. *Elektronické systémy motorových vozidel. Díl I*. Brno: František Vlk, 2002, 298 s. : il. ISBN 80-238-7282-6.
- [8] *NTC Thermistors: Standardized R/T characteristics*. TDK Group Company, 2018. Dostupné také z: <https://www.tdk-electronics.tdk.com/download/531152/71487ad65dd78f1844cf52efcee5836d/pdf-rt.pdf>
- [9] Calculating Temperature from Resistance. *North star sensors* [online]. Oceanside (California): North star sensors [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.northstarsensors.com/calculating-temperature-from-resistance>
- [10] *Temperature Sensor NTC M12-H*. Berlin, 2023. Dostupné také z: [https://www.bosch-motorsport.com/content/downloads/Raceparts/Resources/pdf/Data%20Sheet\\_70115595\\_Temperature\\_Sensor\\_NTC\\_M12-H.pdf](https://www.bosch-motorsport.com/content/downloads/Raceparts/Resources/pdf/Data%20Sheet_70115595_Temperature_Sensor_NTC_M12-H.pdf)
- [11] Sensors for industrial and off-highway applications. *Bosch* [online]. 2019 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.bosch-ibusiness.com/products/sensors/>
- [12] Hardware-in-the-Loop Testing. *DSPACE* [online]. Paderborn [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.dspace.com/en/pub/home/applicationfields/foo/hil-testing.cfm>
- [13] KUČERA, Pavel. *Autonomní mechatronický systém pro uzavírání diferenciálů vozidel = Autonomous mechatronic system for differential locking of vehicles: zkrácená verze habilitační práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, nakladatelství VUTIUM, 2019, 32 stran : ilustrace ; 25 cm. ISBN 978-80-214-5777-5.
- [14] CompactRIO Systems. *NATIONAL INSTRUMENTS* [online]. 2023 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.ni.com/cs-cz/shop/compactrio.html>

- [15] SCALEXIO Customized System. *DSPACE* [online]. Paderborn [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: [https://www.dspace.com/en/pub/home/products/hw/simulator\\_hardware/scalexio/scalexio\\_customized.cfm#176\\_55645](https://www.dspace.com/en/pub/home/products/hw/simulator_hardware/scalexio/scalexio_customized.cfm#176_55645)
- [16] The Controller Area Network (CAN) in automotive testing. *Goepel electronic* [online]. Jena [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.goepel.com/en/automotive-test-solutions/hardware/bus-interfaces/can>
- [17] *NI myRIO-1900: user guide and specifications*. 2018. Dostupné také z: <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/myrio-1900-getting-started/resource/376047d.pdf>
- [18] NUCLEO-F303K8. *Mbed* [online]. Arm Limited [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://os.mbed.com/platforms/ST-Nucleo-F303K8/>
- [19] NUCLEO-F303K8: STM32 Nucleo-32 development board with STM32F303K8 MCU, supports Arduino nano connectivity. *ST* [online]. STMicroelectronics, 2023 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.st.com/en/evaluation-tools/nucleo-f303k8.html>
- [20] Arduino Nano. *Arduino* [online]. Arduino, 2023 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://store.arduino.cc/products/arduino-nano>
- [21] STM32CubeIDE: Integrated Development Environment for STM32. *ST* [online]. STMicroelectronics, 2023 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeide.html>
- [22] An introduction to Arm Mbed OS 6. *Mbed* [online]. Arm Limited, 2023 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://os.mbed.com/docs/mbed-os/v6.16/introduction/index.html>
- [23] PCAN-USB: CAN Interface for USB. *PEAK* [online]. PEAK-System Technik, 2023 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.peak-system.com/PCAN-USB.199.0.html?&L=1>
- [24] SIMetrix: SIMetrix Simulator. *SIMetrix* [online]. SIMetrix Technologies, 2023 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.simetrix.co.uk/products/simetrix.html>
- [25] *Microelectronic Circuits*. 6th ed. New York: Oxford University Press, 2010. ISBN 978-0199931507.
- [26] *Operační zesilovače v elektronice*. Praha: BEN -technická literatura, 1996. ISBN 80-901-9843-0.
- [27] *SINGLE-BIT DUAL-SUPPLY BUS TRANSCEIVER WITH CONFIGURABLE VOLTAGE TRANSLATION AND 3-STATE OUTPUTS*. Dallas (Texas), 2020. Dostupné také z: [https://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74lvc1t45-ep.pdf?ts=1682631120962&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74lvc1t45-ep.pdf?ts=1682631120962&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F)



- [28] *CD405xB CMOS Single 8-Channel Analog Multiplexer or Demultiplexer With Logic-Level Conversion*. Dallas (Texas), 2023. Dostupné také z:  
[https://www.ti.com/lit/ds/symlink/cd4051b.pdf?ts=1684517308802&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FCD4051B%253Futm\\_source%253Dgoogle%2526utm\\_medium%253Dcpc%2526utm\\_campaign%253Dasc-int-null-prodfolderdynamic-cpc-pf-google-wwwe\\_int%2526utm\\_content%253Dprodfolddynamic%2526ds\\_k%253DDYNAMIC%2BSEARCH%2BAD%2526DCM%253Dyes%2526gclid%253DCj0KCQjw3a2iBhCFARIsAD4jQB1aEovHRT-MhDW\\_yBbwZ1nO4UZWASpRL\\_dt1MVTwjS4-uM99l4wOM0aAvJfEALw\\_wcB%2526gclidsrc%253Daw.ds](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/cd4051b.pdf?ts=1684517308802&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FCD4051B%253Futm_source%253Dgoogle%2526utm_medium%253Dcpc%2526utm_campaign%253Dasc-int-null-prodfolderdynamic-cpc-pf-google-wwwe_int%2526utm_content%253Dprodfolddynamic%2526ds_k%253DDYNAMIC%2BSEARCH%2BAD%2526DCM%253Dyes%2526gclid%253DCj0KCQjw3a2iBhCFARIsAD4jQB1aEovHRT-MhDW_yBbwZ1nO4UZWASpRL_dt1MVTwjS4-uM99l4wOM0aAvJfEALw_wcB%2526gclidsrc%253Daw.ds)
- [29] *KiCad* [online]. [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.kicad.org/about/contact-us/>
- [30] *1N5819: Low drop power Schottky rectifier*. 2011. Dostupné také z:  
<https://www.st.com/en/diodes-and-rectifiers/1n5819.html#documentation>
- [31] *ICL7660A: Super Voltage Converters*. Tokyo, 2020. Dostupné také z:  
<https://www.renesas.com/us/en/document/dst/icl7660s-icl7660a-datasheet>
- [32] *LD1117: Adjustable and fixed low drop positive voltage regulator*. 2013. Dostupné také z: <https://www.st.com/en/power-management/ld1117.html>
- [33] *MCP1501: High-Precision Buffered Voltage Reference*. 2022. Dostupné také z:  
<https://4donline.ih.com/images/VipMasterIC/IC/MCHP/MCHP-S-A0013078544/MCHP-S-A0014754752-1.pdf?hkey=6D3A4C79FDBF58556ACFDE234799DDF0>
- [34] *LTspice. Analog devices* [online]. Analog Devices, 2023 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>
- [35] *MCP4902/4912/4922: 8/10/12-Bit Dual Voltage Output Digital-to-Analog Converter with SPI Interface*. 2010. Dostupné také z:  
<https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/OTH/ProductDocuments/DataSheets/22250A.pdf>
- [36] *MCP41XXX/42XXX: Single/Dual Digital Potentiometer with SPI™ Interface*. 2003. Dostupné také z:  
<https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/OTH/ProductDocuments/DataSheets/11195c.pdf>
- [37] *MCP2551: High-Speed CAN Transceiver*. 2016. Dostupné také z:  
<https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/APID/ProductDocuments/DataSheets/20001667G.pdf>
- [38] *Data and signal line chokes*. 2019. Dostupné také z:  
<https://www.farnell.com/datasheets/2873033.pdf>
- [39] *PESDICAN: CAN bus ESD protection diode*. 2008. Dostupné také z:  
<https://4donline.ih.com/images/VipMasterIC/IC/NEXP/NEXP-S-A0005722386/NEXP-S-A0005722386-1.pdf?hkey=6D3A4C79FDBF58556ACFDE234799DDF0>

- [40] *LMx24, LMx24x, LMx24xx, LM2902, LM2902x, LM2902xx, LM2902xxx: Quadruple Operational Amplifiers*. 2023. Dostupné také z:  
[https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2902b.pdf?ts=1684519079021&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FLM2902B](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2902b.pdf?ts=1684519079021&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FLM2902B)
- [41] STM32Cube initialization code generator. *ST* [online]. STMicroelectronics, 20223 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubemx.html>
- [42] Arm Mbed Studio. *Mbed* [online]. Arm Limited, 20223 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://os.mbed.com/docs/mbed-studio/current/introduction/index.html>
- [43] Full API list. *Mbed* [online]. Arm Limited, 20223 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://os.mbed.com/docs/mbed-os/v6.16/apis/index.html>
- [44] MLC Test System. *Bosch* [online]. Robert Bosch, 2022 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.bosch-motorsport.com/products-and-services/product-highlights/ulc-test-system/>
- [45] *Metodika návrhu plošných spojů*. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-010-2193-9.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

$\Theta_{JA}$	[°C/W]	Tepelný odpor přechodu okolí
$0/5$	[-]	Logická hodnota spínacího signálu
$1/0$	[-]	logická hodnota
$A/D$		Analogově digitální převodník
$A_{25}$	[Ω]	Odpor NTC termistoru při 25 °C
$Ang_{VH}$	[°]	Úhly inicializace zubových profilů vačkových hřídelí
$API$		Application Programming Interface
$B$	[-]	Teplotní konstanta
$BOB$		Brake Out Box
$CAN$		Controller Area Network – komunikační sběrnice
$CS$		Chip select pin
$D/A$		Digitálně analogový převodník
$DAC$		Digital-to-Analog Converter
$DIGIPOT$		Digital Potenciometr
$DPS$		Deska Plošných Spojů
$ECU$		Electronic Control Unit
$EGR$		Exhaust Gas Recirculation
$f$	[Hz]	Frekvence PWM signálu
$FPGA$		Field Programmable Gate Array
$HAL$		Hardware Abstraction Layer
$HIL$		Hardware In The Loop testování
$I$	[A]	Elektrický proud
$I2C$		Inter-Integrated Circuit
$ID$	[-]	Identifikační číslo
$IDE$		Integrated Development Environment
$LED$		Light-Emitting Diode
$LIN$		Local Interconnect Network
$MISO$		Master-In Slave-Out pin
$MOSI$		Master-Out Slave-In pin
$n$	[min <sup>-1</sup> ]	Otáčky klikové hřídele
$NTC$		Negative Temperature Coefficient – termistor
$n_z$	[-]	Počet zubů věnce klikové hřídele

<i>Offset</i>	[°]	Posunutí vačkových hřídelí
<i>P</i>	[W]	Elektrický výkon
<i>PN</i>		rozhraní polovodiče typu P a polovodiče typu N
<i>PTC</i>		Positive Temperature Coefficient – termistor
<i>PWM</i>		Pulse Width Modulation
<i>P<sub>z_DIOmax</sub></i>	[W]	Maximální ztrátový výkon diody
<i>R</i>	[Ω]	Elektrický odpor
<i>R</i>	[Ω]	Odpor
<i>RTOS</i>		Real-Time Operating System
<i>SAE</i>		Society of Automotive Engineers
<i>SCLK</i>		Slave Clock pin
<i>SENT</i>		Single Edge Nibble Transmission
<i>SMD</i>		Surface Mount Device
<i>SOIC</i>		Small Outline Integrated Circuit
<i>SPI</i>		Serial Peripheral Interface
<i>SRAM</i>		Static Random Access Memory
<i>střídaKH</i>	[°]	Střída zubu signálu otáček klikové hřídele
<i>střídaPWM</i>	[%]	Střída signálu PWM
<i>T</i>	[K]	Teplota
<i>T</i>	[°C]	Teplota
<i>T<sub>A</sub></i>	[K]	Teplota okolí
<i>T<sub>J</sub></i>	[K]	Maximální teplotou přechodu
<i>t<sub>KH</sub></i>	[us]	Perioda otáčení klikové hřídele o jeden stupeň
<i>t<sub>KN</sub></i>	[us]	Perioda PWM signálu
<i>TSI</i>		Twincharged Stratified Injection
<i>U</i>	[V]	Elektrické napětí
<i>U<sub>BE</sub></i>	[V]	Napětí procházející emitorem a bází
<i>U<sub>EX</sub></i>	[mV]	Napětí externího D/A převodníku
<i>U<sub>M</sub></i>	[mV]	Napětí integrovaného D/A převodníku STM32 I
<i>U<sub>S</sub></i>	[mV]	Napětí integrovaného D/A převodníku STM32 II
<i>USB</i>		Universal Serial Bus
<i>V<sub>in</sub></i>	[V]	Vstupní napětí
<i>V<sub>out</sub></i>	[V]	Výstupní napětí

## SEZNAM PŘÍLOH

<b>Příloha I</b>	Tabulka popisu výstupů použitých ve schématech
<b>Příloha II</b>	Tabulka popisu výstupů generátoru signálů
<b>Příloha III</b>	Tabulka dekodování CAN zpráv
<b>Příloha IV</b>	Graf průběhu signálů při konstantní hodnotě otáček $745 \text{ min}^{-1}$ Graf průběhu signálů při konstantní hodnotě otáček $4888 \text{ min}^{-1}$
<b>Příloha V</b>	Graf průběhu signálů při změně hodnoty otáček frekvencí 200 Hz. Rozsah $500 \text{ až } 4500 \text{ min}^{-1}$ Graf průběhu signálů při konstantní hodnotě otáček $4888 \text{ min}^{-1}$ , frekvence PWM 24 kHz, střída 98 %
<b>Příloha VI</b>	Graf průběhu analogových signálů při změně hodnot ovládacích parametrů frekvencí 200 Hz Graf průběhu analogových signálů při konstantních hodnotách
<b>Příloha VII</b>	Deska plošných spojů a její rozměry (návrh)
<b>Příloha VIII</b>	Montáž mobilního generátoru signálů
<b>Příloha A</b>	Software mobilního generátoru signálů Archivovaná složka jednotlivých souborů <b><u>software uC.zip</u></b> : <b><u>STM32 I master.txt</u></b> <b><u>STM32 II slave (indukční snímač otáček).txt</u></b> <b><u>STM32 II slave (snímač klepání).txt</u></b> <b><u>Ovladaci system.slx</u></b>
<b>Příloha B</b>	Elektrická schémata DPS <b><u>Elektrická schémata.pdf</u></b>



Tabulka popisu výstupů použitých ve schématech

Název dle schémat	Typ signálu	Účel signálu	Deska Nucleo	Pin
SPI1_MISO	Digitální	SPI komunikace	STM I/SPI MASTER	PB_4/D12
SPI1_MISO	Digitální		STM II/SPI SLAVE	PB_4/D12
SPI1_MOSI	Digitální		STM I/SPI MASTER	PA_7/A6
SPI1_MOSI	Digitální		STM II/SPI SLAVE	PA_7/A6
SPI1_SCLK	Digitální		STM I/SPI MASTER	PB_3/D13
SPI1_SCLK	Digitální		STM II/SPI SLAVE	PB_3/D13
SPI1_SSEL	Digitální		STM I/SPI MASTER	PB_5/D11
SPI1_SSEL	Digitální		STM II/SPI SLAVE	PA_4/A3
CS_DAC1	Digitální	CS D/A převodníku	STM I/SPI MASTER	PA_8/D9
CS_DAC2	Digitální		STM I/SPI MASTER	PF_1/D8
CS_DAC3	Digitální		STM I/SPI MASTER	PB_1/D6
CS_DAC4	Digitální		STM I/SPI MASTER	PB_6/D5
CS_DAC5	Digitální		STM I/SPI MASTER	PA_10/D0
CS_DPOT1	Digitální	CS digitálního potenciometru	STM I/SPI MASTER	PB_7/D4
CS_DPOT2	Digitální		STM I/SPI MASTER	PA_3/A2
CS_DPOT3	Digitální		STM I/SPI MASTER	PA_1/A1
CS_DPOT4	Digitální		STM I/SPI MASTER	PA_0/A0
D2_SVH1	Digitální	Signál polohy sací vačkové hřídele 1	STM II/SPI SLAVE	PA_12/D2
D3_VVH1	Digitální	Signál polohy výfukové vačkové hřídele 1	STM II/SPI SLAVE	PB_0/D3
D4_KH_IND	Digitální	Signál indukčního snímače otáček klikové hřídele	STM II/SPI SLAVE	PB_7/D4
D5_KH_HALL	Digitální	Signál hallova snímače otáček klikové hřídele	STM II/SPI SLAVE	PB_6/D5
D10_SVH2	Digitální	Signál polohy sací vačkové hřídele 2	STM II/SPI SLAVE	PA_11/D10
D11_VVH2	Digitální	Signál polohy výfukové vačkové hřídele 2	STM II/SPI SLAVE	PB_5/D11
0-3.3	Digitální	Spínací signál	STM I/SPI MASTER	PA_2/A7
DACS_1	Analogový	Integrovaný D/A převodník	STM II/SPI SLAVE	PA_5/A4
DACS_2	Analogový		STM II/SPI SLAVE	PA_4/A3
DACM_1	Analogový		STM I/SPI MASTER	PA_6/A5
DACM_2	Analogový		STM I/SPI MASTER	PA_5/A4
DACM_3	Analogový		STM I/SPI MASTER	PA_4/A3
CAN_TD	Digitální		CAN komunikace	STM I/SPI MASTER
CAN_RD	Digitální	STM I/SPI MASTER		PA_11/D10
3V3	-	Napájení 3,3 V	STM I/SPI MASTER	3V3

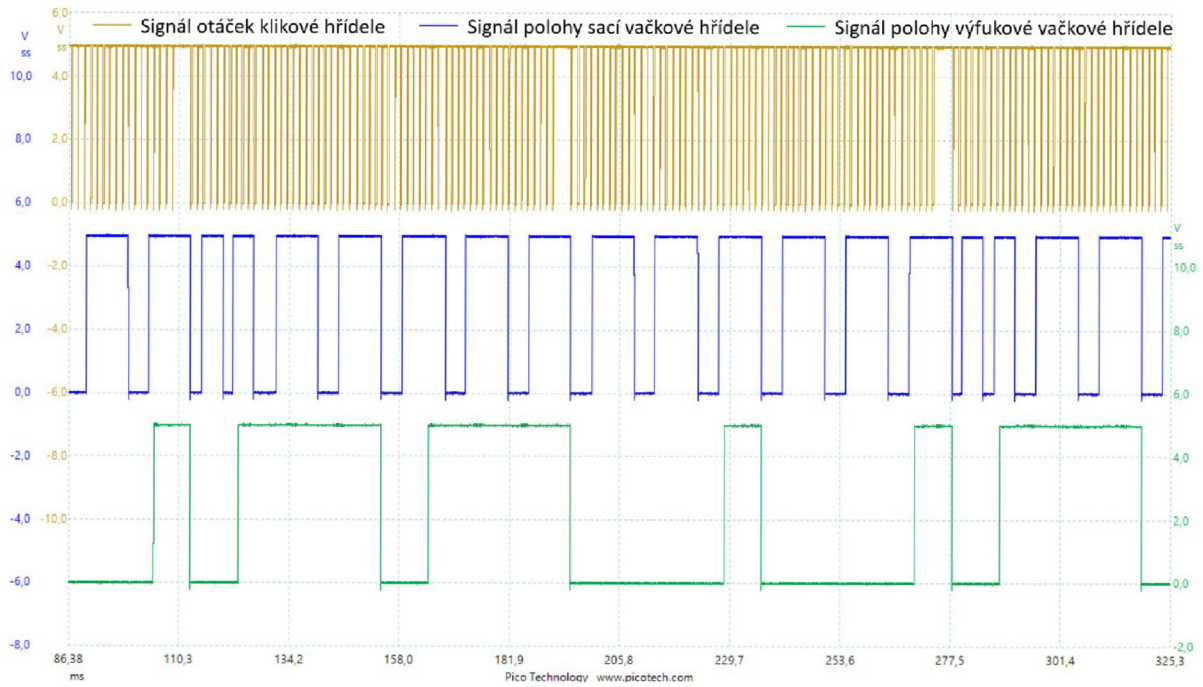
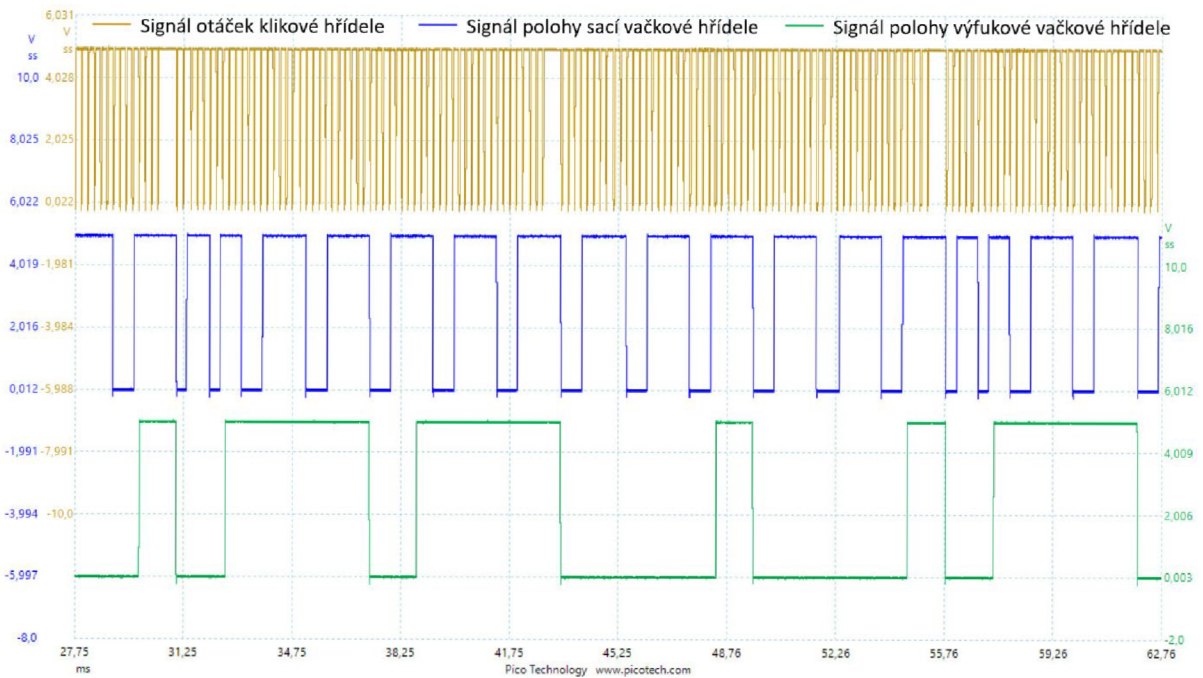
Tabulka popisu výstupů generátoru signálů

Název	Typ	Rozsah	
• KH_HALL	Snímač otáček klikové hřídele (Hallův efekt)	0/5 V	
• KH_IND/ KNOCK	Snímač otáček klikové hřídele (indukční)/ Snímač klepání	-8 – 8 V	
• SVH1	Snímač polohy sací vačkové hřídele 1	0/5 V	
• VVH1	Snímač polohy výfukové vačkové hřídele 1	0/5 V	
• SVH2	Snímač polohy sací vačkové hřídele 2	0/5 V	
• VVH2	Snímač polohy výfukové vačkové hřídele 2	0/5 V	
• 0-5	Spínací digitální signál	0/5 V	
• DACM1	D/A převodník 1 mikrokontroléru STM32 I	0 – 5 V	
• DACM2	D/A převodník 2 mikrokontroléru STM32 I	0 – 5 V	
• DACM3	D/A převodník 3 mikrokontroléru STM32 I	0 – 1 V	
• DACS1	D/A převodník 1 mikrokontroléru STM32 II	0 – 5 V	
• DACS2	D/A převodník 2 mikrokontroléru STM32 II	0 – 5 V	
• DAC1A	Externí D/A převodník 1 A	0 – 5 V	
• DAC1B	Externí D/A převodník 1 B		
• DAC2A	Externí D/A převodník 2 A		
• DAC2B	Externí D/A převodník 2 B		
• DAC3A	Externí D/A převodník 3 A		
• DAC3B	Externí D/A převodník 3 B		
• DAC4A	Externí D/A převodník 4 A		
• DAC4B	Externí D/A převodník 4 B		
• DAC5A	Externí D/A převodník 5 A		
• DAC5B	Externí D/A převodník 5 B		
• POT1/1	Modul digitálních potenciometrů 1	90 – 15800 Ω	
• POT1/2			
• POT2/1	Modul digitálních potenciometrů 2		
• POT2/2			
• POT3/1	Modul digitálních potenciometrů 3		
• POT3/2			
• POT4/1	Modul digitálních potenciometrů 4		
• POT4/2			
• 9 V	Napájení		9 – 10 V
• GNDD	Zem		-
CAN	CAN komunikace		250 kbit·s <sup>-1</sup>
RST_M	Resetovací tlačítko mikrokontroléru STM32 I		-
RST_S	Resetovací tlačítko mikrokontroléru STM32 II		

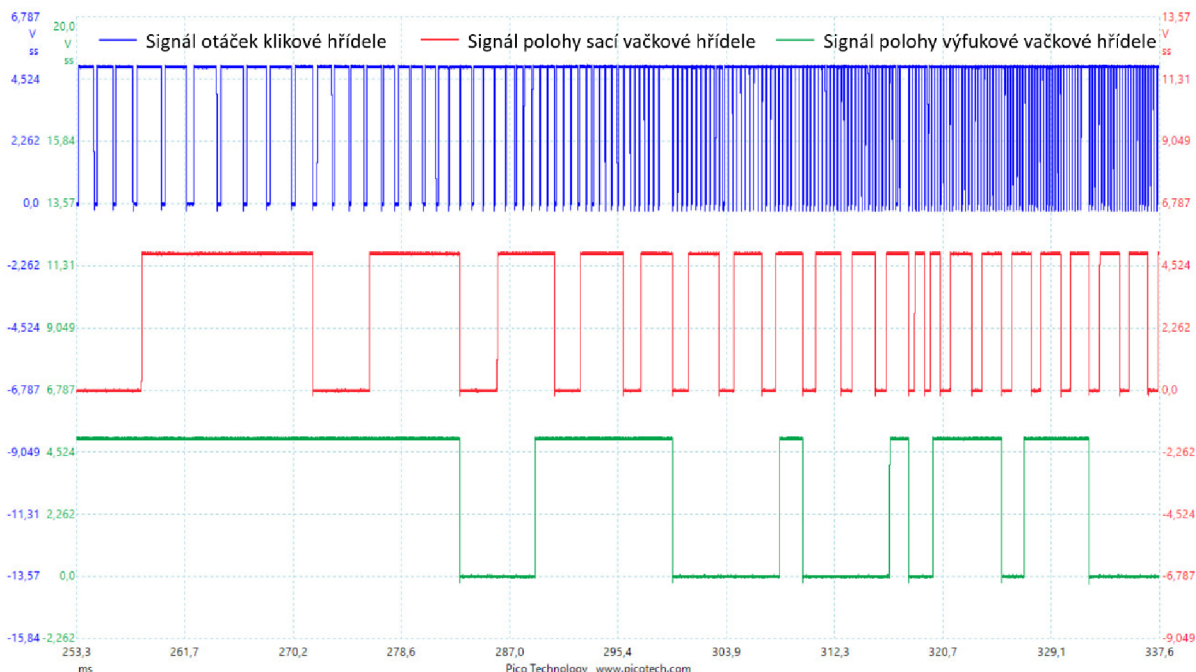


CAN ID (decimal)	CAN ID (hex)	Počet bajtů	0	1	2	3	4	5	6	7	Název zprávy
99	0x63	6	ON/OFF	PocetZubuKH	PocetVynech	Strida	PocetZubuVVH	PocetZubuSVH			ON/OFF
100 - 149	0x64 - 0x95	8	Zub_zp2	Zub_zp1	Mezera_zp2	Mezera_zp1	Zub_zp2	Zub_zp1	Mezera_zp2	Mezera_zp1	VVHi-j
100 - 149	0x64 - 0x95	4	Zub_zp2	Zub_zp1	Mezera_zp2	Mezera_zp1					VVHi-j
150 - 199	0x96 - 0xC7	8	Zub_zp2	Zub_zp1	Mezera_zp2	Mezera_zp1	Zub_zp2	Zub_zp1	Mezera_zp2	Mezera_zp1	SVHi-j
150 - 199	0x96 - 0xC7	4	Zub_zp2	Zub_zp1	Mezera_zp2	Mezera_zp1					SVHi-j
200	0xC8	8	SetVVH1_zp2	SetVVH1_zp1	SetSVH1_zp2	SetSVH1_zp1	SetVVH2_zp2	SetVVH2_zp1	SetSVH2_zp2	SetSVH2_zp1	SetVH
201	0xC9	8	DACS_1_zp2	DACS_1_zp1	DACS_2_zp2	DACS_2_zp1	FreqKH_zp2	FreqKH_zp1	KnockFreq	KnockDuty	DACS_RPM_Knock
202	0xCA	8	0-5	0	DACM_1_zp2	DACM_1_zp1	DACM_2_zp2	DACM_2_zp1	DACM_3_zp2	DACM_3_zp1	0-5_DACM
203	0xCB	8	DACA_1_zp2	DACA_1_zp1	DACB_1_zp2	DACB_1_zp1	DACA_2_zp2	DACA_2_zp1	DACB_2_zp2	DACB_2_zp1	DAC1-2
204	0xCC	8	DACA_3_zp2	DACA_3_zp1	DACB_3_zp2	DACB_3_zp1	DACA_4_zp2	DACA_4_zp1	DACB_4_zp2	DACB_4_zp1	DAC3-4
205	0xCD	4	DACA_5_zp2	DACA_5_zp1	DACB_5_zp2	DACB_5_zp1					DAC5
206	0xCE	6	1DPO_1_zp2	1DPO_1_zp1	1DP1_1_zp2	1DP1_1_zp1	1DP1_zp2	1DP1_zp1			DP_1
207	0xCF	6	2DPO_1_zp2	2DPO_1_zp1	2DP1_1_zp2	2DP1_1_zp1	2DP1_zp2	2DP1_zp1			DP_2
208	0xD0	6	3DPO_1_zp2	3DPO_1_zp1	3DP1_1_zp2	3DP1_1_zp1	3DP1_zp2	3DP1_zp1			DP_3
209	0xD1	6	4DPO_1_zp2	4DPO_1_zp1	4DP1_1_zp2	4DP1_1_zp1	4DP1_zp2	4DP1_zp1			DP_4
2047	0x7FF	4	11	0	0	0					požadavek inicializačních dat

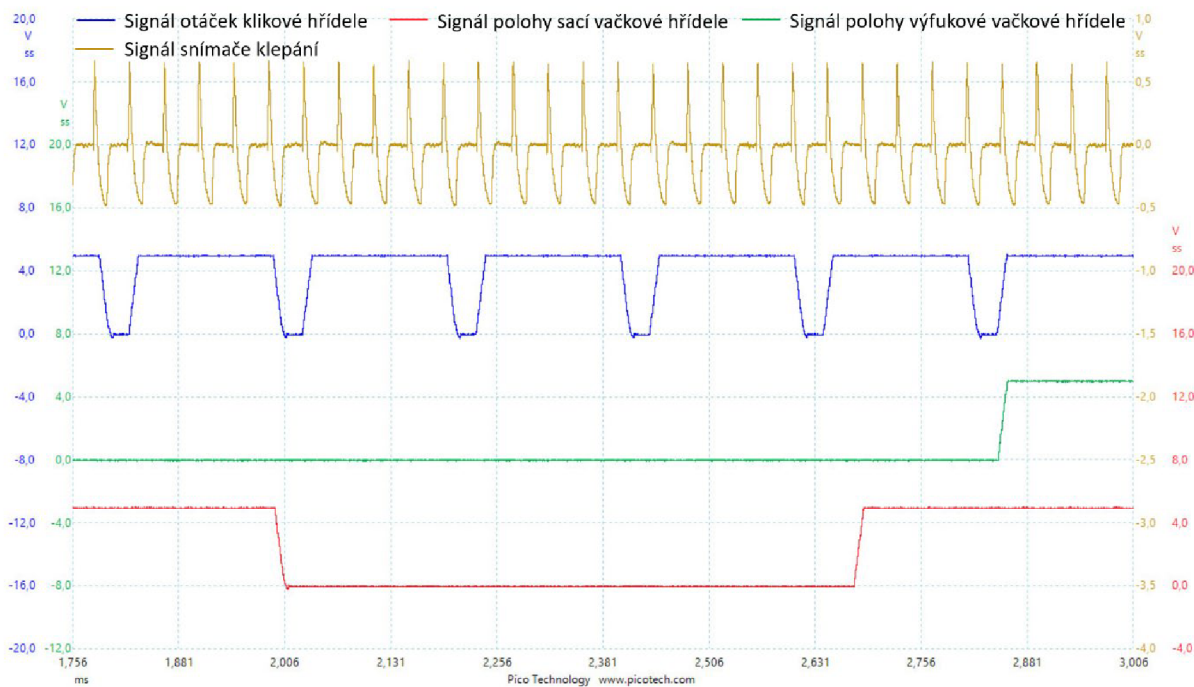
KH	Kliková hřídel	ON/OFF	Aktivace výstupů STM32 II	Zub_zp1	Úhlova hodnota umístění zubu [°] - bit 8 až 15
VVH	Výfuková vačková hřídel	PocetZubuKH	Počet zubů KH	Zub_zp2	Úhlova hodnota umístění zubu [°] - bit 0 až 7
SVH	Sací vačková hřídel	PocetVynech	Počet vynechaných zubů KH	Mezera_zp1	Úhlova hodnota umístění mezery [°] - bit 8 až 15
DACS	Integrovaný D/A převodník STM32 II	Strida	Střída signálu otáček KH [°]	Mezera_zp2	Úhlova hodnota umístění mezery [°] - bit 0 až 7
DACM	Integrovaný D/A převodník STM32 I	PocetZubuVVH	Počet zubů VVH	SetVVH1_zp1	Posunutí VVH 1 [°] - bit 8 až 15
DACA	Externí D/A převodník - Kanál A	PocetZubuSVH	Počet zubů SVH	SetVVH1_zp2	Posunutí VVH 1 [°] - bit 0 až 7
DACB	Externí D/A převodník - Kanál B	SetSVH1_zp1	Posunutí SVH 1 [°] - bit 8 až 15	KnockFreq	Perioda PWM [us] - Snímač Klepání
DP	Digitální potenciometr	SetSVH1_zp2	Posunutí SVH 1 [°] - bit 0 až 7	KnockDuty	Střída PWM [%] - Snímač Klepání
	n - číslo skupiny	DACS_1_zp1	Napětí DACS 1 [mV] - bit 8 až 15	0-5	Logická 1/0
nDPO_1	Dvojitý DP - potenciometr 1	DACS_1_zp2	Napětí DACS 1 [mV] - bit 0 až 7	DACA_1_zp1	DACA 1 - bit 8 až 15
nDP1_1	Dvojitý DP - potenciometr 2	FreqKH_zp1	Otáčky KH [us] - bit 8 až 15	DACA_1_zp2	DACA 1 - bit 0 až 7
nDP1_1	Jednoduchý DP	FreqKH_zp2	Otáčky KH [us] - bit 0 až 7	1DPO_1_zp1	DP 1 - bit 8 až 15
				1DPO_1_zp2	DP 1 - bit 0 až 7

Graf průběhu signálů při konstantní hodnotě otáček  $745 \text{ min}^{-1}$ :

 Graf průběhu signálů při konstantní hodnotě otáček  $4888 \text{ min}^{-1}$ :


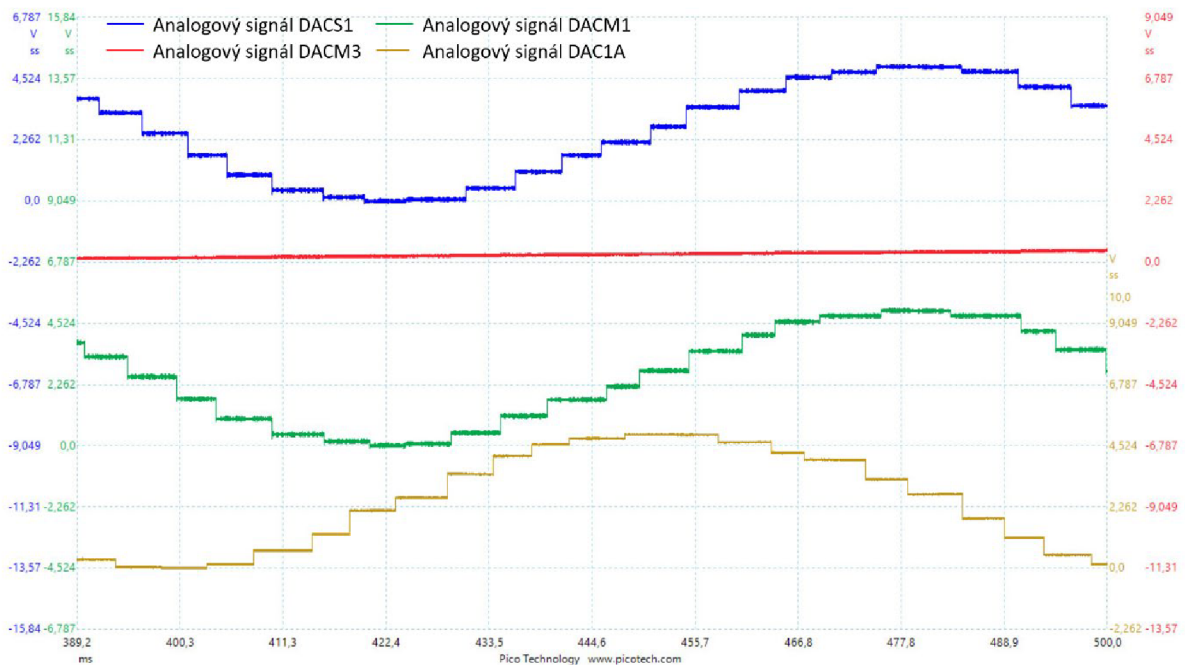
Graf průběhu signálů při změně hodnoty otáček frekvencí 200 Hz. Rozsah 500 až 4500 min<sup>-1</sup>:



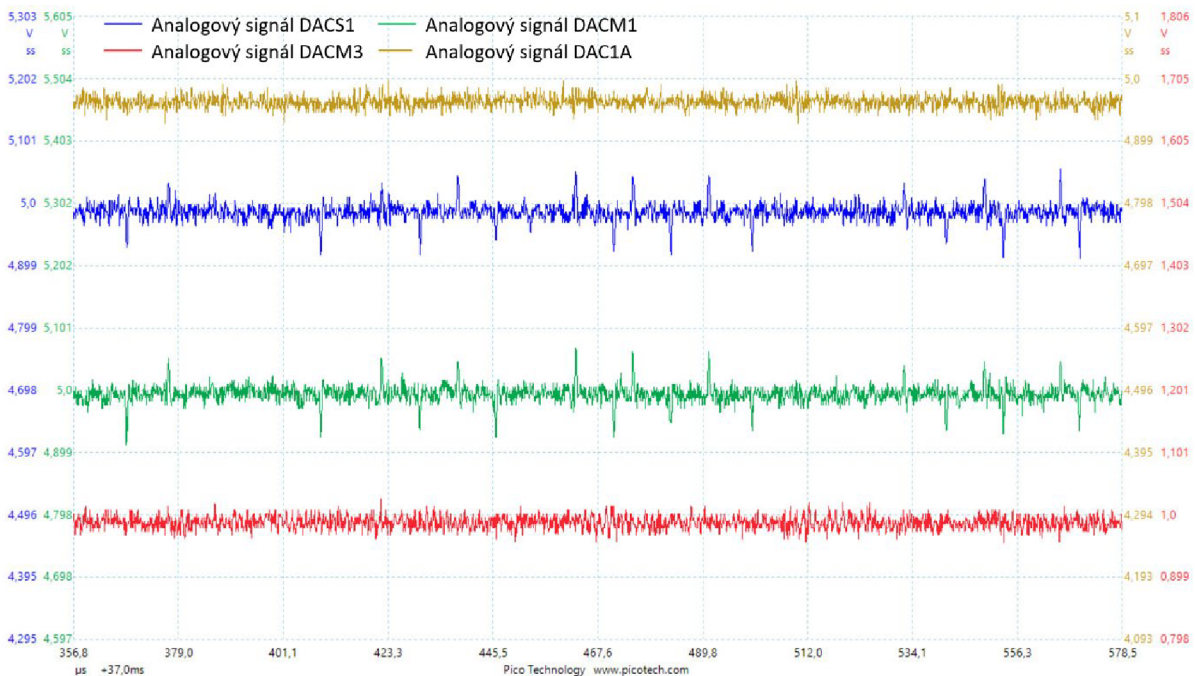
Graf průběhu signálů při konstantní hodnotě otáček 4888 min<sup>-1</sup>, frekvence PWM 24 kHz, střída 98 %:



Graf průběhu analogových signálů při změně hodnot frekvencí 200 Hz:

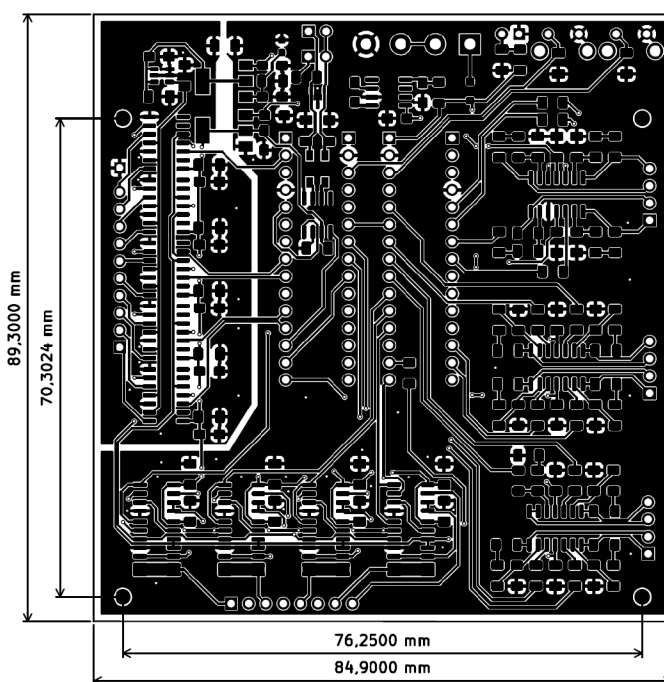
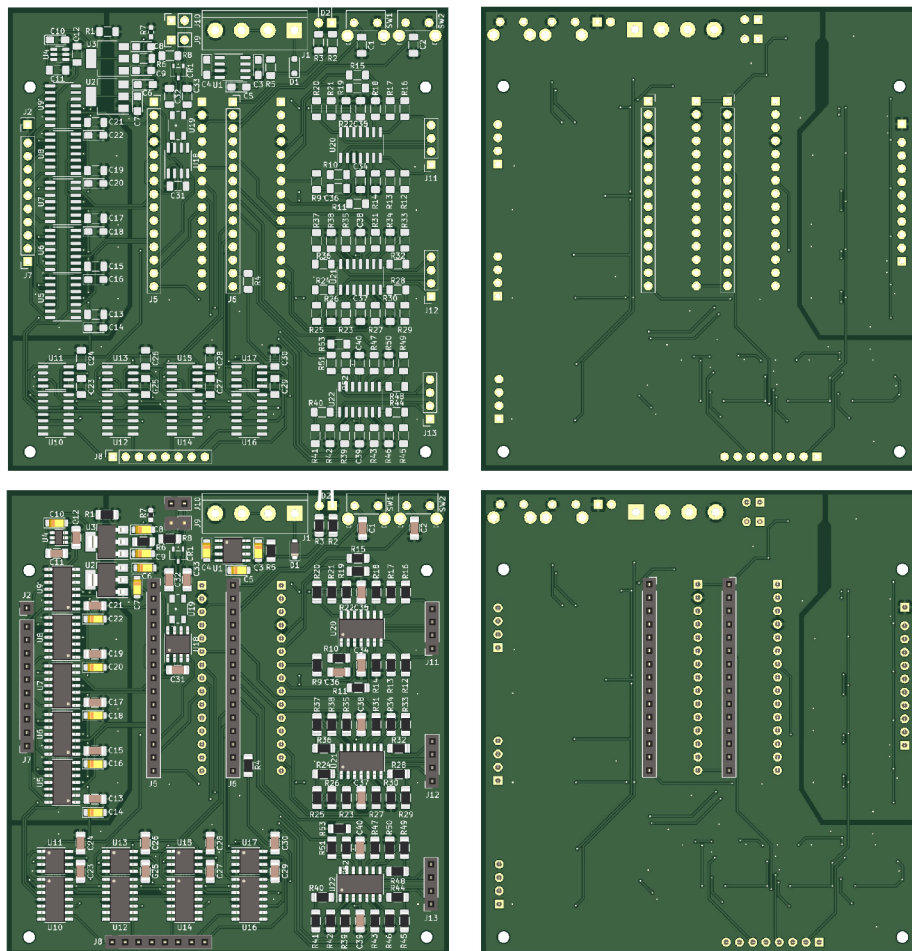


Graf průběhu analogových signálů při konstantních hodnotách:





Deska plošných spojů a její rozměry (návrh):



Montáž mobilního generátoru signálů:

